

**UNIVERSITA DEGLI STUDI DI ROMA
TOR VERGATA**

Facoltà di Lettere e Filosofia

Corso di laurea in Filosofia

Tesi di laurea in Storia del pensiero scientifico

Introduzione storica e filosofica ai concetti e alla metodologia della misura

Relatore: Prof. Barbara Continenza

Correlatore: Prof. Giovanni Iorio Giannoli

Studente: Paolo Agnoli

Anno Accademico 2002-2003

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	6
1.1 Che cosa significa misurare?.....	14
1.2 Prime riflessioni.....	19
2. DALLE ORIGINI AL SISTEMA METRICO.....	27
2.1 Gli inizi: il numero come misura.....	29
2.2 I Greci, i Romani e le prime unificazioni premetriche.....	37
2.3 Medioevo e Rinascimento: l'importanza della quantificazione della realtà.....	42
2.4 Il Seicento e l'osservazione accurata.....	45
2.5 Il Settecento, la nascita del sistema metrico decimale e la "globalizzazione delle misure".....	50
2.6 L'Ottocento, il Novecento e la normalizzazione delle comunicazioni.....	67
2.7 Un case study: il sistema metrico e gli Stati Uniti.....	78
3. LE LEGGI DELLA FISICA.....	86
3.1 Dimensioni di una grandezza.....	92
3.2 Un approfondimento: il tempo.....	93
4. SISTEMI DI UNITA' DI MISURA.....	109
4.1 Enti normativi.....	114
4.2 Definizioni delle unità di misura.....	115
4.3 SI. Grandezze derivate.....	119
4.4 Prefissi.....	121
4.5 SI. Regole di scrittura.....	122
4.6 Unità non SI.....	122
4.7 Sistemi cgs.....	124
4.8 Costanti fisiche e sistemi di unità di misura.....	125
5. CARATTERISTICHE DEGLI STRUMENTI DI MISURA.....	132
5.1 Osservazioni su alcune caratteristiche degli strumenti.....	133
6. ERRORI DI MISURA. LA MISURAZIONE DELLA MISURAZIONE.....	135
6.1 L'incertezza e la meccanica quantistica.....	139
6.2 Le cause di errore.....	143
6.3 Documentazione del lavoro sperimentale.....	146
6.4 Un esempio istruttivo.....	147
6.5 Media e deviazione standard.....	148
6.6 Errori casuali.....	151
6.7 Misure non ripetibili.....	151
6.8 Errori massimi su funzioni di grandezze. La propagazione degli errori.....	152
6.9 Errore relativo ed errore percentuale.....	153
6.10 Digressione sul numero di cifre significative. Esempio dell'errore massimo.....	153
6.11 Errori statistici su funzioni di grandezze.....	153
7. UNO SGARDO ALLA "COMBINAZIONE DELLE OSSERVAZIONI".....	155
7.1 Le origini.....	155
7.2 La probabilità.....	158
7.3 Il gioco delle tre scatole.....	159
7.4 Distribuzioni di probabilità.....	160
7.5 La distribuzione di Gauss, o "legge normale degli errori".....	161
8. INVITO AD APPROFONDIMENTI.....	164
8.1 Principio della massima verosimiglianza e principio dei minimi quadrati.....	164
8.2 Eliminazione di dati.....	165
8.3 Bontà dell'approssimazione.....	166
9. NUOVI SVILUPPI.....	168

9.1 Critica della teoria degli errori casuali.....	168
9.2 Il concetto di probabilità soggettiva.....	171
9.3 Il teorema di Bayes. Considerazioni epistemologiche.....	176
9.4 Possibili campi di applicazione della formula di Bayes.....	185
9.5 Nuova impostazione nel determinare l'incertezza di misura.....	191
9.6 Conclusioni.....	196
BIBLIOGRAFIA.....	199
WEBIBLIOGRAFIA.....	211

La grande importanza attribuita alla precisa quantificazione della realtà avvenuta a seguito della rivoluzione copernicana (vedi par. 2.3 e par. 2.4), e la relativa collocazione dell'attività di misurazione tra i successi più rilevanti dell'umanità, sono rilevabili nella incisione (1561) che porta il titolo di *Temperanza*, realizzata su un disegno (1560) di Pieter Bruegel il Vecchio e pubblicata da Jerome Cock (Londra, British Museum; il disegno originale è conservato al museo Boymans-Van Beuningen di Rotterdam). L'incisione viene generalmente attribuita a Philippe Galle, artista contemporaneo del maestro fiammingo.



Fanno corona alla figura della Temperanza, una delle sette virtù, diversi episodi in costume contemporaneo. Gli Europei ¹, protagonisti del progresso di tutta l'umanità, sono impegnati nell'esercizio delle loro arti, tutte attività culturali socialmente utili (il riferimento è innanzi tutto alle sette Arti Liberali ², Aritmetica, Musica, Retorica, Astronomia, Geometria, Dialettica e Grammatica, ma anche a tutte le attività la cui pratica efficiente implica la benefica azione della misura). E tutti guardano alla realtà come aggregato di unità uniformi: leghe, miglia, gradi, fiorini, lettere, ore, minuti, note musicali, ecc....

La parte in alto a destra mostra alcune misurazioni tipiche. Grazie a un compasso a punte fisse, un geometra verifica le dimensioni di una colonna, mentre rimane seduto su un supporto fortunosamente appeso in cima alla colonna stessa. Sopra di lui, un architetto verifica minuziosamente la pendenza del pilastro utilizzando un filo a piombo. La separazione angolare di oggetti lontani è misurata da un altro uomo, che utilizza come strumento di osservazione una sorta di bastone munito di una ruota – un'allusione ai calcoli trigonometrici delle lunghezze. Dietro quest'ultimo, un pittore misura gli angoli di un quadro posto ai suoi piedi. Sull'altro lato della colonna, cannoni e balestre sembrano suggerire la necessità di misurare le traiettorie. In alto al centro si fa allusione alle misurazioni cosmiche. Sulla destra un geografo usa un compasso per

¹ Queste considerazioni sono basate sulle interpretazioni del disegno argomentate e storicamente documentate in Brown, 1975; Crosby, 1997; Klein, 1963; Klein H.A., Klein M.C., 1968; Klein 1988; Vallese, a cura di, 1979; Van Bastelaer, 1908

² Le Sette Arti, tradizionalmente, rappresentano la via attraverso la quale l'individuo si avvia a un'esistenza più evoluta, disciplinata e civile

misurare le distanze sulla Terra; sopra ancora, in una posizione che sembra coincidere con il Polo Nord, un astronomo addirittura sottopone a determinazioni quantitative i cieli.

Tutte queste attività metrologiche, che si basano sulle conoscenze matematiche e scientifiche più avanzate del tempo, sono contrapposte alle interminabili discussioni dei cinque personaggi posti in primo piano: sono dei teologi¹ immersi nelle loro polemiche. Qui Bruegel si permette un po' di satira: mentre i teologi discutono, la Bibbia rimane chiusa e ignorata su un leggio lì accanto. Il sentimento è simile a quello dell'*Elogio della follia* di Erasmo, dove il filosofo mette alla berlina i teologi che discutono continuamente su minuzie senza trovare un momento libero per leggere il Vangelo o le Epistole di San Paolo. Tutto ciò sembra esprimere affinità con le idee "libertine" o "spiritualiste" del tempo di Bruegel, secondo le quali la vera religiosità non consiste nella rigidità confessionale o nelle sottili disquisizioni teologiche, ma nello studio individuale della parola divina espressa dalle Sacre Scritture e da una pratica di vita conforme.

Sotto i teologi, in basso a destra, lo spazio è occupato da un professore di grammatica e dai suoi studenti. La parte a sinistra, sempre in basso, è dedicata ad una serie di calcoli: un mercante conta il proprio denaro, un contabile è occupato in operazioni amministrative e qualcuno è intento a segnare numeri sulla cassa di un liuto. Sopra di loro è presente un coro accompagnato da musicisti che suonano numerosi strumenti (tra cui organo, trombone e cornetta). Nell'angolo sinistro in alto, anche un riferimento al teatro contemporaneo: presumibilmente è rappresentata una commedia con attori che si avvalgono dell'arte della retorica.

Al centro dell'incisione si erge la personificazione della Temperanza stessa, raffigurata appunto come la regina delle arti basate sulle misurazioni. Cinque simboli significativi rivelano ciò che essa rappresentava per Bruegel. Sulla sua testa si trova, e certo non a caso, la macchina più evoluta e sofisticata dell'epoca tra quante misurassero la quantità: l'orologio, capace di scandire il trascorrere del tempo, che passa velocemente e deve quindi essere messo a profitto al meglio ("Chi sta attento all'orologio, considera il tempo in tutte le sue azioni", recita un commento dell'epoca). Sotto i suoi piedi è collocata la pala di un mulino a vento, un esempio dell'abilità dell'uomo di imbrigliare le forze della natura. La mano sinistra racchiude un paio di occhiali, che costituivano un supporto tanto utile, per interpretare chiaramente la realtà, quanto di recente invenzione per l'epoca. La mano destra stringe delle redini il cui morso è stretto nella bocca, a rappresentare fermezza e autocontrollo. Al posto della cintura un serpente arrotolato, che probabilmente allude alla capacità di dominare i puri desideri fisici e gli impulsi primitivi.

La Temperanza di Bruegel non è quindi un simbolo della vita ascetica o ritirata. Rappresenta, invece, l'opposto dell'indolenza, dell'ignoranza riluttante, dell'inettitudine e della mancanza di iniziativa. Significa un assieme di elevate e difficili virtù morali (autocontrollo, distacco critico, disciplina, controllo degli istinti e delle facoltà naturali e loro conversione in forze ordinate e soggette alla ragione). Si erge sicura di sé e competente, circondata dalle testimonianze delle arti tradizionali e delle tecnologie più recenti, che si intersecano e interagiscono nelle diverse, decisive attività di misurazione.

Il motto latino stampato sotto l'incisione recita:

Dobbiamo considerare attentamente di non cedere a futili pensieri, allo spreco o a una vita dissoluta, ma anche a non vivere in modo sordido e nell'ignoranza, a causa dell'avidità.

¹ Secondo molti studiosi i cinque personaggi rappresentano le cinque confessioni religiose del tempo: a destra, il prete cattolico in veste lunga e zucchetto; alla sua sinistra, un barbuto rabbino ebraico; di fronte, tre figure che corrispondono alle tre diverse confessioni riformate

1. INTRODUZIONE

Weights and Measures may be ranked among the necessities of life to every individual of human society. They enter into the economical arrangements and daily concerns of every family. They are necessary to every occupation of human industry; to the distribution and security of every species of property; to every transaction of trade and commerce; to the labors of the husbandman; to the ingenuity of the artificer; to the studies of the philosopher; to the researches of the antiquarian; to the navigation of the mariner; and the marches of the soldier; to all the exchanges of peace, and all the operations of war. The knowledge of them, as in established use, is among the first elements of education, and is often learned by those who learn nothing else, not even to read and write. This knowledge is riveted in the memory by the habitual application of it to the employments of men throughout life.

John Quincy Adams, *Report to the Congress*, 1821

Le misure sono contemporaneamente una delle pratiche più antiche dell'umanità e una delle sue conquiste più sofisticate. L'obiettivo di questo lavoro è quello di introdurre il significato, riassumendo a grandi linee il processo storico che ha portato alla formazione dei concetti e delle consuetudini metrologiche attuali e discutendo criticamente questi risultati.

Scopo della metrologia è definire un sistema di unità, realizzare tali unità in campioni di riferimento, esplorare nuove tecniche e nuovi approcci (anche per quanto riguarda la rappresentazione formale dei risultati) e valutarne l'affidabilità. La metrologia sottende dunque ai progressi della ricerca di base, alla comunicazione e agli scambi scientifici internazionali e presenta naturalmente quell'articolazione tra aspetti teorici, sperimentali e sociali dell'attività scientifica che la storia e la filosofia della scienza riconoscono oggi come una delle loro principali problematiche.

Le misure sono del resto fondamentali non solo in ambito scientifico ma in ogni settore tecnico (sarebbe praticamente impossibile costruire senza misurare), in tutti gli scambi quotidiani, nei processi produttivi di qualsiasi tipo (in particolare nell'industria e nell'agricoltura), nelle questioni medico-sanitarie, nello sport, nei problemi di natura giuridica, finanziaria e commerciale. Misurare è un atto sociale di primaria importanza: dipendiamo dalle misurazioni e usiamo gli strumenti di misura quando facciamo la spesa al mercato, compriamo servizi da strutture private o pubbliche, guidiamo la macchina, ecc.... Di fatto, tutti gli aspetti della nostra vita coinvolgono delle attività di misurazione ¹.

La metodologia della misura come la intendiamo attualmente è stata sviluppata in un periodo relativamente recente, ma metodi primitivi di misurazione sono stati da tempi molto antichi alla base della capacità dell'uomo di interagire e soprattutto di incidere sul mondo circostante. Si può dire che da sempre la misura è stato uno dei procedimenti della vita quotidiana necessari alla sopravvivenza e alle relazioni sociali. L'utilizzo delle provviste, il raccolto, la caccia, il baratto, l'individuazione del suolo da coltivare ecc..., sono tutte attività in cui emerge la necessità di misurare.

Se si volesse ricercare una spiegazione unificante del progresso tecnologico e scientifico che le diverse collettività umane hanno realizzato nel corso della storia, tale spiegazione, presumibilmente, andrebbe proprio individuata nel perseguimento, da parte dell'uomo inteso in senso sociale, dell'espansione della propria capacità di incidere su quanto lo circonda, più che in una disinteressata curiosità individuale. Ciò non significa, come vedremo, privilegiare esclusivamente fattori economici o sociologici; ma, per fare un esempio, che cosa altro è la costruzione di imbarcazioni, dagli antichi tipi di canoe alle navette spaziali, se non la ricerca della soluzione al problema di estendere la mobilità dell'uomo verso un dominio diverso dal suo per appropriarsi di beni altrimenti irraggiungibili?

¹ L'importanza di quest'ultime nell'agire di tutti i giorni è tra l'altro testimoniata dall'esistenza di professioni (geometri, topografi, analisti clinici, ecc...) il cui unico obiettivo è quello di effettuare misurazioni

Non è affatto raro, anche ai nostri giorni, imbattersi in quello che è soltanto un pregiudizio ben radicato: la scienza è pura e neutrale, la tecnica è buona o cattiva secondo l'uso che se ne fa. Come afferma spesso nei suoi scritti il filosofo Umberto Galimberti, la tecnica non è l'applicazione della scienza: la scienza non inaugura se stessa per contemplare il mondo, la scienza inaugura se stessa per trasformare il mondo e quindi l'intenzione tecnica è già nello sguardo scientifico. La scienza si compone di *fare* (intervenire) almeno tanto quanto di *sapere* (rappresentare) ¹.

Sin dagli albori gli uomini hanno dovuto affrontare problemi pratici, a cominciare dal più importante di tutti: rimanere vivi. Gli organismi viventi, nella loro grande diversità, sono soluzioni differenti al problema della sopravvivenza in un ambiente che cambia. Uno dei più pressanti problemi che gli uomini hanno affrontato è stato quello di utilizzare al meglio la modesta potenza fisica loro disponibile. E' per questo obiettivo che sono state realizzate alcune tra le più ingegnose invenzioni della storia, dai primi utensili alle più avanzate reti di telecomunicazione. E sappiamo adesso che le prime invenzioni apparvero molto prima di quanto finora si fosse ritenuto. La recente scoperta in Kenya di numerose pietre scheggiate vecchie di 2,3 milioni di anni, attesta che il livello di complessità mentale della progettazione tecnologica (e non più semplicemente dell'uso istintivo di oggetti) era già stato acquisito molto prima che facesse la sua comparsa *Homo habilis*, ovvero circa 1,9 milioni di anni fa ².

Oggi molte ricerche indicano che la mente è una struttura funzionale, ovvero un insieme di funzioni organizzate per certi scopi (un sistema, potremmo dire, che innanzi tutto costruisce e organizza rappresentazioni della realtà) ³. Essa è sorta grazie all'esperienza. L'uomo sopravvive sviluppando la mente, ovvero solo grazie alla sua azione che da subito diventa ideativa e progettuale: la tecnica è l'essenza dell'uomo. Il fisico George B. Dyson così sottolinea:

Siamo fratelli e sorelle delle nostre macchine. Menti e utensili si sono affinati tra loro sin dal momento in cui la pietra di un cavernicolo abituato a rovistare tra gli scarti si rompe in maniera netta, consegnando così il primo bordo tagliente nelle mani di un cacciatore. La scaglia di ossidiana e il chip di silicio sono colpiti dalla luce dello stesso fuoco da bivacco che si è tramandato di mano in mano sin dai primordi della mente umana. (Dyson, 1997, trad. it. 12)

Certo è che, come afferma il filosofo Alexander Koyrè, le origini della tecnica si perdono nella notte dei tempi:

E' d'altronde possibile che la tecnica, per parlare propriamente, non abbia origini come non ne ha il linguaggio: l'uomo ha sempre posseduto utensili, così come ha sempre posseduto il linguaggio. Egli sembra anche essere stato sempre capace di fabbricarne. E' appunto per questo che alla definizione dell'uomo attraverso la parola si è potuta opporre quella attraverso il lavoro; l'uomo, in quanto uomo, sarebbe essenzialmente *faber*, fabbricatore di cose, fabbricatore di utensili. Così né la preistoria, né l'etnografia ci permettono di assistere alla nascita dell'utensile, ma solamente di seguirlo nella sua evoluzione e nei suoi perfezionamenti. (Koyrè, 1961 A, trad. it. 62)

E' anche vero che la tecnologia a volte crea problemi più grossi di quelli che risolve. Un libro dello storico Edward Tenner ⁴ presenta una lista di soluzioni con effetti secondari disastrosi e progetti andati completamente storti. Ma anche Tenner sarebbe d'accordo con il fisico e divulgatore scientifico Alan Cromer quando questi afferma:

è la produzione di utensili, piuttosto che il bipedismo, a distinguere gli esseri umani dagli animali[...]Un'attività così complessa come la manifattura di utensili, che deve essere tramandata di generazione in generazione, richiede come condizione preliminare lo sviluppo di una caratteristica distintiva dell'uomo ancora più fondamentale: la cultura. (Cromer, 1993, trad. it. 67)

Come sappiamo ogni cultura è caratterizzata da un insieme di "conoscenze" che permette agli individui di una data comunità d'interpretare gli avvenimenti nei quali sono coinvolti. Ma cosa si

¹ Galimberti, 1999

² Vedi Mohen, 1994

³ Vedi per esempio Calorio, Imbasciati, 1999

⁴ Tenner, 1996

deve intendere qui, in prima istanza, per *cultura*? La comune premessa alla creazione di un sistema di “spiegazioni” di ciò che accade nel mondo é stata sempre quella di *interagire con il mondo circostante e conservare e gestire le informazioni considerate pertinenti allo scopo prefissato*. E quando gli uomini furono capaci di inventare le prime tecniche di misurazione l’abilità nella acquisizione e gestione di queste informazioni subì una cesura intellettuale assolutamente fondamentale (forse paragonabile, nella storia dell’evoluzione della vita sul nostro pianeta, alla comparsa, quando ancora le specie animali erano solo negli oceani, della capacità di “vedere” ciò che è distante). Queste tecniche permettono, in ultima analisi, di *codificare* informazioni sulle proprietà del mondo (codifiche senza le quali spesso non sono possibili analisi e pensiero razionali) ed i relativi sviluppi sono stati alla base del progresso della tecnica e della scienza, iniziando da quella attività sociale che in un certo senso potremmo già definire, con uno storico delle prime civiltà apparse su questo pianeta, “scienza primitiva”:

In questo contesto il termine “scienza” designa una forma particolare di attività sociale che, attraverso l’osservazione, la raccolta, l’analisi, l’organizzazione di fatti empirici[...]produce risultati che si rivelano utili ed efficaci nell’interazione fra uomo ed ambiente e che rappresentano la più avanzata generalizzazione delle comuni attività umane. Questi risultati portano all’elaborazione di un sistema di conoscenze definite da una serie di termini, proposizioni, teorie[...]regole nelle quali si esprime e si conserva il sapere accumulato nelle epoche passate[...]I risultati dell’attività scientifica servono a mantenere e a sviluppare la produzione e la riproduzione di un bene, sia esso di natura materiale o immateriale e possono inoltre diventare strumenti di potere.(Reineke, 1994, trad. it. 57)

La metodologia della misura, oltre ad un’ovvia importanza pratica, presenta quindi implicazioni concettualmente fondamentali nei processi conoscitivi. Come sottolinea lo storico della metrologia Witold Kula ¹, il processo attraverso il quale si sono formati i concetti relativi alle misure è una componente essenziale dell’evoluzione delle rappresentazioni umane del mondo, della formazione dei sistemi di classificazione e dei concetti astratti.

Forse non è inutile ricordare che in greco *logos* significa anche proporzione, legge dei rapporti ². Ed è la ricerca di queste leggi che apre alla misura, ovvero alla sapienza. Nelle opere di filosofi come Platone, Aristotele, Eraclito, ed Empedocle un *logos* interpretabile come “rapporto” regola gli equilibri tra le componenti della natura e la saggezza del comportamento umano. La proporzione, la misura del visibile dischiude per i Greci, se così si può dire, alla misura dello spirito.

Non è certo azzardato affermare quindi, citando sempre Kula, che “la nozione di misura, il modo di intenderla, perfino la sua concreta grandezza, sono tutte categorie fondamentali del pensiero umano”.

Durante questo scritto mi soffermerò anche su questo aspetto, presentando una prima rassegna di alcuni problemi di ordine teoretico che scaturiscono dall’applicazione della metodologia della misura allo studio dei fenomeni della natura. Come riassume il filosofo Heinrich Gomperz, uno dei maestri viennesi del noto epistemologo Karl Popper,

se consideriamo quanto infinitamente problematico sia il concetto di *esperienza*[...]saremo costretti a credere che[...] per quanto lo riguarda, le affermazioni entusiastiche sono meno appropriate[...]che non un atteggiamento critico estremamente accurato e guardingo.(H. Gomperz, cit. in Popper, 1934, trad. it. 35)

E’ con queste premesse che cercherò di introdurre i laboriosi passaggi che hanno portato alla messa a punto dell’attuale metodologia della misura, nonché i cambiamenti ora in atto. Come mostra uno studioso delle comunità primitive ³, è questa una storia testimoniata già verso la fine del Paleolitico da piccole innovazioni - tacche incise nell’avorio, punte di frecce e altre forme stilizzate dipinte sulle pareti - legate all’esigenza di registrare informazioni importanti per la sopravvivenza del gruppo.

¹ Kula, 1970

² Solo secondariamente *logos* denotava la “parola” e il “discorso”

³ Giannini, 2002

Al di là del livello di approfondimento raggiunto, credo che anche attraverso lo studio della storia della metrologia riassunto in questo lavoro sia possibile fornire sostegno alla tesi che la scienza non è un'impresa autonoma razionalmente comprensibile sulla base di una dinamica regolata da norme interne fissate una volta per tutte, ma un concreto processo di apprendimento sociale, dotato di regole specifiche che, a loro volta, dipendono dal contesto (filosofico, economico, politico e culturale) storicamente dato. Come afferma il fisico teorico Marcello Cini, che ha basato molto del suo lavoro e dei suoi contributi come critico della scienza per argomentare la precedente ipotesi,

da ormai qualche decennio gli studi storici, epistemologici, e sociologici hanno mostrato che le regole dei linguaggi scientifici non sono rigide e immutabili, ma cambiano a seconda del clima culturale e sociale del tempo e che i fatti non sono dati assoluti e a priori, ma a loro volta devono essere interpretati teoricamente.(Cini, 1994,8-9)

Questo significa, in altre parole, che i linguaggi adottati dalle rispettive comunità per rappresentare l'insieme delle conoscenze accettate come valide in un dato momento storico sono mutati e muteranno con il tempo. E questo lavoro si propone di mostrare tra l'altro che ciò vale, anche e forse innanzi tutto, per le tecniche e le metodologie usate per realizzare e rappresentare i risultati delle attività di misurazione.

Insieme ad altri, ha aiutato a porre il problema dei presupposti storici e culturali dei processi di misura lo storico e filosofo della scienza Thomas Kuhn:

Le operazioni e le misurazioni che uno scienziato esegue in laboratorio non sono «il dato» dell'esperienza, ma piuttosto «ciò che viene rilevato con difficoltà»[...]Le operazioni e le misurazioni sono determinate dal paradigma in maniera ancor più evidente di quanto lo sia l'esperienza immediata dalla quale in parte derivano. La scienza non si occupa di tutte le possibili manipolazioni di laboratorio; essa sceglie invece quelle che possono servire a far corrispondere un paradigma all'esperienza immediata che in parte è stata determinata da quello stesso paradigma. Di conseguenza, scienziati con paradigmi differenti si interessano di differenti manipolazioni concrete di laboratorio. Le misurazioni che si debbono eseguire per studiare il pendolo non sono le stesse di quelle necessarie per studiare la caduta vincolata. E analogamente, le operazioni adatte a chiarire le proprietà dell'ossigeno non sono sempre identiche a quelle che si richiedono quando si studiano le caratteristiche dell'aria deflogistizzata.(Kuhn, 1962, trad. it. 156)

Il sociologo della conoscenza Ancarani in un suo saggio sull'epistemologia e storico della scienza Gaston Bachelard, riassumendo dal suo *Essai sur la connaissance approchée* del 1927, sottolinea:

la storia reale della precisione metrica avrà[...]come effetto critico quello di mostrare che i nitidi modelli della ragione classica si rivelano già incrinati (e non solo a partire dai grandi sommovimenti della relatività o della fisica quantistica), le contraddizioni retrodatate, i metodi da tempo diversificati, falsa l'idea che a lungo la verità abbia potuto significare pacifico accumulo di conoscenze nei reticoli stabili di un pensiero che non muta.(Ancarani, 1981, 51)

Il problema della misura, si può addirittura ipotizzare, è esemplare in qualche modo della evoluzione della scienza *tout court*:

Ciò significa che i livelli della precisione sperimentale sono suscettibili di segmentare in periodi nettamente distinti la storia della scienza giacché si mostrano sostanzialmente in accordo con la situazione generale della conoscenza scientifica in un dato momento storico. Non si dà in sostanza una "precisione gratuita" che vada al di là dei limiti di precisione richiesti in una data epoca e da un certo grado di sviluppo della scienza.(ivi, 56)

Le antiche misure possono apparirci quanto mai imprecise e tali da ingenerare equivoci. Ma appunto stiamo bene attenti a non incorrere in anacronismi nell'interpretarle. In situazioni diverse, un diverso grado di esattezza è una necessità sociale. Se il criterio di scelta di una buona scala si basa sulla convenienza, ne segue che quelle che a noi sembrano idee primitive di dimensione sono nel loro contesto sociale “altrettanto buone, se non migliori, delle nostre scaltrite concezioni”¹.

All'interno del percorso storico ho cercato di sottolineare l'importanza dell'avvento del *sistema metrico decimale*². E' sorprendente scoprire quante persone decisamente istruite, e perfino scienziati di professione, sottovalutino tale evento o addirittura ignorino come la nascita di tale

¹ Leach, 1954

sistema sia storicamente legata all'avvento del movimento e della cultura illuministi. Già prima di essere adottato in Francia, il sistema metrico fu visto come una futura istituzione internazionale: ci si riprometteva - e il tempo sta confermando questa speranza - di farlo accettare in tutti i paesi del mondo: un sistema di misure “à tous les temps, à tous les peuples” (per tutti i tempi, per tutti i popoli).

Condorcet continuò a considerare come principale obiettivo della riforma la sua universalità: a suo parere, cioè, la riforma non doveva avere alcun carattere particolare o nazionale specificatamente francese, così da poter essere accettata dal mondo intero. Proprio per questa ragione le misure dovevano essere «prese dalla natura»: questa, infatti, specie per i filosofi dell'Illuminismo, era comune a tutti i popoli e ne costituiva l'elemento unificante. (Kula, 1970, trad. it. 282)

Come in altri momenti cruciali di svolta nella storia della civiltà e della scienza, una pressione enorme fu esercitata durante la Rivoluzione Francese dal tessuto sociale sulla comunità scientifica ed, in questo caso, con risultati assolutamente positivi per quanto riguarda la fecondità delle nuove idee. Mi riferisco in generale allo straordinario fiorire di nuove discipline scientifiche che in quel contesto nacquero sotto la spinta di una nuova concezione del rapporto fra scienza e tecnica: non più la scienza come guida illuminata e a priori della pratica, come era sotto *l'ancien régime*, ma la scienza al servizio della nuova struttura sociale e delle sue esigenze tecnico-produttive. La storia della metrologia è, in particolare, davvero l'esempio più eclatante di questi avvenimenti. In tutte le società organizzate, del resto, disporre delle misure è una delle caratteristiche del potere (basti pensare, per un caso recente, alla contrastata adozione dell'euro nel nostro continente). Ciò significa conferire alle misure vigore di legge e conservare i campioni, che spesso nel mondo antico avevano carattere sacro.

In Grecia e, più in generale, in tutto il mondo antico, le misure furono subito considerate attributi importanti del potere. I campioni delle misure, che presentavano dediche agli dèi, erano conservati sia nell'Acropoli di Atene che al Campidoglio, a Roma. Inoltre, tra le varie cariche pubbliche della polis, vi era anche quella di verificatore. Ogni nuova città aveva propri campioni che, essendo simbolo di sovranità, venivano imposti alle popolazioni sottomesse.

L'eterogeneità delle misure e dei metodi di misurazione, che esiste fin da quando gli uomini hanno iniziato a misurare, ha da sempre lasciato campo libero alle controversie. Perciò il potere che di volta in volta ha conquistato il diritto di stabilire e controllare le misure, è venuto a trovarsi in una posizione privilegiata, una vera e propria *sovranità metrologica*. Basti pensare che per esempio in epoca feudale, quando di fatto coesistevano sovranità diverse (la comunità, il signore, la Chiesa, il Re, l'Imperatore) esistevano in pratica anche sistemi di unità di misura diversi, ognuno valido nel proprio ambito.

“Un re, una legge, un peso e una misura!”, gridavano i contadini alla vigilia della Rivoluzione in tutta la Francia. Gridavano spinti da aspirazioni e sogni riformisti e patriottici. Unificando le istituzioni, volevano nient'altro che libertà, uguaglianza e fraternità. (ivi, 301)

Ma come mai un sistema per la prima volta realmente *universale* cominciò ad affermarsi solo con l'avvento della Rivoluzione?

Una ipotesi plausibile è che questo tipo di unificazione ¹ degli standard metrologici abbia iniziato ad avere successo in una fase storica in cui tale obiettivo era ormai divenuto auspicabile e compatibile con quegli ideali di *universalità* e di *razionalità economica* che hanno così fortemente caratterizzato la nascita della società moderna. In altre parole, è postulabile che il processo di standardizzazione delle misure sia stato fortemente legato tanto allo spirito e ai valori del capitalismo moderno quanto

² In parte riprendendo e sviluppando alcune considerazioni già da me presentate in un saggio (*Breve storia del sistema metrico decimale*) pubblicato sul sito dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare <http://scienzapertutti.lnf.infn.it/scaffali.html>

¹ Le unificazioni premetriche, come vedremo, non si pongono obiettivi universali: devono esistere fin dove arriva un certo potere

alla sua storica affermazione nel mondo occidentale, che ci ha accompagnato fino al processo di globalizzazione economica in atto. In particolare, cercherò anche di mettere in luce come i primi sviluppi significativi ed i primi risultati davvero consolidati e riconosciuti della *teoria degli errori* si siano verificati quando ormai erano divenuti direttamente *compatibili*¹ con uno spirito di precisione indissolubilmente *legato alla* (anche se per alcuni, come vedremo, non necessariamente *generato dalla*) attività economica, attività che la società moderna individuò sin dal suo esordio come il reale motore del progresso e della civiltà. Più in generale, cercherò di mostrare come, proprio sulla base dello studio del processo storico che ha condotto alla attuale metodologia della misura, si possa ipotizzare che ci sia vera innovazione in ambito scientifico e tecnologico solo quando una serie di invenzioni tecniche e una serie di pratiche sociali, politiche ed economiche si incontrano e si sostengono vicendevolmente.

Proverò inoltre ad argomentare che con queste considerazioni non si vuole affatto negare che le ragioni delle innovazioni eclatanti avvenute con la Rivoluzione abbiano origine anche in un momento storico precedente, quello della nascita dello stato moderno, come asserisce e mostra tra gli altri lo storico della scienza Charles C. Gillispie².

Tutto ciò può indubbiamente contribuire ad introdurre la riflessione su un tema da sempre presente nel dibattito filosofico-epistemologico: indagare come vengono elaborate individualmente ed accettate (o respinte) dalla società le scoperte scientifiche e le conquiste tecniche. Certo, come ci insegna anche Freud, l'attività umana è diretta a ricercare il piacere ed evitare il dolore; e per alcuni, più di altri, ciò significa esaudire la propria curiosità. Come afferma Koyrè in *Perspectives sur l'histoire des sciences* del 1961:

perchè la scienza nasca e si sviluppi, occorre, come ci spiegò lo stesso Aristotele, che vi siano uomini che dispongano di tempo libero; ma questo non basta: bisogna anche che fra i membri delle *leisured classes* compaiano uomini i quali trovino *soddisfazione* nella comprensione, nella *teoria*. (cit. in Zambelli, 2000, 39)

Ma lo stesso Koyrè, spesso definito (forse non del tutto correttamente) il filosofo della trascendenza del pensiero rispetto alla prassi, aggiunge:

occorre anche che questo esercizio della *theoria*, l'attività scientifica, abbia valore agli occhi della società[...] Nonostante tutte le dichiarazioni orgogliose che affermano il contrario, non si parla quando non c'è nessuno per intenderci e non si scrive quando non c'è nessuno per leggerci. (Koyrè, 1961 A, trad. it. 70).

Fin dall'inizio la spiegazione del successo particolare della comunicazione in ambito scientifico è stata una preoccupazione della filosofia della scienza³. Certo, gli scienziati vogliono trovare la verità, ma vogliono anche, e soprattutto, *essere loro a trovarla e comunicarla*, perché *questa verità* sia accettata dagli altri. E *non solo* (anche se certamente in prima istanza) *dagli altri scienziati*.

Chiarisce Cini come questo ultimo aspetto sia particolarmente importante in alcuni momenti storici:

Si tratta[...]di riconoscere che ogni svolta nella storia della cultura (e la scienza non è che una delle sue componenti) è il frutto della concomitanza di condizioni sociali favorevoli e di proposte di innovazioni "convincenti".

Da un lato è infatti necessario che, in un dato momento storico, le risposte, fino a quel momento giudicate adeguate e sufficienti, date dalla cultura dell'epoca alle domande poste dall'incalzare dei problemi pratici e ideali della vita degli individui e della collettività, incomincino a rivelarsi limitate e insoddisfacenti. Dall'altro occorre che, quando si manifestano i sintomi di una crisi del genere, siano disponibili alternative concettuali capaci di cogliere, al disotto delle apparenze caotiche del mondo fenomenico, quei nessi e quelle relazioni fra elementi della realtà naturale che hanno rilevanza per le nuove domande che nascono dall'evoluzione del tessuto sociale. (Cini, 1994, 23)

Ciò porta a sottolineare che (e la storia della metrologia è davvero un caso esemplare al riguardo),

¹ L'uso dell'aggettivo "compatibili", già effettuato precedentemente, vuole sottolineare il fatto che non si vuole qui ricorrere in maniera semplicistica a un'interpretazione "deterministica" di carattere socioeconomico

² Gillispie, 1960 e 1980

³ Vedi Gillispie, 1980

la storia della scienza non è altro che un aspetto particolare della storia umana, e, di conseguenza, che la comprensione della successione delle sue tappe salienti implica per ognuna di esse una ricostruzione dei sentieri abbandonati, delle alternative contrapposte, delle forze e degli interessi in gioco, delle ragioni che hanno fatto prevalere una scelta rispetto alle altre possibili e, soprattutto, dei "vantaggi" che la scelta vincente presentava per la successiva affermazione nel contesto sociale e culturale di vedere il mondo che esso implicava. (ivi, 45)

E' in questa cornice che cercherò di discutere, quindi, come lo spirito del libero mercato sia alla base dell'attività di normalizzazione tecnologica contemporanea (iniziata appunto con la adozione di unità di misura universali), che riguarda gli oggetti più insignificanti come pure i più avanzati telefoni cellulari o le più sofisticate reti di computer. Si potrà così misurare quanto la storia della scienza (l'unica disciplina che "dà un senso alla nozione, tanto glorificata e decantata, di progresso", come afferma frequentemente Koyré nei suoi lavori) debba non solo tener conto del contenuto puramente scientifico del problema che affronta, ma prestare attenzione anche agli aspetti filosofici, economici, sociali, politici che ad esso sono legati e che permettono di coglierne tutta la complessità. Lo studio storico della scienza, condotto con prospettive critiche, può contribuire a saldare la frattura che ancora divide le scienze dalle discipline umanistiche e a dare una nuova dimensione alla consapevolezza del nostro presente. Non esiste una scienza separata dalla società, dalla filosofia, dall'ambiente culturale (come pure va detto che non è possibile studiare la storia della società senza tener conto delle influenze che la scienza esercita su di essa).

Nel discutere il processo storico che ha portato alla standardizzazione dei sistemi di misura, questo lavoro presenta anche una breve introduzione alla metodologia della misura (che definirò convenzionale ¹) che a lungo è stata in uso tra gli scienziati e i tecnici sperimentali (ed in buona parte ancora lo è), per introdurre altresì alcune considerazioni critiche che vogliono servire a delineare alcuni sviluppi oggi in atto, sviluppi che sono parte integrante di un vero e proprio cambiamento di "*paradigma*" teoretico.

In particolare saranno criticamente introdotti il significato della *misura* di una *grandezza fisica*, le nozioni fondamentali di trattazione degli *errori di misura*, le caratteristiche degli *strumenti*, il concetto di *probabilità* e quello di *funzione di distribuzione* di probabilità, i *metodi statistici* per l'elaborazione degli errori di misura fino ad arrivare appunto a descrivere brevemente *un nuovo approccio* al problema della determinazione delle *incertezze*. Il concetto di *incertezza*, che sostituisce quello convenzionale di errore, è relativamente nuovo nella storia della metrologia. Come vedremo l'errore, almeno in teoria, può essere ridotto a piacere. L'incertezza è oggi invece considerata un aspetto "inevitabile" del processo di misurazione (anche a livello macroscopico; non solo quindi a livello atomico come suggerito, notoriamente, dalla meccanica quantistica).

Cercherò di chiarire in particolare come la teoria standard di trattazione degli errori stia evolvendo sulla base di una critica al concetto convenzionale stesso di probabilità e alla adozione della cosiddetta *statistica bayesiana*. Questa statistica, come vedremo, è basata sull'idea intuitiva che la probabilità quantifica il *grado di fiducia* attribuito all'occorrenza di un evento. Le "credenze" fanno parte naturale del "fare" scienza e ammetterne l'esistenza non necessariamente pregiudica la percezione oggettività delle scienze stesse. Come afferma un fisico sperimentale ²,

in other words, one needs only to look closely at how frontier science makes progress, instead of seeking refuge in an idealized concept of objectivity[...]My preferred motto on this matter is "no one should be allowed to speak about objectivity unless he has had 10-20 years working experience in frontier science, economics, or any other applied field" [...]the statistician D. Berry[...]has amused himself by counting how many times Hawking uses 'belief', 'to believe', or synonyms, in his 'A brief history of time'. The book could have been entitled 'A brief history of beliefs', pointed out Berry in his talk. (D'Agostini, Luglio 1999, 123)

Pur non soffermandomi in particolare sui problemi posti dalla meccanica quantistica al processo ed ai protocolli della misura (argomento su cui è stato scritto moltissimo, sia da storici della scienza

¹ Nel senso di ordinaria, standard

² Le citazioni riportate in questo lavoro e riprese da documenti o libri di cui non è ad oggi disponibile una versione in italiano saranno, con qualche eccezione, lasciate in lingua originale

che da filosofi e fisici) introdurrò comunque questo tema per sottolineare l'importanza che il linguaggio della meccanica quantistica ha esercitato sulla nascita di un nuovo paradigma scientifico, ed un'analogia che deve essere messa in luce fra l'atteggiamento epistemologico nei confronti dell'osservazione scientifica suggerito dal principio di indeterminazione di Heisenberg, per quanto riguarda il mondo atomico, e l'attuale situazione esistente a scale macroscopiche. E' noto che l'immagine del mondo della fisica moderna è cambiata con l'introduzione del principio di indeterminazione. Quel che si vuole qui evidenziare è che il valore di una qualsiasi operazione di misura è caratterizzato da una più o meno grande indeterminazione, e che una corretta metodologia può solo consentire di conoscere statisticamente (o, meglio, *probabilisticamente*) il valore dell'incertezza da associare ad esso. E questo valore non può che scaturire da valutazioni intersoggettive, che certo non sono arbitrarie ma neppure ci permettono di attribuire un valore oggettivo in senso tradizionale al grado di precisione raggiunto. Le conseguenze epistemologiche che dapprima scaturiscono dalla meccanica quantistica hanno quindi, per così dire, *valore generale*. Come afferma Paolo Vineis ¹, docente di statistica medica e biometria all'università di Torino, a sua volta riprendendo una espressione di John Locke, *fare scienza è oggi una attività che si svolge non più nella notte dei secoli bui, né alla luce chiara dei lumi, ma nel "crepuscolo della probabilità"*. Ciò potrebbe implicare anche una apertura sulla dimensione etica del dibattito, che qui, però, non sarà presa in considerazione salvo attraverso una citazione di Cini:

E' assai generale[...]l'opinione che i filosofi non servano più a molto da quando sono le scienze a farci scoprire com'è fatto il mondo. Al massimo si concede ai filosofi di mettere in bell'ordine i risultati di queste scoperte traendone, *ex post*, conseguenze formali prive di una sostanziale efficacia conoscitiva. Ma la rinuncia all'unificazione filosofica si paga cara. Si paga con la rinuncia a collegare *conoscenza e valore* e quindi con la separazione fra verità e comportamento individuale e collettivo. La scienza infatti non unifica, la scienza spezzetta. Provocatoriamente si può dire che la scienza come un tutto unico non esiste: esistono solo le scienze con le loro innumerevoli branche sempre meno comunicanti fra loro.(Cini, 1994, 242)

Un'ultima considerazione di carattere teoretico, in parte connessa con questa ultima citazione. Quando possibile, compatibilmente allo spazio e al carattere introduttivo di questo lavoro, ho cercato di sottolineare con la dovuta attenzione l'importanza che riveste la ricostruzione storica dei concetti scientifici (accennando, in particolare, alla formazione di alcuni di essi direttamente coinvolti nelle procedure di misurazione, come per esempio quelli di alcune grandezze fisiche quali *spazio, tempo, forza e massa* ²). Nella situazione attuale, certo segnata da incredibili progressi tecnologici, vi è una preoccupante separazione tra le nostre (importantissime) abilità tecniche e la nostra incomprendenza filosofica dei concetti di base. Come bene riassume il fisico e filosofo della fisica Max Jammer,

l'attività meditativa dello scienziato moderno, il quale è più un tecnico che un filosofo, viene tesa al massimo dalla necessità di assimilare il rapido accumularsi delle informazioni relative al suo campo specifico di ricerca. Egli trova ben poche occasioni per permettersi una sosta sui problemi fondamentali connessi ai concetti stessi che egli applica. Inoltre, nell'attuale sistema d'istruzione di tipo accademico, si omette deliberatamente ogni discussione approfondita e critica dei concetti scientifici fondamentali ed apparentemente semplici (relegandoli a uno stadio in cui la mente dello studente è ancora troppo immatura per comprenderne l'effettivo significato).(Jammer, 1957, trad. it. 9)

¹ Vineis, 1999

² E' forse inutile sottolineare che, entro i limiti di un lavoro di piccola mole e di carattere introduttivo, non è certamente pensabile tracciare anche solo sommariamente lo sviluppo storico dei singoli concetti coinvolti nei processi di misurazione fisica (si pensi per esempio solamente a tutte le grandezze fisiche coinvolte!). Probabilmente non sarebbe sufficiente neppure un'intera biblioteca. Cionondimeno nel terzo capitolo di questo lavoro introdurrò anche alcune considerazioni critiche relative al *concetto di legge universale* e nell'ultimo tenterò di chiarire come la *discussione sul concetto convenzionale di probabilità* stia generando i nuovi sviluppi della teoria degli errori. Per quanto riguarda le *unità di misura* mi limiterò, nel secondo capitolo, a ricostruire storicamente il processo che ha portato al succedersi delle diverse definizioni relative alle sole unità di tempo, lunghezza e massa

Certo, lo studio della formazione dei concetti nella scienza e nella tecnologia non è affatto un compito facile, ed è anche per questo che viene perseguito solo in casi isolati, almeno per quanto riguarda la fisica. Esso richiede, oltre ad una educazione storica e filosofica, anche la conoscenza delle teorie fisiche e delle loro specifiche applicazioni. Ma la rinuncia ad avvicinarsi anche in maniera parziale a questi temi, da parte di chi poi viene riconosciuto come esperto tecnico o scientifico dalla società, può compromettere in modo serio l'onestà delle nostre prospettive intellettuali, esponendoci anche ai pericoli etici cui si riferiva l'ultima citazione di Cini.

Riconoscimenti

Sono particolarmente grato ai professori Barbara Continenza, Giovanni Iorio Giannoli e Paolo Quintili per le tante correzioni e i continui consigli, senza i quali il lavoro di tesi qui presentato non sarebbe stato mai completato. Ringrazio inoltre il professor Giulio D'Agostini per gli importanti contributi e i tanti suggerimenti, in particolare riguardanti indicazioni di fonti bibliografiche e documenti disponibili in rete, con riferimento soprattutto alle analisi critiche e ai nuovi sviluppi presentati nel capitolo 9 (al riguardo anche qui segnalo i suoi lavori, riportati in bibliografia, ed il sito <http://zeual1.roma1.infn.it/~agostini/prob+stat.html> da lui gestito).

Sottolineo che la prima parte degli argomenti più tecnici sulla metodologia convenzionale deriva dagli appunti dei corsi di sperimentazione fisica dei professori Marisa Alessio e Marco Severi, che nella seconda metà degli anni '70 ho avuto la fortuna di frequentare, e dal materiale propedeutico alla mia tesi di laurea in fisica (*Analisi dei dati di taratura di un doppio telescopio a scintillatori plastici*, relatore prof. Marco Severi, Roma, Università La Sapienza, 1979), documentazione ovviamente riveduta ed aggiornata alla luce delle pubblicazioni più recenti.

1.1 Che cosa significa misurare?

The problem of physics is how the actual phenomena, as observed with the help of our sense organs aided by instruments, can be reduced to simple notions which are suited for precise measurement and used for the formulation of quantitative laws.

Max Born

[...]whether or not a thing is measurable is not something to be decided a priori by thought alone, but something to be decided only by experiment.

Richard P. Feynman

Prima di affrontare direttamente il processo storico che ha portato agli attuali sistemi di misura (cap. 2), cercherò qui di discutere criticamente il concetto stesso di misura. Com'è stato già rilevato, il termine misura copre innumerevoli campi d'attività. In un senso molto generale potremmo dare la seguente definizione ¹: *la misura è l'assegnazione di numerali per rappresentare delle proprietà* ². In un senso più ristretto qui tratterò principalmente il concetto di misura nelle scienze fisiche, comprendendo in questa categoria, in ogni caso, le applicazioni tecnologiche della fisica e i vari campi dell'ingegneria (è mia opinione comunque che l'aver affrontato il problema della misura facendo uso primariamente di argomentazioni fisiche non tolga alla trattazione, che certo non pretende di aver nessun carattere di completezza, una sufficiente generalità).

Normalmente con l'espressione "fenomeno fisico" si suole indicare qualsiasi oggetto, fatto o avvenimento esterno percepito o osservato direttamente, oppure per mezzo di dispositivi particolari. Più precisamente, come si legge nel noto manuale di fisica generale di Gilberto Bernardini,

¹ Vedi Campbell, 1957; Mandel, 1964; Toulmin, 1960

² Numerale: ciò che determina una quantità (cardinale; per esempio uno, tre, cento,...) o il posto occupato in una serie (ordinale; per esempio primo, terzo, centesimo...)

un *fenomeno* è una variazione dello stato di cose che ci circonda e che i nostri sensi, o direttamente o per mezzo di strumenti, ci permettono di *osservare*; è quindi una *transizione* da uno stato diciamo *A* a uno *B* in qualche cosa diverso da *A*. (Bernardini, 1974, 4)

Si suole anche partire dal presupposto che la conoscenza della natura, cioè del mondo esterno, possa essere oggettiva, ovvero indipendente dalla persona che la acquisisce:

Il poter descrivere con una correlazione di cause-effetti la transizione fra *A* e *B* è il primo passo necessario per comprendere un fenomeno. Naturalmente la descrizione deve implicare solo elementi di giudizio oggettivi inerenti al fenomeno, ed essere indipendente dalle caratteristiche fisiologiche dell'osservatore. Inoltre deve potersi esprimere in termini razionali. Il modo più semplice ed immediato, se non l'unico, per poter far questo, è quello di sostituire alle parole dei numeri ossia misurare ogni cosa che possa *secondo il nostro giudizio* partecipare in modo determinante al fenomeno che interessa. (*ibidem*) (il corsivo è mio)

Che i metodi per conseguire la conoscenza debbano avere questo carattere di oggettività discende da un postulato fondamentale dell'indagine scientifica (postulato di invarianza spazio-temporale) secondo cui i fenomeni naturali sono indipendenti, a parità di condizioni, dal luogo e dal momento in cui vengono osservati ¹. E quindi, un'esperienza correttamente eseguita e descritta oggi, deve poter esser domani sempre riproducibile e dare sempre, nei limiti degli errori di osservazione, lo stesso risultato.

Presupporre questa *oggettività* non è, però, cosa banale né tantomeno scontata: basti pensare che l'osservatore è parte attiva nel processo conoscitivo, con tutto il suo complesso di informazioni preesistenti perché derivanti da esperienze precedenti. Inoltre, si può evidentemente supporre che l'osservazione della realtà modifichi la realtà stessa, come anche che l'acquisizione di una mole sufficiente di informazioni richieda del tempo, e non è certo detto che, mentre si svolge l'indagine, tutto rimanga perfettamente costante. Per descrivere un fenomeno inoltre, bisogna misurare ogni cosa che possa, "secondo il nostro giudizio" (vedi citazione precedente), essere determinante. E ciò, evidentemente, non può non introdurre un elemento di soggettività.

Partendo comunque, per ora, da questo presupposto, si può schematizzare la metodologia della fisica nel modo seguente:

- è necessario inizialmente individuare o definire il fenomeno che si vuole studiare;
- questo risulta descritto da un certo numero di sue caratteristiche, dette *grandezze fisiche* (p.e. lunghezza, massa, tempo, forza, velocità, densità, temperatura, carica elettrica), ognuna delle quali deve potersi valutare quantitativamente per mezzo di operazioni di confronto con una grandezza ad essa omogenea, assunta come unitaria. Tali operazioni di confronto si chiamano *operazioni di misura* ed i risultati ottenuti si dicono *misure*. Per definire un dato fenomeno, quindi, occorre anche individuare (selezionare) le grandezze necessarie a descriverlo;
- le misure effettuate, opportunamente elaborate, forniscono le informazioni mediante le quali si possono determinare le modalità con cui ogni grandezza, nell'ambito di quel fenomeno, è legata alle altre;
- in questo modo si giunge a determinare le relazioni esistenti fra le grandezze che intervengono in modo essenziale in un fenomeno, stabilendo fra esse dei rapporti, quantitativi, di causa ed effetto. Quando queste relazioni sono legittimamente estendibili a tutta una classe di fenomeni (per es. alla generica caduta di un grave) si enunciano in forma generale e si dicono *leggi* (vedi cap. 3).

Questo modo di rappresentare la metodologia della fisica è quello di norma ancora oggi offerto nei testi scolastici di scienza, benché sia in realtà molto discusso che nella pratica effettiva il procedimento sia così lineare:

¹ Vedi per esempio Severi, 1986

The road from scientific law to scientific measurement can rarely be traveled in the reverse direction. To discover quantitative regularity one must normally know what regularity one is seeking and one's instruments must be designed accordingly; even then nature may not yield consistent or generalizable results without a struggle. (Kuhn, 1961, 189-190)

Benché semplicistica, dunque, la precedente schematizzazione è però utile ad introdurre alcune definizioni da cui partire. Secondo questo metodo si tratta di arrivare a *codificare un'informazione* su una o più caratteristiche prescelte del fenomeno in modo che essa possa essere utilizzata in un secondo tempo, eventualmente da altri.

Una misurazione è basata quindi sulla schematizzazione (modello) del fenomeno per individuarne in modo univoco le proprietà rilevanti e la sua formalizzazione attraverso relazioni (leggi fisiche) tra enti chiamati grandezze fisiche. In altre parole, si rappresenta il fenomeno mediante un *modello semplice*, nel quale le grandezze di interesse compaiono come le sole essenziali alla sua descrizione. Misurare il diametro di una palla significa averla assimilata ad una sfera; il modello considera irrilevanti le variazioni del diametro con la direzione e una sfera è la schematizzazione ad un solo parametro della palla.

Le misure sono quindi la base della conoscenza scientifica, come ci ricorda bene il famoso detto di Lord Kelvin: "*if you cannot measure, your knowledge is meager and unsatisfactory*".

Le considerazioni appena fatte non si riferiscono evidentemente al solo metodo sperimentale. Spesso si ritiene che l'esperimento sia il solo modo di procedere della scienza, ma ciò a ben vedere non è affatto esatto. Anche rimanendo nel campo della fisica vi sono scienze come l'astrofisica (pensate di ripetere in laboratorio lo scoppio di una supernova!), la geologia e la meteorologia dove l'osservazione e la classificazione sono i metodi dominanti. E ciò è ovviamente vero per le altre scienze in generale: pensiamo, per un esempio classico, alla biologia evoluzionistica. Alcuni, come lo storico e filosofo della scienza Ian Hacking, addirittura sottolineano i limiti del metodo sperimentale:

Le teorie delle scienze di laboratorio non vengono direttamente confrontate con "il mondo"; esse sono durevoli in quanto sono vere per fenomeni riprodotti - o addirittura creati - da apparati di laboratorio, e sono misurate con gli strumenti che abbiamo costruito. Questo "vero per" non è questione di comparazione diretta fra la teoria e il fenomeno, bensì si basa su ulteriori teorie, in particolare su teorie sul come l'apparato lavora e su vari tipi di tecniche per elaborare *i dati* che generiamo[...]Le nostre teorie persistenti e il mondo vanno così d'accordo non tanto perché noi abbiamo capito come il mondo è realmente, quanto piuttosto perché abbiamo conformato le une all'altro. (Hacking, 1992, trad. it. 35-36)

Per parlare di scienza in senso moderno, come afferma il biologo e storico della biologia Ernst Mayr, la semplice osservazione, tuttavia non è sufficiente:

Fu solo alla fine del diciottesimo secolo che si fece uso per la prima volta di un metodo particolarmente adatto allo studio delle diversità: il metodo comparativo[...]E la differenza tra il metodo sperimentale e il metodo comparativo non è così grande come può apparire[...]In ambedue i metodi si raccolgono dati e in ambedue l'osservazione gioca un ruolo cruciale[...]Nelle cosiddette scienze osservative, l'osservatore studia gli esperimenti della natura. La differenza principale tra questi due insiemi di osservazioni è che nell'esperimento artificiale si possono scegliere le condizioni e quindi si è in grado di verificare i fattori che determinano il risultato dell'esperimento. In un esperimento della natura, sia esso un terremoto o la produzione di una fauna insulare, il nostro compito principale è di dedurre o di ricostruire le condizioni in cui l'esperimento della natura ha avuto luogo. (Mayr, 1982, trad. it. 32).

Se, nello studio dei fenomeni naturali, si passa da un metodo classificatorio (ripartizione di oggetti o fenomeni in classi) ad un metodo comparativo, *il ragionamento quantitativo inizia a diventare importante*. Infatti si introduce una *relazione d'ordine*, cioè un criterio che consente di decidere in modo univoco se, dati due oggetti o fenomeni, il primo possiede una data proprietà in grado minore, uguale o maggiore del secondo. Se la relazione d'ordine gode della proprietà transitiva, si può stabilire una corrispondenza tra i gradi di quella proprietà ed *un insieme di numeri*, in modo tale che

la relazione d'ordine sia preservata¹. I concetti comparativi occupano una posizione intermedia tra i concetti classificatori e i concetti quantitativi. Per introdurre un concetto quantitativo, è necessario essere già in grado di confrontare gli oggetti relativamente ai caratteri che si devono misurare; vale a dire, è necessario essere, appunto, in possesso di concetti comparativi. Si può per esempio stabilire che un certo oggetto è più grande, più caldo, o più pesante di un certo altro oggetto, senza tuttavia misurare, in termini quantitativi, le dimensioni, la temperatura, o il peso dei due oggetti in questione; tuttavia, una delle condizioni necessarie per introdurre una scala metrica è il possesso di concetti comparativi, quali: più grande, più caldo, più pesante.

Consideriamo, per esempio, la scala di Mohs per le durezza dei minerali. La scala è basata sul criterio che un minerale è più duro di un altro se lo scalfisce. La scala elenca dieci minerali in ordine di durezza crescente, associandoli a 10 numeri in ordine crescente:

1.talco 2.gesso 3.calcite 4.fluorite 5.apatite 6.ortoclasio 7.quarzo 8.topazio 9.corindone 10.diamante.

Le proprietà di un oggetto o sistema non sembrerebbero, dunque, “per loro natura” qualitative o quantitative. La differenza dipenderebbe solo dal tipo di concetti utilizzati. Il filosofo della scienza Mauro Dorato, nel ricordare che tra gli altri anche uno dei pensatori del circolo di Vienna, Rudolph Carnap, si pronunciò sul fatto che la differenza tra qualità e quantità è da porsi solo in termini concettuali, così per esempio afferma:

Ciò che[...]ci fa propendere per la soluzione di Carnap al problema suddetto, è che in fisica le scale e le unità di misura sono, almeno in parte, convenzionali, anche quando sono introdotte sulla base di leggi di natura note. Di conseguenza, l'attribuire, per esempio, alla temperatura dell'acqua che congela certi numeri piuttosto che altri (32 gradi Fahrenheit piuttosto che 0 Celsius o 273,15 Kelvin) sembra il frutto di una scelta dettata anche da ragioni di convenienza.(Dorato, 2000, 116)

A questo proposito è utile leggere come, alla voce *Esperimento* dell'enciclopedia Einaudi lo storico e filosofo della scienza Stefan Amsterdanski commenta questi aspetti:

In questo contesto, si dovrebbe osservare che la differenza tra ciò che è qualitativo e ciò che è quantitativo *non è una differenza ontologica, ma una differenza concettuale*. Esiste un'opinione molto diffusa secondo la quale, in se stesse, le proprietà degli oggetti sono di due specie: sono, cioè, proprietà qualitative e proprietà quantitative. Proprio quest'opinione è spesso all'origine della credenza che la scienza contemporanea travisi la vera immagine del mondo, perché è interessata primariamente agli aspetti quantitativi, mentre ignora gli aspetti qualitativi. Tuttavia la differenza vera e propria consiste nel modo della descrizione, ossia nella specie di concetti di cui si fa uso. Le medesime caratteristiche possono essere descritte sia in termini qualitativi sia in termini quantitativi. La cosiddetta trasformazione della quantità in qualità è un processo semantico, non una faccenda ontologica. Non ha alcun senso il chiedere se questa o quella caratteristica un carattere qualitativo o un carattere quantitativo. Non è la caratteristica in se stessa, ma la descrizione che se ne dà che può essere dell'una o dell'altra specie[...]Di conseguenza, quando si usano concetti comparativi, si deve affrontare il problema di istituire un procedimento empirico per mezzo del quale sia possibile stabilire un confronto. Questo problema è il problema della misurazione. La costruzione di *concetti* quantitativi consiste nell'elaborazione di scale metriche da applicarsi all'ordinamento degli oggetti determinato dai concetti comparativi.(Amsterdanski, 1977, 841-842)

Un altro punto da introdurre è che qualsiasi operazione di misura implica un certo grado di indeterminazione del suo risultato. Saper valutare correttamente l'indeterminazione di una misura è essenziale sia in campo scientifico, per fissare i limiti di validità delle teorie con cui si descrivono i fenomeni naturali, sia in campo tecnologico, per asserire il grado di affidabilità di prodotti e procedure².

Cerchiamo di approfondire meglio alcuni dei concetti introdotti.

Per affrontare in modo scientifico lo studio di un determinato fenomeno, occorre all'inizio individuare quali sono le grandezze significative. Se, per esempio, il fenomeno da studiare è il moto di una pallina che rotola su una rotaia in discesa, scopriremo ben presto che alcune grandezze, come

¹ Vedi per esempio Fornasini, 2001

² Vedi per esempio Agnoli et al., 1993.

il dislivello percorso dalla pallina o l'inclinazione della rotaia, influiscono sullo svolgimento del fenomeno, mentre altre, come il colore della rotaia e la temperatura dell'aria, non hanno “apparentemente” alcun effetto sensibile sul moto.

Una volta individuate le grandezze rilevanti se ne esegue la misura secondo un metodo chiaro e possibilmente ripetibile.

Occorre ora definire in maniera univoca il concetto di *grandezza fisica*.

Una grandezza fisica viene di norma definita come una caratteristica misurabile di un sistema, completamente individuata dal risultato di una ben determinata operazione di misura. Il complesso delle operazioni da eseguire per effettuare una misura si chiama *operazione metrica*. (Il nome metro deriva dal greco *metron*, latino *metrum* = misura, in senso generale, non specificatamente di lunghezza; la *metrologia* è appunto la scienza della misura ¹).

Una grandezza si definisce quindi tramite l'insieme di regole atte a misurarla (nel prossimo paragrafo discuterò criticamente questa affermazione).

Nel 1993 la più autorevole organizzazione attiva a livello mondiale nell'opera di standardizzazione, l'*International Organization for Standardization* (ISO, vedi par. 4.1), ha pubblicato una Guida ² (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) con uno specifico vocabolario dei termini usati nella metodologia della misura ³, alla cui stesura hanno contribuito esperti (interdisciplinari) nominati da diversi enti nazionali ed internazionali del campo.

La Guida ISO definisce una grandezza (*misurabile*) come “*un attributo di un fenomeno, di un corpo o di una sostanza che può essere distinto qualitativamente e determinato quantitativamente*”. Ed inoltre stabilisce che per “*misura debba intendersi l'insieme di operazioni che hanno come scopo la determinazione del valore del misurando*”, ovvero della grandezza sottoposta a misura.

In particolare si legge quanto segue (si noti che l'incertezza è considerata parte integrante del risultato):

The objective of a measurement is to determine the value of the measurand, that is, the value of the particular quantity to be measured. A measurement therefore begins with an appropriate specification of the measurand, the method of measurement, and the measurement procedure. In general, the result of a measurement is only an approximation or estimate of the value of the measurand and thus is complete *only when accompanied by a statement of the uncertainty of that estimate*. (ISO, 1993, 4) (il corsivo è mio)

Cominciamo col considerare un tipo di misura, non sempre possibile (vedi cap. 3), che chiamiamo *misura diretta*. Una misura diretta è una operazione che si effettua confrontando direttamente la grandezza da misurare con un'altra grandezza ad essa *omogenea*, presa come *campione*; misurare quindi una grandezza significa in pratica trovare un numero che dica quante volte tale grandezza è più grande o più piccola del campione. Può rivestire un certo interesse ricordare che una delle prime definizioni teoriche di misura la possiamo ritrovare nell'*Encyclopédie* di Jean d'Alembert e Denis Diderot dove, alla voce “*Mesurer*” si può leggere ⁴: “*nella sua accezione matematica il termine significa prendere una certa quantità ed esprimere i rapporti che tutte le altre quantità dello stesso genere hanno con la prima. Nel senso popolare del termine, significa invece servirsi di una misura nota e determinare attraverso di essa l'estensione precisa, la quantità o la capacità di una qualsiasi cosa*”.

Analizziamo meglio ciò che abbiamo finora introdotto.

Innanzitutto si deve considerare presupposta, per grandezze soggette ad essere misurate direttamente, la definizione operativa di confronto (uguaglianza o disuguaglianza) e somma. In

¹ Vedi Egidì, 1992

² In questo scritto spesso farò riferimento alla Guida e manterrò, di norma, la versione originale in inglese

³ Voglio sottolineare che per armonizzare le risorse terminologiche in campo tecnico-scientifico risultano necessarie regole unificate. Le norme a questo riguardo emesse dall'ISO individuano anche tutte le modalità da seguire per lo svolgimento dell'attività terminologica, dalle fasi iniziali di creazione delle procedure di lavoro, alla raccolta e registrazione dei termini, alla formulazione delle definizioni e alla strutturazione delle singole voci

⁴ Encyclopédie, X, 426 b

secondo luogo, va precisato il significato di grandezze fisiche omogenee. Sono omogenee quelle grandezze che possono essere misurate attraverso lo stesso tipo di operazioni e con le medesime regole; ciò evidentemente significa che “sono definite” allo stesso modo. Infine va scelto il campione con cui confrontare le grandezze ad esso omogenee. La scelta è completamente arbitraria, purché soddisfi alcuni requisiti di carattere pratico (vedi cap. 4).

In definitiva, misurare una grandezza significa associare ad essa un numero che, riferito a un ben precisato campione, cioè a una ben precisata *unità di misura*, ne fornisce il valore. Ciò vale in generale e non solo per le misure dirette prima definite. Per le misure direttamente ottenibili per confronto, cioè le misure dirette, tale numero rappresenta il rapporto tra il valore della grandezza in esame e quello, assunto come unitario, del campione. Per mettersi in grado di eseguire correttamente una misura, il significato astratto di misura come rapporto va precisato nella seguente maniera: fissato il campione, il confronto con esso fornisce due numeri che delimitano l'intervallo entro cui è compreso il valore della grandezza che stiamo misurando. Vedremo nel seguito come indicare questo intervallo nei differenti casi (cap. 6). In maniera intuitiva, comunque, possiamo intanto dire che il risultato della misura è tanto più preciso quanto più è piccolo tale intervallo. Per comodità si usa introdurre multipli e sottomultipli dell'unità di misura, fino ad avere unità arbitrariamente grandi ed arbitrariamente piccole, purché operativamente definibili. Per operativamente definibili si intende semplicemente, qui e sempre, misurabili. Il numero di cifre significative non è, per quanto detto, arbitrario ma è legato al più piccolo multiplo o sottomultiplo del campione che sia misurabile con il procedimento usato (vedi anche par. 4).

Le precedenti considerazioni sono un tipico esempio del carattere operativo che viene normalmente attribuito ai concetti della fisica. Le grandezze fisiche non vengono definite in termini di proprietà astratte, bensì in modo concreto: la definizione di ogni singola grandezza fisica consiste nell'enunciazione dettagliata delle operazioni che consentono di misurarla.

Per questo le definizioni delle grandezze fisiche sono *definizioni operative*. Come si può sentire in qualsiasi aula dove si insegna la fisica, in fisica non è importante tanto domandarsi "che cos'è?", quanto "come si misura?".

1.2 Prime riflessioni

La scienza senza filosofia – se pure si può concepirla – è primitiva e informe.
Albert Einstein

The trouble with the world is that the stupid are cocksure and the intelligent are full of doubts.
Bertrand Russell

L'utilizzo di definizioni operative ha indubbiamente un'enorme vantaggio, innanzi tutto di ordine pratico. L'uso di una definizione operativa permette di stabilire esattamente ciò di cui si sta parlando e assicura che, in situazioni diverse, ci si riferisca sempre alla stessa grandezza:

E' successo a più riprese nella storia della Fisica, da Aristotele in poi, che errori concettuali siano stati introdotti per analogie o generalizzazioni ingiustificate o per l'uso ripetuto di modelli impiegati con scarso senso critico. Il superamento di questi errori attraverso un riesame dei concetti fisici basato sulla possibilità di dare di essi una definizione operativa, ha spesso coinciso coi maggiori progressi della Scienza.

Ne sono di esempio i seguenti casi.

Il calore non è altro che una forma di energia e si può misurare in vari modi. Ma fino alla metà del secolo scorso il calore era concepito come uno strano fluido, privo di massa, ma indistruttibile, che si trasferiva spontaneamente dai corpi più caldi a quelli più freddi ecc.[...]Nessuno aveva pensato di eseguire una serie di operazioni metriche atte a "osservare" almeno una di queste singolari proprietà. Si deve a Joule il merito di avere dimostrato con una serie di esperienze, che il "calorico", cioè quel tal fluido, si poteva creare e distruggere nei corpi semplicemente ammettendo o

sottraendo ad essi delle quantità note e ben definite (cioè misurate) di energia meccanica. Da quelle esperienze ebbe origine il I principio della termodinamica.

L'etere cosmico, mezzo singolare, anch'esso imponderabile ma perfettamente rigido ed elastico, considerato (per una errata analogia con le onde elastiche) indispensabile per la trasmissione attraverso l'Universo delle onde luminose, ebbe fine quando Einstein, rinunciando ad esso, interpretò correttamente il risultato dell'esperimento di Michelson e Moreley. L'esperimento si proponeva di mostrare con una effettiva misura che "l'Ettere" esisteva.

Infine il principio di indeterminazione di Heisenberg sul quale si erige la meccanica delle particelle elementari ebbe origine da una revisione critica del concetto classico di "orbita", valido per la meccanica classica, ma operativamente non sostenibile per es. nel caso del moto di un elettrone; troppo leggero per essere trapiantato anche da un fascio di luce.

In ognuno dei casi ora citati, ossia per il "calorico", l'"Ettere cosmico" e la "traiettoria di un elettrone" fu dunque constatato che non era possibile rivelare, *attraverso misure*, quelle proprietà che si erano inventate per giustificarne l'esistenza. Brevemente né il calorico, né l'etere, né la traiettoria elettronica, erano degli "osservabili". (Bernardini, 1974, 9)

Pur non mettendo assolutamente in discussione l'estrema utilità di questo modo di definire i concetti, voglio qui sottolineare che tale approccio, da un punto di vista teoretico, non può sempre risolvere tutti i problemi e le aporie che possono comunque sorgere alla luce dei cambiamenti culturali che ogni linguaggio (incluso quello scientifico) cerca di recepire. Una cosa, in altre parole, è l'ammettere che i termini teorici devono essere interpretati in modo tale da poter essere applicati operativamente agli esperimenti, ma è tutt'altra cosa il sostenere che una tale interpretazione esaurisce il significato del termine teorico in questione.

Vediamo, solamente per accennare al problema, il caso di una grandezza fisica *fondamentale* (vedi cap. 3) come la lunghezza (un esempio assolutamente analogo si potrebbe fare per altre grandezze).

Lo sviluppo scientifico e tecnologico ha portato ad una progressiva estensione dell'utilizzazione delle grandezze fisiche al di fuori del campo della comune esperienza quotidiana. I valori delle grandezze fisiche possono ora coprire molti ordini di grandezza.

E' ovvio che né le lunghezze su scala atomica né le lunghezze di interesse astronomico possono essere misurate per confronto diretto con un campione di unità di misura. Generalizzando, *una stessa grandezza fisica può richiedere tecniche di misura diverse per differenti ordini di grandezza dei suoi valori*.

A questo punto si pone un importante problema di ordine teoretico.

Tecniche di misura diverse corrispondono a definizioni operative diverse: stiamo quindi, in questo caso, parlando della stessa grandezza fisica *o di due grandezze fisiche differenti?*

Cerco di spiegare meglio con un esempio. Ricordando che si chiama *anno-luce*¹ la distanza percorsa da un segnale luminoso in un anno, si può dire che la stella a noi più vicina (a parte il Sole che è, in media, a 149.5 milioni di chilometri), l'*Alfa del Centauro*, dista 4,3 anni-luce dalla Terra, cioè circa 41 trilioni di chilometri, la stella *Sirio*, che appare la più bella e brillante del cielo, 9 anni-luce; la *Polare*, 46. Altre stelle conosciute distano dalla Terra migliaia di anni-luce².

Le stelle aventi una parallasse³ troppo piccola per esser misurata, hanno imposto agli scienziati una "generalizzazione" del concetto di misura di una distanza. I corrispondenti risultati hanno prodotto alcune fra le maggiori scoperte della astronomia.

Le stelle osservate con mezzi spettroscopici hanno colori diversi e si possono raggruppare in categorie (il Sole per es. appartiene alla categoria bianco-giallo). Osservando, fra le stelle la cui

¹ L'*anno-luce* è precisamente lo spazio che la vibrazione luminosa percorre in un *anno tropico* (vedi par. 3.2). Essendo la velocità della luce circa 300.000 km al secondo - e sapendo che in un anno vi sono 31.558.000 secondi - moltiplicando questa cifra per la precedente, si ottiene circa 9.460 miliardi, numero che rappresenta *i chilometri percorsi da un raggio di luce* in un anno; un anno-luce, equivale quindi a circa nove trilioni e mezzo di chilometri

² Quindi le nostre *cognizioni astronomiche* si riferiscono quasi completamente al tempo passato. Quanto si vede della stella più vicina, risale a quattro anni e mezzo fa e - della Polare, a 46 anni fa; le nostre conoscenze su alcune stelle della Via Lattea risalgono a 100.000 anni fa, perché la loro luce impiega centomila anni per attraversare lo spazio e giungere sino a noi

³ Dicesi parallasse di una stella l'angolo - espresso in secondi - sotto cui sarebbe visto da questa il semiasse dell'orbita terrestre, perpendicolarmente alla direzione Terra-Sole. Tanto più un astro è lontano, tanto più piccolo, naturalmente, è il valore della parallasse, che - per nessuna stella - raggiunge il valore di un secondo

parallasse è misurabile, quelle che hanno di massima lo stesso colore, gli astronomi hanno fatto la seguente scoperta: il loro splendore ¹ apparente, ossia il flusso luminoso da esse inviato nei grandi telescopi, varia abbastanza regolarmente come l'inverso del quadrato della loro distanza da noi.

Gli astronomi hanno considerato vera la regolarità della relazione esistente fra splendore apparente e distanza per qualsiasi stella e hanno misurato le distanze delle stelle, la cui parallasse è inapprezzabile, dal loro splendore apparente.

In questo modo, per esempio, si è trovato che le nebulose più lontane sono a distanze dell'ordine di $10^{25} m^2$.

Consideriamo ora distanze atomiche o nucleari. Gli atomi sono sistemi assai complessi. Hanno cioè una *struttura*. Sono (per quello che gli strumenti allo scopo escogitati hanno permesso di capire) atmosfere di elettroni distribuite in volumi dell'ordine di $10^{-30} m^3$. Le loro dimensioni lineari sono dell'ordine di $10^{-10} m$.

In ogni atomo l'atmosfera elettronica elettricamente negativa gravita attorno al nucleo, al centro, che è carico positivamente, ed è costituito dalle particelle elementari pesanti più note: il *protone*, che ha una carica positiva uguale a quella dell'elettrone (ma di segno opposto) e il *neutrone*.

Le dimensioni dei nuclei, e dei neutroni e protoni che li costituiscono, sono molto più piccole di quelle atomiche. Le dimensioni lineari (i diametri per così dire) dei nuclei sono dell'ordine di $10^{-14}/10^{-15} m$. Sono stati misurati e si misurano lanciando contro di essi fasci paralleli di elettroni, protoni od altre particelle elementari aventi velocità estremamente elevate. Spesso la velocità di tali particelle differisce da quella della luce per meno di una parte su un milione.

Alcune delle particelle dei fasci incidenti urtano contro i nuclei e vengono bruscamente deviate dalla loro direzione iniziale. Contando qual è la percentuale di queste deviazioni si può con calcoli più o meno diretti risalire alle dimensioni dei centri urtati.

I metodi, i procedimenti di misura di lunghezze di molti ordini di grandezza differenti sono evidentemente diversi. Quando siamo in presenza di brevissimi spazi o enormi lunghezze che non sono semplicemente un multiplo di una quantità omogenea - o anche per esempio di tempi, di azioni di secondo, di tempi astronomici o di tempi cosmici ³ - siamo quindi in presenza di *concetti diversi*? Quest'opinione è stata avanzata per primo dal fisico e filosofo della fisica Percy Williams Bridgman, in *The Logic of Modern Physics* del 1927. Bridgman sosteneva che essendo il significato di ogni concetto quantitativo definito dalle regole delle procedure sperimentali per mezzo delle quali si compiono le misurazioni in questione, differenti procedure di misurazione non possono non fornire significati differenti al medesimo concetto. E ciò, sottolineava Bridgman, è incoerente dal punto di vista logico; si dovrebbe parlare, piuttosto, di concetti differenti espressi approssimativamente dalla medesima parola. Come ci ricorda Ancarani ⁴ lo stesso Bachelard commentò a lungo questa situazione, e ciò lo portò anche a mostrare che il problema della misura è esemplare della discussione sulla metodologia della scienza in generale:

Bachelard mostra come a diversi ordini di grandezza corrispondono metodi e strumenti diversi di precisione della misura. Ad esempio gli strumenti adatti ad una misura diretta della lunghezza di oggetti ordinari (regolo misuratore) perdono la loro utilità a livelli micrometrici e devono essere sostituiti da strumenti ottici che si basano su principi completamente diversi che sfruttano le proprietà ondulatorie della luce. L'andamento della precisione metrica non può dunque disporsi secondo una sostanziale continuità, al contrario: esso appare profondamente segmentato da una vera e

¹ Lo splendore è misurato in *grandezze*. Per la loro grandezza apparente, le stelle fisse si sogliono distinguere in 21 ordini di cui soltanto i primi sei sono visibili ad occhio nudo: col telescopio possono vedersi fino alla 18^a grandezza e - con la fotografia - fino alla 21^a. La grandezza apparente dipende da due fattori: la *luminosità effettiva* (grandezza assoluta) e la *distanza*; l'*Alfa del Centauro*, ad esempio, sembra assai luminosa soltanto per il fatto che è molto vicina a noi, mentre *Rigel* appare luminosissima - pur essendo molto lontana - perché la sua grandezza assoluta è molto elevata

² Si ritiene che il limite dell'universo sia ad una distanza dell'ordine di $10^{26} m$

³ L'età dell'universo è calcolata dell'ordine di $10^{18} s$; la luce attraversa altresì un nucleo in tempi dell'ordine di $10^{-24} s$. Per quanto riguarda, per ulteriore esempio, le misure di massa, si passa da un ordine di grandezza di $10^{42} kg$, massa di una grande galassia, a quello di $10^{-34} kg$, massa del neutrino

⁴ Ancarani, 1981

propria discontinuità metodica e sperimentale. Tutto ciò comporta "delle vere divisioni nella conquista dell'approssimazione fisica. Si arriva ad una sorta di discontinuo sperimentale risultante dall'impiego di strumenti differenti e di tecniche diverse. Non si trova quella transizione che l'idea di perfezionamento continuo ci sospingeva ad ammettere a priori".(Ancarani, 1981, 54-55)

Un fisico "ordinario" risponderebbe più o meno così: definite due classi di misure differenti, che in linea di principio definiscono due grandezze differenti, se queste classi hanno intersezione non vuota (nel senso che in un certo intervallo riguardano lo stesso oggetto) almeno una misura definisce simultaneamente le due grandezze per il medesimo sistema fisico. Allora le unità di misura (locali) possono essere raccordate e le due grandezze *considerate* le medesime. Personalmente non sono affatto convinto che il dubbio, da un punto di vista teoretico, sia così completamente risolto. E credo che neppure l'opinione di Bridgman ci aiuti granchè. Richard Feynman, premio Nobel per la fisica ed uno dei più geniali scienziati del '900, ammette che in tutti questi casi avremmo a che fare, in effetti, con "definizioni diverse". Ma aggiunge subito:

Però, finchè non vi siano inconsistenze nella nostra comprensione, ci sentiamo *fiduciosi* del fatto che le nostre definizioni siano sufficientemente equivalenti.(Feynman, 1965, trad. it. 5-4)(il corsivo è mio)

Ritengo che questo, in effetti, sia l'atteggiamento giusto. Ma ciò ci deve spingere coerentemente anche a ricercare e studiare i "contesti" culturali e quindi le *ragioni storiche* alla base delle nostre definizioni. La concettualizzazione non è fondata solo sull'oggetto, ma anche sulle condizioni al contorno che hanno motivato questa nostra concettualizzazione:

In primo luogo, un qualche elemento di contingenza viene introdotto dalla sequenza in qualche misura fortuita delle esperienze e delle osservazioni, secondo un'idea che è stata di recente posta in rilievo da James Bryant Conant: "Pare chiaro che lo sviluppo delle moderne concezioni scientifiche avrebbe anche potuto seguire un corso sotto certi aspetti diverso da quello effettivamente seguito, se fosse stata diversa la sequenza cronologica di determinate- scoperte sperimentali. E almeno entro certi limiti si può ritenere che questa cronologia sia puramente accidentale." In secondo luogo, un certo clima intellettuale condizionato da motivazioni di carattere subconscio è in parte responsabile del carattere specifico delle concezioni basilari e dei concetti primitivi.(Jammer, 1957, trad. it. 16)

Per quanto riguarda quest'ultima affermazione di Jammer, ricordo che gli stessi Albert Einstein e Leopold Infeld affermano:

i concetti scientifici sono creazioni libere dell'intelletto umano e non vengono, come potrebbe credersi, determinati esclusivamente dal mondo esterno.(Einstein, Infeld, 1938, trad. it. 43)

Anche i concetti scientifici ci appaiono così sempre più delle "nubi" (o "fuzzy set" per usare un termine di ultima apparizione) alla cui formazione possono aver contribuito analogie e metafore mediate sia dall'intuizione spontanea che dalla comune esperienza quotidiana. Tutto ciò è perfettamente naturale, e non diminuisce il percepito valore dei processi di conoscenza:

Non è certo eccessivo sostenere che il ruolo dell'analogia è molto importante per il progresso del sapere, in quanto riduce l'ignoto e lo strano in termini di ciò che ci è familiare e noto. In questo senso tutto il conoscere è un riconoscere. Studiando la formazione storica di un concetto, ci si dovrebbe sempre ricordare che le metafore sono potenti fattori attivi nell'evoluzione sia del linguaggio sia della scienza; esse hanno un valore strumentale nella trasposizione di un termine dal suo significato usuale alla designazione di un concetto specifico inteso come un costrutto definito entro lo schema concettuale della scienza.(Jammer, 1957, trad. it. 29)

Nello sviluppo storico anche i concetti apparentemente più stabili si "deformano", dando origine ad un processo di "ridefinizione". Un esempio eclatante è fornito dal concetto di temperatura. Assunta alla stregua di un'espressione qualitativa della sensazione di calore, essa divenne successivamente una nozione quantitativa quando fu definita come uno stato della materia misurato mediante la scala graduata di un termometro.

Quando, nell'ulteriore sviluppo di questo concetto, apparve con chiarezza che la "temperatura" così definita dipendeva da certe proprietà della sostanza termometrica, essa fu ridefinita con l'introduzione, nella termodinamica, della cosiddetta scala "assoluta." In tal modo essa fu finalmente inserita in un insieme di relazioni più ampio e più comprensivo, diventando parte integrale della teoria cinetica della materia. E' ovvio che in questo processo il concetto storicamente e psicologicamente posteriore (nel caso della "temperatura" l'energia cinetica di una molecola di gas) viene trattato come anteriore da un punto di vista sistematico e logico, in quanto nozione più basilare e fondamentale. (ivi, 18)

Certo, qui nasce la vera questione: non può accadere che durante il processo di ridefinizione il nostro concetto assuma significati sostanzialmente nuovi, rendendo quindi ingiustificato il nostro atteggiamento quando ci ostiniamo a considerare le varie fasi come appartenenti allo sviluppo del medesimo concetto?

Gli operativisti, i quali reclamano l'identità tra il significato di un concetto e i procedimenti mediante i quali lo si misura, potrebbero certamente sollevare obiezioni al fatto stesso di considerare queste varie fasi come diverse modificazioni di una medesima nozione; d'altro canto i realisti[...]sostenendo che le asserzioni scientifiche sono qualcosa di più rispetto a complessi di mere convenzioni, non avrebbero probabilmente alcuna obiezione da fare. Per lo storico delle scienze, questo problema si riduce tuttavia a una questione puramente verbale. Non interessandosi in modo preminente del problema della realtà, e cioè della questione relativa alla misura in cui la struttura interna del sistema ipotetico-deduttivo della scienza rifletta o trasciva un possibile substrato reale giacente al di sotto del continuo indifferenziato delle impressioni sensoriali, lo studioso della storia delle idee si trova, in questo caso, nella stessa posizione dello scienziato che lavora nel proprio laboratorio. Che la sua ricerca sia uno studio dello sviluppo di un singololo concetto, oppure di una catena di nozioni correlate, è per lui una questione del tutto irrilevante. In altre parole, che le varie definizioni tendano a uno e a un solo *definiendum* in quanto parte della realtà che trascende la conoscenza, oppure che ciascuna modificazione del concetto debba esser considerata un elemento indipendente del sistema logico, è problema da lasciare ai metafisici. (ivi, 19-20)

Lo studio della storia può quindi cercare d'illuminare i concetti della scienza e della tecnologia d'oggi. Prima di tutto chiarendo le premesse che, nel particolare contesto culturale, giocano un ruolo nella scelta dei significati da attribuire ai termini in questione:

[...]sembra[...]sempre più plausibile l'ipotesi che i significati dei termini teorici non siano mai stabiliti una volta per tutte e dipendano dalle premesse teoriche che di volta in volta si assumono. Ovviamente esistono dei limiti alle trasformazioni estreme dei significati, ma sono limiti non regolamentati[...]che si possono stabilire solo in senso storico[...]. (Continenza, Gagliasso, 1996, 17)

Di conseguenza, anche quando il termine sembra assumere una specificazione apparentemente rigorosa attraverso la sua definizione in ambito tecnico, bisogna tener conto che la sua identificazione non si è certo conclusa ¹. Essa ottiene il proprio significato solo attraverso il contesto, che continua a modificarsi storicamente, della struttura concettuale entro cui è situato.

E quindi, anche se Popper, nella Prefazione alla prima edizione italiana della *Logica della scoperta scientifica* del 1970, afferma che "dobbiamo smetterla di preoccuparci delle parole e dei loro significati, per preoccuparci invece delle teorie criticabili, dei ragionamenti e delle loro validità" ²,

¹ Quanto importanti siano lo studio e la riflessione teorica sulla terminologia, in particolare in ambito metrologico, è ben mostrato da alcune righe introduttive al documento (*International vocabulary of basic and general terms in metrology*) allegato alla Guida ISO:

In order to try and resolve this problem [Vocabulary] at an international level, the ISO Metrology Group decided to propose to the four main international organizations which are concerned with metrology (BIPM, IEC, ISO and OIML) that there should be a joint action to produce a common terminology. To this end, a task group was set up to co-ordinate the preparation of a vocabulary of general terms used in metrology. The task group [...] produced a draft vocabulary as their starting point which was widely circulated by the four participating organizations. Many comments were received, occupying several hundreds of pages. They were all examined at a series of meetings of an international joint working group, composed of experts appointed by each of the four organizations. Some of the comments gave rise to long, and at times impassioned, discussions. (ISO, 1993, annex 4)

Ricordo che BIPM sta per Bureau international des poids et mesures, IEC per International Electrotechnical Commission, ISO per International Organization for Standardization e OIML per International Organization for Legal Metrology

² Popper, vedi trad. it., 1990, XLV

credo non si possa non riflettere sulle parole usate dall'epistemologo francese Georges Canguilhem nel rispondere:

Ironizzare sull'importanza accordata ai concetti è più facile che comprendere perché senza di essi non si dia scienza.(Canguilhem, 1988, cit. in Continenza, Gagliasso, 1996, 25)

Einstein, nel 1916 (anno dell'edizione originale di *La relatività, esposizione divulgativa*), nello spiegare in che modo era giunto a formulare il concetto di tempo "relativo", riconosce l'importanza di un tale atteggiamento critico e i contributi che possono venirne dalla riflessione filosofica:

Perché mai è necessario trascinare giù dalle sfere olimpiche di Platone i concetti fondamentali del pensiero scientifico, e sforzarsi di svelare il loro linguaggio terrestre? Risposta: allo scopo di liberare questi concetti dai *tabù* loro annessi, e pervenire così a una maggiore libertà nella formazione dei concetti. Costituisce il merito imperituro di D.Hume e di E. Mach quello di avere, più di tutti gli altri, introdotto questa mentalità critica.(Einstein, 1916, trad. it. 300)

Il discutere dei concetti in chiave storica può essere di aiuto, inoltre, a cogliere lo spessore delle stesse teorie scientifiche (l'esempio della teoria della relatività è davvero sin troppo noto; a questo proposito non dovremmo mai dimenticare, d'altro canto, che i concetti sono innanzi tutto degli strumenti cognitivi che ci permettono di mettere ordine nella realtà che percepiamo).

Einstein stesso introduce un primo, ma davvero decisivo esempio, di come i concetti possano essere dei veri e propri "generatori di teorie"¹:

La scienza ha attinto dal pensiero prescientifico i concetti di spazio, di tempo e di oggetto corporeo[...]e li ha modificati e resi più precisi. Il primo risultato significativo da essa conseguito è stato lo sviluppo della geometria euclidea, la cui formulazione assiomatica non deve renderci ciechi circa la sua origine empirica (la possibilità di giustapporre corpi solidi).(*ibidem*)

Sempre Einstein poi, nel 1953, nello scrivere la prefazione alla prima edizione di un importante lavoro sul concetto di spazio di Jammer² usa delle parole davvero emblematiche nel descrivere l'atteggiamento che di norma gli scienziati di mestiere dimostrano nei confronti dei concetti scientifici con i quali ogni giorno, direttamente o indirettamente, hanno a che fare:

Nel tentativo di giungere a una formulazione concettuale dell'insieme enorme e confuso dei dati di osservazione, lo scienziato fa uso di un gran numero di concetti assorbiti praticamente col latte materno e raramente o mai è consapevole del loro carattere eternamente problematico. Egli usa questo materiale concettuale, o, più precisamente, questi strumenti concettuali del pensiero, come qualcosa di ovvio, di immutabilmente dato; qualcosa che ha un valore oggettivo di verità che non si deve quasi mai, e in ogni caso non seriamente, mettere in dubbio. Come potrebbe fare altrimenti? Come sarebbe possibile la scalata di una montagna, se l'uso delle mani, delle gambe e degli strumenti dovessero essere confermati passo per passo dai principi della scienza meccanica? Eppure nell'interesse della scienza è necessario impegnarsi ripetutamente nella critica di questi concetti fondamentali in modo da non esserne dominati inconsciamente. Ciò diviene evidente specialmente in quelle situazioni che implicano sviluppi di idee in cui l'uso conseguente di concetti fondamentali tradizionali ci conduce a paradossi di difficile risoluzione. A parte i dubbi che possono sorgere quanto alla giustificazione dell'uso di questi concetti, e cioè, anche nei casi in cui questi dubbi non toccano da vicino i nostri interessi, c'è pur sempre un interesse puramente storico circa le origini o le radici dei concetti fondamentali. Tali indagini, sebbene appartengano puramente al campo della storia del pensiero, non sono tuttavia indipendenti, in linea di principio, da tentativi di un'analisi logica e psicologica dei concetti fondamentali. Ma le limitazioni imposte dalla specializzazione professionale sono tali che soltanto raramente troviamo una persona che abbia la preparazione filologica e storica richiesta per l'interpretazione critica ed il confronto dei documenti, che coprono diversi secoli, e che al tempo stesso possa valutare il significato dei concetti in discussione per la scienza nel suo insieme.(Einstein, 1954, trad. it. 8)

Non è un caso quindi che, almeno per quanto riguarda la fisica, siano davvero rari i contributi degli scienziati su tali tipi di discussione critica. Lo sviluppo storico dei concetti scientifici, nonostante la

¹ Continenza, Gagliasso, 1996; Gagliasso, 2001

² Jammer, 1954

sua fondamentale importanza nella scienza e nella filosofia della scienza, non ha formato finora l'oggetto di un'indagine storica esauriente e coerente.

Una autorevole eccezione sono sicuramente tre opere del citato Jammer¹. Come detto, Einstein volle scrivere personalmente una appassionata *Premessa* alla prima delle tre, due anni circa prima di morire. In questo documento, poche righe dopo le affermazioni sopra riportate, Einstein è ancora più esplicito riguardo al tema introdotto, ed in particolare afferma:

Lo storico tenta di superare questa incertezza col confronto dei testi e prendendo in considerazione il quadro, costruito dalla critica, del bagaglio culturale dell'epoca in questione. Lo scienziato odierno, invece, non ha essenzialmente una preparazione o un orientamento da storico; egli non è in grado di formare in questo modo le sue opinioni sull'origine dei concetti fondamentali, ma è piuttosto incline farle risultare intuitivamente dalla sua rudimentale conoscenza delle conquiste della scienza nelle diverse epoche storiche. Egli, tuttavia, sarà grato allo storico se quest'ultimo riesce a correggere in maniera convincente tali opinioni di origine puramente intuitiva. (ivi, 9)

L'empirismo logico radicale postulerebbe in ogni caso la possibilità di un linguaggio in cui i concetti hanno un significato immutato nel tempo, e in effetti, come abbiamo visto nel caso di Popper, alcuni ritengono ancora che, almeno nel campo delle scienze fisiche, le analisi riguardanti il formarsi e lo svilupparsi dei concetti utilizzati nella formulazione di teorie non siano da considerarsi attività di grande interesse. Presentare una compiuta discussione di questo dibattito sarebbe lungo ed al di fuori degli scopi introduttivi che questo scritto si propone. Sicuramente si può sostenere, però, che differente è stato fino ad ora il caso della biologia, proprio per il carattere storico che questa scienza ha assunto.

Nelle scienze biologiche[...]i progressi più importanti furono ottenuti, nella maggior parte dei casi, con l'introduzione di nuovi concetti, o con l'affinamento di concetti esistenti. Comprendiamo il mondo più efficacemente attraverso miglioramenti concettuali che attraverso la scoperta di fatti nuovi, benché le due cose non si escludano reciprocamente[...]i fenomeni che sono ora spiegati dalla selezione naturale erano largamente noti molto prima di Darwin, ma ebbero un senso solo quando fu introdotto il concetto di popolazioni consistenti di individui unici[...]Non sono troppo lontani dal vero coloro i quali sostengono che il progresso della scienza consiste principalmente nel progresso dei concetti scientifici. (Mayr, 1982, trad. it. 25)

Una seconda riflessione si pone subito a proposito del fatto che per affrontare in modo scientifico lo studio di un determinato fenomeno, occorre dapprima selezionare le grandezze significative (nella Guida ISO definite *variabili di influenza*). Come ricordavo nel paragrafo precedente questa selezione intanto introduce indubbiamente un elemento di discrezionalità (ovvero di intersoggettività, visto che queste scelte sono certamente compiute all'interno di una pratica e di una tradizione culturale elaborate collettivamente dalla comunità degli scienziati di una specifica disciplina). Una tale procedura è poi affetta almeno da un altro problema: identificare un pezzo di mondo per darne una descrizione come sistema chiuso è un'operazione mentale che solo in alcuni casi limitati ha una vera corrispondenza nella realtà. Ogni porzione di mondo riceve, attraverso i propri contorni, influssi ambientali che lo influenzano nella sua evoluzione. Vediamo quello che dovrebbe essere l'esempio più semplice, l'atomo di idrogeno, descritto dal fisico F. Tito Arecchi:

l'elettrone di un atomo di idrogeno interagisce col protone del nucleo e la dinamica corrispondente ammette una soluzione esatta. Ma poi l'elettrone interagisce anche con i campi di radiazione di tutte le altre cariche dell'universo, e ciò implica delle correzioni sensibili che vanno calcolate con procedure ben più elaborate che la soluzione dell'equazione di Schrödinger o di Dirac.

Questa è la base del dibattito attuale sulla cosiddetta *complessità*: l'immagine del mondo circoscritto in una stanza, in cui gli oggetti hanno una collocazione e funzione precisa, non è spesso sufficiente; occorrerebbe in teoria includere tutto quello che viene dal di fuori. (Arecchi, 2000, 9).

Infatti si originano continui scambi con l'ambiente circostante che richiedono una struttura "aperta" alla stessa descrizione scientifica. L'irruzione, o *emergenza*, di tanti aspetti nuovi non inclusi nelle

¹ Jammer, 1954, 1957, 1961

informazioni e nei dati iniziali rappresenta la parte più innovativa di questa nuova avventura interdisciplinare:

non limitarsi cioè alla scienza delle interazioni fondamentali, da cui poi estrarre, con una procedura pitagorico-platonica, tutti i possibili comportamenti e invece adeguare la descrizione scientifica del mondo agli elementi di realtà che intervengono in ciascuna situazione.(ivi, 10).

Ciò significa rendersi innanzi tutto conto del fatto che qualunque scienza, che opera nell'ambito di precise formulazioni linguistiche, è sempre un taglio che facciamo sui possibili modi di leggere la realtà. Qualunque teoria seleziona un numero limitato di aspetti da spiegare: in pratica nel rappresentare (alcuni preferiscono il termine *costruire*, vedi anche cap. 3) la realtà facciamo uso di una pluralità di moduli che corrisponde ad una pluralità di *punti di vista*. Consideriamo, per fare un esempio, l'irreversibilità dei fenomeni naturali che *emerge* quando utilizziamo gli strumenti teorici (punto di vista) della termodinamica nei fenomeni macroscopici. Ebbene, a livello della fisica atomica ¹, la freccia del tempo non esiste, non c'è nessuna freccia del tempo, le leggi della fisica sono perfettamente reversibili; i sistemi fisici tendono verso uno stato di equilibrio, però tutto è simmetrico, sia che il tempo tenda a più infinito che a meno infinito.

Tutto ciò ha un'influenza diretta ed immediata innanzi tutto sulla metodologia della misura:

i protocolli di misura non sono fissati una volta per tutte, non fanno parte integrante del linguaggio formale in cui si è congelata una teoria scientifica, ma in ogni atto di misura c'è un aggiustamento della sensibilità e risoluzione degli apparati per adeguarsi alla realtà locale e questo aggiustamento precede la stessa formulazione linguistica dell'esperimento. Già sappiamo che ciò avviene a livello percettivo. Ad esempio, vedere non è registrare un campo di segnali su un ricevitore passivo, come fa una macchina fotografica, ma è un dialogare con la realtà in quanto la memoria archiviata di situazioni precedenti modifica le soglie neuronali in modo da esaltare certi dettagli e trascurarne altri. Il vedere è perciò un dialogo attivo col mondo che esclude, da una parte la ricezione passiva legata al dualismo fra *res cogitans* e *res extensa*, e dall'altra esclude una "autopoiesi" per cui non si esce mai da se stessi e si continua a prendere coscienza solo di proprie rappresentazioni interne. In effetti, i meccanismi di sincronizzazione neuronale di cui ci parlano i neurofisiologi implicano delle correlazioni fra flussi di segnali provenienti dall'esterno (*bottom-up*: dal basso verso l'alto) e flussi di congetture provenienti dalla memoria (*top-down*: dall'alto verso il basso). La percezione vista come armonizzazione di questi due flussi implica una sintesi complessa fra due punti di vista che - se isolati - appaiono semplicistici, quali l'empirismo della tabula rasa da una parte e il solipsismo dell'autopoiesi dall'altra.(ivi, 11).

Su questa linea di una conoscenza che implichi un ruolo attivo dell'intelletto ed allo stesso tempo non neghi aspetti della realtà si possono leggere i temi della ricerca scientifica del futuro.

¹ Almeno se si sta soltanto alle equazioni fondamentali della meccanica quantistica

2. DALLE ORIGINI AL SISTEMA METRICO

Measurement is numbers, and the manipulation of numbers is mathematics. Thomas Bradwardine, Schoolman and archbishop of Canterbury in the fourteenth century, said, "Whoever then has the effrontery to study physics while neglecting mathematics, should know from the start that he will never make his entry through the portals of wisdom."

Alfred W. Crosby

Le unità di misura ¹ e i relativi campioni (vedi par. 4.2) che uno scienziato o un tecnico utilizzano per poter esprimere i risultati relativi alle osservazioni di un qualsiasi fenomeno sono il frutto di un lungo lavoro. Diverse sono state, infatti, le questioni ² che gli studiosi hanno dovuto affrontare e superare per giungere ad ottenere quel sistema di cui oggi tutti disponiamo. Prima fra tutte la scelta di un numero adeguato di grandezze fisiche indipendenti da assumere come *fondamentali* e dalle quali poter derivare tutte le altre cosiddette grandezze *derivate* (vedi cap. 3). Alla scelta di tali grandezze ha fatto seguito la necessità di dover adottare un *sistema di unità di misura*, che permettesse la misurazione delle grandezze in gioco. Un importante problema è stato quello relativo *alla istituzione e costruzione di campioni rappresentativi* delle unità di misura scelte, in modo tale da poter disporre di un riferimento attendibile e controllabile ³. In questo modo è facile comprendere l'importanza rivestita dalle unità di misura e dai loro campioni anche in ambiti diversi da quello puramente scientifico di ricerca pura, come ho già sottolineato in questo scritto.

Il processo storico che ha portato alla scelta di un sistema internazionale di misura è stato davvero lungo e complesso, ed è stato caratterizzato da alcune tappe culturali fondamentali che hanno reso possibile tale standardizzazione certamente, ed inevitabilmente, non conclusa. Ognuna di queste tappe è segnata a sua volta da importanti fasi distinte; cionondimeno si può iniziare distinguendo tre tappe principali.

La prima, iniziata davvero agli albori della civiltà e conclusa, si può dire, solo con la nascita della scienza moderna è stata sicuramente caratterizzata da unità di misura di tipo *antropomorfo* e da grande eterogeneità, anche ovviamente nei metodi di misurazione. Al suo interno questa tappa è sicuramente caratterizzata da una prima fase in cui le unità di misura sono individuate da *rappresentazioni concrete*, e da un periodo successivo in cui siamo ormai in presenza di *concetti astratti* (si passa, per fare un esempio, dal *mio piede* al *piede in generale*).

Con la nascita della scienza moderna (seconda tappa) che coincise, come vedremo, con l'abbattimento della barriera fra cielo e terra che aveva caratterizzato il sistema aristotelico, anche il mondo terreno diventa regolare, semplice, ripetibile e quindi suscettibile di *misurazioni "precise"*. Il passaggio dal modello di pensiero qualitativo a quello quantitativo raggiunge ora, in Europa occidentale, il suo culmine. All'interno del nuovo "paradigma galileano", e principalmente poi con la successiva nascita della società moderna, nasce così un nuovo approccio metrologico, caratterizzato dalla ricerca della precisione e quindi di una valutazione "oggettiva" della, potremmo dire, *misura della misura*, ovvero dalla nascita della *teoria degli errori*. Certo, diversi sono i fattori che, come cercherò di mostrare, hanno favorito questa svolta. La considerazione di fondo non può comunque che riferirsi al contesto complessivo all'interno del quale il confronto fra le due culture (aristotelica e moderna) si è svolto:

Il sistema aristotelico comincia a diventare inadeguato nel momento in cui la priorità dell'esigenza di una visione unificante del mondo terrestre si indebolisce di fronte al moltiplicarsi di fenomeni celesti e terrestri inaspettati, al

¹ Vedi anche Dresner, 1971

² Vedi Fazio, 1995

³ Insieme a tutto questo, parallelamente si è anche sviluppata una attività per la ricerca di una metodologia condivisa per la rappresentazione dei risultati di una misurazione (vedi cap. 6)

sorgere di nuove dottrine filosofiche e religiose, alla scoperta di civiltà e di popoli sconosciuti. E nel momento in cui cresce la spinta a costruire mezzi e strumenti più efficaci e perfezionati per l'offesa e la difesa, per l'idraulica, per la navigazione, per le tecniche estrattive e metallurgiche, per le arti della manifattura. E' il mutamento di contesto che Alexandre Koyré sintetizza con le due formule: *dal mondo chiuso all'universo infinito e dal mondo del pressappoco all'universo della precisione.* (Cini, 1994, 22)

La terza tappa ha iniziato a delinarsi con chiarezza solo recentemente, anche se le sue origini vanno, almeno in parte, ricercate nella nascita del linguaggio della meccanica quantistica, che rompe con la tradizione scientifica galileiana fondata sul determinismo e su un oggettivismo "ingenuo". Forse l'influenza più importante esercitata dall'avvento del linguaggio della microfisica, almeno per quanto concerne i nostri temi, riguarda l'individuazione dei meccanismi "esplicativi" considerati validi, in quel momento, nella scienza. In situazioni differenti le comunità scientifiche si dichiarano soddisfatte da spiegazioni di natura concettuale assai differente. E l'esempio che ci interessa è, come vedremo, la scelta fra spiegazioni deterministiche e spiegazioni probabilistiche. Einstein, come noto, non accettò mai l'idea di un "Dio che gioca a dadi con il mondo". Oggi invece, dopo l'avvento della meccanica quantistica prima e la recente riscoperta del cosiddetto "caos deterministico" poi, una spiegazione che invoca il carattere intrinsecamente aleatorio di un dato fenomeno non solleva alcuna obiezione. Per quanto riguarda il caos deterministico ¹ mi limito qui a ricordare che già alla fine dell'Ottocento il grande matematico Henri Poincaré dimostrò che, anche per un sistema così semplice come quello di tre corpi mutuamente interagenti non esistono soluzioni esatte delle equazioni della dinamica ². Come fa notare Cini ³, per quasi settant'anni la comunità scientifica quasi ignorò questa scoperta, e solo negli anni 60-70 il caos deterministico venne riconosciuto come questione scientificamente rilevante (e questo è certamente un esempio dei nessi tra istituzioni scientifiche e contesto socioculturale). Sappiamo oggi che cercare di studiare l'evoluzione di un sistema come se fosse isolato, trascurando le piccole perturbazioni esercitate dall'ambiente circostante (vedi anche paragrafo precedente) è una illusione teorica. Per esempio è l'instabilità dell'atmosfera rispetto a piccole variazioni delle condizioni iniziali che caratterizza la meteorologia e rende di fatto impossibili le previsioni a lungo termine.

La terza tappa è caratterizzata in particolare da un approccio diverso alla valutazione e alla definizione di *incertezza di misura*. E' un approccio che mette in discussione il *concetto ingenuo di precisione* di una misura (che nasce appunto dalla fede in un mondo retto da leggi universali immutabili e caratterizzato dal determinismo) ed è parte *di un nuovo paradigma scientifico* che rinuncia ad un concetto idealizzato di oggettività ⁴. Più in generale questo paradigma accetta di fare a meno della priorità di categorie come semplicità, ordine, regolarità per mettere al loro posto quelle di complessità, disordine, caoticità ove risulti impossibile (e ciò è la norma in un mondo che si rivela sempre più essere un organismo complesso) ricondurre queste ultime alle prime. Il fatto che il mondo sia *governato* da leggi immutabili è oggi per esempio ampiamente discusso. Per Richard Feynman "la conoscenza delle leggi fisiche non ci dà, automaticamente e direttamente, una comprensione degli aspetti essenziali del mondo[anzi]la natura sembra essere fatta in modo che le cose più importanti del mondo reale appaiano essere conseguenze complicate e accidentali di una molteplicità di queste leggi" ⁵. La scoperta che la quasi totalità dei fenomeni della natura, anche alle nostre dimensioni ordinarie, si presenta di norma sotto forma di caoticità dovuta all'azione di forze non lineari che causano instabilità dinamica, mette in discussione alcuni aspetti del mito fondamentale della scienza tradizionale: *quello della misura oggettiva e precisa della natura che ci*

¹ Per una introduzione a questo fenomeno ed alle sue conseguenze si può vedere per esempio Gleick, 1989

² Nella *Proposition 66* dei *Principia* (I edizione 1687, II 1713) Isaac Newton aveva affermato che una soluzione esatta al problema dei tre corpi "*exceeds, if I am not mistaken, the force of any human mind*"

³ Cini, 1994

⁴ Avvertenza importante: per quanto riguarda la discussione critica di questa terza tappa rimando soprattutto all'ultimo capitolo. Questa riflessione richiede infatti, come premessa, l'introduzione della teoria convenzionale degli errori, che sarà presentata a sua volta nei capitoli 6, 7, 8. Nei prossimi paragrafi di questo capitolo saranno così introdotte le prime due delle tre tappe appena menzionate

⁵ Cit. in Cini, 1994

circonda e quindi della sua prevedibilità (ricordo che per sistema dinamico non lineare si intende un sistema caratterizzato da equazioni del moto nelle quali le variabili compaiono elevate ad una potenza maggiore di uno):

La precisione[...]è uno strumento fondamentale di approfondimento della conoscenza e di conseguenza anche di perfezionamento del progetto di trasformazione artificiale della natura, soltanto in un mondo retto da leggi lineari. In questo caso infatti quanto più piccole sono le perturbazioni casuali dei fattori d'ingresso, tanto più piccole sono le deviazioni che il sistema introduce rispetto ai valori prefissati dell'effetto voluto in uscita. In un mondo regolato da leggi non lineari, tuttavia, la ricerca affannosa della precisione non garantisce più nulla[...]Naturalmente questo non significa ritornare alla *scienza* di Aristotele. Significa piuttosto riconoscere, arricchiti dall'esperienza e dalle conoscenze acquisite in tre secoli di analisi sempre più spinta e dettagliata della realtà, che la *cultura* del futuro ha bisogno di recuperare alcuni elementi di saggezza che caratterizzavano la categorizzazione percettiva e concettuale della natura da parte di civiltà che avevano con essa un rapporto più equilibrato della nostra.(ivi, 291-293)

Voglio ora accennare anche ad un commento, sempre di Cini, sul *cambiamento di contesto complessivo* che starebbe favorendo il successo del nuovo paradigma scientifico. Secondo Cini l'avvento del paradigma scientifico tradizionale si era accompagnato (e mutuamente rafforzato) *con l'affermazione della cultura del macchinismo*, ambedue basati su un'idea di mondo riducibile ai suoi componenti e retto da leggi lineari (il compito della scienza è in questo caso quello di realizzare, potremmo dire, l'obiettivo della "mente superiore" pensata da Laplace che, avendo cognizione in un certo istante di tutte le condizioni al contorno e delle leggi universali potrebbe conoscere perfettamente tanto l'avvenire che il passato). La ragione di questo successo è così spiegata:

Basta pensare che, fin dalla sua nascita più di duecento anni fa, il sistema sociale basato, per dirla con l'economista Piero Sraffa, sulla "produzione di merci a mezzo di merci", ha trovato nelle macchine il meccanismo fondamentale del suo sviluppo. Ma non si tratta soltanto di un rapporto strumentale. E' molto di più. La scomposizione del processo produttivo in unità indipendenti progettate in modo che a un input dato corrisponda un output determinato riproduce puntualmente la scomposizione della realtà che è l'essenza del programma della scienza moderna. D'altra parte l'obiettivo dell'illimitata crescita del capitale che è il motore della sopravvivenza e dello sviluppo di questo sistema sociale, si realizza pienamente mediante una crescita illimitata degli artefatti prodotti in quel processo produttivo che è al tempo stesso modello e risultato della rappresentazione del mondo fornita dalla cultura del macchinismo.(ivi, 290-291)

Dietro questa cultura ci sarebbero non solo quindi le idee e la riflessione teorica, ma gli interessi di istituzioni sociali ed economiche. Ebbene, gli obiettivi di crescita illimitata descritti entrano ora, almeno secondo Cini, in discussione, favorendo appunto la crisi del paradigma tradizionale. Innanzi tutto per i seguenti motivi:

La coscienza della finitezza dell'ecosistema terrestre sta[...]diffondendosi rapidamente. La crescita esponenziale di merci, sempre più effimere ed ingombranti, il prevedibile esaurimento delle stesse risorse che alimentano questo processo, il limite fisico alla capacità della biosfera di riciclare i rifiuti che si accumulano, sono tutti fattori che sottolineano la necessità di abbandonare l'illusione di vivere in un universo infinito.(*ibidem*)

Riprenderò la discussione sull'intrecciarsi dei fattori economici e sociali con quelli filosofici (oltre che con quelli interni più "canonici") nell'influenzare il progresso scientifico e tecnologico nei prossimi paragrafi di questo capitolo, delineando appunto lo sviluppo storico della scienza della misura.

2.1 Gli inizi: il numero come misura

In its most basic psychological sense numbers appears to be a quality of sensible objects. For example the numerousness of a set of objects is just as much a perceptible quality of reality as colour, flavour, height, weight and so on.

Charles Brainerd

“What’s one and one?”
 “I don’t know” said Alice. “I lost count”.
 “She can’t do addition”. Said the Red Queen.
 Lewis Carrol

I numeri hanno esercitato il loro fascino sin dall’alba della civilizzazione, ed una grande parte della prima preistoria della scienza e della tecnologia può essere riassunta nella scoperta, da parte di diverse civiltà, di ciò che oggi chiamiamo numeri ¹. Ma la loro origine andrebbe ricercata addirittura in fasi precedenti, come ci sottolinea uno storico della matematica:

Le nozioni originarie collegate ai concetti di numero, grandezza e forma si possono far risalire alle epoche più antiche in cui visse l'uomo e vaghi accenni a nozioni matematiche si possono vedere adombrati in forme di vita che forse hanno anticipato il genere umano di parecchi milioni di anni. Darwin in *L'origine della specie* notò che certi animali superiori posseggono capacità come la memoria e l'immaginazione, e oggi è ancor più evidente che le capacità di distinguere il numero, la dimensione, l'ordine e la forma - rudimenti di un istinto matematico - non sono proprietà esclusiva del genere umano. Esperimenti effettuati con corvi, per esempio, hanno mostrato che almeno certi uccelli sono in grado di distinguere insiemi contenenti fino a quattro elementi. (Boyer, 1968, trad. it. 1)

Pitagora scoprì, già nel VI secolo a.C., che l’armonia musicale dipendeva da rapporti di piccoli numeri interi e concluse che ogni cosa nell’universo era Numero. Ma la nascita della matematica ², pur tenendo ben presente che il problema della natura dei relativi concetti è sicuramente dibattuto, si può far risalire almeno in larga parte a problemi pratici: le prime forme di misura ne costituiscono così i primi passi.

Probabilmente il concetto di numero iniziò a delinarsi in situazioni quotidiane, ad esempio durante la distribuzione del cibo o in occasione dello scambio di merci, nei giochi, nelle scommesse, nei balli folcloristici, nei festini di guerra o durante la celebrazione di riti religiosi: tutte le volte, cioè, in cui era necessario confrontare i componenti di un gruppo – persone, animali, cose, avvenimenti celesti o terreni –, con i componenti di un altro gruppo ³. Il concetto di numero fu così probabilmente elaborato all’interno di una cultura specifica che inventò dei metodi indiretti di confronto tra i gruppi, nel momento in cui non era nelle condizioni di poter operare agevolmente raffronti diretti: questo avveniva, in particolare, quando gruppi di oggetti dovevano essere comparati in momenti successivi e non contemporaneamente. Il confronto indiretto implicava l’idea che i membri di un dato gruppo di oggetti o di eventi potessero essere associati con un altro gruppo attraverso un terzo insieme che fungesse da intermediario, come ad esempio dita, sassolini, gettoni, tacche, lacci e nodi.

Un osso di lupo di circa 30.000 anni fa ⁴, scoperto in Cecoslovacchia, presenta una serie di 55 tacche, raggruppate per cinque. Questa sembra una prova che una forma di numerazione era già nota all’*Homo sapiens* in epoca molto remota. La nascita dei numeri come concetto astratto è un processo che si sviluppa comunque in modo graduale, parallelamente all’evoluzione della specie umana ed ai suoi rapporti con l’ambiente circostante. Ma si può dire che gli uomini compirono un passo davvero fondamentale il giorno in cui impararono a contare, cioè ad astrarre, come appena introdotto, la proprietà comune a un gruppo di cinque capre e ad un cesto con cinque pere. Così riassume Boyer:

E' chiaro che originariamente la matematica nacque come un aspetto della vita quotidiana dell'uomo; e se è valido il principio biologico della "sopravvivenza del più adatto", la durata del genere umano probabilmente non è del tutto priva di rapporto con lo sviluppo di concetti matematici nell'uomo[...]il contrasto tra un solo lupo e molti lupi, tra una pecora e un gregge, tra un albero e una foresta suggerisce che un lupo, una pecora e un albero hanno qualcosa in comune: la loro unicità. Nella stessa maniera si sarebbe osservato che certi altri gruppi, come le coppie, possono essere messi in

¹ Vedi Stewart, 1995

² Vedi anche Menninger, 1969

³ Vedi Roche, 1998

⁴ Vedi Morini, 1981

corrispondenza biunivoca. Le mani possono essere appaiate con i piedi, con gli occhi, con le orecchie o con le narici. Questo riconoscimento di una proprietà astratta che certi gruppi hanno in comune, e che chiamiamo numero, rappresenta un grande passo verso la matematica moderna. E' inverosimile che tale riconoscimento sia stato dovuto alla scoperta di un singolo individuo o di una singola tribù: si trattò più probabilmente di una consapevolezza graduale (ivi, 2)

Il Paleolitico superiore, designato dagli autori con termini diversi quali *Miolithique*, *Leptolithique*, *Höheres Jägertum*¹, fu un periodo caratterizzato da rapide trasformazioni, tutte determinate da quei progressi tecnologici che permisero alle società preistoriche, in cui la caccia rappresentava la principale attività, di raggiungere il culmine del loro sviluppo. Fu durante questa fase, infatti, (da 40000 a 12000 anni fa), che gli sviluppi tecnologici, particolarmente evidenti nella *sfera economica primaria* - vale a dire nella creazione di utensili - iniziarono a influenzare decisamente la sfera intellettuale e, di conseguenza, l'organizzazione sociale e la vita spirituale. Proprio in questo periodo nacque la capacità degli esseri umani di elaborare *sistemi di segni*: in un'epoca in cui procacciarsi il cibo iniziò a non essere più un problema di sopravvivenza, fu possibile assistere all'evoluzione delle attività non produttive.

L'evoluzione della società umana avvenne sì di norma in modo graduale e costante, ma subì talvolta rallentamenti e talaltra notevoli accelerazioni, al presentarsi di condizioni opportune. Si trattò di cambiamenti, salti qualitativi, spesso definiti "rivoluzioni" a causa della loro radicalità, che favorirono il passaggio brusco a un livello intellettualmente superiore.

Quanto i cambiamenti nella sfera economica influenzino la "sovrastruttura" spirituale, e quanto viceversa gli sviluppi concettuali e teorici rappresentino il punto di partenza per nuovi salti tecnologici è sicuramente dibattuto (mostrerò al riguardo l'interessante e autorevole tesi di Koyrè nel par. 2.4). E' evidente comunque che l'evoluzione continua di un sempre più numeroso complesso di utensili si accompagna direttamente con il consolidarsi di una sfera concettuale.

Il risultato più importante di una simile evoluzione è il linguaggio articolato accanto a diversi altri mezzi di comunicazione. Ciò ha reso possibile lo scambio di dati dell'esperienza, di informazioni[...]Accanto alle linee o tacche isolate presenti sulle ossa o sugli oggetti in pietra, si osserva la comparsa di segni[...] (Klima, 1994, trad. it. 202)

Queste forme di *annotazione* rappresentano le prime *rudimentali rappresentazioni di misurazioni* e precedono nel loro contenuto concettuale l'invenzione stessa della scrittura. Dalla scoperta, avvenuta oltre un secolo fa in giacimenti del Paleolitico superiore, in Francia, di frammenti ossei recanti serie di incisioni, gli archeologi² hanno proposto un gran numero di ipotesi per interpretare questi oggetti: si tratterebbe di annotazioni di caccia (per tenere il conto delle prede uccise), indicazioni del numero di persone partecipanti a una cerimonia o anche primitivi sistemi di notazione o di vero calcolo (avverto qui il lettore che per quanto riguarda le prime annotazioni e misure relative al tempo rimando al par. 3.2). Per usare una espressione di Denise Schmandt-Besserat³, studiosa delle espressioni che hanno preceduto la scrittura vera e propria, *sembra proprio che l'uomo abbia imparato prima a far di conto che a scrivere il proprio nome*.

Da subito è inoltre ipotizzabile un legame tra il disporre di una seppur rudimentale capacità di misurare e la detenzione del potere:

Gli elementi di continuità indicano che nel corso del Paleolitico superiore la produzione e l'impiego dei sistemi di memoria artificiale avvennero in contesti sociali simili. È possibile che solo pochi individui fossero pienamente a conoscenza dei codici più complessi, e che questa competenza sia stata solo uno degli elementi del ruolo che costoro rivestivano nelle società paleolitiche. Gli individui specializzati nella conservazione della memoria dei gruppi umani senza scrittura - anziani, iniziati o sciamani - sono senza dubbio coloro che realizzarono questi oggetti e trasmisero i codici a essi associati. (D'Errico, 2002, 9)

¹ Vedi Klima, 1994

² Vedi D'Errico, 2002

³ Schmandt-Besserat, 2002

Durante i cinque millenni di evoluzione del Neolitico in Europa (da circa 12000 a circa 6000 anni fa), periodo caratterizzato dalla produzione di cibo, l'agricoltura e l'allevamento si svilupparono notevolmente e ciò favorì a sua volta l'evolversi della cultura. La coltivazione dei campi, la cura e la distribuzione del raccolto esigevano, in particolare, che si facesse ricorso a differenti tipi di misura. Anche nell'ambito di una economia semplice, di tipo familiare o tribale - come poteva essere quella iniziale della produzione agricola - i consumi, le scorte, le sementi, la distribuzione dei prodotti dovevano essere sottoposti a periodica verifica.

Nello sviluppo della civilizzazione, il passaggio dalla caccia all'allevamento e all'agricoltura fu davvero un momento fondamentale poiché offrì, da un lato, l'opportunità di costituire delle scorte - eliminando l'urgenza della ricerca di cibo - e, dall'altro, favorì l'evoluzione delle tecniche di coltivazione, di costruzione degli attrezzi e di conservazione delle derrate. Contemporaneamente agevolò la nascita di una organizzazione più complessa della vita associata, caratterizzata dalle prime specializzazioni di ruoli, e ci si trovò per la prima volta di fronte alla necessità di misurare i raccolti ¹.

Due tra le prime scelte primitive di unità di misura di una certa notorietà (*ceste* e *agri*) si applicano per esempio a problemi di coltivazione. Nell'Asia sud-orientale il coltivatore usava misurare la superficie della sua risaia in base al numero di ceste di semi che egli vi semina. La qualità della terra è stabilita in funzione del numero di ceste di riso, che egli prevede di raccogliere, rispetto al numero di ceste di semi piantati. Così un campo di 3 ceste di una terra da 50 ceste fornirà una produzione media annua di 150 ceste. Tutto ciò è semplice e sensato, benché non dica nulla sull'estensione del campo.

La parola *acri* era in origine applicata a un terreno senza recinto (cfr. il termine latino *ager*) e non comportava alcuna misura. Essa venne poi a denotare la superficie arabile in un giorno con una coppia di buoi ².

Enormi progressi furono realizzati anche in altri campi, in particolare in quello dei trasporti, sia terrestri che via mare. Di primaria importanza in tale ambito fu l'invenzione della ruota che si diffuse nel Vecchio Mondo all'incirca nel sesto millennio a.C.: essa fu utilizzata in primo luogo dai vasai, che ebbero così la possibilità di fabbricare vasi più regolari nella forma ³ e, successivamente, venne adoperata nei carri trainati da asini, buoi e cavalli, favorendo, tra l'altro, il trasporto di carichi pesanti a lunga distanza. Nelle Americhe, invece, l'uso della ruota rimase del tutto sconosciuto fino all'epoca della colonizzazione europea e fino ad all'ora i trasporti via terra furono effettuati da portatori umani o mediante animali da soma, quali il lama.

Sempre nella stessa era gli Egiziani inventarono la vela e impararono a trarre vantaggio dalla forza motrice del vento. Per capire l'enorme importanza di queste due invenzioni, basti pensare che fino al XVIII secolo d.C. i mezzi di trasporto terrestri e marittimi non subirono alcuna innovazione significativa a livello tecnico ⁴.

Le nuove tecnologie riuscirono a svilupparsi soltanto in presenza di una seppur iniziale forma di regolamentazione degli scambi commerciali e di un primitivo controllo sul sistema di pesi e misure. Il sistema tradizionale del baratto venne progressivamente sostituito da scambi basati sulla quantità prendendo come unità di misura simboli astratti di cui rimane testimonianza nelle prime tavolette scritte.

Ed è così appunto che sono nate le prime tecniche di *rappresentazione delle misure*.

In effetti l'attività del contare iniziò molto prima di quando furono inventati simboli quali 1, 2, 3... perché è possibile contare senza usare alcun simbolo, per esempio contando con le dita. Si può calcolare che "ho due mani ed un pollice di cammelli" alzando le dita man mano che gli occhi

¹ Vedi Morini, 1989

² Vedi Leach, 1954

³ E forse fu proprio, almeno secondo alcuni, la spinta a misurare meglio i volumi, con gli indubbi vantaggi pratici che ciò comportava (fu questo un successo davvero importante nell'ambito dello sviluppo delle prime civiltà umane in occidente; come del resto decisiva era stata la costruzione stessa dei primi vasi) che in qualche modo generò l'invenzione della ruota (su l'importanza di quest'ultima credo sia davvero superfluo qualsiasi commento)

⁴ Vedi De Laet, 1994

passano in rassegna i cammelli. Si può anche memorizzare il conteggio attraverso graffi o segni su un pezzo di legno o di osso. Si possono anche usare pezzi di argilla con disegnata una figura di pecora per contare pecore, o con figura di cammello per contare cammelli. L'uso di semplici simboli per i numeri si sviluppò circa 3 mila anni or sono, quando tali contatori venivano messi in speciali contenitori anch'essi di argilla¹. Era però un fastidio rompere il "coperchio" ogni qual volta si volesse controllare il contenuto, e ricostruirne un altro quando finito. Così le persone impararono a mettere speciali segni all'esterno del contenitore per riassumere ciò che c'era dentro. Si resero quindi conto che in effetti non avevano bisogno di nessun contatore fisico all'interno: potevano utilizzare gli stessi segni su semplici tavolette di argilla.

Come noto cinque o seimila anni fa nacquero le prime grandi civiltà: fu in quel periodo, infatti, che fecero la loro comparsa le prime città-stato, situate nelle valli del Tigri, dell'Eufrate e del Nilo, che rappresentavano delle realtà del tutto autosufficienti. Erano circondate da fattorie e i loro abitanti esercitavano il commercio e l'artigianato, utilizzavano veicoli provvisti di ruote, raffinavano i metalli, tagliavano la pietra ed erano abili architetti. Tutte queste attività necessitavano di strumenti di misura: non è un caso, allora, che pesi e misure standardizzati siano stati ritrovati nei siti archeologici. Le radici dei nostri sistemi moderni di pesi e misure vanno quindi cercati proprio in queste culture.

Ed è proprio nelle antiche città sumere, dove la vita raggiunse una notevole complessità, che furono ideati i primi sistemi di controllo degli ambienti e dei beni posseduti. Fu in questo tipo di cultura che fece la sua comparsa la famosa *cretula*, che con i gettoni e le taglie o tacche, appartiene agli oggetti che costituiscono la prima testimonianza di una operazione giuridico-amministrativa.

Le *cretule*² erano dei pezzi di argilla che venivano applicati su contenitori, su porte di magazzini o di archivi. Su queste *cretule* si imprimeva il sigillo che, in qualche modo, informava sul genere di materiale sigillato o su chi lo aveva sigillato. Le *cretule* furono così uno dei primi strumenti di comunicazione non orale.

Un sistema di conteggio che faceva uso di gettoni fu ampiamente usato in tutta l'Asia occidentale tra il IX e il II millennio a.C.. I gettoni si distinguevano sulla base delle dimensioni e dei segni incisi o impressi.

Verso il 3000 a.C. compaiono le "*bullae*" o involucri, di argilla, per i gettoni. La "*bulla*" permetteva di conservare, separati da altri, i gettoni che rappresentavano il tipo e la quantità di merce inviata. Sulla superficie liscia esterna della "*bulla*" si imprimevano, secondo l'uso sumerico, i sigilli personali degli individui che dovevano autenticare l'atto. Rompendo la "*bulla*" il destinatario verificava la partita di merce ricevuta. Tale innovazione però presentava un inconveniente. Se i sigilli impressi all'esterno dovevano preservarsi era necessario conservare intatta la "*bulla*". Si risolse il problema di sapere quanti e quali gettoni erano conservati dentro alla "*bulla*" con le immagini dei gettoni in essa contenuti. L'utilità portò allo sviluppo successivo della rappresentazione bidimensionale dei gettoni. Era nata la scrittura.(Morini, 1981, 12)

I gettoni infatti si evolsero man mano, dando origine a un sistema complesso con numerose forme e con signature incise o punzonate, che servivano a registrare molti tipi di beni con una sempre maggiore precisione.

Fu soprattutto quindi il bisogno di contabilizzare i prodotti di scambio che portò infine alla nascita del linguaggio scritto, che a sua volta contribuì a sviluppare il commercio. Col sorgere dei primi imperi, la pesatura e la misurazione divennero scienza applicata.

La prima unità di misura di cui si ha traccia certa (riferita ad una lunghezza) è il *cubito egiziano*, vedi oltre, standardizzato intorno al 2600 a.C. in un pezzo di marmo di circa 50 centimetri (*cubito reale*, 524 millimetri).

La necessità di conservare dei campioni di pesi e misure, come unità di riferimento nazionali recanti iscrizioni in nome del re e depositate nei templi principali, fu riconosciuta almeno fin dal 2000 a.C. I manufatti, ritrovati durante gli scavi in Egitto o in tante altre località di periodi molto antichi, confermano proprio quanto fosse importante, da un punto di vista pratico, avere a disposizione

¹ Vedi per esempio Stewart, 1995

² Vedi Morini, 1981

standard di pesi e di misure nell'ambito degli scambi commerciali. Un ruolo di primo piano viene anche attribuito allo studio della matematica babilonese, che si fonda su diverse centinaia di tavolette e di frammenti di tavolette. Tali testi possono essere classificati in due gruppi maggiori: testi di tabelle e testi di problemi, la cui analisi dimostra in maniera inequivocabile il nesso tra lo sviluppo di questa matematica ed i problemi economici e sociali esistenti. In effetti il loro contenuto è spesso strettamente legato ai diversi sistemi di misurazione: esistono tavole di conversione fra frazioni ordinarie e misure di capacità o tavole che riportano il quadrato delle misure di lunghezza.

Una larga scelta di problemi è presa dalla tecnologia pratica o è direttamente collegata a essa, come i sistemi d'irrigazione, il trasporto e la manifattura dei mattoni, la tessitura delle pecore, le misure del grano e il valore dell'argento e delle pietre preziose ¹.

È universalmente accettato che la prima importante tappa nello sviluppo dei concetti metrologici dell'uomo sia stata *antropomorfica*: in essa le principali unità di misura sono le parti del corpo umano. Gli esseri umani codificano ciò che li circonda *con se stessi*, e questo è davvero un sistema primitivo e antichissimo:

Per misurare oggetti a lui [uomo] estranei, gli servono le varie parti del corpo: il piede, il braccio, il dito, il palmo, le braccia tese, il passo. E le possibilità sono molte, dato il gran numero di elementi nel corpo umano utilizzabili per misurare. (Kula, 1970, trad. it. 24)

Su di un timpano greco del V secolo a.C., conservato nell'Ashmolean Museum di Oxford, si trovano raffigurate in rilievo la testa, il petto, le braccia allargate e l'impronta del piede di un uomo. Qualunque possa essere l'esatta interpretazione dal punto di vista della metrologia di questa rappresentazione (che, del resto, è ancora oggi argomento di discussione), essa è testimone di quanto, in passato, si fosse già consapevoli dell'importanza delle misure ricavate dal corpo umano.

Si ritiene che le misure di lunghezza siano state le prime a essere perfezionate ², sebbene questa ipotesi non possa che essere il frutto di congetture teoriche. Nel momento in cui gli uomini abbandonarono le caverne e iniziarono a costruire capanne e case all'aperto, fu avvertita la necessità di utilizzare forme di misura lineare: inizialmente si fece ricorso a semplici bastoni contrassegnati da tacche, che sarebbero stati poi utilizzati come legna da ardere, in seguito fu percepito il bisogno di unità di riferimento meno precarie e più durature. E la prima unità di misura adottata non poté che essere tarata in riferimento al corpo umano: il *cubito*, infatti, corrispondeva alla lunghezza dell'avambraccio dalla punta del gomito a quella del dito medio a mano aperta, mentre 4 cubiti venivano a formare una *tesa*. In ogni lingua, inclusa quella latina, è possibile ritrovare una specifica terminologia relativa alle misure lineari e alle loro suddivisioni.

Certo, anche i primi utenti di queste unità dovevano essere consapevoli che la lunghezza del proprio braccio o del proprio piede era diversa da quella di un'altra persona, ma agli inizi le differenze individuali non sembravano importanti *considerato il basso livello di precisione* richiesto per le misurazioni di quei tempi. Solo successivamente questo sistema raggiunse un livello di *astrazione*. Il passaggio da rappresentazioni concrete a quelle di tipo astratto segnò in verità una fase completamente nuova e rivoluzionaria nella storia della metrologia:

La cesura intellettuale consiste nel passaggio dalle rappresentazioni concrete a quelle astratte, dal «dito mio o tuo» al «dito in generale». Le misure del tipo «cubito», «palmo» o «spanna», «piede», sono state usate nella nostra civiltà in tempi ancora relativamente recenti, fino alla piena egemonia del sistema metrico. Ma erano ormai concetti astratti. Era il «passo in generale», di una lunghezza stabilita, valida in ogni occasione (benché nel corso del tempo questa lunghezza potesse mutare), di una lunghezza un po' più grande o un po' più piccola del passo «mio» o «tuo». (*ibidem*)

Prima dell'introduzione di modelli convenzionali di misurazione quindi, le lunghezze, le aree e i volumi non furono concepiti quali *estensioni pure o dimensioni*; questo fatto segnò di per sé un'ulteriore, importantissima fase. E fu lo stesso sviluppo del processo di misurazione che contribuì

¹ Vedi Neugebauer, 1954

² Vedi per esempio Skinner, 1954

alla generalizzazione ed in definitiva alla nascita del *pensiero astratto* in generale. Come sottolinea Jammer,

trascurando il colore, il disegno e la struttura dell'oggetto da misurare, il pensiero umano comincia, mediante l'"astrazione", a concentrarsi sull'idea di estensione pura e di spazio privo di qualità. Comunque non si deve supporre che sia stato un processo semplice e breve. L'archeologia mostra che le prime astrazioni erano limitate da interessi pratici. L'antica unità sumerica di area - ed incidentalmente anche l'unità di peso - era il *še* o "grano." Questa denominazione indica chiaramente che l'estensione dell'area veniva concepita in quei tempi in base alla quantità di semi necessari per seminare l'area in questione, cioè, in ultima analisi, in base all'aspetto antropocentrico del lavoro implicato. (Jammer, 1954, trad. it. 19-20)

Per il fatto che le prime misure furono quelle di lunghezza, il primo concetto astratto che gli uomini si formarono fu probabilmente quello di spazio, come passo finale di un faticoso processo di astrazione:

La fisica moderna nel suo complesso - eccettuate alcune teorie relativistiche - qualifica lo spazio come continuo, isotropo, omogeneo, finito o infinito, in quanto non costituisce un puro sistema di relazioni. Non tutte queste qualità, comunque, sono accessibili alla percezione sensibile. Esse sono il risultato di un lungo e continuo processo di astrazione che ebbe la sua origine nella mente dell'uomo primitivo. L'indagine filologica, archeologica e antropologica mostra chiaramente che il pensiero primitivo non fu capace di astrarre il concetto di spazio dall'esperienza dello spazio. Per la mente primitiva, lo "spazio" fu semplicemente una disposizione accidentale di orientamenti concreti, una più o meno ordinata moltitudine di direzioni, ciascuna associata ad inevitabili reminiscenze emotive. Questo "spazio" primitivo, sperimentato e informato inconsciamente dall'individuo, può essere stato coordinato con uno "spazio" comune al gruppo, alla famiglia o alla tribù. (ivi, 19)

E solo dopo molto tempo, partendo da questi "coordinamenti", si poté arrivare infine al concepimento di una estensione astratta.

Anche se probabilmente la grandezza fisica che per prima divenne oggetto di misurazione fu quindi quella di lunghezza, già nella preistoria il sorgere e lo sviluppo degli scambi commerciali resero necessari modi e mezzi per misurare anche le quantità di merce, per esempio cereali e metalli, per la cui determinazione quantitativa non si poteva ricorrere al semplice conteggio. Fu quindi la necessità pratica a originare la nozione di quantità di materia, cioè il concetto che anticipò il concetto moderno di massa.

Gli Antichi disponevano di due metodi, che venivano applicati entrambi: la determinazione del peso e la determinazione del volume o spazio occupato. L'uso della bilancia risale senza dubbio ai tempi preistorici; il culto di Osiride dell'antico Egitto ne sottolinea l'importanza quale mezzo di valutazione e di stima, e nella Bibbia (*Genesi 23:16*) leggiamo: "... e Abramo pesò alla presenza dei figli di Heth il denaro domandato da Efron, cioè quattrocento sicli d'argento di buona moneta mercantile." Questo passo si riferisce ovviamente all'epoca in cui il denaro era ancora pesato; le monete, come mezzo per far risparmiare tempo e rendere superflue pesate ripetute, pare siano state introdotte nel VII secolo avanti Cristo. (Jammer, 1961, trad. it. 25)

È interessante notare che il campione di misura più antico, eccezion fatta per le unità naturali di lunghezza e tempo ¹, non fu un'unità di peso, bensì di volume:

il famoso vaso d'argento del principe Entemena di Lagash (circa 2500 a.C.), la cui capacità, come testimonia l'iscrizione incisa sulla sua superficie, serviva a definire 10 *sila* (circa 5 litri). Le unità di peso, al contrario, variavano notevolmente nel tempo oltre che da luogo a luogo. Soltanto all'epoca di Shalmanassar V, re di Assiria (726-722), la *mina* venne proclamata campione ufficiale di peso (circa 1000 grammi). (ivi, 26)

Quantità di merci diverse venivano tuttavia misurate di solito con unità diverse.

Questa grande varietà di unità di peso per diversi tipi di merci - un fatto che si riflette ancora nella metrologia di alcune antiche nazioni orientali - non trova ragione soltanto nella mancanza, in quei tempi, di accordi internazionali, poiché ciò non spiega la diversità di unità nella medesima nazione. Si ha qui piuttosto l'espressione di un principio filosofico

¹ Avvertenza importante: per una ricostruzione storica delle diverse tecniche di misura del tempo rimando al par. 3.2 e in parte al par. 2.5

fondamentale, dominante nel pensiero degli Antichi, a proposito del concetto di peso: questo non era inteso infatti, come nella scienza moderna, come una grandezza universale dinamica come una forza, proporzionale alla quantità di materia o massa (nello stesso luogo), ma piuttosto come una proprietà dei singoli corpi, cioè come una qualità, a somiglianza del colore, dell'odore, della fragilità. (*ibidem*)

Anche quando si arrivò a concepire le grandezze in maniera astratta, come dimensioni pure (vedi anche par. 3.1), non vennero comunque affatto eliminate le differenze nello stabilire il valore delle relative unità, a seconda delle regioni o del tempo.

In Egitto il sistema delle unità di misura di lunghezza era basato sul *cubito reale* i cui sottomultipli principali erano il *palmo* (equivalente alla larghezza del palmo escluso il pollice) e il *dito* (pari alla larghezza di un dito). Alcuni storici ¹ hanno stabilito anche le seguenti relazioni, valide di massima almeno nell'ultimo periodo degli imperi egizi:

4 dita = 1 palmo, circa 7,5 cm.

7 palmi = 1 cubito reale, circa 52,3 cm.

100 cubiti reali = 1 *ht* o *khet* circa 52,3 m.

Altri multipli o sottomultipli utilizzati erano la *mano* (5 dita), il *remen* (20 dita), il *piccolo cubito* (24 dita) e l'*ater* (120 ht).

Presso i Sumeri il sistema delle unità di misura di lunghezza era basato sul *cubito sumero* equivalente a 49,5 cm. Abbiamo questa informazione grazie ad una statua (oggi conservata al Louvre) risalente al 2170 a.C., che rappresenta Gudea, re di Lagash.

E' curioso notare come le unghie dei pollici in particolare e poi, più in generale, quelle delle altre dita abbiano svolto ruoli speciali nella misurazione primitiva delle lunghezze:

La parola greca *onych* o *onyx* indicava l'unghia del dito di un uomo o l'artiglio di un animale. Sebbene oggi *onyx* richiami alla mente della maggior parte dei parlanti inglese un tipo di pietra (il calcedonio), questo stesso termine, in ambito medico, si riferisce anche alle dita dei piedi o della mano: *onyxis* è, infatti, una condizione patologica nota ai profani col nome di unghia incarnita - sicuramente una fastidiosissima fonte di dolore!

Alcune parole, i cui significati sono legati alla parola greca *onych*, sono *unguis* in latino, *unghia* in italiano, *unglo* in provenzale e *ongle* in francese. Un *ongle* può indicare sia un'unghia umana che l'artiglio di un animale, ma anche lo zoccolo di un cavallo (*ungula* in italiano) e un *ongle incarné* è un'unghia incarnita.

“*Inch*” (pollice) deriva etimologicamente dall'inglese antico *unce* o *ynche*, che a sua volta trova le sue origini nel latino *uncia*, cioè un dodicesimo. Stessa origine ha la parola *uncia*, un'altra unità con diversa etimologia: il vocabolo latino *uncia* deriva infatti da *unus*, che significa “uno”.

L'antico termine inglese *ynche* – *ynch* – *unce*, o *inch*, sembra fosse sempre usato per indicare la lunghezza del pollice, come prescritto dal re Scozzese David I. Ma *nail*, che sta qui ad indicare la larghezza dell'unghia del pollice, esordì come una più piccola unità di misura, equivalente a circa tre quarti del pollice attuale. Il *nail* (0,75 pollici) era la controparte inglese di un'unità di misura romana molto più importante, il *digit* (*digitus* in latino), basato sulla larghezza del dito, pari a circa tre quarti di un pollice o 1,9 centimetri di oggi. Il *digitus* era ampiamente utilizzato nel mondo antico. (Klein, 1988, 54)

Quando le lunghezze erano estremamente elevate, pensiamo a distanze su scala geografica, gli standard basati sull'anatomia umana non erano evidentemente sufficienti. In questi casi erano allora utilizzate stime basate sul tempo calcolato per uno spostamento, quali “un giorno di cammino” o “un'ora a piedi”, insieme ad analoghe stime “equestri”, quali “a un giorno di cavallo” o “a mezz'ora di piccolo galoppo”. Una misura spesso usata in questo contesto dai Romani era la distanza tra due *mutationes*, stazioni dove era possibile ristorarsi e cambiare i cavalli durante i lunghi viaggi su una *via strata* (via lastricata) romana, termine da cui deriva l'odierno *strada* o l'inglese *street* (la lunghezza variava approssimativamente tra i 40 e i 45 Km odierni circa).

¹ Vedi per esempio Dilke, 1993

Tra i Greci spesso era usato lo *stadio*. Lo stadio greco oscillava tra i 150 e i 200 metri ed in origine equivaleva alla lunghezza di una pista da corsa. Fu anche ripreso dai Romani, dove valeva circa 180 metri.

A noi sembra che il sistema metrico permetta di esprimere tutte le proporzioni in maniera semplice, efficiente e naturale. Una cosa, come spesso sottolinea Kula nei suoi scritti, tuttavia è certa: le misure antropomorfe, i cui inizi risalgono alla preistoria dell'umanità e che si sono perfezionate nel corso di decine di secoli, dal momento in cui composero un sistema coerente *hanno assolto bene al proprio compito e hanno servito bene l'uomo nel suo lavoro*. A questo proposito ritengo utile leggere ciò che in generale Cini, a proposito del confronto fra la scienza galileiana e “scienza” aristotelica, ci ricorda:

Lo scontro tra Galileo e la cultura aristotelica non va dunque visto, seguendo ciò che comunemente si legge sui libri di scuola, come l'affermazione del metodo scientifico - un metodo universale ed eterno fondato sull'alternarsi di "sensate esperienze" e "certe dimostrazioni" - nei confronti di una concezione dogmatica e metafisica della realtà. La sua vera portata si può comprendere soltanto se lo si considera come uno scontro fra due modi altrettanto legittimi di osservare la natura, ognuno dei quali ha come conseguenza l'elaborazione di un proprio sistema *coerente ed empiricamente adeguato* di conoscenze.(Cini, 1994, 20)(il corsivo è mio)

Le diverse misure antropomorfe, una volta trasformatesi da individuali-concrete in astratte poterono in altre parole assolvere perfettamente, e per lungo tempo, una funzione intersoggettiva nelle relazioni umane all'interno delle rispettive società. Società non ancora, diremmo oggi, “globalizzate”.

2.2 I Greci, i Romani e le prime unificazioni premetriche

Cubitum nullum processerat.

Detto latino (Non era andato avanti neppure di un cubito)

Le civiltà dell'antica Grecia e di Roma offrirono, come noto, enormi contributi alla nostra cultura moderna, tra cui molti nuovi elementi di tecnologia della misura.

Come mostra in dettaglio il matematico e storico della scienza Lucio Russo in un suo interessante libro sulla scienza antica ¹ l'insegnamento della matematica rappresentava nel mondo greco uno degli aspetti più importanti dell'istruzione, mentre per i Romani tale disciplina era considerata un aiuto necessario alla tecnologia. Il sostantivo *mathēma* deriva dal verbo *manthanō* e significa “argomento legato all'apprendimento”, il che dimostra che la matematica in Grecia era una materia posta alla base dell'istruzione. I termini utilizzati per definire due rami in cui essa era suddivisa nei tempi antichi, l'aritmetica e la geometria, significano rispettivamente “materia dei numeri” (*arithmos* = numero) e “misurazione (*metrein*) della terra (*gē*)”.

E' interessante notare che storici greci (anche Erodoto, nel capitolo II delle sue *Historiae*) fanno risalire la nascita della geometria agli Egizi, spiegandone l'origine con l'esigenza di misurare le variazioni di estensione delle proprietà dovute all'erosione del Nilo *per fini fiscali*.

L'Agorà di Atene era il centro commerciale della città, e sappiamo bene dalle commedie di Aristofane che tipo di rumoroso mercanteggiare avesse lì luogo. Nell'Agorà sono stati ritrovati i pesi e le misure di ispettori ufficiali (*metronomoi*) e, tuttavia, in generale ci si trovava sempre di fronte allo stessa situazione: in Grecia gli standard delle misure differivano in varia forma, in relazione alle diverse città o regioni e al periodo storico. Per esempio la lunghezza del piede (*pous*) oscillava tra i 27 e i 35 cm. Di massima valevano comunque le seguenti relazioni ²:

¹ Russo, 2001

² Vedi Dilke, 1993

4 *daktyloi* (larghezza di un dito) = 1 *palaste* (palmo)

3 *palastai* = 1 *spithamē*

4 *palastai* = 1 *pous*

1 $\frac{1}{2}$ *pedes* = 1 *cubito*

4 *cubiti* = 1 *orguia*

10 *orguiai* = 1 *amma*

10 *ammata* = 1 *stadion*

Un grande contributo alle problematiche della misurazione venne dagli sviluppi dell'astronomia e dell'idrostatica, in particolare ad Alessandria e soprattutto sotto il regno di Tolomeo II.

La figura dello scienziato assunse, in quel periodo, una fisionomia nuova, molto diversa da quella che aveva durante il periodo greco precedente, e già premonitrice di future trasformazioni. Con uomini come Archimede e Tolomeo appaiono studiosi dediti esclusivamente al lavoro scientifico; i loro unici metodi di studio sono *l'osservazione della natura e la memorizzazione dei risultati* tramite la scienza dei numeri. Fin dalle origini, l'osservazione del cielo era stata l'unica attività che distingueva lo scienziato dal filosofo (vedi anche par. 2.4). L'astronomia poté infatti disporre per prima di una notevole *apparecchiatura*. Tolomeo ha minutamente descritto nel suo *Almagesto* taluni di codesti strumenti, tra i quali l'astrolabio, talvolta considerato il più antico strumento scientifico del mondo. Le altre discipline non avevano bisogno di strumenti o di osservatori.

Si conoscevano già numerosi strumenti per i bisogni dell'artigianato, ma i filosofi non pensarono affatto di impiegare codesti strumenti al di fuori del loro uso corrente, né di perfezionarli o di dedicarsi a operazioni strumentali. La lacuna è stata spiegata con il disprezzo che avrebbe colpito il lavoro manuale presso gli antichi; essendo stato praticato fin dai tempi più remoti dagli schiavi, non poteva diventare un'occupazione degna di uomini liberi, né soprattutto degna di uomini colti. I *filosofi greci non hanno riflettuto sugli strumenti perché li ignoravano*. E tuttavia assistiamo, con Archimede, alle prime manifestazioni del metodo sperimentale, timide indubbiamente, ma senza le quali l'origine della meccanica sarebbe incomprendibile[...]. Indubbiamente Archimede aveva imparato da ingegneri alessandrini come Ctesibio e Erone una certa pratica degli esperimenti fisici. Non fu il solo a dedicarsi in quel periodo a quest'arte nuova[...]. La costruzione di fari a riflettore e l'invenzione di orologi ad acqua, se datano da quell'epoca, fanno pensare che i loro autori si fossero dedicati a ricerche sperimentali. (Daumas, 1969, cit. in Baldini, 2000 B, 23-24)

Eratostene (III sec. a.C.) oltre ad aver prodotto la prima carta scientifica del mondo conosciuto riuscì per primo ¹ a fornire una stima della lunghezza del meridiano ² terrestre basata su una misura decisamente "precisa". Nella pratica il metodo utilizzato da Eratostene può essere riassunto come segue.

Egli riteneva che Siene - l'attuale Assuan - e Alessandria si trovassero sullo stesso meridiano (cosa che, in realtà, non è perfettamente esatta); sapeva, inoltre, che a mezzogiorno del 21 giugno - *solstizio* ³ d'estate - i raggi del Sole, a Siene, giungevano al fondo dei pozzi, cioè che il Sole era allo

¹ Sembra che le prime osservazioni di questo genere siano da attribuire a Eudosso di Cnido e a Dicearco da Messina (IV sec. a.C.): il primo avrebbe trovato per la circonferenza terrestre meridiana una lunghezza corrispondente a circa 74.000 km, il secondo una lunghezza pari a circa 55.000 km, entrambe più elevate di quella che è la lunghezza reale (circa 40.009 km). Il tentativo di cui abbiamo notizie sicure e che condusse ad un risultato molto più preciso è però quello, appunto, eseguito da Eratostene di Cirene

² L'arco di meridiano terrestre è l'arco di un cerchio massimo passante per i poli

³ Se l'asse terrestre fosse perpendicolare al piano dell'orbita, il circolo d'illuminazione coinciderebbe - in tutti i giorni dell'anno - con un meridiano, e quindi taglierebbe sempre a metà tutti i paralleli; in tale condizione, ogni punto di questi ultimi sarebbe compreso, per dodici ore nella zona illuminata e, per un tempo uguale, in quella oscura, perciò su tutta la superficie terrestre i giorni e le notti risulterebbero di uguale lunghezza. Siccome invece l'asse terrestre è inclinato e si sposta rimanendo sempre parallelo a se stesso, così il circolo di illuminazione coincide con un meridiano in due soli giorni dell'anno - il 21 marzo e il 23 settembre - giorni che prendono il nome di *equinozi* (dal latino: *aequa* = uguale; *nox noctis* = notte), appunto per il fatto che in tutti i paesi della Terra la notte ha la stessa durata, e nei quali il periodo diurno è uguale a quello notturno. Negli altri giorni dell'anno il circolo di illuminazione si allontana sempre più dai due poli, sino a raggiungere la massima distanza il 21 giugno e il 22 dicembre, cioè nei giorni dei *solstizi* (dal latino: *sol* = sole; *statio* = fermata). Dicesi *stagione* il periodo di tempo che intercede tra un equinozio e il successivo solstizio, e tra un solstizio e il successivo equinozio (per dettagli vedi per esempio Cori, Ostermann, 1971)

zenit. Egli misurò con una *scafe* (strumento a forma di emisfera cava graduata, con infisso al centro uno *stilo* o asticciola) l'angolo che i raggi del Sole formavano con la verticale, quello stesso istante, ad Alessandria: esso risultò pari a 1/50 circa della misura angolare di una intera circonferenza. Considerando i raggi del Sole paralleli tra loro (il Sole si trova ad enorme distanza da noi e quindi i raggi che da esso giungono alla Terra si possono considerare paralleli), egli concluse che *l'angolo al centro* corrispondente all'arco di meridiano compreso tra Siene e Alessandria doveva *rappresentare un cinquantesimo* della circonferenza terrestre. Poichè la distanza lineare tra le due città era valutata 5000 stadi, moltiplicando questa cifra per 50, ottenne - come lunghezza della circonferenza terrestre - *250.000 stadi*, cifra che però arrotondò a *252.000*, per poter esprimere con un numero intero la lunghezza di un grado.

Ad una prima valutazione questo metodo può apparire semplice e ovvio. In effetti richiede presupposti teorici tutt'altro che banali. La difficoltà non è certo nel ragionamento geometrico, ma nel capire che ragionando su un modello si possono trarre conclusioni valide sull'intera Terra.

In effetti gli storici non sono sicuri di quale valore sia stato usato per lo stadio, ma se si accetta un valore di circa 159 metri, come afferma la maggioranza degli studi ¹, l'errore è dell'ordine dell'1%. Il risultato non può non essere giudicato straordinario ², anche se oggi si tende a pensare che sia anche stato il frutto di una casuale e fortunata compensazione di errori. Lo studio di questa vicenda può suggerire un'importante considerazione, anche alla luce della famosa misurazione del meridiano terrestre avvenuta, come vedremo (par. 2.5), durante la Rivoluzione Francese:

E' stato osservato che la misura del meridiano ottenuta da Eratostene, 252.000 stadi, ha la proprietà di essere divisibile per tutti numeri naturali da 1 a 10 (il loro minimo comune multiplo è infatti 2520). Si tratta naturalmente di una proprietà molto utile ed è improbabile che sia frutto del caso. Eratostene potrebbe avere alterato i dati per ottenere un valore così comodo. [Un] passo di Plinio sul valore dello stadio "secondo il rapporto di Eratostene" può però suggerire anche un'altra possibilità: quella che Eratostene avesse introdotto il nuovo "stadio" proprio come un conveniente sottomultiplo del meridiano, anticipando il procedimento usato in epoca moderna per definire il metro. (Russo, 2001, 297)

L'espansione del commercio tra gli imperi richiedeva la navigazione sui mari. La geometria, la fisica, la medicina, la botanica e la zoologia ebbero basi scientifiche. I Romani introdussero l'uso della forza idrica per macinare il grano. Il continuo evolversi della civiltà comportò una sempre crescente gamma di attività che necessitavano di misure e la natura tecnica di tali misurazioni rappresentò una sfida sempre più affascinante. Per i Romani l'aspetto pratico delle misurazioni predominava su tutti: la costruzione di strade, le misurazioni topografiche, l'organizzazione militare, i rifornimenti di acqua e il miglioramento delle condizioni igieniche dipendevano tutti da un sistema di misure ben definito.

I sistemi di pesi e misure creati presso le valli del Tigri e dell'Eufrate furono adottati prima dai Greci e, in seguito, dai Romani che, a loro volta, esportarono tali procedure in tutta Europa. Tracce evidenti di questi sistemi sono ancora riscontrabili nelle culture occidentali moderne: ad esempio, l'oncia - (*troy pound*), unità di misura usata soprattutto per le monete - è divisibile in 12 parti, analogamente alle suddivisioni del piede ideate dai Romani. Tanto la libbra quanto il miglio di oggi derivano rispettivamente dai termini latini *libra*, che significa "bilancia", e *mille passuum* (*milliare*), cioè "mille passi". In origine il *passus* corrispondeva al passo di un legionario romano durante una lunga marcia: esso misurava circa 1,5 metri, pari a circa cinque piedi inglesi. Tale lunghezza è solo in apparenza eccessiva, poiché il ciclo completo sinistra-destra-sinistra o destra-sinistra-destra equivaleva al doppio di un passo singolo di circa 0,75 metri ³.

A Roma la più piccola unità di misura, proprio come in Grecia, era il *digitus*, che equivaleva alla larghezza di un dito. Quindi, analogamente alla Grecia, ma anche in altre regioni, in genere quattro

¹ Vedi Russo, 2001

² Dal tempo di Eratostene dovettero passare circa diciannove secoli prima di avere una migliore valutazione delle dimensioni della Terra, come quella ottenuta nel 1671 da un astronomo francese, Jean Picard (vedi anche par. 2.4), il quale misurò l'arco di meridiano congiungente Amiens con Malvoisine (presso Parigi)

³ Vedi McCoubrey, 1983 e Klein, 1988

dita formavano un palmo e 4 palmi costituivano un piede, cosicché c'erano 16 dita ⁴ in ogni piede. Riassumendo, si può ricordare che le nove unità di lunghezza più usate dai Romani in ordine crescente erano le seguenti: il *digitus*, l'*uncia*, il *palmus*, il *pes*, il *palimpes* (anche *palmipedalis*), il *cubitus*, il *passus*, lo *stadium* e il *milliare*.

Come riportato in una precedente (par. 2.1) citazione di Klein, dal *digitus* deriva il *nail* inglese, mentre dall'*uncia* scaturisce l'*inch* (pollice); la controparte del *pes* è invece il *foot* (piede), diversamente chiamato in tutto il mondo. Il *pes*, che corrisponde normalmente alla lunghezza di circa trenta centimetri, rimanda ad un piede umano (abbastanza lungo, almeno per quei tempi!).

Anche il cubito, come quello egiziano, equivaleva in origine alla lunghezza dell'avambraccio (per inciso, gli storici hanno individuato ben otto diversi cubiti: misurano in media poco più di 50 centimetri di oggi).

Si può anche ricordare che un multiplo del piede utilizzato in molte occasioni era l'*actus*. In pratica 120 *pedes* formavano 1 *actus*, equivalente a circa 35 m.; l'*actus*, (pl. *actus*), che deriva da verbo latino *agere*, cioè condurre, sembra che in origine fosse la distanza percorsa da un bue che tirava un aratro "prima di girarsi".

Nella prossima tabella riporto alcune delle più comuni unità di misura romane ragguagliate al sistema metrico. Tabelle del genere, più complete, si possono trovare edite dal "Ramo editoriale degli agricoltori (Roma)", e sono state ricostruite dagli storici partendo da numerosi documenti dell'epoca, in particolare utilizzando il *De Agricoltura* di Catone.

⁴ Come risaputo i Romani rappresentavano i numeri con alcune lettere maiuscole del loro alfabeto. Il sistema era poco adatto per eseguire calcoli o operazioni scritte rapidamente. Di certo sappiamo che eseguivano i loro calcoli con l'*abaco*: in latino i "calcoli" stavano appunto a significare i "sassolini" che si mettevano in una tavoletta con apposite scanalature

DENOMINAZIONE	VALORE IN MISURE ANTICHE	SISTEMA DECIMALE	METRICO
ACTUS MINIMUS			
SIMPLEX	Superficie. Piedi (pes) quadrati 120 x 4	metri quadrati	41,84
ACTUS QUADRATUS	Piedi quadrati 120 x 120	"	1257,41
AMPHORA	Vaso di forma cubica di un piede romano per lato	litri	25,80
AREPENNIS	Equivalente a metà iugero (vedi oltre)	metri quadrati	1257,41
BESBIPEDALIS O			
BIPEDANEUS	Piedi romani 2	metri	0,59
CADETUM	Piedi romani 150	"	44,32
CADUS	Specie di barile di capacità arbitraria		
CLIMA	Piedi quadrati 60x60	metri quadrati	314,35
CONGIUS	Sestari (vedi oltre) 6	"	
PABULATORIA	Paniere per misurare il fieno	litri	3,225
CULLEUS	Anfore 20	"	172,00
DECEMODIAE	Moggi (vedi modius) 10		86,00
DEFRUTARIUM VAS	Vaso di piombo contenente 90 anfore		2322,27
DENUX	Superficie pari a ¹¹ / ₁₂ dello iugero	metri quadrati	2304,25
DEXTANUS	Superficie pari a ⁵ / ₆ dello iugero		2095,69
DIGITUS	Pari a ¹ / ₁₆ di piede	metri	0,0185
FACTUM	Misura di una stretta di olive o di un carico di olive		
HEMINA	Novantesima parte dell'anfora	litri	0,268
JUGERUM	piedi quadrati 240x120	metri quadrati	2514,82
LAGOENA	emine (heminae) 12	litri	3,225
METRETA	Anfore 1,5	"	38,70
MILIARIUM O LAPIS	Passi (vedi oltre) 1000	metri	1477,50
MODIUS	Pari al terzo dell'anfora	litri	8,60
OLLA	Vaso di terracotta di capacità arbitraria		
PALMARIS	Della lunghezza di un palmo	metri	0,074
PALMIPEDALIS	Lunghezza di un piede e di un palmo	"	0,369
PALMUS	Tre pollici ossia ¹ / ₄ di piede	"	0,074
PASSUS	Piedi 5	"	1,477
PES	Diviso in 12 pollici che vengono a formare 4 palmi	"	0,295
PORCA	piedi quadrati 30x80	metri quadrati	209,57
SEMIS	La metà di qualsiasi qualità		
SEMIDIUS	Sestari 8	litri	4,30
SERIA	Specie di botte di varia capacità		
SESQUIMODIUS	Moggi 1,5	litri	12,90
SESQUIPEDALIS	Piedi 1,5	metri	0,443
SESTARIUS	48° parte dell'anfora	litri	0,537
SINUM	vaso da latte di capacità non conosciuta		
STADIUM	piedi 625	metri	184,68
TRIMODIUS	Moggi 3	litri	25,80

Una certa uniformità caratterizzò l'Europa fino all'inizio dell'era cristiana, epoca in cui le misure romane erano ancora ampiamente diffuse. Diversi secoli di confusione politica succedettero al declino dell'impero e in Europa il sistema di misura si sviluppò in modo disomogeneo. Se per esempio il miglio romano era di circa 1480 metri, quello inglese ne misurerà 1610, quello italiano 1850, quello danese 7530, quello austriaco 7585, quello svedese 10640 e quello norvegese 11295! In particolare la grande frammentazione di quella zona territoriale che, in seguito, sarebbe divenuta

la Francia, in cui il potere era allora suddiviso e affidato a un gran numero di nobili e di città, favorì un'evoluzione in assoluto isolamento dei nomi e dei valori delle misure (par. 2.5).

Nei luoghi di cultura anglosassone, oltre al citato foot (piede inglese), ebbero origine due altrettanto famose unità di lunghezza che in qualche maniera si sono tramandate sino ai nostri giorni: la *yard* (circa 3 piedi) corrispondente alla distanza tra la punta del naso e l'estremità del dito medio, e il *fathom*, che si otteneva quando si allargavano completamente le braccia (circa 6 piedi).

L'influenza della cultura romana rimase comunque evidente nei nomi delle principali unità di misura, dei loro multipli e dei loro sottomultipli usati in tutta Europa e la sua eredità fu messa in discussione solo nel XVIII secolo, con l'introduzione del sistema metrico.

2.3 Medioevo e Rinascimento: l'importanza della quantificazione della realtà

It is the philosopher who has modified his attitude, not the craftsman, and the change was essentially subjective.
Alfred Rupert Hall

Dopo che i Romani, conquistatori della Gran Bretagna, furono partiti, gli invasori iniziarono ad utilizzare i campi e le colonie che dai primi erano stati abbandonati. Come mostra Klein ¹, in questi luoghi gli Angli ed i Sassoni stabilirono le loro roccaforti tribali e i loro centri fortificati di difesa detti *buhrs* (che in seguito sarebbero stati chiamati *boroughs* e che avrebbero dato origine ad un consistente numero di località il cui nome termina per *-bury* o *-borough*). Il buhr era la sede del capo del villaggio o della tribù locale, oppure del governatore della regione. Il commercio fluiva da e verso i buhrs; che divennero anche sede dei tribunali e degli uffici per la riscossione delle tasse. La legge del territorio – nella misura in cui poteva esistere una legge finalizzata a tale scopo – forniva al buhr standard autorizzati per le misure.

In questo inizio di paragrafo mi sono ancora soffermato sulla Gran Bretagna in quanto una data da menzionare, anche per la storia della metrologia, è sicuramente quella del giugno 1215. Come noto Re Giovanni appose il suo sigillo alla famosa Magna Charta, ma ciò che forse non sempre viene messo in luce è che tra le riforme che in essa erano promesse vi era anche un'importante politica metrologica: da allora in poi avrebbero dovuto esserci unità uniformi, riconosciute, riproducibili sulle quali sia gli acquirenti che i venditori avrebbero potuto fare affidamento. Tuttavia, nonostante questi buoni propositi, la registrazione delle unità di peso e di misura utilizzate in Inghilterra non fu affatto precisa, regolare e ordinata e da ciò trassero vantaggio abili truffatori - mercanti, funzionari statali o monarchi - che ebbero maggiori opportunità di ingannare i loro interlocutori.

A livello europeo, nel secolo XIII, nasce una nuova economia: vengono incrementati lo scambio delle merci e *l'uso della moneta*. Dalle città marinare - dove arrivano spezie e sete di provenienza orientale - e dai centri della pianura padana (luoghi di lavorazione della lana), le direttrici del commercio attraversano Francia e Renania per giungere nelle Fiandre e nell'Inghilterra.

Gli abitanti delle città, prendendo coscienza di avere interessi comuni da difendere e da sviluppare, si coalizzano e ottengono sempre maggiori autonomie di governo: nascono così i Comuni. In questo clima è sentito in maniera sempre più pressante il problema di migliorare il *supporto tecnico all'attività commerciale*, in particolare per ciò che riguarda il *problema delle misure*. La figura più rappresentativa di questo periodo storico è, senza dubbio alcuno, quella del mercante.

I mercanti, nel momento in cui assistono all'incrementarsi dei loro traffici, avvertono la necessità di risolvere insieme i problemi organizzativi che si presentano loro e decidono di collaborare al fine di creare una rete commerciale. Si trasformano addirittura in banchieri, sviluppando un sistema all'interno del quale gestiscono non solo il denaro proprio ma anche quello degli altri. Ovviamente, per poter far funzionare un'organizzazione così complessa, devono avere una buona cultura di base:

¹ Klein, 1988

devono saper leggere e scrivere ed essere in possesso di nozioni matematiche, merceologiche, geografiche, economiche (cambi fra monete, pesi e misure correnti). *E il denaro diventa il criterio di stima di tutte le cose.*

L'uso e l'apprendimento della matematica vengono ad essere modificati dalle nuove esigenze commerciali: Fibonacci, nel suo *Liber abaci* (1202), propone un nuovo sistema di calcolo che induce i mercanti a sollecitare i Comuni a istituire scuole pubbliche. Assistiamo, inoltre, alla diffusione delle botteghe d'abaco, cioè di centri in cui vengono offerte consulenze commerciali e notizie su merci e su paesi interessati ai traffici¹. I titolari di queste botteghe e delle scuole vengono chiamati Maestri d'abaco. Questi personaggi, a partire dal XIV secolo, traducono in volgare il manuale di Fibonacci, ma ne semplificano il contenuto, inserendo nel loro testo solo quelle nozioni relative al commercio e, pertanto, attinenti al loro insegnamento. Redigono, inoltre, opere inerenti le pratiche di mercatura, tra l'altro, informazioni su fiere, dazi e dogane, monete, pesi, misure delle varie città e le loro equivalenze.

Questa profonda trasformazione sociale è ben descritta anche dallo stesso Koyrè che, citando a sua volta Pierre-Maxime Schuhl, afferma:

fra la « gente bene » e la « gente meccanica » viene a interpersi dal XIV secolo in poi, un nuovo gruppo, quello dei mercanti, il cui influsso e potere non cessano di aumentare. « E' il momento in cui la parola negozio cambia, se così si può dire, il suo segno e assume quel valore positivo che l'etimologia dovrebbe rifiutargli ». E' anche il momento in cui *l'otium* diventa « oziosità ». L'insegnamento dei portavoce del nuovo spirito, dello spirito che anima la nascente civiltà borghese, riflette l'evoluzione dei costumi e della morale. « Bacone rimprovera ai filosofi di essere vissuti lontani dagli affari, *a negotiis*... Il fine del moralista non è di scrivere nell'ozio cose da leggersi nell'ozio, ma di fornire armi alla vita attiva ».(Koyrè, 1961 A, trad. it. 69)

Tutto ciò avrà un'influenza decisiva, come vedremo subito, nella nascita della scienza moderna e di un nuovo approccio metrologico. Questa situazione, tuttavia, favorevole in generale a differenti sviluppi in ambito tecnologico, cambiò nel secolo immediatamente successivo. Come noto il sogno umanistico della concordanza delle fedi sotto il segno della ragione lasciò il posto alla drammatica realtà delle lunghe guerre di religione che insanguinarono l'Europa. In questo clima mettere in discussione i dogmi religiosi ed il principio di autorità diventò sempre più pericoloso e ciò influenzò lo spirito di qualsiasi tipo di ricerca. Anche coloro che credevano possibile l'acquisizione di verità scientifiche furono costretti dal cambiamento di tendenza ad esprimere le loro conclusioni in un linguaggio ipotetico.

Una sofisticata tendenza[...]sviluppatasi in quei numerosi mertoniani e parigini del quattordicesimo secolo, che contribuirono in gran parte al pensiero scientifico di questo secolo, fece abbandonare la speranza di acquisire conoscenze vere del mondo fisico. Invece, essi incanalarono le loro energie in ipotetiche discussioni come quelle sull'aumento e la diminuzione delle forme; oppure evocarono affascinanti problemi ipotetici come, per esempio, il comportamento dei corpi se avessero occupato un vuoto che Dio aveva creato tra la Luna e la Terra.

Le soluzioni di tali problemi non erano destinate all'applicazione alla natura. Il maggior obiettivo era la consistenza logica, non la ricerca per la realtà fisica.(Grant, 1983, cit. in Baldini, 2000 B, 28)

La situazione cambiò di nuovo solo quando, tra il '500 ed il '600, la cosmologia classica venne messa sperimentalmente in discussione da quella che è stata universalmente definita la *rivoluzione copernicana*. In un clima nuovo, premonitore della imminente rivoluzione scientifica, anche le attività pratiche acquistarono di nuovo dignità culturale e conoscitiva. Le università e i conventi non sono più gli unici luoghi nei quali si produce cultura². Nasce un tipo di sapere che ha a che fare con la progettazione di macchine, con la costruzione di strumenti, di canali, di dighe. Alcune botteghe si trasformano in veri e propri laboratori. La cultura degli "uomini senza lettere" deriva da un'istruzione pratica che si richiama a fonti diverse, e che conosce frammenti dei testi della scienza classica.

¹ Vedi Oliva, 1981

² Vedi Rossi, 1998

Lo storico americano Alfred W. Crosby ¹ fa risalire tutti questi importantissimi cambiamenti al *completo affermarsi*, in questo momento, in Europa occidentale, di una nuova *mentalità* (in fermento comunque, come visto, da secoli): *pensare alla realtà in termini quantitativi*.

E' proprio con questo cambiamento profondo nella percezione del mondo esterno, la "*misura della realtà*" (che incise su ogni aspetto della cultura ², innovando non solo la scienza ma generando anche nuove concezioni nell'arte e nuove pratiche nel commercio), che Crosby spiega quindi l'origine del sorprendente e ineguagliabile successo dell' "*imperialismo europeo*" ³. Nella prefazione al libro citato Crosby scrive significativamente:

Gli Europei non erano così superiori come credevano, ma erano certo in grado di organizzare, meglio di qualsiasi altro popolo di ogni tempo, ingenti quantità di persone e denaro, sfruttando la realtà fisica per una conoscenza utile e per un potere immenso. Perché? Questo libro trova una risposta, in termini semplici, nella scienza e nella tecnologia: tale risposta è stata certamente vera per intere generazioni, e lo è tuttora in gran parte del mondo. Ma guardando attentamente attraverso e oltre il XIX secolo e volgendo agli inizi dell'imperialismo europeo, scorgiamo in realtà ben poca scienza e ben poca tecnologia. Credo infatti che il vantaggio acquisito dagli Occidentali risieda in primo luogo non in queste forme di conoscenza in sé considerate, ma nella capacità di utilizzare modelli di pensiero in grado di assicurare un rapido progresso sia in campo scientifico che tecnologico, fornendo, allo stesso tempo, competenze decisive in ambito amministrativo, commerciale, marittimo, industriale e militare. L'iniziale superiorità degli Europei consiste pertanto in ciò che gli storici francesi hanno definito *mentalité*. Durante il tardo Medioevo e il Rinascimento emerse in Europa un nuovo modello di realtà: si trattava di un modello quantitativo, in grado di sostituire, fin da allora, l'antico precedente qualitativo. Copernico, Galileo, gli artigiani che divennero esperti nella costruzione dei cannoni, i cartografi che mapparono le coste delle terre appena conosciute, i burocrati e gli uomini d'affari che amministravano i nuovi imperi e le compagnie dell'India orientale e occidentale, i banchieri che ordinavano e controllavano i nuovi flussi monetari - tutte queste persone pensavano alla realtà in termini quantitativi, con una coerenza che non trovava pari tra gli uomini. (Crosby, 1997, trad. it. 8-9)

Mostrerò nel prossimo paragrafo come Koyré, a sua volta, spieghi perché la completa affermazione di una nuova mentalità si accompagni alla cosiddetta rivoluzione copernicana.

Sapere tecnico e scienza si uniscono quindi per studiare e sottomettere la natura. Inizia ad essere così superata la separazione, tipica della cultura medievale, fra le arti meccaniche e la conoscenza vera e propria. Comincia ad affermarsi così l'idea del "conoscere" come "fare", come "costruire", che avrà un'enorme influenza in futuro ⁴.

¹ Crosby, 1997

² Credo a questo riguardo sia davvero istruttiva l'incisione *La Temperanza* riportata ed introdotta agli inizi di questo lavoro

³ *Gli Europei non furono gli imperialisti più crudeli né i più benevoli, non furono i primi né gli ultimi, ma certo unica fu la portata del loro successo. Verosimilmente conserveranno per sempre questo primato, perché è improbabile che altri uomini riusciranno ad acquistare ancora un tale supremo vantaggio sul resto del mondo. Ciro il Grande, Alessandro il Grande, Genghis Khan e Huayna Kapac furono grandi conquistatori, ma tutti restarono confinati entro un solo continente, tutt'al più con un'estensione di potere in un secondo. Come conquistatori furono dei principianti rispetto alla Regina Vittoria, sul cui impero (per resuscitare un vecchio cliché) non tramontava mai il sole; ma il sole non tramontava mai neppure sugli imperi di Francia, Spagna, Portogallo, Olanda e Germania all'apice del loro potere.* (Crosby, 1997, trad. it. 7)

⁴ Oggi è infatti universalmente accettato che la conoscenza è un concetto poliedrico, con molteplici significati, che può articolarsi in modo esplicito o manifestarsi in maniera implicita (vedi per esempio Lugujo, 2002). La storia della filosofia, fin dalla Grecia classica, può essere vista come un'incessante ricerca del significato della conoscenza che, secondo l'epistemologia tradizionale, rappresentava una "credenza vera e giustificata". Nella cultura contemporanea è riconosciuto che una parte considerevole della conoscenza umana è "tacita". Questo è vero in particolare per tutte le capacità operative e le cognizioni tecniche acquisite attraverso l'attività pratica. Una conoscenza di questo tipo è *quindi legata e orientata all'azione*. La conoscenza esplicita, che è invece generata attraverso la deduzione logica e acquisita tramite lo studio formale, può essere facilmente trasferita attraverso il tempo e lo spazio. Al contrario, la conoscenza tacita può essere trasferita solo quando vi è uno stretto rapporto e una relazione armoniosa tra colui che possiede tale conoscenza e colui che la deve invece apprendere. Essa può essere acquisita in primo luogo attraverso l'istruzione professionale, in qualsiasi contesto

2.4 Il Seicento e l'osservazione *accurata*

[...]the beginning of modern science[...]consisted in a new philosophy, which considered systematic experiment to be the main source of knowledge.

Max Born

Con la proposta di un nuovo sistema cosmologico, che metteva il Sole al centro e di fatto “riducendo” la Terra ad un pianeta non diverso dagli altri, Copernico superò la antica contrapposizione aristotelica tra cielo e terra. Intorno al 1515 (in *De hypothesibus motuum coelestium a se constitutis commentariolus*) egli scriveva:

Qualunque movimento ci appaia del Sole, non appartiene ad esso, ma dipende dalla Terra e dalla nostra sfera, insieme alla quale noi ruotiamo intorno al Sole come qualsiasi altro pianeta, e così la Terra compie più movimenti. Per i pianeti appare un moto retrogrado e un moto diretto: ciò in realtà non dipende da loro, ma dalla Terra; pertanto il moto solo di questa basta a spiegare tante irregolarità celesti.(Copernico, vedi trad. it. 1979, 110)

Copernico mise per primo in discussione il sistema proposto dalla fisica aristotelica, confermando le sue osservazioni ed intuizioni con misurazioni specifiche. Egli si rese conto che su una Terra in moto inerziale tutto doveva accadere come su una Terra in quiete:

Perché[...]esitiamo ad attribuire [alla Terra] la mobilità che si accorda, per natura, alla sua forma, invece che far scivolare tutto quanto il mondo[...]e perché non ammettiamo[...]che in cielo è l'apparenza della sua quotidiana rivoluzione, e in terra la sua verità?[...]Giacché, quando una nave viaggia nella bonaccia, i naviganti vedono tutte le cose che sono fuori di essa muoversi ad immagine del suo movimento e, inversamente, credono se stessi e tutto ciò che hanno con sé in riposo. Così di certo può accadere anche per il movimento della Terra, in modo che si creda che tutto quanto il mondo giri intorno ad essa. Ma che potremo dire, dunque, delle nubi e di tutte le altre cose sospese nell'aria, sia di quelle che tendono al basso come di quelle che, invece, volgono verso l'alto? Niente altro se non che non solo la Terra con l'elemento acqueo che le è unito si muove in tal modo, bensì anche una parte non trascurabile dell'aria e tutto ciò che, nello stesso modo, ha un rapporto con la Terra[...]Perciò l'aria più vicina alla Terra sembrerà tranquilla, e tali anche le cose in essa sospese, a meno che, come talora accade, non vengano sbalottate qua e là dal vento e da una qualche altra forza.(ivi, 199-200)

Dopo Copernico - e le successive osservazioni di Galilei - le leggi matematiche che governano i moti dei corpi celesti sono identiche a quelle che regolano i moti di quelli terrestri. Lo spazio è considerato dappertutto omogeneo e ciò che era assunto come l'ordine gerarchico del mondo è infine messo in discussione; ne risulta che il moto rettilineo non è più finalizzato a ristabilire l'ordine gerarchico degli elementi, riportando ciascuno di essi al suo luogo naturale. Come la quiete, tale moto può essere mantenuto indefinitamente, se non intervengono cause esterne. Ciò che ne deriva è il principio di inerzia (“*Un corpo non soggetto a forze o è in quiete o la sua velocità è costante*”). Con l'introduzione di questo principio, non intuitivo, di un moto che, come la quiete, è in grado di durare in modo indefinito, la fisica prende le distanze dall'esperienza immediatamente trasmessa dai sensi, su cui era edificata la cosmologia antica.

Secondo Koyrè, che ammette ma non privilegia i fattori economici e sociologici, è proprio il cambiamento dell'orizzonte filosofico (definito, certo non a caso, *sottostruttura*) che rende in definitiva possibile la nascita della scienza moderna nonché la concezione stessa della “precisione” delle misurazioni. Koyrè è convinto che l'influenza delle concezioni filosofiche sullo sviluppo della scienza sia stata altrettanto grande di quello delle concezioni scientifiche sullo sviluppo della filosofia. Si potrebbero addurre numerosi esempi, egli sottolinea spesso, di questa influenza:

Uno dei migliori[...]ci è fornito dal periodo post-copernicano della scienza, periodo che si concorda comunemente nel considerare come quello delle *origini della scienza moderna*; voglio dire la scienza che ha dominato il pensiero europeo per circa tre secoli, *grosso modo* da Galilei fino ad Einstein, Planck o Niels Bohr[...]se si parla molto dell'influenza del pensiero scientifico sull'evoluzione delle concezioni filosofiche, e questo a buon diritto poiché essa è evidente e certa -

basta evocare i nomi di Descartes, Leibniz e Kant - si parla, in compenso, molto meno, o niente affatto, dell'influenza della filosofia sull'evoluzione del pensiero scientifico. A meno che, come fanno talvolta gli storici di osservanza positivista, non si menzioni questa influenza solo per informarci che, nei tempi andati, la filosofia aveva effettivamente influenzato ed anche dominato la scienza, e che è appunto a ciò che la scienza antica e quella medievale devono la propria sterilità. E che, dopo la rivoluzione scientifica del XVII secolo, la scienza si è ribellata contro la tirannia di questa pretesa *Regina Scientiarum*, che il suo progresso è giustamente coinciso con la sua progressiva liberazione ed il suo fermo stabilirsi sulla base dell'empiria. Liberazione che non è avvenuta tutta d'un colpo - ahimè in Descartes, ed anche in Newton, si trovano ancora tracce di speculazione metafisica, e si è dovuto attendere il XIX secolo, o anche il XX, per vederle sparire completamente - ciò che ad ogni buon conto è avvenuto, grazie a Bacon, Auguste Comte, Ernst Mach e il Circolo di Vienna. (Koyrè, 1954, trad. it. 25-26)

Proprio la storia della scienza ci insegna invece, secondo Koyrè, che il pensiero scientifico non è mai stato interamente separato dal pensiero filosofico e che le grandi rivoluzioni scientifiche sono state sempre determinate da rovesciamenti o cambiamenti delle concezioni filosofiche. Ciò non significa affatto, in ogni caso (neanche per Koyrè, voglio sottolineare) sottovalutare il valore dell'esperienza e l'importanza che riveste la tecnica:

Il pensiero scientifico - parlo delle scienze fisiche - non si sviluppa *in vacuo*, ma si trova sempre all'interno di un quadro di idee, di principi fondamentali, di evidenze assiomatiche, che, abitualmente, sono state considerate appartenenti allo specifico della filosofia. Il che non vuol dire, beninteso, che io intenda negare l'importanza della scoperta di nuovi fatti, né quello della tecnica, né l'autonomia e perfino l'autologia dello sviluppo del pensiero scientifico. Ma questa è un'altra storia. (ivi, 28)

Ed in particolare, nel cercare di spiegare perché nell'antichità non si arrivò mai ad una vera scienza e quindi non si sviluppò una metodologia della misura che avesse come obiettivo "la precisione", Koyrè afferma:

La scienza greca non ha costituito una vera tecnologia, perché essa non ha elaborato una fisica. Ma perché, da capo, non l'ha fatto? Secondo tutte le apparenze, perché non ha cercato di farlo. E ciò, forse, perché essa non credeva che fosse fattibile.

In effetti, fare della fisica nel *nostro* senso del termine - non nel senso che Aristotele dava a questo vocabolo - vuol dire applicare al reale le nozioni rigide, esatte e precise della matematica e, in primo luogo, della geometria. Impresa paradossale, se mai ve furono, poiché la realtà, quella della vita quotidiana in mezzo alla quale viviamo e stiamo, non è matematica. E neppure matematizzabile. Essa è il dominio del movente, dell'impreciso, del « più o meno », del « pressappoco ». (Koyrè, 1961 B, trad. it. 90)

Ciò significa quindi che, almeno secondo Koyrè, era per i Greci sbagliato e insensato provare ad applicare la matematica e le metodologie che da essa scaturiscono allo studio dei fenomeni naturali:

Nella natura non ci sono cerchi, ellissi, linee rette. E' ridicolo voler misurare con esattezza le dimensioni di un essere naturale: il cavallo è senza dubbio più grande del cane e più piccolo dell'elefante, ma né il cane né il cavallo, né l'elefante hanno dimensioni strettamente e rigidamente determinate: c'è dovunque un margine di imprecisione, di «giuoco», di «più o meno», di «pressappoco».

Queste sono idee (o atteggiamenti) cui il pensiero greco è restato ostinatamente fedele, quali che fossero le filosofie dalle quali le deduceva; esso non ha mai voluto ammettere che l'esattezza possa essere di questo mondo, che la materia di questo mondo, del mondo nostro proprio, del mondo sublunare possa incarnare gli esseri matematici (a meno che non vi sia forzato dall'arte). Il pensiero greco ammetteva in compenso che nei cieli fosse del tutto diverso, che i movimenti assolutamente e perfettamente regolari delle sfere e degli astri fossero conformi alle leggi della geometria più rigorosa e più rigida. Ma appunto, i cieli sono altra cosa dalla terra. E per questo l'astronomia matematica è possibile, ma la fisica matematica non lo è. Così la scienza greca ha non soltanto costituito una cinematica celeste, ma ha anche osservato e misurato il cielo con una pazienza e un'esattezza sorprendenti, servendosi di calcoli e di strumenti di misura che essa ha ereditato o inventato. In compenso essa non ha mai tentato di matematizzare il movimento terrestre e - con una sola eccezione - di impiegare sulla terra uno strumento di misura, ed anche di misurare esattamente una cosa qualunque al di fuori delle distanze. Ora è attraverso lo strumento di misura che l'idea dell'esattezza prende possesso di questo mondo e che il mondo della precisione arriva a sostituirsi al mondo del «pressappoco ». (ivi, 90-91)

Ed arriviamo dunque all'argomentazione centrale, in relazione ai nostri temi, di Koyrè:

Nulla sembra rivelare in maniera più sorprendente l'opposizione profonda del mondo celeste e del mondo terrestre - mondo della precisione e mondo del più o meno - per il pensiero greco e la sua impotenza a superarne la dualità radicale, che la sua *incapacità di concepire una misura unitaria del tempo*. Poiché se la volta celeste con le sue rivoluzioni eternamente uniformi crea - o determina - divisioni rigorosamente eguali del tempo, se per questo fatto il giorno siderale è di una lunghezza perfettamente costante, non avviene lo stesso per il tempo della terra, per il nostro proprio tempo. Per noi la giornata solare si decompone in un giorno e in una notte, di lunghezza essenzialmente variabile, e giorno e notte si suddividono in un numero eguale di ore che sono però di durata ugualmente variabile, più o meno lunghe, o più o meno corte, a seconda della stagione. Tale concezione è così profondamente ancorata nella coscienza e nella vita greca che, paradosso supremo, il quadrante solare, lo strumento che trasmette alla terra il messaggio del moto dei cieli, è distolto dalla sua funzione prima, e lo vediamo forzato a marcare le ore più o meno lunghe del mondo del pressappoco.

Ora, se si pensa che la nozione del movimento è inseparabilmente legata a quella del tempo, che proprio entro e attraverso una nuova concezione del movimento si è realizzata la rivoluzione intellettuale che ha dato origine alla scienza moderna e nella quale la precisione del cielo è scesa sulla terra, si comprenderà bene come mai la scienza greca, anche quella di Archimede, non abbia potuto fondare una dinamica.(ivi, 91-92)(il corsivo è mio)

Per Koyrè è proprio questa nuova concezione del movimento, questa “rottura” filosofica con il mondo aristotelico, unita alle suggestioni pitagoriche, platoniche ed atomistiche presenti nella cultura rinascimentale, a rafforzare il convincimento che i dati sensibili debbano essere interpretati e non più accettati come sono senza alcuna riserva. Dopo Copernico l'esperienza, cui è interessata la ricerca, si presenterà sempre di più come il risultato di un'osservazione accurata e quindi (questo è l'aspetto più innovativo) *di misurazioni “precise”*.

Alla fine del secolo XVII si impose, proprio sull'onda di questo atteggiamento, un importantissimo precetto nella procedura scientifica: in via di principio, nessun esperimento doveva essere accettato, nessuna osservazione creduta, nessun fenomeno stabilito fino a che il lavoro non potesse essere riprodotto e le misurazioni verificate da altri scienziati oltre a quello che aveva annunciato i risultati e li aveva rivendicati a suo merito. Si fa strada l'idea che la scienza non ha nessun valore fino a che non viene comunicata, e quando viene comunicata non viene giudicata e valutata come un'opera d'arte, *ma viene verificata in base alle misure effettuate*. Ciò è alla base, evidentemente, della nascita dello stesso concetto di comunità scientifica (vedi anche prossimo paragrafo).

Organizzazione e descrizione matematica dei dati osservati e ricerca delle leggi che descrivono e spiegano i fenomeni naturali sono, insieme appunto alla verifica sperimentale, le componenti fondamentali della scienza moderna.

L'esperienza, si dice, è la sola guida del ricercatore, la prima virtù che egli deve possedere è l'umiltà davanti ai fatti; le osservazioni e non l'autorità degli antichi forniscono i soli elementi decisivi pro o contro una certa teoria. Nessuno, dunque, tra i ricercatori del tempo dichiara che occorre voltare deliberatamente le spalle alla natura e ai fatti, anzi si afferma ripetutamente che lo scienziato deve essere il «fedele segretario della Natura»[...]Per tutto il Seicento e anche nel Settecento continueranno a venire al mondo teorie «già vecchie e, per così dire, con una barba venerabile» ma il clima culturale a poco a poco subisce profondi mutamenti. Infatti, anche se nel Settecento ci saranno ancora ricercatori che cedono all'orgoglio di abbellire i fatti osservati e al piacere di meravigliare gli ascoltatori, tuttavia molti uomini di scienza sono già divenuti diligenti allievi della scuola del sospetto. «Più i fatti sono strani - scrive - Reaumur - più essi richiedono di essere attestati». Ed ancora: «in precedenza era forse un titolo per un fatto, al fine di essere creduto, quello di suscitare meraviglia; ma ciò che mi sembra costituire motivo di onore per il nostro secolo è che, in genere, si è giunti a saper dubitare». Come scriverà più tardi Claude Bernard «una cosa è avere una esperienza, un'altra è fare degli esperimenti». La differenza tra l'«esperienza» e l'«esperimento» consiste nel fatto che quest'ultimo impegna lo scienziato in un metodico interrogatorio della natura, esso, dunque, presuppone e richiede un *linguaggio* in cui formulare le domande, e un *vocabolario* che ci permetta di leggere e interpretare le risposte.(Baldini, 2000 A, 33-34)

Ed estendere l'osservazione e la misurazione al di là delle capacità dei sensi diventa sempre più un obiettivo primario. E' evidente che lo scienziato moderno è un uomo di laboratorio.

La creazione di strumenti e apparecchiature atti a estendere le possibilità di intervento concreto fu uno degli elementi basilari della rivoluzione scientifica del diciassettesimo secolo. Da questo momento, infatti, la scienza fu in grado di sfruttare al meglio le proprie scoperte al fine di approfondire il lavoro già svolto o di indirizzarlo a fini pratici. Le nuove conoscenze portarono alla creazione di nuovi dispositivi che, a loro volta, condussero all'acquisizione di ulteriori saperi.

Diversi erano gli strumenti che gli scienziati avevano a loro disposizione fin dal Medio Evo: alcuni, come la bilancia, la fornace, i compassi da disegno e i compassi per misurare, erano però antiquati e di semplice produzione artigianale; altri, quali gli astrolabi, i quadranti solari e i vari strumenti per osservazioni astronomiche, erano più complessi e la loro fabbricazione dipendeva da un'attenta e sapiente valutazione di una tradizione manoscritta. Falegnami e fabbri potevano, pertanto, realizzare costruzioni grossolane, ma spettava allo scienziato provvedere a progettazioni dettagliate, incisioni e graduazioni ¹. Il XVII sec. tramandò cinque grandi invenzioni che avrebbero continuato a indirizzare la scienza sperimentale per molti decenni: il telescopio, il microscopio, il barometro, il termometro e la pompa ad aria (poi pompa pneumatica).

In questo clima non sono davvero rari quindi i tentativi di miglioramento delle tecniche di misurazione, in particolare anche tentativi di stabilire nuove unità di misura ².

Gabriel Mouton, vicario a Lione, *fece il primo tentativo di sistema metrico*. Mouton, già affermato come astronomo per aver effettuato accurate osservazioni del diametro apparente del Sole, propose infatti che tutte le distanze venissero misurate attraverso un sistema decimale ³ di unità. La proposta dell'adozione di un sistema decimale è avanzata, in particolare, in una memoria allegata al suo lavoro ⁴ del 1670, *Observationes diametrorum solis et lunae apparentium*, intitolata significativamente *Una nova mensurarum geometricarum idea* ⁵.

Scriva Mouton nel secondo capitolo della memoria quanto segue:

Anche se le misure di cui qui si tratta per caso non fossero nuove per tutti, per il fatto che, a causa di una così vasta varietà di misure oggi in uso dovunque fra i popoli, è possibile che queste coincidano perfettamente con alcune di esse o con la massima approssimazione, tuttavia sono nuove non solo per il calcolo del metodo con cui sono determinate e inoltre senza rischio di alterazione alcuna, ma anche perché ognuna di esse con le misure maggiori, da cui è contenuta, e con le minori, che contiene, mantiene sempre un rapporto decimale, proporzione che tra quelle geometriche è la migliore ed è destinata ad apportare una grande facilità al calcolo geografico con una rapidità fuor di dubbio.

In base a ciò, le predette misure giustamente potrebbero essere definite Geometriche e forse più convenientemente degli antichi piedi e passi dei Romani, che ormai, per la lunghezza incerta e la meno regolare sequenza con le misure simili, ritengo giusto cedano davanti a questo nuovo sistema di misure, fatta salva l'opinione di chi è più cauto.

Mi è sembrato quindi opportuno stabilire le misure geometriche così che le principali siano due: la verga, cioè la misura più piccola tra le maggiori, e la verghetta, la più grande tra le minori; sono infatti quelle a metà tra le estreme e perciò più facili da trattare rispetto a tutte le altre. Continuando, 10 verghe faranno un funiculus (cordicella), 10 funiculi uno stadio e 10 stadi un miglio. Di nuovo, una verga è divisa in 10 verghette, una verghetta in 10 dita, un dito in 10 grani (chicchi), un grano in 10 punti e così in totale un miglio conterrà 10.000.000 di punti, o anche 1.000.000 di grani o 100.000 dita o 10.000 verghette o 1.000 verghe, o 100 funiculi o 10 stadi[...]

¹ Vedi Price, 1954

² Vedi anche Fazio, 1995 e Mc Coubrey, 1983

³ In effetti il matematico che per primo in occidente suggerì l'uso di frazioni decimali nelle misure fu il belga Simone Stevin, in una pubblicazione del 1585 intitolata *De Thiende (Sui decimali)*; ma egli non arrivò a proporre un vero sistema metrico

⁴ Mouton, 1670; una copia originale è conservata presso la Biblioteca Nazionale Vittorio Emanuele

⁵ Come spiega Mouton stesso nella Prefazione al lettore, il lavoro del 1670 si propone innanzi tutto altri scopi, ed è per rappresentare meglio i risultati relativi a questi obiettivi che l'abate avanza l'idea di utilizzare un diverso sistema di misura:

L'intera opera comprende tre libri, il primo dei quali, diviso in tre capitoli, tratta l'investigazione dell'altezza di Polo [latitudine] di Lione, sotto la quale iniziarono le osservazioni, descrive i mezzi e gli strumenti necessari a misurare i diametri degli Astri, indica il loro uso e tramanda i metodi con cui svolgere osservazioni di tal genere con più facilità e precisione che con i sistemi finora usuali[...]. Il secondo libro, diviso in tre capitoli, comprende un apparato di quindici calcoli dei moti della Luna, dei quali c'è bisogno, esposti per compiere quindici osservazioni del diametro apparente della Luna e contemporaneamente per esaminarla in profondità: segue, inoltre, un diario delle osservazioni intraprese sul Sole e la Luna per investigare i loro diametri apparenti. Il terzo libro è suddiviso in tre capitoli e in esso sono contenute alcune altezze del Sole a Mezzogiorno e di alcune stelle fisse[...]. E' sembrato, inoltre, opportuno, trattare brevemente verso la fine dell'opuscolo la diversa durata dei giorni naturali e la ripartizione del tempo[...]. Infine si esporrà una nuova idea (rappresentazione) delle misure geometriche e sarà presentato un nuovo metodo per comunicare quelle e qualunque altra misura e per preservarle in futuro e da modificazioni. (Mouton, 1670, 5-6)

Se a qualunque di queste misure sembrano attribuiti nomi inadatti, ecco ne sono proposti altri perché siano scelti quelli che piacciono di più. Il loro ordine è questo: Miglio, Centuria, Decuria, Verga, Verghetta, Decima, Centesima, Millesima. (Mouton, 1670, 431)

In seguito Mouton propose di adottare come campione di lunghezza 1/10000 dell'arco di 1 minuto (vedi par. prossimo e par. 3.2) di un meridiano terrestre. L'abate era ben consapevole che l'accurata misurazione di un minuto di arco di un meridiano della Terra era un'impresa difficile da realizzare. Di conseguenza esaminò un modo alternativo per arrivare ad una lunghezza standard, *non rinunciando ad utilizzare le caratteristiche fisiche della Terra stessa*: fece allora ricorso a pendoli con precise oscillazioni di tempo ¹. (Già nel 1660 la Royal Society aveva proposto come campione di lunghezza il cosiddetto *pendolo al secondo*, su suggerimento ripreso da Christian Huygens e Ole Romer. Nel 1668, anche Jean Picard, che era noto per aver misurato l'arco di meridiano che separava Sourdon, a sud di Amiens, da Malvoisine, a sud di Parigi, propose di prendere come modello la lunghezza del pendolo che batteva il secondo).

La relazione generale tra la lunghezza di un vero pendolo (l) e il periodo della sua

oscillazione (T) era nota: $T = \sqrt{\frac{l}{g}}$. Un vero pendolo è formato da una cordicella molto leggera, con un fulcro a bassa frizione all'estremità superiore e con tutta, o quasi tutta, la sua massa concentrata all'estremità inferiore.

Quando questo pendolo oscilla liberamente in avanti e indietro, la formula ci dice che più lungo sarà, più tempo impiegherà a compiere una completa oscillazione, e il tempo, o periodo, di tale oscillazione aumenterà in proporzione alla radice quadrata della lunghezza dal fulcro al centro della massa. Questo tempo, o periodo, è anche inversamente proporzionale alla radice quadrata dell'intensità gravitazionale – più correttamente chiamata accelerazione di gravità – in cui il pendolo sta oscillando ².

Il primo studioso ad utilizzare il termine *universale* nel riferirsi ad un sistema di misura fu l'inventore, architetto, geografo e appassionato egittologo italiano, originario di Agordo, Tito Livio Burattini, in un manoscritto pubblicato nel 1675 con il titolo *Misura Universale* ³. Nel frontespizio del libro di Burattini si legge esplicitamente:

Overo trattato nel qual si mostra come in tutti li Luoghi del Mondo si può trovare una MISURA, & un PESO UNIVERSALE senza che abbiano relazione con niun'altra MISURA, e niun altro PESO, & ad ogni modo in tutti li luoghi saranno li medesimi, e saranno inalterabili, e perpetui sin tanto che durerà il MONDO.

Burattini propose anche lui di utilizzare il pendolo, per determinare il campione della lunghezza. Alla nona pagina del libro ⁴ egli afferma:

Frà tutte le opere lasciateci dal signor Galileo Galilei Accademico linceo (che sono note, e tutte ammirabili) io stimo, che quella delli Movimenti Locali di gran lunga superi tutte le altre (benché ogn'una sia rarissima) mà sopra tutte pare a me , che quella delli Pendoli superi di tanto tutte le altre, quanto l'oro tutti gl'altri metalli, & il sole lo splendor di tutte l'altre stelle, bastando questa sola à render il suo nome immortale in tutti li secoli avvenire; perché questi ci danno il Tempo, questo ci dà la Misura, e quella ci dà il Peso, tutte cose necessarie alla vita Civile[...]

¹ Ricordo di nuovo che per una introduzione storica alle differenti unità e tecniche di misura del tempo rimando al par. 3.2 e, in parte, al par. 2.5

² Sappiamo oggi che, a livello del mare, ad una latitudine di 45°, a metà strada tra il polo e l'equatore, l'accelerazione standard dovuta alla gravità è di 9,80621 metri al secondo per secondo. A queste condizioni, un puro pendolo lungo 0,993577 metri compirà il suo ciclo di oscillazione (andata e ritorno) in soli 2 secondi: 1 secondo per l'oscillazione in una direzione e 1 secondo per tornare indietro

³ Burattini, 1675

⁴ L'originale di Burattini (copia conservata presso la Biblioteca Nazionale Vittorio Emanuele di Roma) non ha le pagine numerate

Sempre nella stessa pagina Burattini, con una frase davvero storica (la prima in cui appare il termine metro per indicare una unità di lunghezza) avanza l'ipotesi di chiamare *metro cattolico* (cioè universale) il campione realizzato con il pendolo che batte il secondo:

Dunque li Pendoli saranno la base dell'opera mia, e da quelli cavarò prima il mio Metro Cattolico, cioè misura universale, che così mi pare di nominarla in lingua Greca, e poi da questa cavarò un Peso Cattolico[...]prima di tutte le altre cose da mostrarsi bisogna far vedere la natura delli Pendoli, e proporzione, che tengono al tempo...

E alla ventesima pagina, dopo aver introdotto alcune definizioni sui pendoli e le loro leggi, egli propone così la definizione di metro:

Il Metro Cattolico non è altro che la lunghezza di un Pendolo, le di cui vibrazioni siano 3600 in un hora[...]ch'io intendo d'un Pendolo libero, e non di quelli che sono attaccati agli Horologi.

Nella pagina successiva Burattini presenta anche una tavola con tempi, lunghezze e “vibrazioni” dei pendoli, per meglio chiarire i suoi suggerimenti:

TAVOLETTA, NELLA QUALE SI VEDE LA LUNGHEZZA DELLI PENDOLI, CHE FANNO LE LORO VIBRAZIONI DA UN MINUTO SECONDO FINO A DIECI MINUTI SECONDI

<i>Minuti secondi</i>	<i>Delli Pendoli lunghezza</i>	<i>Vibrazioni che fanno li Pendoli in un hora</i>	<i>Vibrazioni che fanno in hore ventiquattro</i>
1	1	3600	86400
2	4	1800	43200
3	9	1200	28800
4	16	900	21600
5	25	720	17280
6	36	600	14400
7	49	514 –2/7	12342 –6/7
8	64	450	10800
9	81	400	9600
10	100	360	8640
<i>Radici</i>	<i>Quadrati</i>		

Fu quindi in questo periodo (metà del secolo XVII), come ho cercato di mostrare, che *per la prima volta si avanzò l'ipotesi di prendere un'unità di base dal mondo fisico piuttosto che dal corpo umano.*

Come vedremo (par. 2.6), curiosamente 308 anni più tardi, nel 1983, il metro fu definito in relazione al “secondo” di tempo, ma in maniera tale che dipende dalla velocità della luce nel vuoto e non dalla lunghezza di un pendolo; dato che si ritiene che la velocità della luce nel vuoto sia una costante universale, i problemi posti dal pendolo (vedi prossimo paragrafo) sarebbero ora superati.

2.5 Il Settecento, la nascita del sistema metrico decimale e la “globalizzazione delle misure”

E' del tutto evidente che la diversità dei pesi e delle misure utilizzati nei vari paesi e, spesso, anche all'interno di una stessa provincia, è causa di imbarazzo nel commercio, nello studio della fisica, nella storia e perfino nella politica; i nomi delle misure straniere che ci appaiono ignoti, la pigrizia e la difficoltà nel convertire i loro valori nei nostri sono motivo di confusione e ci impediscono di conoscere fatti che potrebbero esserci utili.

Charles de La Condamine

Date ascolto alla vostra passione per la scienza dice la natura, ma cercate che la vostra scienza sia umana e tale che possa avere un legame diretto con l'azione e la società[...]Sii filosofo, ma in mezzo a tutta la tua filosofia resta pur tuttavia un uomo.

David Hume

Gli interessi di carattere pratico della scienza settecentesca, stimolata in piena rivoluzione industriale a rispondere a sempre crescenti domande provenienti dal mondo produttivo, sono troppo ovvi per dover essere sottolineati. D'Alembert, proprio agli inizi del suo *discorso preliminare* dell'*Encyclopédie*, forse la più famosa impresa dell'Illuminismo, afferma che “basta appena riflettere sui reciproci nessi che sussistono tra le invenzioni umane per rendersi conto che scienze e arti si aiutano le une con le altre, e che v'è una catena che le unisce”. La stessa *Encyclopédie*, il cui sottotitolo era *Dizionario analitico delle Scienze, delle Arti e dei Mestieri*, è stata definita ¹ una “storia naturale dell'industria”. Del resto, insieme all'*Encyclopédie* furono realizzati moltissimi studi di carattere industriale, pervasi

da un metodo sofisticato, che innalzò le arti e i mestieri al di sopra della palude della tradizione incolta, e da una tradizione razionale, e dalla classificazione per trovare ad ognuno di essi il giusto posto nella grande unità della conoscenza umana. (Gillispie, 1960, trad. it. 177)

E' l'epoca delle prime applicazioni della macchina a vapore (nel 1769 James Watt brevettò il modello perfezionato di una macchina in cui per la prima volta viene sfruttato, anziché il ciclo termico, il principio della forza meccanica del vapore condensato), dei primi studi teorici e delle prime applicazioni pratiche dell'elettricità. In una parola, nasce la grande industria meccanica e con essa tutta la problematica sperimentale che vi si connette, con ovviamente dirette ricadute sulla tecnologia della misura.

Fu nel corso del XVIII secolo che la logica del profitto determinò l'instaurarsi di stretti e organici rapporti tra sviluppo tecnologico e processo produttivo. Allo stesso tempo, fu in questo secolo che grazie all'Illuminismo divenne possibile avviare un'indagine alla scoperta delle leggi della natura e delle norme che regolano le società umane attraverso una ricerca libera, non influenzata da dogmi e votata alla verifica sperimentale. Sia gli Stati-nazione che i conglomerati commerciali si dedicarono a favorire l'esplorazione, il commercio e la colonizzazione; come parte di questo processo, essi sponsorizzarono programmi estensivi di misurazioni e rilievi cartografici di tutta la Terra, nonché la compilazione di statistiche economiche e sociali. Gli strumenti astronomici e topografici furono usati per determinare la forma del nostro pianeta e la configurazione dei territori nazionali; anche gli strumenti meteorologici assolsero una funzione importante nell'esplorazione, in quanto furono usati per disegnare una carta geografica degli estremi climatici dei tropici e delle regioni polari o per calcolare l'altezza delle montagne. Queste attività, tra l'altro, sollevarono i primi problemi di normalizzazione degli apparecchi e delle scale di misura.

Numerose furono inoltre le invenzioni realizzate, alcune delle quali trovarono un'applicazione pratica e furono di seguito migliorate, ed è rilevante notare che contemporaneamente il '700 pose le basi della fisica, della chimica, della biologia, della botanica e della geologia moderne. Il parafulmine di B. Franklin, la pila elettrica di A. Volta e, soprattutto, la macchina a vapore di J. Watt furono tra le invenzioni più famose e nello stesso tempo si dimostrarono quelle che

¹ Gillispie, 1960

apportarono più vantaggi ai successivi sviluppi teorici effettuati nell'ambito della fisica e dell'ingegneria ¹.

Il programma baconiano della Royal Society - procurare il dominio dell'uomo sulla natura e con esso il benessere per la società umana mediante il sapere scientifico - in questo secolo non appare un sogno utopistico, bensì uno scopo non solo storicamente attuabile, ma già in via di attuazione: donde l'ottimismo circa le sorti del genere umano, e soprattutto circa le possibilità che a questo possono derivare dallo sviluppo della ragione, della scienza e “dell'operosa attività” ². Anche gli avversari dell'ottimismo metafisico di Gottfried Leibniz conservano in fondo alla loro critica una fede nella ragione e nel lavoro: Jean Jacques Rousseau, alla fine della sua violenta polemica contro la civiltà che ha corrotto tutta quanta la natura alienando l'uomo da se stesso, conserva la fede nella rigenerazione dell'umanità stessa mediante un'organizzazione razionale dello stato.

Watt realizzò una macchina in grado di trasformare l'energia del vapore in lavoro meccanico nel 1780: il 26 agosto del 1789, l'Assemblea Nazionale francese approvava la *Dichiarazione dei diritti dell'uomo e del cittadino* sancendo solennemente il sacro e inviolabile diritto alla proprietà privata. Ed anche se naturalmente non è possibile formulare nessi causali di tipo unidirezionale fra questi fenomeni, si può tuttavia formulare l'ipotesi (vedi anche l'Introduzione) che *solo quando una serie di invenzioni e una serie di pratiche sociali, politiche ed economiche si incontrano* abbiamo vera innovazione in ambito scientifico e tecnologico.

Le innovazioni tecno-economiche, migliorando la produttività del lavoro umano, hanno determinato la fine del regime feudale dell'autoconsumo ed incentivato la produzione per il mercato su vasta scala e la *ricerca del profitto*. D'altra parte, l'applicazione diffusa e sistematica della scienza ai processi produttivi implicava investimenti di capitali talmente elevati che non sarebbero stati pensabili se non in un clima culturale ed ideologico congeniale alla libera iniziativa e ai valori della proprietà privata e del successo individuale. (Abruzzese, Borrelli, 2000, 63)

Il problema della comunicazione sempre più diventa impellente, ed è utile notare con riferimento alle affermazioni fatte, che

la rivoluzione industriale non avrebbe potuto assicurare la libera circolazione delle merci teorizzata da Adam Smith se non fosse stata accompagnata da un imponente rivoluzione dei trasporti. Se si pensa che fino a quel momento il mezzo di locomozione più rapido era il cavallo, si può immaginare quale straordinaria impressione dovettero destare presso i contemporanei l'invenzione ad opera dell'americano Robert Fulton del primo battello a vapore che nel 1819 attraversò l'Atlantico, oppure la realizzazione del primo tronco ferroviario tra Stokton e Darlington in Inghilterra per merito dell'ingegnere inglese Gorge Stephenson.(ivi, 64)

E fu proprio l'adozione dello scartamento unico per le strade ferrate europee che diede un impulso decisivo al *progetto di standardizzazione e normalizzazione internazionale delle tecnologie* (vedi prossimo paragrafo).

E' con l'avvento del metodo sperimentale da una parte e la spinta alla collaborazione internazionale dall'altra (si pensi alle esigenze maturate dall'accrescersi degli scambi commerciali e culturali) che venne per la prima volta *fortemente* sottolineata la necessità di disporre di unità di misura unificate in sostituzione dell'enorme numero di unità in uso nei diversi paesi, situazione che rendeva per esempio pressoché impossibile qualsiasi confronto dei risultati ottenuti da ricercatori di diversa nazionalità nell'osservazione dello stesso fenomeno fisico. Il problema *fu tuttavia affrontato in maniera risolutiva* solo ai tempi della Rivoluzione Francese quando, nel 1790, l'Assemblea Nazionale avviò il progetto di costruire un *sistema di unità di misura universale* incaricando del compito di fissare le unità di misura e i campioni di lunghezza e massa due commissioni delle quali fecero parte emeriti scienziati e filosofi (vedi oltre). Come accennavo nell'Introduzione, sottolineare questi fatti non significa sottovalutare la tesi che i motivi degli straordinari risultati ottenuti dalla scienza francese durante e subito dopo la Rivoluzione abbiano anche origine in un periodo

¹ Vedi per esempio Sais, Tavanini, 1992

² Preti, 1975

precedente. Gillispie mostra con dettaglio ¹ come già alla fine dell'Ancien Régime si era raggiunto un livello elevato di riflessione sullo stato della conoscenza che era necessario per alcuni settori scientifici. Ciò perché, Gillispie argomenta storicamente, la scienza aveva avuto *interazioni* con gli affari pubblici dello stato francese. Il punto da sottolineare è comunque il seguente, come pure ammette lo stesso Gillispie:

Caratteristica della Francia di due secoli orsono è che le interazioni [tra cultura e potere] diventarono regolari e abbastanza frequenti da poter essere definite sistematiche anziché episodiche. (Gillispie, 1980, trad. it. 7)

Gillispie in ogni modo rifiuta di riconoscere il fatto che l'avvento della libertà economica abbia rappresentato indirettamente un momento di svolta nello sviluppo della scienza e della tecnica:

E' un'illusione del liberalismo pensare che la libertà, che è per esso la causa migliore, sia stata storicamente concomitante alla scienza, come condizione o come conseguenza. Né Bacone né Cartesio prevedero mai che lo sarebbe stata e le conquiste tecniche dell'Unione Sovietica sono una prova schiacciante che non è necessaria. Gli scienziati, al pari della maggioranza degli uomini possono amare la libertà, ma raramente ne hanno bisogno allo stesso modo degli scrittori. (ivi, 105)

Egli asserisce che il vero motivo dello straordinario fiorire delle diverse discipline scientifiche e tecniche avvenuto in concomitanza con la nascita della società moderna va ricercato, almeno in Francia, nel periodo storico precedente, l'ultima fase dell'ancien régime. Nell'individuare negli apparati e nelle esigenze dello stato moderno i veri propulsori di tale innovazione, Gillispie indica in particolare la data dell'inaugurazione del ministero Turgot (1774), il quale “si affidò alla scienza e al sapere sistematico nel formulare le scelte volte a riabilitare la monarchia francese quando salì sul trono Luigi XVI”. Ma egli stesso mette subito in luce che

naufragati come riforme, i punti principali del suo programma riemersero quindici anni dopo nei progetti delle istituzioni rivoluzionarie. (ivi, 11)

Un esempio davvero eclatante di queste ultime considerazioni è proprio la vicenda legata alla nascita di un sistema di misura universale, il sistema metrico decimale. In effetti nel 1774 Turgot incaricò il filosofo Jean-Antoine-Nicolas Caritat, marchese di Condorcet (come ispettore soprannumerario) di lavorare a fianco del vecchio funzionario Tillet all'elaborazione di un progetto accettabile all'Accademia delle Scienze per uniformare pesi e misure. Si dice che l'idea di basare l'unità di misura della lunghezza su un oggetto naturale piacesse a Turgot ². Fu forse il matematico e geografo Charles de La Condamine a suggerire in questa occasione il pendolo con una frequenza di un'oscillazione al secondo, lungo circa un metro, come l'unità più adatta. In ogni caso fu affidato ad un astronomo, Messier, l'incarico di determinarne la lunghezza esatta al quarantacinquesimo parallelo. Questa scelta determinò però forti contrasti con i tradizionalisti, tra i quali Tillet, ed il progetto dovette essere abbandonato. Tillet, quando la riforma dei pesi e delle misure fu ripresa all'inizio della Rivoluzione, si battè poi per uniformare le unità tradizionali piuttosto che stabilirne delle nuove.

E' un fatto riconosciuto che dal momento del successo della Rivoluzione in poi la comunità scientifica francese ebbe una tale superiorità nel mondo da essere stata eguagliata solo (forse) da quella raggiunta dal complesso tecnologico e scientifico americano contemporaneo. E questo evento straordinario fu dovuto in prima istanza dalla nascita stessa di una vera comunità scientifica in senso moderno. Sottolinea infatti Gillispie:

Dal punto di vista della storia della scienza vera e propria, in quanto allora cominciava ad emergere è possibile individuare una seconda rivoluzione scientifica. Manifestando nella scienza i mutamenti e i rinnovamenti dell'Europa

¹ Gillispie 1960, 1980

² Gillispie, 1980

rivoluzionaria, tale spinta si sarebbe diretta verso l'organizzazione più che verso la conoscenza, come era avvenuto nel secolo XVII. Si può anzi sostenere che soltanto a seguito di questi mutamenti in Francia e quindi all'estero è possibile parlare veramente di “scienziati” e di “scienza” nel senso di persone che coltivano con piena professionalità le discipline moderne, in particolare la fisica e la biologia, con il loro apparato moderno di specialità e problemi. (ivi, 97)

Uno tra i membri dell'Assemblea Nazionale Rivoluzionaria di Francia era il vescovo di Autun, Charles Maurice de Talleyrand-Perigord, passato alla storia semplicemente col nome di Talleyrand. Era entrato in politica come rappresentante della Chiesa negli Stati Generali, ma, nel 1789, propose e ottenne la nazionalizzazione dei beni ecclesiastici. Quando la prima Costituente stava volgendo al termine, nel 1791, Talleyrand si espresse in favore dell'istruzione gratuita fino all'università e sostenne che la religione – ma non un particolare dogma o una fede specifica – doveva essere insegnata nelle nuove scuole pubbliche. Talleyrand propose una riforma del sistema dei pesi e delle misure presso l'Assemblea, circa un secolo dopo l'iniziativa di Mouton. Nell'aprile del 1790 presentò con successo un progetto basato su un'unità di lunghezza determinata da un pendolo che batteva secondi di tempo. Il 22 agosto 1790 Luigi XVI approvò una legge che sosteneva l'iniziativa e promuoveva nuove indagini scientifiche finalizzate a stabilire tale lunghezza ¹. Questa legge prevedeva che il re suggerisse anche al parlamento inglese di procedere in tal senso e che la Royal Society di Londra e l'Accademia delle Scienze di Parigi collaborassero al fine di sviluppare le ricerche scientifiche necessarie a determinare definitivamente questa unità di base.

L'Accademia delle Scienze venne invitata a contattare la Royal Society. Non giunse però alcuna risposta e la Francia continuò da sola questo storico progetto.

L'Accademia delle Scienze formò due commissioni: la prima si occupò dell'adozione di una scala unica per tutti i pesi e le monete, la seconda – a cui parteciparono studiosi quali Jean Charles Borda, Pierre Simon de Laplace, Joseph Louis Lagrange, Gaspard Monge, Antoine Laurent Lavoisier (fino a quando non venne ghigliottinato per ordine della Convenzione) e Condorcet - avrebbe dovuto scegliere l'unità di lunghezza tra le tre che apparivano più promettenti: il pendolo al secondo, il quarto di equatore e il quarto di meridiano.

Le commissioni effettuarono numerose ricerche e presentarono i loro rapporti il 27 ottobre 1790 e il 19 marzo 1791. Nel primo di essi si sollecitava l'adozione di un sistema decimale. Nel secondo veniva consigliata, per la lunghezza, l'adozione di un'unità equivalente a un decimilionesimo della distanza tra il Polo Nord e l'Equatore. Questa unità fu chiamata *metro* ², termine che deriva dalla parola greca *metron*, che, come detto (par. 1.1), significa *una misura*. Come unità della massa fu pensata la massa dell'acqua necessaria a riempire un volume corrispondente (vedi anche oltre) a quell'unità, mentre, per quanto riguarda l'unità di tempo, fu ipotizzato inizialmente che questa avrebbe dovuto essere calcolata in base ai battiti di un pendolo che avesse la lunghezza di un'unità. L'idea di far derivare tutte le unità di misura dal più piccolo numero possibile di unità di base, oggi fondamento del Sistema Internazionale (vedi par. 2.6), fu coronata quindi da successo per la prima volta in questo preciso momento storico,

I lavori della seconda commissione portarono pertanto all'adozione del quarto di meridiano terrestre come base di un nuovo sistema metrico. Si decise in questo modo di rinunciare sia al pendolo, per il fatto che questa opzione prevedeva troppe variabili locali per poter essere considerata universale ³, che al quarto di equatore, perché troppo difficile da misurare. Due astronomi e topografi, Jean Baptiste Joseph Delambre e Pierre Francois André Méchain, ricevettero l'incarico di misurare la lunghezza del quarto di meridiano e Lavoisier ebbe il compito di misurare la massa di un volume d'acqua noto e di definirne operativamente l'unità.

L'obiettivo di universalità, alla base di tutti i lavori proposti dall'Assemblea Nazionale, era tipico dello spirito illuminista. Talleyrand non desiderava affatto che le misure di Parigi fossero adottate in

¹ Vedi per dettagli McCoubrey, 1983

² Colui che propose il termine (“un nome così espressivo che direi quasi francese”) in questo contesto (12-5-1790) fu il matematico Auguste Savinien Leblond

³ L'accelerazione di gravità dipende dal luogo (altitudine, latitudine) dove si effettua la misura; ciò avrebbe anche reso “variabile” il secondo

tutta la Francia, come, invece, era stato auspicato durante l'Ancien Régime. Voleva, infatti, che il nuovo prototipo fosse preso dalla natura (“pris dans la nature”) e fosse accettato in tutto il mondo. L'Accademia delle Scienze diede disposizione che tutte le misure in uso nelle varie province fossero dismesse e le fossero inviate. Lo scopo di tale iniziativa appariva semplice: si credeva, infatti, che nei sei mesi successivi alla spedizione dei nuovi campioni le vecchie misure sarebbero scomparse del tutto ¹.

Anche se questo progetto si presentava apparentemente come la realizzazione di un antico sogno della monarchia, il Re ne dette approvazione formale solo il 22 agosto 1790, attribuendo a Condorcet, che all'epoca rivestiva il ruolo di segretario dell'Accademia, l'incarico di portare a termine l'iniziativa l'11 novembre dello stesso anno.

L'obiettivo di universalità era inoltre un obiettivo *del tutto nuovo e rivoluzionario*:

Nel secolo XVIII le unificazioni premetriche non hanno obiettivi universali; al contrario, come di regola fin dal tempo della dinastia carolingia, le misure sono attributo del sovrano e devono essere in vigore fin dove si estende il suo potere. Obiettivi universali, globali se li pone la riforma metrica. (Kula, 1970, trad. it 130)

Il sistema metrico diventa così l'incarnazione della voglia rivoluzionaria di uniformità e del desiderio di limitazione di un potere economico esercitato per secoli anche attraverso l'uso di innumerevoli unità di misura differenti.

Come sottolinea spesso Kula nei suoi studi, a differenza dei sistemi di misura più antichi che sono il risultato dell'evoluzione di pratiche tradizionali proprie delle varie società, il sistema metrico ebbe come base i “principi scientifici” più convalidati disponibili all'epoca della sua invenzione e fu ideato con lo scopo di soddisfare le nuove esigenze emerse a seguito dello sviluppo del commercio e dell'industria. L'impegno civile che caratterizza l'Illuminismo, per cui la cultura filosofica deve scendere alla considerazione dei problemi concreti, commisurarsi con questi ultimi indicando nel contempo le soluzioni più confacenti ai veri interessi della società, è certamente alla base di questo imponente sforzo.

In questa prospettiva si evidenzia così lo scopo eminentemente pratico della filosofia, cioè il suo impegno civile volto a diffondere nella società uno *spirito di precisione* indissolubilmente legato all'attività economica in base alla quale si sviluppa, e che costituisce la reale promotrice del progresso e della sempre maggiore diffusione *della civiltà, cioè della razionalità*.

Ciò che si rimproverava alla molteplicità dei gerghi veniva rimproverato anche alla diversità di pesi e misure: la legna da ardere era venduta a corde, il carbone di legna a carrate, il carbon fossile a carra, l'ocra a botti, e il legname per carpenteria al marco o alla solive. Si vendevano i frutti di cedro alla poinçonnée, il sale al moggio, al sestario, a mine, a mezza mine, a stiaia, a once; la calce si vendeva al poinçon, e i minerali alla raziara. Si comprava l'avena a profonda e il gesso a sacchi; il vino a pinta, a mezza pinta, a caraffa, a roquille, a boccale e a mezzetta. L'acquavite si vendeva a brente, il grano a moggi e a salme. Le stoffe, i tappeti e la tappezzeria si compravano ad aune; boschi e prati venivano misurati in pertiche, i vigneti in daureés. L'arpento valeva dodici hommées, misura che indicava una giornata di lavoro di un uomo; altrettanto valeva per l'ouvrée. Gli speciali pesavano in libbre, once, dramme e scrupoli; la libbra valeva dodici once, l'onda otto dramme, la dramma tre scrupoli, e lo scrupolo venti grani.

Le lunghezze erano misurate in tese e in piedi del Perù, che equivalevano a un pollice, una logne, e otto punti di piede del Re, il quale piede poteva essere quello del re di Macedonia o di Polonia, e anche quello delle città di Padova, di Pesaro e Urbino. Era, molto approssimativamente, l'antico piede della Franca Contea, del Maine e del Perche, e il piede di Bordeaux per l'agrimensura. Quattro di questi equivalevano più o meno all'auna di Laval, cinque formavano l'esapodo dei Romani, che era pari alla canna di Tolosa e alla verga di Norai. C'era poi quella di Raucourt, e anche la corda di Marchenoir en Dunois. A Marsiglia, la canna per le lenzuola era di circa un quattordicesimo più lunga di quella per la seta. Che confusione: sette-ottocento nomi!

«Due pesi e due misure!» era il simbolo stesso dell'ineguaglianza. (Guedj, 1997, trad. it. 24)

In effetti è stato stimato ² che in quel periodo in Francia vi erano circa 800 nomi di misure, e considerando i loro differenti valori nelle diverse regioni e città, circa 250.000 unità di misura

¹ Kula, 1970

² Vedi per esempio l'articolo on-line *The History of measurement*, di O' Connor J.J., Robertson E.F. all'indirizzo <http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/HistTopics/Measurement.html#s25>

differenti! I nomi delle misure erano spesso, in tutte le loro varianti, legati non solo alle dimensioni del corpo umano, ma anche alle sue attitudini: quantità di terra lavorata in un giorno, quantità (di sicuro variabile!) di vino che si può bere durante un pasto, ecc... In un certo senso l'eterogeneità e la diversità riflettevano il potere che risiedeva nelle mani dei nobili locali che avevano resistito nei secoli a tutti i tentativi dei Re e consiglieri della corona di uniformare gli standard ¹.

Si era in tal modo venuto a formare, all'interno di ogni gruppo sociale, collettività territoriale o corporativa, un sistema di misure appropriato alle esigenze del gruppo, sistema spesso omogeneo, ma solo se considerato unicamente dal punto di vista del luogo o del mestiere. In un'epoca in cui il lavoro, i governi e la vita civile erano fortemente localizzati, anche le misure erano locali. Ogni comunità locale aveva il proprio 'pollice' e il proprio 'piede', e analogamente accadeva per le unità di altre grandezze.

L'insieme delle misure allora in uso può essere definito come una sorta di caos informe, che aveva lasciato così ampio spazio a innumerevoli contrasti e alle ingiustizie sociali:

Le misure premetriche - proprio perché hanno un carattere non convenzionale ma significativo, perché sono un attributo del potere e uno strumento per imporre il privilegio di classe e perché attorno ad esse si è accesa spesso violenta la lotta di classe - posseggono un ricco e concreto contenuto sociale, che la metrologia storica avrebbe il compito di portare alla luce. (Kula, 1970, trad. it. 109)

Gli ideali e i valori nuovi erano del tutto *compatibili* con l'evidenza, considerata indiscutibile agli albori della società moderna, che la proprietà privata fosse un fattore decisivo di progresso economico. Ciò includeva la necessità di una profonda rivoluzione di tutti i rapporti sociali e di tutti i modi di vivere, ma anche di tutte le istituzioni che regolavano il lavoro, la produzione e in generale tutta la vita sociale. Lo squilibrio fra il dinamismo delle strutture economiche e "l'arretratezza" delle istituzioni (politico-amministrative, culturali, religiose, civili) fu percepito in maniera sempre più consapevole dagli uomini di governo e dai ceti intellettuali. Alcuni aspetti e sfaccettature di questo passaggio decisivo della storia dell'umanità sono stati descritti in maniera mirabile, per quanto critica, da Michel Foucault. In elaborazioni celebri, rimaste nella storia della filosofia e della letteratura, di originale ricostruzione storica di alcune fondamentali istituzioni, Foucault ha cercato di reperire in una serie di esempi le tecniche e le strategie che si sono più di altre generalizzate. Tecniche, come lui afferma, spesso *attente al dettaglio*, che definiscono una nuova *microfisica del potere*, per usare una sua famosa espressione. In *Sorvegliare e punire*, per esempio, nel descrivere la nascita della istituzione penitenziaria moderna a lungo si sofferma sulle esigenze di *precisione* talvolta minuziosa che il nuovo atteggiamento richiedeva:

Per ammonire gli impazienti, ricordiamo il maresciallo di Saxe: «Benché coloro che si occupano dei dettagli passino per persone limitate, mi sembra tuttavia che questa parte sia essenziale, poiché è il fondamento ed è impossibile costruire alcun edificio né stabilire alcun metodo senza averne i principi. Non basta aver il gusto dell'architettura. Bisogna conoscere il taglio delle pietre». Di questo «taglio delle pietre» ci sarebbe tutta una storia da scrivere - storia della razionalizzazione utilitaria del dettaglio nella contabilità morale e nel controllo politico. L'età classica non l'ha inaugurato, l'ha accelerato, ne ha mutato la scala, le ha dato strumenti precisi e, forse, ne ha trovata qualche eco nel calcolo dell'infinitamente piccolo o nella descrizione dei più minuscoli fra gli esseri naturali[...]La minuzia dei regolamenti, lo sguardo cavilloso delle ispezioni, il controllo sulle minime particelle della vita e del corpo daranno ben presto, nell'ambito della scuola, della caserma, dell'ospedale o dell'opificio, un contenuto laicizzato, una razionalità economica o tecnica a questo calcolo mistico dell'infimo e dell'infinito[...]Una minuziosa osservazione del dettaglio e, nello stesso tempo, un'assunzione politica delle piccole cose, per il controllo e l'utilizzazione degli uomini, percorrono l'età classica, portando con sé tutto un insieme di tecniche tutto un corpus di procedimenti e di sapere, di descrizioni, di ricette e di dati. E da queste inezie, senza dubbio, è nato l'uomo dell'umanesimo moderno. (Foucault, 1975, trad. it. 151-153)

¹ Carlo il Calvo (editto di Pitres dell'864), Luigi l'Hutin, Filippo il Lungo, Francesco I (editto sull'*anna* del 1540-1545), Enrico II nel 1557, " Suppliche degli Stati Generali" del 1560, 1576, 1614, Enrico IV, Colbert, Laverdy nel 1764, Trudaine e Marigny del 1766. Philippe Le Bel, Philippe Le Long, Louis XI, Louis XII, François I, Henri II, Louis XIV avevano, in particolare, tentato di rendere le unità di Parigi obbligatorie in tutto il Paese

Niente deve essere lasciato all'arbitrio e al disordine. Il sogno di una società perfetta è il sogno di una società *ordinata*. Alla base c'è la speranza, il tentativo, di costituire una vita al riparo di tutto ciò che può portare scompiglio:

La costituzione di *quadri* è stata uno dei grandi problemi della tecnologia scientifica, politica ed economica del secolo XVIII: sistemare orti botanici e giardini zoologici, e costruire nello stesso tempo classificazioni razionali degli esseri viventi; osservare, controllare, *regolarizzare la circolazione delle merci e della moneta*, e costruire, nello stesso tempo, un quadro economico che possa valere come principio di arricchimento[...] (ivi, 161) (il corsivo è mio)

Questa è certo una tecnica di potere come le precedenti, ma Foucault sottolinea che è anche (ed è ciò che più ci interessa, nell'ambito delle considerazioni di questo scritto) un *procedere conoscitivo*:

Il quadro, nel secolo XVIII, è insieme una tecnica di potere ed un procedimento di sapere. Si tratta di organizzare il multiplo, di darsi uno strumento per percorrerlo e padroneggiarlo; si tratta di imporgli un *ordine* [...] ordinamento spaziale degli uomini, tassonomia, spazio disciplinare degli esseri naturali; quadro economico, *movimento regolato delle ricchezze*. (ibidem) (il corsivo è mio)

Come detto, nei capitoli 6, 7, 8 tratterò con un certo dettaglio *la teoria convenzionale degli errori di misura*. Anche se in singoli pensatori o scienziati c'è sempre stata una certa consapevolezza del problema della precisione di una misura, prima dell'età moderna non vi erano mai stati sviluppi sistematici significativi in questo campo. E quindi, come avverte anche Koyré, citando Lucien Febvre, l'eterogeneità delle misure si esprimeva anche nella mancanza di tecniche condivise per rappresentarne i risultati:

è anche vero che non mancavano soltanto gli strumenti di misura, ma *il linguaggio che avrebbe potuto servire ad esprimerne i risultati*. "Né nomenclatura chiara e ben definita, né campioni di esattezza garantita, adottati da tutti con consenso gioioso. La moltitudine incoerente dei sistemi di misura variabili di città in città, di villaggio in villaggio. Si tratti di lunghezza, di peso o di volume" (Koyré, 1961 B, 98) (il corsivo è mio)

Non è certo per caso quindi che i primi studi sistematici e le prime vere teorie sulla trattazione degli errori di misura iniziarono a svilupparsi proprio agli inizi del XIX secolo. Ma, per non appesantire ora la lettura di carattere più storico con considerazioni inevitabilmente di tipo soprattutto tecnico, presenterò questo aspetto della metodologia della misura, come già anticipato, nei capitoli finali di questo lavoro. Va comunque sottolineato che prima della metà del XVIII sec. spesso mancava la stessa comprensione quantitativa necessaria per effettuare molte misure significative. Piuttosto, ciò che spesso appariva come una misura non forniva ancora la vera quantità. La pratica, abbastanza comune nel primo Settecento, di tracciare sulle scale dei termometri indicazioni del tipo "molto caldo", oppure "calore del sangue", suggerisce che la lettura numerica fornita non fosse realmente quantitativa¹. Per esempio, Daniel Gabriel Fahrenheit fece corrispondere al valore di 100° la temperatura del sangue, mentre Anders Celsius adottò per lo stesso valore la temperatura dell'acqua in ebollizione. La stessa parola "temperatura" presa in prestito dall'antica teoria medica, stava a indicare non una misura quantitativa del calore (vedi anche par. 1.2), ma una proprietà generale o 'temperamento' di un oggetto. Nessuno si preoccupava del resto della possibilità che la temperatura corporea dell'osservatore interferisse con la misura. Tarare i termometri in base a punti fissi divenne la norma solamente negli anni Quaranta del XVIII sec., e anche allora non esisteva alcuna convenzione che regolasse la taratura stessa.

Voglio ricordare ancora che nel prossimo paragrafo, e nel prossimo capitolo, accennerò alla *misura del tempo*. E' questo un tema decisamente utile ed istruttivo per quanto riguarda la riflessione sui rapporti tra i progressi della scienza e della tecnica e le *esigenze della società*:

¹ Vedi Feldman, 2001

La storia della cronometria ci offre un esempio impressionante, forse il più impressionante di tutti, della nascita del pensiero tecnologico che, progressivamente, penetra e trasforma il pensiero - e la realtà - tecnica stessa. E la innalza a un livello superiore. Questo spiega a sua volta come mai i tecnici, gli orologiai del Settecento, abbiano potuto migliorare e perfezionare gli strumenti che i loro predecessori non hanno potuto inventare: ciò avvenne perché essi vivevano in un altro «clima» o «ambiente» tecnico ed essi erano contagiati dallo spirito della precisione. (ivi, 111)

Per Koiré del resto (par. 2.5) è proprio questo clima nuovo, questo *spirito della precisione*, che ha reso possibile *la nascita della scienza moderna*. Nell'antichità e nel medioevo (così come *sempre* fino all'era contemporanea in altre regioni del pianeta) per Koiré, non c'è stata scienza. Semplicemente perché non c'è stata esigenza di precisione:

È curioso: duemila anni prima Pitagora aveva proclamato che il numero è l'essenza stessa delle cose, e la Bibbia aveva insegnato che Dio aveva fondato il mondo sopra «il numero, il peso, la misura». Tutti l'hanno ripetuto, nessuno l'ha creduto. Per lo meno, nessuno fino a Galileo l'ha preso sul serio. Nessuno ha mai tentato di determinare questi numeri, questi pesi, queste misure. Nessuno si è provato a contare, pesare, misurare. O più esattamente, nessuno ha mai cercato di superare l'uso pratico del numero, del peso, della misura nell'imprecisione della vita quotidiana - contare i mesi e le bestie, misurare le distanze e i campi, pesare l'oro e il grano - per farne un elemento del sapere preciso. (ivi, 97-98)

In contrasto, commentando la situazione della società moderna occidentale, e citando di nuovo Lucien Febvre, Koyrè aggiunge:

«Tutta la nostra vita moderna è come impregnata di matematica. Gli atti quotidiani e le costruzioni degli uomini ne portano il segno, e non c'è nulla, fino alle nostre gioie artistiche e alla nostra vita morale che non ne subisca l'influsso». (*ibidem*)

E' nel contesto e nell'atmosfera che ho cercato fino a qui di presentare quindi che le commissioni nominate dall'Accademia ebbero il grande merito di offrire al mondo il primo sistema di misura scientifico. Il 26 marzo 1791 l'Assemblea Costituente istituì la Commissione Generale dei Pesi e Misure, “per far cessare - diceva il decreto - la stupefacente e scandalosa diversità delle nostre misure”¹.

Durante il discorso all'Assemblea Condorcet affermò:

Abbiamo ritenuto che non fosse necessario attendere la partecipazione delle altre nazioni, né per decidere sulla scelta dell'unità di misura, né per cominciare le operazioni. Infatti, abbiamo escluso da questa scelta ogni determinazione arbitraria, ammettendo soltanto quegli elementi che appartengono allo stesso modo a tutte le nazioni. Dunque non appaiono motivi che diano adito al rimprovero di aver voluto ostentare una sorta di preminenza. In una parola, se la memoria di questi lavori dovesse cancellarsi, se ne restassero soltanto i risultati, essi non ci offrirebbero niente che possa servire a far conoscere quale nazione ne ha concepito l'idea e ne ha realizzato l'esecuzione. (citazione in Guedj, 1957, trad. it. 38)

Sulla base di questo atteggiamento l'Assemblea decretò solennemente²:

Considerando che per arrivare a stabilire l'uniformità dei pesi e delle misure è necessario fissare un'unità di misura naturale e invariabile e che il solo mezzo per estendere questa uniformità alle nazioni estere e per esortarle a decidere insieme su un sistema di misure è di scegliere un'unità che non conservi niente di arbitrario né di specifico ad alcun popolo della terra[...]adotta la grandezza del quarto di meridiano terrestre come base del nuovo sistema di misure; le operazioni necessarie a determinare questa base, cioè la misura di un arco di meridiano da Dunkerque a Barcellona saranno immediatamente eseguite.

I fondatori del sistema metrico erano persone dotate di conoscenze davvero universali, uomini dal sapere letteralmente enciclopedico (contribuirono, tra le altre cose, a redigere l'*Encyclopédie* di D'Alembert e Diderot; su molti aspetti relativi alle loro biografie vedi il citato saggio di Mondini).

¹ Cit. in Mondini, 1977

² Cit. nell'articolo on line *Un historique du METRE* di Fevier D. all'indirizzo <http://www.industrie.gouv.fr/metro/aquosert/metre.htm>

Borda, il presidente di questo comitato, era stato ufficiale di marina. Aveva solo 23 anni quando pubblicò uno studio balistico che lo portò alla selezione da parte dei membri dell'Accademia. Borda in particolare progettò la maggior parte degli strumenti utilizzati nella misura dell'arco di meridiano.

Condorcet, filosofo ed affermato matematico, era anche un idealista, e la sua filosofia influenzò Thomas Jefferson e le stesse scelte ideali che furono alla base della nascita degli Stati Uniti d'America tanto, o forse, perfino di più di quella di John Locke.

Monge (che, a differenza del più moderato Condorcet, girondino, aderì da subito ai circoli giacobini) era conosciuto in ambito scientifico per i progressi ottenuti nell'ambito degli studi sulla geometria descrittiva; a soli sedici anni fu nominato professore di fisica a Lione.

Laplace a quindici anni era già ispettore della Artiglieria Reale e a venti professore di matematica. In una nota introduttiva ad un articolo di Laplace che l'Accademia pubblicò nel *Savants étrangers* (1774) Condorcet affermò che tale ente non aveva “ancora visto una persona così giovane presentare in così poco tempo tanti saggi importanti e su argomenti tanto diversi e difficili”¹. In seguito insegnò matematica insieme a Lagrange.

Lagrange fu uno dei più grandi matematici mai esistiti e, come mette in rilievo Mondini, il suo lavoro sulla meccanica analitica colpì così profondamente un altro grande matematico, William Rowan Hamilton, al punto da spingere quest'ultimo a definire tale opera “un poema scientifico”. E così lo descrive Filippo Burzio, nella biografia di questo grande personaggio: “Lagrange appare, a mezzo il Settecento, come *l'uomo razionale* per eccellenza, quale l'evoluzione dell'umanesimo occidentale in senso scientifico ed intellettualistico ha portato a concepirlo; come *una personificazione fra le più alte e perfette* (e forse la prima apparsa così compiutamente nella storia dell'Occidente) del tipo nuovo dello scienziato, secondo il modello classico che di questo tipo si foggerà poi l'Ottocento idoleggiandolo come un culmine di perfezione umana”².

Come visto il principio guida implicato nella fase iniziale dell'elaborazione del sistema metrico riconosceva la necessità di definire alcune unità base (stabili) di misura secondo criteri universalmente accessibili e collegati alla natura, oltre al bisogno di far derivare tutte le altre unità di misura necessarie utilizzando regole logiche.

Per quanto riguarda la massa, si decise che l'unità sarebbe equivalsa a quella di una quantità di acqua contenuta in un cubo il cui lato corrispondesse a un centesimo del metro che ancora non era stato individuato. In tal modo il peso di un centimetro cubo di acqua distillata fu chiamato *grammo*. Era noto che il peso di un certo volume d'acqua variava in base alla temperatura. Inizialmente si decise di utilizzare la temperatura dell'acqua in cui il ghiaccio inizia sciogliersi (0° C nella scala moderna). In seguito, si ritenne necessario cambiare quella temperatura e di sostituirla con quella in cui l'acqua raggiunge il massimo della sua densità, cioè circa 3,98 °C (l'acqua è più densa a questa temperatura di quanto non lo sia a temperature inferiori a 0° C; questa scoperta fu raggiunta grazie agli studi dell'italiano Mattia Fabbroni che aveva misurato la densità dell'acqua al variare della temperatura).

In effetti l'unità di massa adottata ufficialmente fu poi il *chilogrammo* (chiamato inizialmente *grave*, dal latino *gravis*, cioè pesante), definito come la massa di un decimetro cubo di acqua distillata. Come corpo campione fu scelto un blocco di platino (vedi anche oltre) che avrebbe appunto dovuto pesare esattamente quanto un dm³ di acqua distillata³.

Nell'introdurre l'unità di massa, ho utilizzato indistintamente la parola *peso* e la parola *massa*. Da un punto di vista teorico ciò non è esatto, in quanto ci staremmo in effetti riferendo a concetti diversi (i padri fondatori del sistema metrico originariamente si riferirono, comunque, al peso). *Sappiamo cionondimeno che le due grandezze sono proporzionali*. All'inizio del capitolo 4 discuterò queste considerazioni, presentando brevemente una introduzione al concetto di massa, o meglio dovremmo dire, ai concetti di massa (in effetti in fisica si introducono diversi concetti di

¹ Cit. in Gillispie, 1980

² Cit. in Mondini, 1977

³ In realtà sappiamo oggi che il suo peso è 1.000027 circa rispetto a quest'ultimo

massa: *massa inerziale, massa gravitazionale, massa relativistica*; l'equivalenza fra di essi, dovuta alla proporzionalità ed alle identiche tecniche di misurazione, non ci autorizza a dire che stiamo parlando della stessa cosa)¹.

Tutte le proposte furono subito accettate dall'Assemblea Costituente che procedette celermente ad attuare le relative raccomandazioni: era nato in questo modo (e fu istituito poi con decreto legge del 7 aprile 1795) il *Sistema Metrico Decimale* (SMD)².

E' tramite le vicende appena riassunte quindi che si arrivò per la prima volta alla definizione del metro come la frazione $1/10^7$ di un arco di meridiano terrestre: *dieci milioni di metri dal polo all'equatore!* Il rapporto dell'Accademia Francese del marzo 1791 raccomandava, come detto, anche un metodo per determinare il modello per l'unità di base, e Delambre e Méchain effettuarono la misurazione della lunghezza di un quadrante di meridiano. Delambre, appena terminata l'impresa, scrisse subito (1798-1799) un primo importante documento³ sui metodi utilizzati per la determinazione di questa lunghezza, che inizia proprio con queste parole:

Gli astronomi incaricati di misurare l'arco del meridiano compreso tra i paralleli di Dunkerque e di Barcellona, hanno terminato questa importante e faticosa operazione. Al ritorno, la loro prima preoccupazione è stata quella di riferire ai commissari della loro nazione e a quelli dei paesi esteri, riuniti per fissare l'unità fondamentale di queste nuove misure, tutto il loro lavoro[...]Una commissione speciale ha letto i registri e i diari e, dopo aver esaminato ogni angolo e soppesato le circostanze in cui erano stati osservati, ha selezionato tutti i risultati che dovevano servire per calcolare il meridiano e la lunghezza del metro.(Delambre, 1798-1799, V)

La lunghezza dell'arco di meridiano fu determinata attraverso la triangolazione⁴. Non vi fu bisogno di dividere in triangoli un intero quadrante partendo dal Polo Nord fino all'Equatore: gli scienziati scelsero un settore pari a circa un nono di quadrante (10 gradi di latitudine) che si estendeva da Dunkerque, sulla Manica, fino ad una località situata nei pressi di Barcellona, sulla costa meridionale della Spagna⁵. Questa misurazione infatti permetteva di calcolare la lunghezza dell'intero quadrante del meridiano dal polo all'equatore tramite estrapolazioni basate sulle latitudini determinate da accurate osservazioni astronomiche nelle due città. Uno dei vantaggi della scelta era che entrambe le estremità dei settori erano a livello del mare. Dopo molte peripezie, nel maggio del 1792, vennero fabbricati i "circoli ripetitori"⁶ sotto la supervisione di Borda. Méchain effettuò i rilievi da Barcellona a Rodez, e Delambre da Dunkerque a Rodez. Furono così misurati più di cento triangoli⁷, che formavano una catena ininterrotta. I punti fondamentali del meridiano furono fissati attraverso una rete di punti che formavano triangoli sovrapposti (triangoli adiacenti

¹ Successivamente venne anche adottato, come unità di capacità o di volume, il litro, ovvero il volume di un chilogrammo di acqua distillata a 3,98 °C

² Vedi anche Moreau, 1975

³ Delambre, 1798-1799; una delle copie originali è conservata anche presso la Biblioteca Nazionale Vittorio Emanuele di Roma

⁴ Procedimento che permette di misurare la lunghezza di un percorso rettilineo per mezzo di una serie di misure angolari e di una sola misura lineare (basato sul teorema per cui se si conoscono due angoli e un lato di un triangolo, se ne conoscono tutti i lati). Esso si realizza come segue: note le coordinate geografiche di due punti A e B della superficie terrestre e la lunghezza del segmento che li unisce, la *base topografica*, è possibile, con uno strumento misuratore di angoli, traguardare da essi un terzo punto C, quindi visibile sia da A che da B, e misurare gli angoli che le sue congiungenti con i punti A e B formano con la base topografica; dalla geometria è noto che, se di un triangolo (ABC) si conoscono due angoli e la lunghezza del lato tra esso compreso, è possibile calcolare le lunghezze degli altri due lati, vale a dire posizionare il punto C sulla carta; per evitare errori e per maggiore precisione si misura anche l'angolo in C. Si passa poi a considerare come basi topografiche gli altri lati e altri punti visibili per posizionarli sulla carta con lo stesso sistema. Così si determina una rete di triangoli - la *base geodetica* - e di punti, *punti geodetici* o *trigonometrici*, su tutta la regione da cartografare (per approfondimenti vedere Di Donna, 2000 e Palmieri, Parlotto 2000)

⁵ Vedi Guedj, 1997, Delambre, 1806-1810 e Delambre, 1798-1799

⁶ Questo strumento, ottico meccanico, serviva a ripetere agevolmente un numero elevato di volte la misurazione di uno stesso angolo (come è intuitivo, più misurazioni si fanno, più si riduce l'errore; vedi par. 6.5). E' munito fondamentalmente di un cannocchiale che può ruotare, sia orizzontalmente che verticalmente: l'ampiezza delle rotazioni si legge su due cerchi graduati, uno orizzontale e l'altro verticale. I moderni strumenti, *teodoliti*, sono dotati di dispositivi che consentono di misurare direttamente anche le distanze

con un lato in comune). La misura reale di un solo lato di questi triangoli permise di calcolare la lunghezza di tutti gli altri e, attraverso la proiezione, di ottenere la distanza sulla Terra, a livello del mare, attraverso i punti estremi. Vennero utilizzate due basi di riferimento della lunghezza di circa 6000 tese (11,7 km, vedi oltre): una tra Melun et Lieusaint, l'altra tra Vernet e Salses (nei pressi di Perpignan). Nella pubblicazione di Delambre (agli inizi del volume) è anche inclusa una memoria di Legendre sui metodi matematici da utilizzare per la determinazione della lunghezza del quarto di meridiano a partire dalle osservazioni e misurazioni dei due topografi, metodi del resto già da lui presentati nel 1787 nelle *Mémoires dell'Accademia delle scienze*. Spiega Legendre il ruolo del suo contributo:

Avendo infine i cittadini Delambre e Méchain portato a termine tutte le operazioni relative alla misura dell'arco del meridiano compreso tra Dunkerque e Barcellona ci si può occupare senza indugio, di dedurre dai dati raccolti da questi eccellenti osservatori la lunghezza del quarto di meridiano, ovvero l'oggetto principale dei loro studi. In questa circostanza, ho creduto che non fosse inutile suggerire ai geometri qualche idea sul metodo da perseguire[...]al fine di giungere ad un risultato così esatto come la natura della questione richiede. Queste idee sono una diretta conseguenza di quelle già esposte in un memoriale sulle operazioni trigonometriche pubblicato nel volume dell'Accademia delle scienze nell'anno 1787.(Legendre, 1798-1799, 1)

Ultimare il lavoro di osservazioni e misure ¹ non fu faccenda di poco conto e occorsero parecchi anni (dal 1792 al 1799; i due topografi raggiunsero Parigi, dopo aver terminato tutti i rilievi, solo il

⁷ Vedi Delambre, 1798-1799 e l'articolo on line *Un historique du METRE* di Fevier D. all'indirizzo <http://www.industrie.gouv.fr/metro/aquosert/metre.htm>

¹ Le osservazioni e misure da cui partire sono così elencate da Legendre nella memoria:

1° *Gli angoli dei triangoli e le altezze dei punti di stazione necessari per ridurre ogni triangolo al piano dell'orizzonte.*

2° *La base da Melun a Lieusaint. Questa base principale, così come la base di verifica misurata presso Perpignan, è stata rapportata ad un modulo particolare, chiamato la regola n°1, la cui lunghezza è molto vicina a due tese.*

3° *Gli azimut di due lati della catena di triangoli o gli angoli che formano col meridiano. Essendo questi azimut stati misurati alle due estremità della catena risultano essere una conferma di tutta l'operazione, non meno importante e più facile di quella che è stata data dalla misura di una seconda base (geodetica).*

4° *La latitudine dei punti estremi: Dunkerque e Montjoux, così come gli altri punti intermedi come Parigi, Evaux e Carcassonne.*

Tutti questi elementi sono stati determinati con un grado di precisione che avrebbe dovuto stupire, se non fosse una conseguenza necessaria della precisione dei mezzi utilizzati e dell'abilità degli osservatori.(Legendre, 1799, 1-2)

Ricordo che se si vuole determinare la posizione di un punto rispetto ad un altro si possono utilizzare le coordinate geografiche azimutali, vale a dire, in pratica, la distanza tra i due punti e l'azimut, cioè l'angolo, misurato in senso orario, compreso tra la congiungente i due punti e la direzione del nord. Per quanto riguarda poi il calcolo dei triangoli, Legendre così prosegue:

Dopo aver ridotto all'orizzonte tutti gli angoli dei triangoli[...]e aver applicato a ciascuno degli angoli ridotti, la correzione necessaria affinché la somma degli angoli di ciascun triangolo sia uguale a 180°+ il piccolo eccesso dovuto alla superficie del triangolo e calcolato a priori[...]non ci sarà più la necessità di tener conto della disparità dell'altezza dei punti di stazione, e tutta la catena dei triangoli si troverà proiettata su una superficie sferica o sferoidica, che è possibile considerare come un prolungamento della superficie del mare.

In questa ipotesi, che sembrerebbe la più adatta a semplificare i calcoli, tutti i triangoli diventano sferici o sferoidali, i cui i lati sono o possono essere considerati come degli archi di cerchio; e la base, anch'essa un arco di cerchio, si deduce agevolmente dalla base misurata, applicando una correzione calcolata secondo le altezze note dei suoi punti estremi al di sopra del livello del mare. Posto ciò, per calcolare i diversi lati della catena dei triangoli di proiezione, si può ricorrere all'applicazione del teorema enunciato ne le Memorie dell'Accademia nell'anno 1787[...] di conseguenza, se nel triangolo proposto, la somma degli angoli è 180°+ω, si sottrarrà 1/3 ω da ciascuno di essi, cosicché la somma dei restanti angoli sarà 180°. Fatta questa sottrazione si procede come se il triangolo proposto fosse rettilineo ovvero vi fosse possibile applicare la seguente proporzione: Il seno dell'angolo opposto al lato noto sta a quest'ultimo come il seno di un altro angolo sta al lato opposto. Il quarto termine sarà la vera lunghezza del lato del triangolo sferico che si vuole risolvere; la lunghezza si ottiene con la stessa facilità, come se la catena dei triangoli che si calcola fosse situata per intero su uno stesso piano.(ivi, 2-3)

Da tutto ciò potrà essere calcolata, prosegue il matematico francese, la lunghezza dell'arco di meridiano:

14 novembre 1798) a Delambre e Méchain per portare a compimento questa valutazione e raccordare la nuova unità alla *tesa* detta “dell’Accademia”, allora campione d'uso comune ¹.

Fino al 1776, il prototipo reale della lunghezza era stato “la tesa di Châtelet”, formata da una barra di ferro, alle cui estremità erano posti due dentelli la cui distanza determinava la lunghezza della tesa. Fu proprio su questo modello (originariamente una pietra murata nella cattedrale nel 1668) che furono realizzate nel 1735 le due tese (fabbricate da Charles Langlois, ingegnere del Re per gli strumenti astronomici) utilizzate per le prime misurazioni di un arco di meridiano (avvenute tra il 1736 e il 1737): la prima fu adoperata da Pierre Bouguer, Louis Godin, Charles - Marie de La Condamine, e venne chiamata più tardi la tesa del Perù, la seconda fu utilizzata in Lapponia da Pierre - Louis de Maupertuis, Alexis Clairaut, Charles Camus, Pierre - Charles Le Monnier, Reginald Outhier, e fu denominata in seguito la tesa del Nord ². L’Accademia Reale delle Scienze parigina aveva spedito queste squadre ³ in Perù e in Lapponia per misurare archi di meridiani, al fine di appurare quanto la forma della Terra si allontanasse da quella di una sfera ⁴. Louis de Maupertuis ritornò trionfalmente dall'estremo Nord, portando misure che avvaloravano l'idea che la Terra fosse schiacciata ai poli. Il lavoro - che richiese precise osservazioni astronomiche e misure di distanze terrestri - fu estremamente arduo e gli ostacoli che incontrò la spedizione peruviana furono enormi. Entrambe le squadre dovettero trasportare strumenti di grandi dimensioni su terreni accidentati e operare con essi in condizioni climatiche ostili. Fino a che punto, in queste circostanze, essi fossero riusciti a ricavare osservazioni esatte fu oggetto di discussione al loro ritorno a Parigi. Maupertuis uscì vittorioso da questo dibattito; la sua insistenza sugli standard elevati di precisione portò i topografi francesi a ripetere una precedente misurazione del meridiano che attraversava Parigi lungo la linea da Dunkerque a Perpignan ⁵.

Sia una catena qualunque di triangoli[...]poco distante dalla meridiana tracciata su una superficie curva che rappresenta il livello del mare[...]si conosce inoltre grazie all'osservazione, l'angolo[...]che misura l'azimut del lato o la sua inclinazione in rapporto al meridiano; si tratta di trovare la lunghezza del meridiano[...]prolungato fino ad incontrare la perpendicolare[...]tracciata dall'ultimo punto della catena. Si seguiranno[...]gli stessi principi seguiti nei calcoli dei triangoli; ma si potranno, all'occorrenza, trovare dei modi più brevi per evitare di calcolare tante porzioni di meridiano quanti sono i triangoli. (ivi, 3-4)

Per questi metodi, e per tutti gli altri dettagli matematici rimando alla memoria di Legendre ed alla pubblicazione di Delambre

¹ Come afferma lo storico Ken Alder (Alder, 2002), “l'errore era il grande nemico dell'Illuminismo, il detestabile infame che i philosophes avevano cercato in tutti i modi di uccidere”. Si può dire che Delambre e Méchain provarono davvero a fare proprio il principio dell'Antico Testamento di “non commettere ingiustizie nei giudizi, nelle misure di lunghezza, nei pesi o nelle misure di capacità”, perché “avrete bilance giuste e pesi giusti”

² Vedi l'articolo on line *Un historique du METRE* di Fevier D. all'indirizzo <http://www.industrie.gouv.fr/metro/aquosert/metre.htm>

³ Vedi anche Golinski, 2001

⁴ Da quando Newton aveva affermato che, dal punto di vista teorico, il nostro pianeta doveva essere un ellissoide di rotazione con il raggio equatoriale a più grande del raggio polare b , furono fatti molti tentativi per confermare (o falsificare) questa ipotesi teorica. Per determinare a e b , sarebbero state sufficienti in linea di principio due misure di arco meridiano; in pratica ne servivano molte di più, dati gli inevitabili errori delle misure geodetiche e astronomiche (nonché le deviazioni locali dalla forma generale del pianeta). Ricordo che un corpo deformabile in rotazione, per la forza centrifuga (dovuta appunto alla rotazione) e per la forza di attrazione esercitata dalla sua massa centrale, tende ad assumere la forma di un ellissoide, una sorta di sfera schiacciata ai poli; tale forma sarebbe stata assunta dal pianeta Terra quando la crosta era ancora plastica. Lo schiacciamento polare della Terra era già stato messo in evidenza (vedi Palmieri, Parotto, 2000) verso la fine del XVII secolo, mediante le osservazioni sul moto oscillatorio del pendolo compiute dall'astronomo francese Richer. Questi aveva constatato che un pendolo regolato a Parigi esattamente sul secondo (cioè un pendolo che compiva un'oscillazione completa in un secondo) trasferito alla Caienna, nella Guiana francese, presentava oscillazioni più lente. Poiché Parigi è molto più vicina al polo di quanto non lo sia la Caienna (che si trova poco lontana dall'Equatore) e dato che il periodo di oscillazione di un pendolo è inversamente proporzionale al valore dell'accelerazione di gravità, il fenomeno osservato venne attribuito alla diminuzione della forza di gravità nella zona equatoriale. E ciò permise di dedurre che la Terra è leggermente schiacciata ai poli e rigonfia all'Equatore; infatti, ammettendo questo schiacciamento, ai poli un punto della superficie terrestre viene a trovarsi più vicino al centro della Terra e quindi la forza di gravità è maggiore, secondo la legge di Newton.

Sia detto, per inciso, che attualmente i valori accettati sono $a = 6378,1$ km e $b = 6356,8$ km

Ma torniamo alle unità di lunghezza. La tesa di Châtelet non era affatto affidabile poiché la sua fabbricazione era stata piuttosto rudimentale e, inoltre, era stata sottoposta a urti e usura. La Condamine propose nel 1747 di adottare come modello prototipo la tesa del Perù (conservata prima presso il Louvre e, in seguito, presso l'Osservatorio di Parigi). Il 16 maggio 1766, Luigi XV approvò questa proposta e incaricò l'allora funzionario dell'Accademia delle Scienze Tillet di far riprodurre 80 copie di questa tesa, che nel frattempo aveva preso il nome di tesa dell'Accademia, perché fossero inviate ai procuratori generali dei Parlamenti. Fu la lunghezza definita dalla tesa dell'Accademia ad essere utilizzata per definire (vedi oltre) il metro provvisorio nel 1795 e quello definitivo nel 1799 (che risultò pari a 0,513243 tese).

E' interessante rilevare che, malgrado i ricercatori avessero incontrato ostacoli di varia natura ¹ le misurazioni effettuate tra Dunkerque e Barcellona modificarono lo standard del metro di poco meno di 0,3 millimetri ². Questo fatto dimostra che le proiezioni, fin dalle prime e limitate ricerche, erano state accurate, soprattutto se le si rapporta a questo tipo di operazione (realizzata in 6 anni, effettuata su una distanza di 1,1 milioni di metri).

Il resoconto dettagliato della ricerca di Delambre e Méchain fu pubblicato in tre volumi da Delambre ³. Va anche notato che i risultati dovettero essere completati con alcuni compromessi circa l'ellitticità della Terra. Avverte Delambre agli inizi del suo scritto del 1798-1799:

A seguito delle formule che servono a calcolare, per tutti i vertici di una lunga serie di triangoli, le differenze di longitudine, di latitudine e di azimut nella supposizione che la terra sia sferica, spiego[nel seguito del libro] i metodi necessari per tener conto dell'appiattimento della terra e per determinare questo appiattimento attraverso delle osservazioni. Per facilitare questa spiegazione ho raccolto un gran numero di formule che danno, in funzione della latitudine, il valore di tutte le parti dell'ellisse del meridiano terrestre.(Delambre, 1798-1799, IX)

L'ellitticità della Terra fa sì che un arco di un minuto di latitudine rappresenta una distanza che cambia gradualmente quando si procede a nord o a sud ⁴. Dovette così esser stabilito un valor medio ⁵, e la quantità di ellitticità usata in questo calcolo ebbe un importante seppur piccolo effetto. Delambre e Méchain dedussero un certo valore di ellitticità durante la loro ricerca ⁶, e questo risultato fu successivamente combinato con i risultati ottenuti nelle precedenti ricerche per fissare il valore più attendibile possibile ⁷.

Come detto, le nuove unità di misura furono ufficialmente adottate con obbligo di legge nel 1795. Furono anche realizzati prototipi provvisori del metro e del chilogrammo e copie di questi furono distribuite in tutti i 559 ⁸ distretti della Francia. Riporto gli articoli più significativi di quello storico provvedimento ⁹:

ART.II. Non vi sarà che un solo tipo o modello di pesi e misure per tutta la Repubblica; e questo tipo sarà un regolo di platino sul quale sarà tracciato il metro che è stato adottato come unità fondamentale di tutto il sistema delle misure.

⁵ Tale linea costituì la base per un rilevamento geodetico nazionale della Francia, completato nel 1789, dopo un lavoro di circa quarant'anni compiuto da César-François Cassini de Thury e da suo figlio Jean-Dominique

¹ Vedi per i dettagli, anche tecnici, di questa importante vicenda Delambre, 1806-1810, il libro di Guedj e Alder, 2002

² Vedi per esempio Klein, 1988

³ Delambre, 1806-1810

⁴ Per la forma schiacciata della Terra ad 1° di latitudine, spostandosi dall'equatore verso i poli, corrisponde un arco (misurato in lunghezza lineare) sempre più ampio. Ad 1° di longitudine, allontanandosi dall'equatore, corrisponde un arco sempre più piccolo; sappiamo oggi che all'equatore esso misura 111,3 km, alla latitudine di 60° misura 55,8 km, alla latitudine di 80° misura 19,4 km ed ai poli, che sono solo dei punti, esso misura 0 km (vedi per dettagli Di Donna, 2000)

⁵ Delambre, 1798-1799 e 1806-1810

⁶ 1/150, vedi Delambre, 1798-1799, 1806-1810

⁷ Vedi per dettagli Delambre, 1798-1799 e l'articolo on-line *Background of the Metric System*, di Frysinger J.R., all'indirizzo <http://www.cofc.edu/~frysingj/background.htm>

⁸ Un botanico chiamato Dambey fu inviato anche negli Stati Uniti con una copia del metro e una del chilogrammo. La sua nave fu attaccata dai pirati nei Caraibi ed egli fu ucciso. Gli standard andarono persi e non furono più recuperati

⁹ Cit. in Mondini, 1977; vedi anche Guedj, 1997 e Ferraro, 1965, per ulteriori dettagli

Questo tipo sarà eseguito colla massima precisione, giusta le esperienze e le osservazioni dei commissari incaricati della determinazione, e sarà depositato presso il Corpo Legislativo, in un col processo verbale delle operazioni che avranno servito a determinarlo, affinché possano essere verificati in ogni tempo.

ART.III. *In ogni capoluogo di distretto sarà mandato un esemplare conforme al campione prototipo di cui sopra, ed inoltre un modello di pesi esattamente dedotto dal sistema delle nuove misure. Questi modelli serviranno alla fabbricazione di tutte le misure adoperate negli usi dei cittadini.*

ART.IV. *L'estrema precisione che sarà data al campione di platino, non potendo influire sull'esattezza delle misure d'uso comune, coteste misure continueranno ad essere fabbricate secondo la lunghezza del metro adottata dagli anteriori decreti.*

ART.V. *Le nuove misure saranno quindi distinte col soprannome di repubblicane; la loro nomenclatura è definitivamente adottata come segue.*

Si chiamerà:

Metro, la misura eguale alla diecimilionesima parte dell'arco del Meridiano terrestre compreso fra il polo boreale e l'equatore;

Ara, la misura di superficie pei terreni, eguale ad un quadrato di dieci metri di lato...

La ricerca fu completata, come detto, nel novembre del 1798 e, sulla base delle definizioni che ne conseguirono, la costruzione dei modelli definitivi per la lunghezza e la massa ¹ venne completata nel giugno del 1799.

Il 22 giugno i prototipi del metro ² e del chilogrammo furono presentati al Consiglio degli Anziani e dei Cinquecento, e successivamente depositati agli Archives Nationales. Una legge del 10 dicembre 1799 li consacrò modelli definitivi delle misure di lunghezza e di peso in tutta la Repubblica. Il primo metro e il primo chilogrammo campioni erano di platino; il metro una sbarra a sezione rettangolare di 25,3 x 4 mm, il chilogrammo un cilindro la cui massa era riferita alla temperatura della massima densità dell'acqua.

Il metro campione fu successivamente chiamato *metro legale* o *degli archivi*.

Napoleone, riferendosi al sistema metrico decimale, affermò: "*Les conquêtes passent, mais ces opérations restent*" ³.

Il decreto che fissò le nuove misure di lunghezza, peso e capacità stabilì anche una nuova unità monetaria: il franco. Anche l'unificazione della moneta si basò quindi sul sistema decimale.

Fu solo successivamente che vennero adottate (nel 1832, su suggerimento di Karl Friederich Gauss ⁴) anche l'unità di tempo, *il secondo*, definito infine come *la frazione 1/86400 della durata del giorno solare medio* ⁵ (scartata l'idea di definire l'unità di tempo in base ai battiti di un pendolo lungo un metro, sempre per il fatto che l'accelerazione di gravità cambia a seconda dell'altezza e

¹ Questi prototipi furono realizzati da Etienne Lenoir, affermato costruttore di strumenti astronomici che aveva già realizzato i prototipi provvisori

² Successivamente alle misurazioni dell'Accademia delle Scienze di Parigi si constatò che il meridiano terrestre è un po' più lungo di 40 milioni di metri (40 009 152 m); per cui il campione costruito, per rappresentare esattamente la quarantamilionesima parte del meridiano, dovrebbe essere allungato di circa 0,2 mm. C'è da notare, inoltre, che i vari meridiani non sono perfettamente uguali fra loro e che la lunghezza di un determinato arco di meridiano non si mantiene esattamente costante nel tempo, a causa dei modestissimi ma continui cambiamenti di forma del nostro pianeta (vedi Palmieri, Parlotto, 2000). Vorrei anche notare che un meridiano terrestre è diviso in 360° (vedi anche par. 3.2); essendo 1° suddiviso in 60' si ha che in 360° sono compresi 21.600' (60' x 360° = 21.600'); in tal modo si ottiene che ad 1' equivalgono circa 1.852 metri (40.009 / 21.600). *Tale valore è stato preso come unità di misura internazionale delle distanze marine, il miglio*

³ Le conquiste militari vanno e vengono, ma questo lavoro resterà per sempre

⁴ Questo fisico fu il primo poi a misurare il campo magnetico terrestre in unità di lunghezza, massa e tempo

⁵ Determinato l'istante preciso in cui una stella passa su un meridiano, si calcola il tempo che intercede tra questo e un nuovo passaggio; questo intervallo di tempo dà la *durata della rotazione*, che è di 23h 56m. Questa misura è chiamata *giorno sidereo* (da *sidus, siderus* = stella). Se invece noi osserviamo due passaggi successivi del Sole al meridiano del luogo, l'intervallo fra essi è in media di 24 ore e viene detto *giorno solare*. Questa differenza è dovuta allo spostamento che la Terra presenta rispetto al Sole per il suo moto di rivoluzione, per cui, quando una stella lontanissima - rispetto alla quale la Terra si può considerare sempre nello stesso punto dello spazio - ripasserà al meridiano del luogo, il Sole si troverà ancora ad oriente di questo punto e ci vorrà un certo tempo (4 minuti) prima che avvenga il suo passaggio. Poiché i giorni solari non sono sempre della stessa lunghezza - non essendo in ogni epoca dell'anno eguali le velocità del moto di rivoluzione - risultò opportuno sostituire al *giorno solare vero*, che non è una misura costante, il *giorno solare medio* che risulta dalla durata media di tutti i giorni solari (vedi Cori, Ostermann, 1971)

della latitudine) e di temperatura, il *grado centigrado* (rinominato nel 1948 *grado Celsius*), definito come la centesima parte dell'intervallo compreso tra i punti di solidificazione (0 °C) e di ebollizione (100 °C) dell'acqua alla pressione di 1 atmosfera (vedi par. 4.6).

La disputa su come misurare il tempo si era protratta per un lungo periodo ¹. Non si poteva utilizzare il sistema decimale per registrare anche il corso del tempo? C'erano cento centimetri in un metro, perchè non inserire cento minuti in un'ora? Ma per questo, come fa ancora notare Guedj, sarebbe stato necessario distruggere e ricostruire tutti gli orologi esistenti. E ciò non fu considerato realistico neppure dai rivoluzionari!

Ciononostante la Convenzione Nazionale nominò un comitato con l'incarico di elaborare i dettagli di un nuovo calendario. Tra i membri di questo comitato vi erano Lagrange, Monge e il poeta Fabre d'Eglantine. Nel settembre del 1793, la Convenzione adottò le proposte del comitato. Il 5 ottobre 1793 divenne il 14 Vendémiaire dell'anno II, e, retrospettivamente, il 22 settembre 1792 divenne il primo Vendémiaire dell'anno I ². Nel nuovo calendario ogni anno doveva iniziare con il primo Vendémiaire, che corrispondeva al 22 o al 23 settembre del calendario gregoriano (vedi par. 3.2) allora in uso.

I dodici mesi di trenta giorni ciascuno furono così ribattezzati. L'autunno comprendeva: *Vendémiaire* (mese del vino della vendemmia: dal 23 settembre al 21 ottobre), *Brumaire* (mese della nebbia: dal 22 ottobre al 20 novembre) e *Frimaire* (mese del gelo: dal 21 novembre al 20 dicembre). L'inverno prevedeva: *Nivôse* (mese della neve: dal 21 dicembre al 19 gennaio), *Pluviôse* (mese della pioggia: dal 20 gennaio al 18 febbraio) e *Ventôse* (mese del vento: dal 19 febbraio al 20 marzo). La primavera era composta da: *Germinal* (mese dei germogli: dal 21 marzo al 19 aprile), *Floréal* (mese dei fiori: dal 20 aprile al 19 maggio) e *Prairial* (mese del prato: dal 20 maggio al 18 giugno). L'estate infine: *Messidor* (mese del raccolto: dal 19 giugno al 18 luglio), *Thermidor* (mese caldo: dal 19 luglio al 17 agosto) e *Fructidor* (mese dei frutti: dal 18 agosto al 17 settembre).

Il calendario repubblicano venne utilizzato in Francia per tutto il periodo del Direttorio e fu abolito il primo gennaio 1806 da Napoleone, che si stava riavvicinando alla Chiesa in un più ampio tentativo di ripristinare le tradizioni.

In un primo momento il sistema metrico ebbe un ruolo in qualche modo ambiguo in Francia. Fu usato da scienziati, uomini di cultura e burocrati e, grazie al sistema dell'istruzione pubblica unificato e rigidamente controllato, una nuova generazione di alunni familiarizzò man mano con le sue unità e le sue basi teoriche. Ma la gente comune, negli scambi commerciali quotidiani, continuò ad utilizzare le vecchie unità, ben più note, quali *pieds*, *pouces*, *livres*, *bosseaux* e tante altre ³. Solo nel 1837 la Francia abolì tutte le unità non metriche e impose multe nel caso fossero ancora adoperate.

Come mette in risalto Kula nel libro citato, di per sé il sistema metrico non ha un particolare valore. Le misure primitive, come in generale tutte quelle esistenti fino agli inizi del capitalismo, hanno un carattere significativo, significano cioè qualche cosa, esprimono qualcosa di umano, legato alla persona umana o alle condizioni di vita e di lavoro. Il sistema metrico no.

E non è affatto vero che sia naturale e facile da usare.

Tutto il nostro modo di pensare in termini quantitativi si fonda sul sistema decimale. Esso ci appare perfetto nella sua semplicità e incredibilmente facile da usare.

Eppure[...]tale sistema apparve alle masse incredibilmente difficile.

Già Leibniz aveva dimostrato, in verità, che non era tanto il sistema decimale a rivelarsi così perfetto, quanto l'invenzione della cifra «zero», e che è possibile costruire un sistema altrettanto o persino più perfetto basandosi su raggruppamenti per otto o per dodici[...]si sente spesso dire che il sistema decimale è «privilegiato dalla natura», dal momento che l'uomo incolto conta sulle dita e queste sono per l'appunto dieci. Chi dice una cosa del genere è da compatire. Personalmente io non ho dieci, ma venti dita. I nostri interlocutori si dimenticano delle altre dieci, perché nella vita quotidiana esse sono per noi, diciamolo francamente, di difficile accesso. Ma tali non erano per coloro che un

¹ Vedi Guedj, 1997

² Vedi Klein, 1988

³ Va anche detto che i prefissi latini e greci quali *kilo* o *centi* erano fortemente osteggiati. Nel novembre del 1800 fu addirittura intrapresa una iniziativa legale per abolirli tutti

tempo andavano scalzi o in sandali e stavano per lo più seduti «alla turca». Al contrario: era più facile contare sulle dita dei piedi, perché con una stessa mano si poteva contare fino a dieci.

Non deve quindi stupirci se, nonostante questo apparente fondamento «naturale», il raggruppamento decimale si incontra relativamente di rado presso le popolazioni primitive. Più di frequente si incontra invece la numerazione per venti. (Kula, 1970, trad. it. 90)

In particolare la numerazione per venti fu sanzionata da Carlo Magno, in un tentativo di unificazione metrologica all'interno del suo impero¹.

Malgrado tutto questo, dal punto di vista storico e sociale, il sistema metrico decimale segna una tappa importantissima dell'umanità verso l'obiettivo di un linguaggio comune globale, per la comprensione, la comunicazione e la collaborazione reciproca.

Non c'è dubbio, quindi, che sia il prodotto di una società più “giusta”. E credo non sia inutile sottolineare di nuovo che il suo successo fu legato *ad una più ampia strategia pensata economicamente*. Ciò può essere anche argomentato come segue:

Due condizioni, e non insignificanti, sono[...]indispensabili perché una società possa adottare misure puramente convenzionali: deve vigere in quella società un'effettiva uguaglianza di fronte alla legge e deve essere portato a compimento il processo di alienazione delle merci.

Non c'è posto per le misure convenzionali - e quindi per il sistema metrico - là dove gli uomini sono soggetti a leggi diverse. Disuguaglianza di fronte alla legge è anche disuguaglianza di diritti di fronte alle misure: c'è sempre almeno uno che le detta e un altro che le subisce, ognuno ha la sua e il più forte la impone al più debole. La misura non è impersonale, è “umana”, appartiene agli uni e non appartiene agli altri, dipende dalla volontà di colui che detiene su di lei il potere.

Soltanto l'uguaglianza di fronte alla legge rende possibile l'uguaglianza di fronte alle misure. La misura cessa di dipendere dalla volontà di chicchessia, e simbolicamente ciò si esprime nell'essere collegata alle dimensioni della sfera terrestre, sulle quali nessuno può in alcun modo interferire. Davanti alla misura tutti devono inchinarsi, sia il re, sia il mendicante. E infine, la misura deve potersi alienare, come la merce.

Il prodotto artigianale, fatto a mano, su ordinazione e in modo conforme ai desideri concreti del cliente, contiene in sé un duplice marchio umano: quello di colui che l'ha fatto e quello di colui per cui è stato fatto. Ogni artigiano ha un suo “stile”, ogni acquirente le sue esigenze. Fra le varie caratteristiche qualitative del prodotto artigianale, caratteristiche individuali e irripetibili, c'è anche la “misura”. Una misura che per gli uni è “buona”, per gli altri “cattiva”. Una misura le cui concrete dimensioni sono concordate in un rapporto umano diretto, attraverso discussioni, mercanteggiamenti e compromessi[...]

Le misure tradizionali erano molteplicemente “umane”. Esprimevano l'uomo e il suo lavoro, dipendevano a volte dalla sua volontà, a volte invece dal suo carattere o dai suoi rapporti con il vicino. Ma nello stesso tempo le misure tradizionali aprivano infiniti spazi agli abusi, alle offese, al prepotere del più forte sul più debole. Il metro, “disumanizzando” le misure, nel renderle indipendenti dall'uomo, “oggettive” nei suoi confronti, moralmente neutre, le trasforma al tempo stesso da strumento della prepotenza umana in un mezzo capace di facilitare la comprensione e la collaborazione fra gli uomini. (ivi, 134-135)

La Rivoluzione Francese creò il primo stato unitario in senso moderno, e vennero subito alla luce gli inconvenienti che sistemi di misura diversi da una regione all'altra creavano per il commercio e gli scambi. Disparità simili esistevano d'altronde in Italia, dove per esempio il terreno si misurava in *pertiche, tavole, cannelle, giornate*². Per rimanere nell'esempio si può anche aggiungere che nell'Italia centrale e meridionale si usavano, sempre appunto per misurare le terre, ulteriori unità come il *moggio antico*, il *moggio legale* ed il *tomolo di antica costumanza*, come risulta da numerosi documenti storici³. In generale prima del sistema metrico (ed anche per un certo periodo dopo la sua iniziale introduzione) non solo ogni luogo aveva proprie misure, ma addirittura ogni bene ed ogni merce venivano misurati con unità specifiche (abbiamo del resto già visto descritta la

¹ Non mi soffermo per motivi di spazio anche su questa importante vicenda della storia della metrologia, per la quale rimando per esempio al libro di Kula. Ricordo che uno dei primi sistemi visagesimali di cui si ha traccia è quello degli antichi Maya. I primi spagnoli rimasero impressionati dalla rapidità con cui i Maya contavano, senza avere misure di capacità o peso, i semi di cacao, che vendevano uno ad uno in quantità variabili

² Vedi per esempio Mondini, 1977

³ Per esempio è molto istruttivo al riguardo un *Bullettino delle ordinanze de' commessari ripartitori demani ex feudali e comunali nelle province napoletane*, Napoli, Tipografia Trani, 1863, dove si può notare che in province o luoghi anche adiacenti fosse naturale utilizzare unità diverse per misurare la stessa cosa

stessa situazione in Francia). Sovente poi la stessa denominazione designava nelle varie località unità di misura di valore differente; unità che spesso differivano anche a seconda dell'oggetto misurato o delle corporazioni che le utilizzavano. Con riferimento ancora alle misure del terreno, e come semplice ma significativo esempio, riporto alcune righe dalla voce "Misure Agrimensorie" del *Prontuario per l'Ingegnere e pel meccanico*, di Giuseppe Cadolini, edito a Milano nel 1843 ed in larga parte disponibile in rete all'indirizzo <http://www.melegnano.net/pagina004tx.htm>:

La misura del *Miglio* è fissata a braccia 3000 da legname, il campione del *braccio milanese* era scolpito in una lapide nel Broletto Nuovo, ora è smarrito. Il *Piede* del *trabucco* chiamasi anche *braccio di terra* e due *trabucchi* formano una *gettata*. Il *braccio da mercanti* è uguale al *braccio da legname*, si divide in metà, terzi, quarti, sestì, ottavi, equivale ad *ellen*, *aune* o *braccia di Vienna* 0,7635301. E' la *gettata* 2 *trabucchi*, 12 *piedi lineari*; la *tavola* una *gettata in quadro*. Il *piede superficiale*, o *di terra*, *l'oncia*, *il punto*, sono rappresentati da rettangoli alti tutti una *gettata*, e larghi rispettivamente un *piede*, un'*oncia*, un *punto*, e si chiamano anche *gettate-piedi*, *gettate-once*, ecc. Dunque la *gettata-oncia* equivale ad un *piede quadrato*, e la *gettata-atomo* ad un'*oncia quadrata*.

In Italia il primo Stato che rese obbligatorio il sistema metrico decimale fu il Regno Sardo, col reale editto 11 settembre 1845, che fu poi modificato dalla legge del 26 marzo 1850. In Lombardia fu imposto col decreto reale 15 settembre 1859.

La storia della metrologia è una parte importante non solo della storia della tecnologia o della storia del pensiero scientifico, ma della storia sociale, politica ed economica in generale. *Ogni misura*, come spesso afferma Kula in tutti i suoi scritti, in quanto istituzione sociale, è *espressione di una particolare categoria di rapporti fra gli uomini* e perciò può informarci di questi rapporti. E le successive adozioni (prossimo paragrafo) del sistema metrico segnano davvero i primi passi del più importante avvenimento storico del genere umano: *quello della sua globalizzazione*.

2.6 L'Ottocento, il Novecento e la normalizzazione delle comunicazioni

Il sistema metrico era, per sua definizione, universale. E subito iniziò la sua marcia vittoriosa. Come la libertà, partì alla conquista del mondo sulla punta delle baionette.

Witold Kula

Nel XIX secolo l'unione tra scienza e tecnologia si consolidò ulteriormente. La seconda rivoluzione industriale infatti si avvale in maniera decisiva del contributo della scienza (fisica, chimica, biologia, mineralogia) e delle sue applicazioni tecnologiche.

Le date più significative riguardanti il problema della standardizzazione delle misure in questo secolo possono essere così riassunte come segue ¹.

Nel 1816 Belgio, Olanda e Lussemburgo adottarono il SMD. Nel 1832 Gauss propose un sistema basato su millimetro, milligrammo e secondo. Nel 1849 anche la Spagna adottò il SMD. Nel 1863 Kelvin propose un sistema metro, grammo, secondo.

In Germania la riforma metrica entrò in vigore nel 1863; seguirono in breve tempo l'Austria, la Cecoslovacchia, 1871, e l'Ungheria, 1874. Negli altri stati dell'Europa orientale e nei paesi baltici il metro arrivò con la conquista dell'indipendenza: in Serbia nel 1863, in Romania nel 1883, in Bulgaria nel 1888, nell'Unione Sovietica nel 1918, in Polonia e in Jugoslavia nel 1919, in Lituania e in Lettonia nel 1920.

In Giappone il metro fu ufficializzato nel 1921, in Cina venne adottato subito dopo la vittoria della rivoluzione e in India la decisione fu presa dopo l'indipendenza.

¹ Vedi anche Fazio, 1995; Kula, 1987 e Klein, 1988

Il carattere internazionale del sistema metrico trovò una sua specifica organizzazione in una conferenza tenuta a Parigi nel 1875, che si concluse l'8 maggio con accordo sottoscritto subito da Russia, Germania, Impero austro-ungarico, Belgio, Brasile, Argentina, Danimarca, Spagna, Stati Uniti, Francia, Italia, Perù, Svezia, Norvegia, Svizzera, Turchia e Venezuela. Ma ciò aveva avuto una lunga preparazione. Nel 1869 il governo francese aveva proposto una *Commissione Internazionale del Metro* per la costruzione dei campioni internazionali, che tentò di riunirsi nel 1870. La riunione andò però deserta per lo scoppio della guerra tra Francia e Germania. Nel 1873 il governo francese decise di convocare di nuovo a Parigi una conferenza diplomatica sui problemi della metrologia, ma solo nel 1875 avvenne la firma della *Convenzione del Metro* e la nascita dell'*Ufficio Internazionale dei Pesi e Misure* (BIPM, *Bureau International des Poids et Mesures*) come organo scientifico permanente con sede a Parigi stessa. Alla conferenza del 1875 parteciparono 20 paesi, e 17 di essi (tra cui gli Stati Uniti) firmarono come appena detto la Convenzione. In questa occasione furono contemporaneamente creati (per le rispettive funzioni vedi par. 4.1) la *Conferenza Generale dei Pesi e Misure* (CGPM) e il *Comitato Internazionale dei Pesi e Misure* (CIPM).

Il governo francese offrì al BIPM il padiglione di Breuil in Sèvres come propria sede (il territorio fu ceduto dalla Francia al mondo: il padiglione è infatti territorio internazionale). La maggior parte dei paesi che aderirono alla Convenzione fondarono dei laboratori nazionali allo scopo di creare e conservare gli standard e gli strumenti di valutazione nazionali da cui scienza e tecnologia avrebbero tratto profitto. I primi laboratori furono probabilmente il *Physikalisch-Technische Reichsanstalt* di Charlottenburg fondato nel 1888, il *British National Physical Laboratory* di Teddington, inaugurato nel 1900 e l'*American National Bureau of Standards*, aperto nel 1901 (ora *National Institute for Standards and Technology*). Gli organismi internazionali impegnati nel mantenimento del sistema metrico promossero l'organizzazione di convegni internazionali dedicati alle unità di misura, tra cui ricordo il primo congresso internazionale sull'elettricità che si tenne a Parigi nel 1881.

L'internazionalizzazione degli standard tecnologici che è stata ad oggi realizzata in numerosissimi settori deriva così, in origine, proprio dalla riforma metrica.

L'opposizione più seria a queste attività ed accordi venne dall'Inghilterra.

Dopo la sconfitta di Napoleone e allontanata l'ondata rivoluzionaria che imperversava nel resto d'Europa, gli Inglesi non avevano alcun motivo rilevante per adottare il metro, che, a ben guardare, era frutto di una delle riforme realizzate durante la Rivoluzione Francese. Del resto, le misure in Inghilterra, a partire dalla metà del secolo XVIII, erano più unificate che altrove. Il fatto che la sterlina si dividesse per venti, lo scellino per dodici e la libbra per sedici, non creava alcun problema né alla popolazione, che era abituata da generazioni a quel tipo di suddivisione, né al commercio con le colonie, dal momento che i colonizzatori avevano esportato le proprie misure¹. Anche la maggioranza degli uomini di cultura (se si escludono gli scienziati) si oppose all'introduzione del sistema metrico. Nel 1864 il poeta William Rankine compose una poesia, *The Three-Foot Rule*, che ebbe notorietà e successo:

*Some talk of millimetres, and some of kilograms,
And some of decilitres, to measure beer and drams;
But I'm a British Workman, too old to go to school,
So by pounds I'll eat, and by quarts I'll drink, and I'll work by my three foot rule.*

*A party of astronomers went measuring the Earth,
And forty million metres they took to be its girth;
Five hundred million inches, though, go through from Pole to Pole;
So lets stick to inches, feet and yards, and the good old three foot rule.*

¹ Vedi Kula, 1970

Ormai in Inghilterra il sistema metrico è stato ufficialmente adottato da tempo (ottobre 1995): in pratica però non è ancora utilizzato appieno. La prima causa di tale situazione, come appena detto, è rappresentata dal fatto che l'Inghilterra ha avuto da tempo misure più unificate che altrove ¹. Nell'Introduzione, citando Cini, sottolineavo che la “*comprensione delle tappe salienti della scienza così come della storia umana in generale implica per ognuna di esse una ricostruzione dei sentieri abbandonati, delle alternative contrapposte, delle forze e degli interessi in gioco, delle ragioni che hanno fatto prevalere una scelta rispetto alle altre possibili*”. Avendo personalmente trascorso parte della mia vita lavorativa e di studio nei laboratori americani ho preferito, per motivi quindi di interesse personale, iniziare a studiare un fenomeno almeno in parte analogo accaduto oltreoceano. La filosofia illuminista ha largamente influenzato i Padri fondatori degli Stati Uniti, e la loro Rivoluzione (1776), relativa Dichiarazione dei Diritti, Costituzione ecc... hanno ispirato i rivoluzionari francesi dell'89. Ciononostante ancora oggi gli Stati Uniti sono tra i pochi paesi al mondo a non aver ancora adottato ufficialmente il sistema metrico. Nel prossimo paragrafo ho cercato, per quanto mi è stato possibile, di presentare brevemente il processo storico che ha portato alla situazione odierna. Con riferimento alla Gran Bretagna mi limito a ricordare che il governo interpreta tuttora i requisiti della legge del 1995 in maniera libera; così che le quantità non-metriche sono ancora legali, purchè il loro equivalente metrico appaia per primo sull'etichetta (es. le pinte di latte o il caffè macinato in pacchi da libbra). Le catene dei supermercati hanno da qualche tempo iniziato il processo di conversione delle loro bilance per mostrare i prezzi e il peso in chilogrammi. Le misure, le sole a dire il vero, per le quali esiste la deroga permanente sono le misure stradali. Non esiste così l'obbligo di cambiare i segnali stradali alle unità metriche. Nonostante ciò, i tachimetri danno la doppia unità inglese-metrica da molti anni, e le unità metriche si vedono sempre di più sui cartelli stradali che indicano le distanze in metri. Inoltre, alcuni veicoli commerciali dove gli autisti sono controllati dai regolamenti dell'UE sugli orari di lavoro e le distanze percorse (ad es. pullman e camion) hanno tachimetri che mostrano i km/ora in caratteri grandi, con mph (miglia per ora) in caratteri piccoli. Si può anche aggiungere che l'avvenuta conversione dei cartelli stradali irlandesi al sistema metrico, negli ultimi anni ha messo più pressione sul Regno Unito per portare finalmente a termine la transizione in maniera completa.

Ma ritorniamo alla storia del sistema metrico.

Nel 1881 avvenne l'adozione del sistema cgs (in cui le unità fondamentali della meccanica sono il centimetro, il grammo e il secondo, vedi par 4.7) al già citato congresso sull'elettricità di Parigi (tale sistema, completato poi con le due versioni elettrostatica ed elettromagnetica, fu usato prevalentemente dai fisici, essendo le sue unità meccaniche troppo piccole per le esigenze industriali).

Nel 1889 la prima CGPM ufficializzò i nuovi campioni internazionali in platino-iridio da distribuire ai paesi membri della Convenzione. Uno dei primi problemi che gli scienziati affrontarono fu quello relativo al fatto di scegliere se mantenere la definizione del metro che faceva riferimento alla forma della Terra, che nel frattempo si era scoperta variabile in modo non prevedibile, o adottare invece quella riferita al metro legale già esistente, senza più alcun collegamento alle caratteristiche geometriche del nostro pianeta. Si decise per la seconda soluzione, con alcune modifiche. Nacque così il metro costituito da una sbarra lunga 120 cm di una lega di 90% di platino e 10% di iridio (a 0 °C) sulla quale erano incisi due gruppi di tre righe vicinissime: la distanza tra le incisioni centrali dei due gruppi fu assunta come campione. Di tale campione vennero subito costruite trenta copie, distribuite ai vari Paesi. Il n. 6 venne assunto come *prototipo internazionale* e, insieme al n. 13 e al n. 19 (riscontri), venne custodito nei sotterranei del BIPM ².

Una nuova definizione del metro, il cosiddetto *metro ottico*, un multiplo della lunghezza d'onda della luce emessa dall'isotopo 86 del kripton, fu introdotta poi nel 1960. In questa occasione l'XI CGPM ribattezzò il sistema metrico con il nome di *Sistema Internazionale* (SI). Nel 1983 la XVII

¹ Vedi anche Sydenham, 1979 e Connor, 1987

² Vedi Fazio, 1995

CGPM ridefinì ancora una volta il metro come la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un ben definito intervallo di tempo. Nel frattempo anche la definizione dell'unità di tempo, il secondo (definito inizialmente, ricordo, come la frazione $1/86400$ della durata del giorno solare medio), era stata più volte rivista.

Riassumo brevemente come si è arrivati a queste nuove definizioni.

Il primo ventennio del XX secolo rappresentò un periodo denso di eventi fondamentali per la scienza ed emerse una nuova concezione del mondo. Ricordo a tal proposito la scoperta dell'elettrone, la teoria della relatività di Einstein, le ricerche di Niels Bohr e Ernest Rutherford e le loro rispettive scoperte sull'atomo e sul nucleo, la teoria di Louis De Broglie sulla doppia natura, ondulatoria e particellare, degli elettroni, il lavoro di Max Planck sulle radiazioni, il nuovo modello dell'elettrone di Erwin Schrödinger e il principio di indeterminazione di Werner Heisenberg. La natura di questo tipo di ricerca fondamentale, che ebbe un impatto profondo sulla comunità scientifica, contribuì a focalizzare l'interesse della scienza verso la ricerca pura. Tuttavia la società richiedeva anche risultati pratici e innovazione nei prodotti. Nel 1900, con la fondazione del laboratorio di ricerca della General Electric (GE), venne formalmente istituzionalizzata la ricerca industriale. Il laboratorio GE, primo al mondo di questo tipo, costituì un modello per la ricerca industriale ad alta tecnologia negli anni e nei decenni subito successivi. In quel periodo poi le più importanti università dell'Europa, degli Stati Uniti e dell'Unione Sovietica erano sede della ricerca scientifica, mentre gli scienziati e gli ingegneri dell'epoca potevano giovare della loro appartenenza ad associazioni e organizzazioni riconosciute a livello internazionale, quali *l'American Philosophical Society e l'American Academy of Arts and Sciences* negli Stati Uniti, il *Verein Deutscher Ingenieure* in Germania, la *Royal Society* di Londra, *l'Accademia Russa delle Scienze*, *l'Académie des Sciences* in Francia, *l'Accademia dei Lincei* in Italia, *l'Akademie der Wissenschaften* a Berlino, la *Kunliga Vetenskapssakademien* in Svezia, solo per citarne alcune. Queste organizzazioni costituivano al contempo un luogo di confronto e d'impulso per lo scambio di idee e per la trasformazione della ricerca scientifica teorica in prodotti utilizzabili.

Sull'onda dei risultati citati e all'interno del clima culturale descritto, vi furono ulteriori, decisivi sviluppi della fisica, sia in campo teorico che nelle ricadute pratiche. E ciò fu decisivo per il processo che condusse infine alle nuove definizioni.

Come detto l'unità di tempo era stata inizialmente definita in rapporto al giorno solare medio. Ma la determinazione della durata del giorno solare medio è indiretta e si ottiene (in pratica) mediante l'osservazione del tempo sidereo. Poiché però il moto di rotazione della Terra ha una durata lievemente variabile, tale campione risultava impreciso. Per ovviare a tale inconveniente

fu suggerita l'adozione di un campione di tempo riferito al moto orbitale della Terra attorno al Sole che risulta più regolare del moto di rotazione; ma anche tale moto presenta delle irregolarità dovute a variazioni periodiche della rotazione terrestre la cui natura è tuttora sconosciuta, di modo che anche il *giorno sidereo*, definito come l'intervallo di tempo tra due passaggi consecutivi di una stessa stella allo stesso punto di osservazione terrestre, e dal quale poteva essere definito il *secondo sidereo medio*, che risultava pari a 0,977 volte il *secondo solare medio*, non era un campione di tempo sufficientemente preciso. Inoltre tanto il secondo solare che quello sidereo richiedevano per la loro misura osservazioni della durata di mesi il primo, di anni il secondo, perciò appariva indispensabile l'urgente adozione di un buon orologio secondario terrestre. Venne temporaneamente definito (1960) il secondo come la frazione $1/31\,556\,925,9747$ dell'anno tropico 1900 (anno tropico è l'intervallo di tempo tra due passaggi consecutivi del Sole all'equinozio invernale, cioè al 21 marzo). (Fazio, 1995, 63-64)

La necessità di disporre di campioni invariabili e riproducibili spinse dapprima gli studiosi di metrologia, come mostrato, a ricercare tra le caratteristiche del nostro pianeta qualcosa che si prestasse allo scopo. Successivamente, essendosi scoperte variazioni di entità non trascurabile nelle caratteristiche di forma e di moto della terra, fu la fisica atomica a suggerire per alcune delle grandezze fondamentali l'adozione di nuovi campioni. Già nel 1870 il fisico inglese James Clerk Maxwell aveva sottolineato che le lunghezze d'onda, i periodi di vibrazione e le masse dei sistemi atomici danno ben altre garanzie di eternità, invarianza, identità e disponibilità delle analoghe grandezze relative a sistemi macroscopici. E così Popper anticipò:

ma le unità di misura del sistema di coordinate che in un primo tempo furono anche definite mediante nomi individuali (la rotazione della terra, il metro campione di Parigi) possono essere definite, in linea di principio, mediante nomi universali: per esempio, mediante la lunghezza d'onda o la frequenza della luce monocromatica emessa da un certo tipo di atomi trattati in un certo modo. (Popper, 1934, trad. it. 50)

Fu dapprima scoperto che, sotto certe condizioni, le molecole emettono radiazione elettromagnetica a frequenze fisse. La radiazione appare come una linea visibile sullo spettro all'incirca a 5×10^{14} cicli per secondo (cps). Se si trova il metodo per contare tali cicli, è possibile creare un orologio atomico. Ciò non è stato fatto per la luce visibile perché le frequenze sono troppo alte, ma linee spettrali invisibili all'occhio nudo esistono per le onde radio a lunghezza d'onda corta - circa un centimetro - chiamate *microonde*. Per una lunghezza d'onda di 3 centimetri la frequenza è di circa 10^{10} cps. Gli apparecchi per generare microonde e per contare i cicli divennero disponibili intorno al 1940. Durante la Seconda Guerra Mondiale infatti, lo sviluppo di radar sofisticati e di circuiti a microonde ebbe grande impulso e ciò aumentò le possibilità di controllo sulle oscillazioni ad alta frequenza. Tali oscillazioni, provocate dall'uomo e identiche a quelle delle onde radio corte, furono sintonizzate in modo da corrispondere a specifici cambiamenti di energia nelle molecole e negli atomi. Questi cambiamenti furono accuratamente misurati nei termini delle oscillazioni elettromagnetiche che emettevano o assorbivano. *Ogni oscillazione, che può essere mantenuta ad una frequenza uniforme, può servire come base per un orologio.* Questo è vero sia nel caso in cui l'oscillazione sia quella di un pendolo o quella di una molecola che emette energia alla frequenza determinata dalla sua struttura. Nei successivi e più efficaci apparecchi realizzati per misurare il tempo furono utilizzati *fasci di atomi* al posto di molecole. Un orologio atomico combina un orologio elettronico con un oscillatore atomico. La radiazione elettromagnetica viene prodotta quando un atomo o molecola cade da uno stato più elevato di energia (E_1) ad uno stato più basso (E_2). La frequenza della radiazione è data da $f = (E_1 - E_2)/h$, dove h è la costante di Planck.

Il migliore tra questi strumenti moderni si serve degli atomi di un comune isotopo di cesio, noto come Cesio 133. Il Cesio 133 ha un nucleo composto da 54 protoni, 79 neutroni e attorno, disposti in orbite, 54 elettroni, il più esterno dei quali è solo nella sua orbita. Nel 1955 è stato creato un oscillatore atomico ad altissima precisione al Laboratorio Nazionale di Fisica di Teddington in Inghilterra, usando un raggio d'atomi di cesio (nonostante tali orologi "da raggi di cesio" siano complessi in teoria, sono stati prodotti commercialmente da varie ditte in versioni altamente precise e leggere; la frequenza rimane stabile intorno a circa ± 2 parti in 10^{12} , e la frequenza assoluta è corretta per circa ± 5 parti in 10^{12}).

Nei primi anni '50, Harold Lyons e alcuni suoi colleghi del National Bureau of Standards misurarono fino a 1 parte su 10 milioni la frequenza risuonante dell'atomo di Cesio 133 nel suo passaggio dallo stato di energia minima al livello di energia più alto. Si scoprì che quella frequenza era molto vicina ai 9,19 gigahertz. Nel 1957, Essen e Parry, del National Physical Laboratory della gran Bretagna, migliorarono ulteriormente i livelli di precisione di queste misurazioni. La loro relazione, pubblicata in Philosophical Transactions della Royal Society di Londra, fu significativamente intitolata "Il Cesio risuonatore come standard di frequenza e di tempo". Risuonatore indica, in questo contesto, lo stesso atomo di Cesio 133, che si muove liberamente in un raggio atomico attraverso il vuoto e che assorbe o emette microonde della caratteristica frequenza risuonante. Questa transizione o cambio di energia dell'atomo di Cesio è provocata dal fatto che, quando lo spin (movimento rotatorio su se stesso) dell'elettrone posizionato più lontano è opposto alla direzione del movimento rotatorio del nucleo, l'atomo di Cesio ha il minimo possibile contenuto di energia. Se, tuttavia, assorbe una precisa e piccola quantità di energia dalle oscillazioni elettromagnetiche circostanti alla giusta frequenza, allora l'elettrone esterno inizia a roteare nello stesso senso o nella stessa direzione del nucleo. L'atomo ha compiuto quella che è stata definita transizione "iperfina" verso uno stato di energia più elevato. L'energia di questa transizione, sia verso l'alto che verso il basso, è precisamente determinata dalla struttura invariabile dell'atomo di Cesio 133. Non differisce affatto da un atomo all'altro, indipendentemente dalle miriadi di atomi che in quel momento possono trovarsi a muoversi nello stesso fascio o a vibrare all'interno del contenitore. (Klein, 1988, 158-159)

Un orologio moderno al cesio, accuratamente costruito e con un'adeguata manutenzione, può misurare il tempo con una stabilità tale che se dovesse essere utilizzato per un intero secolo, la deviazione rispetto all'ora precisa non sarebbe più grande di 3 millisecondi. Gli standard di cesio

più precisi ¹ si trovano nei laboratori nazionali; le loro incertezze sono stimate in alcune parti su 10^{15} .

A joint experiment was carried out in 1955-1958 by the National Physical Laboratory and the U.S. Naval Observatory to determine the frequency of cesium in terms of the second of ephemeris time, as measured with the dual-rate moon camera. The value obtained was 9,192,631,770 cps. (Markowitz, 1983, 757)

Nel 1967 la XIII Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure, in base a questo primo esperimento ed ad altri analoghi che ne confermarono i risultati, sostituì con l'atomo di Cesio 133 tutti i corpi celesti che precedentemente erano stati utilizzati come base dell'unità di tempo.

La definizione formulata in quella sede fu: *il secondo equivale alla durata di 9.192.631.770 periodi (o cicli) della radiazione che corrisponde alla transizione tra due livelli iperfini dell'atomo di cesio 133.* (Vedi par. 4.2 per la definizione di dettaglio).

Una *scala pratica* del tempo per l'uso a livello mondiale ha due elementi essenziali: una realizzazione dell'unità di tempo ed un punto di riferimento temporale continuo. Il riferimento usato al BIPM (vedi per maggiori dettagli il sito web dell'organizzazione: www.bipm.fr) è il cosiddetto *Tempo Atomico Internazionale* (TAI):

International Atomic Time (TAI) is calculated by the BIPM from the readings of more than 200 atomic clocks located in metrology institutes and observatories in more than 50 countries around the world[...]We estimate that TAI does not lose or gain with respect to an imaginary perfect clock by more than about one tenth of a microsecond (0.0000001 second) per year.(http://www.bipm.fr/enus/5_Scientific/c_time/time.html)

L'unità di scala del TAI è mantenuta il più vicino possibile al secondo del SI usando i dati dei laboratori che mantengono i migliori standard primari di cesio:

The improved data from commercial clocks, and the prospect of much more accurate primary standards using trapped or cooled atoms or ions, is leading the BIPM into studies of how future versions of TAI can be made even more accurate. These studies should lead to new algorithms for computation of the scale, optimization in the use of data from novel primary standards, and increased accuracy in the application of Einstein's general theory of relativity. Other studies may lead to a means of interpreting data from millisecond pulsars so as to provide a time scale having outstanding stability in the very long term.(*ibidem*)

Il TAI è una scala uniforme e stabile che non segue quindi la rotazione leggermente irregolare della Terra. Per motivi pubblici e pratici ² è necessario invece avere una scala che faccia ciò nel lungo

¹ Può essere anche anticipato che i nuovi sviluppi in orologi che impiegano atomi o ioni intrappolati o raffreddati stanno portando a degli ulteriori rilevanti miglioramenti. Interesse vi è anche verso gli sviluppi relativi al *maser a idrogeno*.

² Ricordo anche che essendo l'ora eguale soltanto per i punti della superficie terrestre che si trovano *sullo stesso meridiano*, nelle comunicazioni ferroviarie, telegrafiche ecc. fra Stato e Stato e anche fra paesi posti a Est o a Ovest nello stesso Stato, queste differenze ingeneravano nel passato inconvenienti non lievi. Si stabilì così fra i paesi civili, alla fine del secolo scorso, di regolare tutti gli orologi di un dato Stato sull'ora della capitale, ora che fu chiamata *nazionale* (vedi Cori, Ostermann, 1971). Ma, per gli Stati molto estesi nel senso della longitudine si aveva, talvolta, l'inconveniente di un notevole disaccordo tra l'ora nazionale e quella vera del luogo. Alla fine del secolo scorso si pensò allora ad un sistema più pratico per la coordinazione del tempo: quello dei *fusi orari*; tale sistema fu adottato nel 1883 negli Stati Uniti e nel Canada e, successivamente, negli altri Stati (in Italia, nel 1892). Esso consiste nel dividere idealmente la Terra - nel senso dei meridiani - in 24 spicchi chiamati fusi orari, e comprendente ciascuno 15 gradi. L'ora di un fuso è quella del suo *meridiano centrale*; cioè, sull'ora di questo ultimo, sono regolati gli orologi di tutti i paesi del fuso stesso. Siccome ogni fuso si estende per $7^{\circ} \frac{1}{2}$ ad Est e $7^{\circ} \frac{1}{2}$ ad Ovest del meridiano centrale, la differenza massima tra l'ora vera di un luogo e quella del fuso, è soltanto di mezz'ora. I fusi vengono numerati a partire da quello la cui ora è regolata sul meridiano di Greenwich - che perciò è il primo fuso - e proseguendo verso oriente. L'Europa si può considerare compresa entro i tre primi fusi orari; l'Italia, nel secondo fuso, o fuso dell'Europa centrale (conosciuto nel passato come fuso dell'Etna). Perché uno Stato non avesse una piccola porzione del suo territorio non compresa nello stesso fuso, si sono sostituite - per alcuni tratti - alle linee dei meridiani, quelle delle frontiere politiche, per cui i fusi non sono geometrici, ma convenzionali. La Terra, ruotando su se stessa, impiega 24 ore per fare una rotazione completa; in queste 24 ore, il Sole *culmina successivamente su tutti i 360 meridiani* che - convenzionalmente - si

termine. Una tale scala è il *Tempo Coordinato Universale* (UTC), che è identico al TAI con l'eccezione che di volta in volta si aggiunge un secondo per assicurare che, quando si effettua la media nell'arco di un anno, il Sole attraversi il meridiano di Greenwich a mezzogiorno UTC entro 0.9 secondi:

Coordinated Universal Time (UTC) is the basis for legal time worldwide and follows TAI exactly except for an integral number of seconds, presently 32. These leap seconds are inserted on the advice of the International Earth Rotation Service (IERS) (<http://hpiers.obspm.fr>) to ensure that, on average over the years, the Sun is overhead within 0.9 seconds of 12:00:00 UTC on the meridian of Greenwich. UTC is thus the modern successor of Greenwich Mean Time, GMT, which was used when the unit of time was the mean solar day. (*ibidem*)

I confronti degli orologi che forniscono i dati per il calcolo del TAI si effettuano usando i satelliti del GPS (Global Positioning System) e più recentemente attraverso il TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer).

The BIPM is involved in the development of other methods of time and frequency transfer, such as use of GPS carrier phase, multichannel GPS and GLONASS (Global Navigation Satellite System) observations, and use of GLONASS precise code. The BIPM also carries out studies of many subtle effects that have become important as a result of the improved data. Among these are the effects of changes in ionospheric parameters, the calibration of GPS, GLONASS and TWSTFT equipment, use of post-processed GPS and GLONASS precise ephemerides, improved knowledge of the coordinates of national laboratories, and correlations between clocks. (*ibidem*)

Veniamo all'unità di lunghezza.

Ovviamente gli sviluppi della fisica atomica permisero anche di elaborare dei metodi per la misurazione di una lunghezza che erano di gran lunga più esatti di quelli del passato. Dopo uno studio intensivo della luce monocromatica emessa da lampade che usano sostanze diverse, nel 1960 l'XI Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure scelse una particolare radiazione di color rosso-arancio per ridefinire il metro, in dettaglio come *quella lunghezza che equivale a 1.650.763,73 lunghezze di onda nel vuoto della radiazione che corrisponde alla transizione tra i livelli $2p^{10}$ e $5d^5$ dell'atomo di Krypton 86*.

Un ulteriore passo avanti nella ricerca di universalità fu realizzato poi su un suggerimento che Plank aveva avanzato sin dal 1889. Il fisico tedesco aveva suggerito di basare il sistema di unità su valori assegnati per convenzione ad alcune costanti fondamentali della fisica (ad esempio la velocità della luce, la costante di Planck, la costante di Avogadro) che riassumono le informazioni più profonde di quanto noi conosciamo sulla realtà (vedi par. 4.8). La prima (parziale) realizzazione del progetto di Plank è avvenuta così nel 1983: dopo l'attenta considerazione di differenti alternative, l'invarianza della velocità della luce è stata adottata quale principio fondamentale assegnando ad essa il valore convenzionale $c = 299792458$ m/s. *Il metro è ora di fatto un'unità derivata: è il tragitto percorso dalla luce nella frazione $1/299792458$ di secondo*. La decisione di ridefinire il metro nacque in particolare dalla insoddisfazione degli studiosi verso la precedente definizione, generata dalla limitazione dell'accuratezza con la quale poteva essere realizzato il campione del metro usando la specifica radiazione arancio di una lampada di Krypton-86. Per le vicende relative alla scelta della nuova definizione si può vedere l'articolo apparso su *Nature* nel giugno 1983 di uno dei massimi esperti di metrologia del tempo ¹. Nella nuova definizione (a differenza della vecchia) *la radiazione laser è coinvolta solo nei metodi pratici di realizzazione del prototipo* (vedi par. 4.2) e *non nella definizione stessa*. (Una delle radiazioni raccomandate dal CIPM di Sèvres per la realizzazione del metro campione secondo la nuova adozione è quella emessa da un laser a elio-neon; tale radiazione, rigorosamente monocromatica, $\lambda=633$ nm, si mantiene coerente su lunghe distanze) ².

immaginano tracciati sulla superficie terrestre, e che *distano perciò di un grado l'uno dall'altro*. Il Sole, quindi, per passare da un meridiano a quello contiguo - nel suo moto apparente da Est verso Ovest - impiegherà 4 minuti; e - per passare dal meridiano centrale di un fuso a quello centrale del fuso vicino - un tempo quindici volte maggiore, cioè un'ora. E' per questo che, passando da un fuso all'altro, il viaggiatore che si muove verso oriente dovrà mettere l'orologio avanti di un ora mentre quello che va verso occidente dovrà metterlo un'ora indietro

¹ Petley, 1983

Questa corta e succinta soluzione (“*Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299,792,458 de seconde*” nel linguaggio ufficiale del 1983 del SI) è anche un eccellente compromesso fra differenti esigenze, in quanto fu ovviamente necessario trovare una formulazione adatta a scopi diversi; una formulazione che potesse essere capita nelle scuole e fosse sufficiente per i requisiti della metrologia legale e allo stesso tempo soddisfacesse anche le richieste sofisticate della scienza moderna, inclusa la cosmologia relativistica, ai più alti livelli di accuratezza.

The proposed definition has a deceptive simplicity and underlying beauty, and thereby achieves a neat solution to a number of physical problems, while providing adequately for the sophisticated needs of the science, technology, and education of today. (Petley, 1983, 376)

In pratica ¹, viste le sofisticate tecniche di realizzazione del metro campione per renderlo compatibile con la definizione teorica, per misure di controllo di alta precisione vengono utilizzati dei blocchetti di acciaio di sezione rettangolare le cui facce estreme sono state lavorate otticamente in modo che la loro distanza corrisponda a un ben determinato valore:

Di tali blocchetti, posti in commercio da parte del NIST, esistono 81 tipi la cui lunghezza è compresa tra 0,05 e 4 pollici (cioè tra 0,127 mm e 10,16 mm). Mediante una opportuna combinazione di essi è possibile ottenere qualsiasi lunghezza semplicemente premendoli uno contro l'altro, data l'intensità delle forze di adesione che si generano nel contatto tra superfici estreme finemente lavorate. La lunghezza di ciascuno di tali blocchi è stata controllata con metodi interferometrici e la loro precisione è di circa 1 parte su 10⁶. (Fazio, 1995, 61-63)

Una delle proposte discusse attualmente è appunto di definire le unità fissando per ciascuna di esse un valore convenzionale per una costante fondamentale misurata con altissima precisione ². In un simile sistema il secondo sarà sempre definito da un fenomeno naturale (probabilmente il periodo di una transizione atomica oppure quello della rotazione di una pulsar) mentre tutte le altre unità saranno derivate assegnando convenzionalmente il valore di alcune costanti fondamentali. Per esempio è possibile che il chilogrammo sia ridefinito come un grande multiplo della massa dell'atomo di qualche elemento designato, oppure fissando il Numero di Avogadro o la costante di Planck (vedi par. 4.2). L'attuazione di questo programma richiede tuttavia ancora molti anni in quanto una costante universale diventa utilizzabile ai fini metrologici solo se l'unico limite all'incertezza della sua misurazione è costituito dall'incertezza della realizzazione dell'unità che si intende ridefinire.

C'è però da dire che, oltre i problemi tecnici, lo stesso concetto di “costante universale” può aprire una discussione di ordine teoretico. Secondo alcuni, infatti, la *costanza* delle costanti universali della natura sarebbe solo presunta, e si baserebbe soprattutto su una nostra *fede* nell'uniformità della natura stessa (vedi par. 4.8).

Malgrado queste considerazioni dimostrino quindi come sia anche ora difficile sostenere, nonostante tanti importanti sviluppi e aggiustamenti, *una vera universalità ed oggettività dei campioni di misura*, si può però affermare in maniera convincente che

molta strada si è fatta dalle misure così ricche di significato umano dell'epoca feudale. La «disumanizzazione» di uno strumento così strettamente legato alla vita quotidiana di ogni persona, qual è il metro, ha raggiunto il suo apice. Ma al tempo stesso le comunicazioni e la cooperazione fra gli uomini possono, per questa via, svilupparsi più efficacemente e giungere a risultati più qualificanti. (Kula, 1970, trad. it. 134)

Per capire fino in fondo come sia stato possibile giungere a questi risultati, va ribadito che il processo di standardizzazione dei sistemi di misura è stato un aspetto, probabilmente il più

² Va ovviamente sottolineato che, in tutte le ridefinizioni del metro, si è cercato di mantenerne la lunghezza il più vicino possibile al valore fissato nel 1799 dalla ricerca di Delambre e Méchain

¹ Vedi Fazio, 1995

² Vedi Mana, 1994

importante, di un processo più generale di *normalizzazione delle comunicazioni* volto ad una vera e propria *razionalizzazione della società* ¹. Questo sviluppo scaturì, da una parte, dalla ricerca di quell'ideale di universalità tipico del movimento illuminista e, dall'altra, da una nuova *strategia politica della società* pensata economicamente. Da sempre la politica consiste “nello studio dei mezzi e degli accorgimenti mediante cui l'uomo viene sottratto al disordine, verso cui naturalmente tende, per essere mantenuto nell'ordine” ². Ma è con l'avvento della società moderna che il processo di sviluppo economico diventa il *motore riconosciuto* del costituirsi e del successivo formarsi della società civile *in tutte le sue istituzioni*, dalle più primitive alle più evolute: e le relazioni fra gli uomini, la loro reciproca collaborazione, che si esprime soprattutto sul piano del lavoro, volto ad aumentare la quantità di beni di cui può disporre una determinata società, sono possibili solamente a patto che vengano fissate *regole precise* e non ambigue o arbitrarie. Tutto il sistema delle leggi e dei regolamenti non rappresenta altro che la razionalizzazione, se così si può dire, dell'utile della società, l'indicazione cioè dei *modi mediante cui realizzarlo*.

Dalle più sofisticate unità di misura all'oggetto più insignificante, come il cacciavite cruciforme, fino ad arrivare alle tecniche più recenti di normalizzazione internazionale nella gestione delle imprese (sia che si tratti della certificazione di qualità che dell'ambiente), la normalizzazione tecnologica impregna la nostra vita quotidiana, gli oggetti che ci circondano, ma soprattutto il nostro modo di comunicare, di lavorare, di produrre, di viaggiare e di vivere nella società. Uno degli impulsi decisivi al processo di standardizzazione tecnologico internazionale fu, nei primi decenni dell'Ottocento, l'adozione di uno scartamento unico nelle ferrovie europee. La rivoluzione dei trasporti che ne scaturì non ebbe solo dirette conseguenze di ordine economico, ma cambiò in maniera decisiva abitudini e modi di pensare della gente comune: dei borghesi che commerciavano o viaggiavano per istruzione e per diporto, ma anche dei ceti popolari (lavoratori che emigravano, manovali impiegati nelle costruzioni ferroviarie). La stessa immagine del mondo cambiò radicalmente e l'idea di un mondo più unito, *globale*, le cui parti erano legate fra loro da stretti rapporti di interdipendenza, cominciò a farsi strada nella coscienza collettiva.

La prima locomotiva di *Stephenson* venne realizzata nel 1814, mentre il primo tronco ferroviario, che collegava Stockton a Darlington (Inghilterra), venne inaugurato nel 1825. Tra il 1830 e il 1840 molte linee ferroviarie iniziarono a funzionare in Europa e nel Nord America, ma nessuna di queste aveva un'estensione così significativa da riuscire a collegare tra loro i centri principali di uno stesso paese.

All'inizio degli anni '50 esistevano circa 40.000 km di strade ferrate ³, di cui 15.000 si trovavano negli Stati Uniti e 25.000 in Europa (11.000 nella sola Gran Bretagna). Nel decennio successivo tale cifra fu quasi triplicata e si raggiunsero i 111.000 km di ferrovie, di cui più della metà erano state realizzate nel Nord America. Nei venti anni seguenti, la costruzione di linee ferroviarie proseguì con ritmi appena più lenti (oltre 200.000 km nel 1870 e 370.000 nell'80), soprattutto grazie ai progressi ottenuti nel campo dell'ingegneria civile.

Alla fine dell'Ottocento fecero la loro comparsa una serie di strumenti e di macchine che sarebbero poi diventati parte integrante della nostra vita: la lampadina, il motore a scoppio e i pneumatici, il telefono e il grammofono, la macchina da scrivere e la bicicletta, il tram elettrico e l'automobile e davvero tanti altri. La seconda rivoluzione industriale fu forse meno radicale della prima quanto alle conseguenze di lungo periodo, ma sicuramente mutò le abitudini, i comportamenti, i modelli di consumo di centinaia di milioni di uomini.

Fu proprio in questo periodo che le scoperte scientifiche trovarono una vasta applicazione nei vari rami dell'industria, determinando così il sorgere di una strettissima collaborazione fra scienza e tecnologia e fra tecnologia e mondo della produzione. La seconda rivoluzione industriale, a differenza della prima, ebbe come protagonisti scienziati di grande prestigio, che misero le loro conoscenze a disposizione della produzione o, addirittura, si trasformarono in imprenditori: Thomas

¹ Vedi Olshan, 1993

² D'Addio, 1980

³ Vedi Giardina et al., 2000

Edison, Ernst Werner Siemens, Alexander Graham Bell, John Boyd Dunlop sono solo alcuni degli studiosi che legarono i loro nomi a marchi industriali.

E' in questo quadro sociale e politico che l'attività di normalizzazione delle tecnologie si sviluppò in maniera decisiva. La normalizzazione della tecnica è il prodotto di un processo di negoziazione quanto ogni altra forma di coordinamento sociale. Questa dinamica riunisce attori che arrivano ad un enunciato normativo attraverso una serie di convenzioni necessarie a tale sviluppo, ma gli attori, al di là del loro ruolo istituzionale all'interno della società, "sono innanzi tutto *soggetti portatori di progetti politici*"¹.

A livello di organismi internazionali, come detto, è l'ISO ora l'organismo sicuramente più accreditato per definire il genere di norme che si rendono necessarie in questo ambito. L'ISO è nata nel 1946², ed il suo obiettivo³ è proprio quello di "*favorire lo sviluppo della normalizzazione e delle attività ad essa connesse nel mondo, al fine di facilitare gli scambi di beni e di servizi tra le nazioni e di sviluppare la collaborazione in ambito intellettuale, scientifico, tecnico ed economico*". In altre parole, gli scopi della normalizzazione sono quelli di favorire gli scambi a livello internazionale riducendo gli ostacoli tecnici al commercio. Le relazioni molto forti tra l'ISO e l'Organizzazione Mondiale del Commercio, WTO (World Trade Organization) testimoniano d'altronde la loro grande comunanza di obiettivi. Questi aspetti permettono senz'altro di rafforzare la tesi di un legame tra il processo di normalizzazione e lo spirito del libero mercato, come mette a lungo in luce Mertz nel saggio citato.

Il campo d'azione dell'ISO non si limita a un settore particolare, ma copre tutti i campi tecnici, con l'eccezione dell'ingegneria elettrica ed elettronica, che sono di competenza della Commissione Elettrotecnica. All'inizio il ruolo dell'ISO era limitato all'emissione di "raccomandazioni", che avevano come unico scopo quello di influenzare le norme nazionali esistenti.

Secondo il primo Rapporto annuale dell'ISO del 1972⁴, tra le cause profonde dell'accelerazione del ritmo della normalizzazione internazionale, vi fu lo "*sviluppo esplosivo degli scambi internazionali*" provocato da "*una rivoluzione nelle modalità di trasporto*". E il rapporto aggiunge che solo alla metà degli anni '60 il "*bisogno di norme internazionali si fece sentire e non fu più semplicemente un auspicio*".

Inizialmente l'ISO trattava soprattutto di *prodotti* squisitamente tecnici. In questi ultimi venti anni, è stato possibile assistere alla comparsa di norme di natura diversa che si riferivano non a prodotti, bensì a *processi*, come nel caso delle norme relative alla gestione della qualità (ISO 9000, che si indirizzano all'obiettivo di una razionalizzazione della gestione aziendale) o dell'ambiente (ISO 14000, che insistono particolarmente sulla formalizzazione di strutture e di responsabilità, sulla formazione e sulla sensibilizzazione del personale nel sistema di gestione ambientale).

Nei paesi economicamente più avanzati, la rivoluzione elettronica ha contribuito a dare una forte accelerazione al processo di transizione verso un tipo di società che è stato definito "post-industriale". Del resto, anche l'organizzazione del lavoro in fabbrica era ormai cambiata: l'organizzazione rigidamente gerarchica e taylorista fondata sulla catena di montaggio aveva ceduto il passo a una struttura più flessibile e leggera in grado di rispondere più rapidamente - e a costi più ridotti - alle domande del mercato e di adattarsi più agevolmente alle innovazioni tecnologiche. Questo nuovo tipo di organizzazione del lavoro e di sistema produttivo viene definito anche con il termine «post-fordismo», ad indicare l'abbandono del modello taylorista applicato da Henry Ford già nei primi decenni del secolo.

Il termine "post-industriale" non indica ovviamente un mondo senza industria, ma suggerisce che l'industria tradizionale non è più l'asse portante delle attività produttive e delle relazioni umane e sociali. Ciò che connota la società post-industriale è invece *l'informazione*. Le rivoluzioni basate

¹ Mertz, 2002

² Precedentemente esistevano due organismi internazionali di normalizzazione: la Commissione Elettrotecnica Internazionale (creata nel 1906, esistente ancora oggi) e la Federazione Internazionale delle Associazioni Nazionali di Normalizzazione (fondata nel 1926 e vera antenata dell'ISO)

³ Vedi il sito www.iso.ch alla voce "comunicati stampa"

⁴ Vedi sempre sito web dell'organizzazione

sulla produzione materiale, che avevano caratterizzato la prima metà del secolo, hanno lasciato il posto ad una nuova rivoluzione, basata sulla conoscenza. Questa rivoluzione ha avuto inizio con l'invenzione del transistor e con il successivo perfezionamento dei circuiti integrati. Questi hanno a loro volta prodotto nuove tecnologie, grazie alle quali è possibile l'accesso e l'elaborazione a distanza (basta certo qui citare il solo esempio di Internet per sottolineare l'importanza di questa rivoluzione). Il controllo dell'informazione, dei suoi linguaggi, delle sue procedure, dei suoi flussi è divenuto decisivo. Produrre e vendere informazione definisce le nuove gerarchie di potere e di ricchezza, di dominio e di libertà.

Questa evoluzione nel campo della normalizzazione, soprattutto quella internazionale, può essere quindi vista come *un'estensione di norme* relative a dei prodotti, verso norme relative a dei sistemi, dei processi, delle strutture di organizzazione ¹. Come si può leggere nel sito dell'ISO, "*le norme sono degli accordi documentati che contengono delle specificazioni tecniche o altri criteri precisi, destinati ad essere utilizzati sistematicamente in quanto regole, linee guida o definizioni di caratteristiche per assicurare che materiali, prodotti, processi e servizi siano adatti al loro uso*".

La norma appartiene dunque al dominio convenzionale, è un "*dispositivo cognitivo collettivo*" ², che mira ad assicurare il coordinamento dei comportamenti individuali permettendo un'economia del sapere e una riduzione dell'incertezza, e sviluppando così una *razionalità procedurale* che è sicuramente uno degli approdi di quella ricerca di razionalità economica iniziata con la nascita stessa della cultura moderna:

Appare, attraverso le discipline, il potere della Norma. Nuova legge della società moderna? Diciamo piuttosto che, dal secolo XVIII, esso è venuto ad aggiungersi ad altri poteri costringendoli a nuove delimitazioni; quello della Legge, quello della Parola e del Testo, quello della Tradizione. (Foucault, 1975, trad. it. 201)

Ed è anche il caso di notare che accanto alle norme fa la sua apparizione un nuovo tipo di esami che riguarda appunto l'accertamento della conformità alle norme; si pensi, ai nostri giorni, a quanto formali e procedurali sono, per esempio, le verifiche ispettive nelle aziende condotte da enti certificatori e dirette al rilascio appunto di Certificazioni di Qualità. Ed anche queste attività hanno le loro fondamenta nella nascita della società moderna:

L'esame combina le tecniche della gerarchia che sorveglia e quelle della sanzione che normalizza. E' un controllo normalizzatore, una sorveglianza che permette di qualificare, classificare[...]Per questo, in tutti i dispositivi disciplinari, l'esame è altamente ritualizzato. In esso vengono a congiungersi la cerimonia del potere e la forma dell'esperienza, lo spiegamento della forza e lo stabilimento della verità[...]La sovrapposizione dei rapporti di potere e delle relazioni di sapere assume nell'esame tutto il suo splendore visibile. Ecco un'altra innovazione dell'età classica che gli storici delle scienze hanno lasciato nell'ombra. (ivi, 202)

La ragione dell'uomo occidentale, le cui radici sono certo da ricercare in tempi ben più remoti, dal momento in cui si è affermata la società moderna si è però sempre più esplicita in relazione al lavoro che svolge, nel senso cioè che la razionalità si esprime pienamente nei tentativi che fa l'uomo per rendere sempre più produttivo il suo lavoro: e il lavoro perviene a questo risultato solamente quando viene *disciplinato, razionalizzato* in tutte le sue attività.

2.7 Un case study: il sistema metrico e gli Stati Uniti

In God we trust. All others must bring data.

Robert Hayden

New watch?

¹ Vedi Mertz, 2002 e Kristina, 1996

² Vedi ancora Mertz, 2002 e Favereau, 1989

Yeah, dual time zones, tells the time in two cities.

What for?

So if I'm in L.A. and I wanna know the time in New York, I dont' have to go through the anguish of adding three.

Dal film *The Edge*

Ogni volta che in una disciplina scientifica – e la metrologia certo non fa eccezione – si giunge ad un punto di svolta, ci si trova di fronte alla necessità di scegliere tra diverse opzioni che si sono sviluppate in base a vari fattori, quali, ad esempio, le tematiche da affrontare, le possibili prospettive di successo e le differenti esigenze pratiche e concettuali ¹. La scelta a cui gli scienziati arrivano è il risultato di un lungo lavoro di contrattazione all'interno del quale svolgono un ruolo primario la capacità di persuasione degli studiosi stessi, i loro rapporti di forza, l'analisi dei vantaggi e degli svantaggi che da tale decisione possono scaturire, la volontà di porsi in continuità con la tradizione della disciplina stessa o di interrompere quella stessa continuità a favore delle esigenze e delle tendenze culturali, filosofiche, sociali ed economiche contemporanee.

In aggiunta alle diverse vicende riassunte nei paragrafi precedenti, anche lo studio della controversia sul sistema metrico negli Stati Uniti può fornire un esempio illuminante di queste affermazioni. In particolare questo caso rappresenta una istruttiva illustrazione del ruolo decisivo che il contesto culturale generale può talvolta esercitare sulle scelte tra diverse possibilità in ambito scientifico e tecnologico.

Come accennavo già nel paragrafo precedente, benché la filosofia illuminista abbia esercitato una straordinaria influenza sulla cultura e la stessa nascita degli Stati Uniti, gli USA sono oggi tra i pochi paesi al mondo a non aver ancora ufficialmente adottato il sistema metrico. Anzi, gli americani usano probabilmente la più grande varietà di unità di misura rispetto a qualunque altro paese. Coinvolti in un lento processo di transizione utilizzano una mescolanza sicuramente affascinosa, anche se a volte frustrante, di unità di misura per parlare delle stesse cose. Misurano, per esempio, la lunghezza di una corsa in metri, mentre quella di un salto in lungo in piedi e pollici. Inoltre, le cosiddette *English customary units* (unità di misura convenzionali inglesi), riflettendo le loro radici celtiche, romane, sassoni e scandinave, sono spesso fonte di confusione e contraddizioni. Ci sono due sistemi per la misurazione delle superfici (uno basato sulla *iarda*, l'altro sulla *pertica*) e un terzo sistema per le distanze marine. Esistono due sistemi (*pesi avoirdupois* e *pesi troy*) per misurare il peso delle quantità più piccole e altri due (basati sulla *tonnellata inglese* e sulla *tonnellata americana*) per le quantità più grandi. Gli americani utilizzano inoltre due diversi sistemi per i volumi, uno per i solidi e l'altro per i liquidi. Quali clamorosi effetti questa situazione di transizione abbia potuto produrre è ben testimoniato dal fatto che è stato ormai inequivocabilmente dimostrato che l'improvvisa scomparsa, il 13 settembre 1999, della navicella spaziale denominata *Mars Climate Orbiter* in rotta verso Marte fu dovuta alla dimenticanza da parte dei tecnici di convertire alcune misure espresse in unità convenzionali inglesi nei corrispondenti valori in unità metriche ².

L'introduzione del sistema metrico in Francia e la ratifica della Costituzione statunitense avvennero nello stesso anno, il 1790. Mentre la Francia stava vivendo un periodo di grandi riforme sociali, gli Stati Uniti entravano invece, al termine della Rivoluzione, in una fase di assestamento, che coinvolgeva il consolidamento delle colonie, la costruzione della nazione e la sua espansione. Questi fattori svolsero un ruolo importante nello sviluppo di procedure uniformi per le misurazioni. La Costituzione degli Stati Uniti conferì al Congresso il potere di coniare monete, di regolare il valore della valuta nazionale e di quella estera e, inoltre, di fissare i modelli dei pesi e delle misure. Nel 1786 (vedi oltre) il Congresso stabilì, piuttosto coraggiosamente, che tanto la sterlina inglese quanto le altre valute che circolavano negli Stati Uniti fossero sostituite da un nuovo sistema

¹ Vedi Cini, 1994

² Vedi, per esempio, l'editoriale del *Dallas Morning News* del 3 gennaio 2000, disponibile in rete all'indirizzo http://www.dallas.com/editorial/13418_EDIT.html

monetario che venne poi istituito con la Mint Act (Legge sulla Zecca) nel 1792. Analoghe modifiche avrebbero dovuto subire anche i vari sistemi di pesi e misure allora in uso, sempre secondo quanto stabilito nella Costituzione, ma il Congresso non riuscì ad operare in modo deciso e efficace ¹.

Al momento della ratifica della Costituzione, metà delle colonie americane esistevano già da molti anni. In ognuna di esse, i coloni avevano importato procedure per la misurazione dai loro paesi di origine. Poiché il commercio tra le colonie cresceva, divenne necessario regolamentare gli scambi. La storia della prima Confederazione di Stati e del governo costituzionale degli Stati Uniti mette in evidenza tutte le perplessità avvertite di fronte alla diversità dei pesi e delle misure negli Stati e il desiderio di avere un sistema uniforme ².

Gli *Articles of Confederation* (1777), che univano le colonie in una nazione indipendente, comprendevano una disposizione che prevedeva l'obbligo di fissare il modello per i pesi e le misure in tutti gli Stati Uniti:

The United States in Congress assembled shall also have the sole and exclusive right and power of regulating the alloy and value of coin struck by their own authority, or by that of the respective States-fixing the standard of weights and measures throughout the United States.(cit. in US Dept. Of Commerce-NBS, 1976, 2)

Ma, mentre le colonie entravano in una fase di forte unità nazionale, continuavano localmente a conservare una lunga tradizione legata ai modelli e alle procedure di misurazione inglesi, difficile da sradicare.

Dopo l'adozione del dollaro, 6 luglio 1785, il Congresso approvò un sistema monetario decimale l'8 agosto 1786. L'Articolo 1, sezione 8, della Costituzione degli Stati Uniti dà al Congresso (come sopra anticipato) il potere (con effetto dal 1789) di controllare gli standard della moneta e delle misure:

The Congress shall have Power[...]To coin Money, regulate the Value thereof, and of foreign Coin, and fix the Standard of Weights and Measures.

Nel primo messaggio al Congresso, l'8 gennaio 1790, il Presidente George Washington mise in evidenza quanto fosse importante che negli Stati Uniti si raggiungesse al più presto uniformità di moneta, pesi e misure. Thomas Jefferson, Segretario di Stato, venne incaricato di elaborare un progetto su pesi e misure da presentare al Congresso: Jefferson preparò due piani che sottopose alla Camera dei Rappresentanti il 4 luglio 1790. Il primo progetto prevedeva il mantenimento dei pesi e delle misure all'epoca utilizzati e forniva delle indicazioni sulle procedure da intraprendere per ottenere la loro uniformità. Il secondo progetto, invece, del tutto rivoluzionario, proponeva un sistema decimale dei pesi e delle misure come logica conseguenza del sistema monetario decimale, alla cui realizzazione Jefferson aveva partecipato ³.

Quanto l'aspirazione a unità di misura "universali", alla base come visto dell'immenso sforzo compiuto dagli illuministi francesi, fosse presente anche tra i padri fondatori degli Stati Uniti è ben testimoniata dalla relazione, preparata con l'ausilio di diversi studiosi, che Jefferson presentò alla Camera dei Rappresentanti (*Plan for establishing uniformity in the Coinage, Weights, and Measures of the United States. Communicated to the House of Representatives, July 13, 1790*) consultabile al sito http://ourworld.computerserve.com/homepages/Gene_Nygaard/t_jeff.htm. Ne riporto alcune righe iniziali:

To obtain uniformity in measures, weights, and coins, it is necessary to find some measure of invariable length, with which, as a standard, they may be compared.

There exists not in nature, as far as has been hitherto observed, a single subject or species of subject, accessible to man, which presents one constant and uniform dimension.

¹ Vedi McCoubrey, 1983

² Vedi US Dept. Of Commerce-NBS, 1976

³ Vedi Mc Coubrey, 1983

The globe of the earth itself, indeed, might be considered as invariable in all its dimensions, and that its circumference would furnish an invariable measure; but no one of its circles, great or small, is accessible to admeasurement through all its parts, and the various trials to measure definite portions of them, have been of such various results as to show there is no dependence on that operation for certainty.

Matter, then, by its mere extension, furnishing nothing invariable, its motion is the only remaining resource.

The motion of the earth round its axis, though not absolutely uniform and invariable, may be considered as such for every human purpose. It is measured obviously, but unequally, by the departure of a given meridian from the sun, and its return to it, constituting a solar day. Throwing together the inequalities of solar days, a mean interval, or day, has been found, and divided, by very general consent, into 86,400 equal parts.

A pendulum, vibrating freely, in small and equal arcs, may be so adjusted in its length, as, by its vibrations, to make this division of the earth's motion into 86,400 equal parts, called seconds of mean time.

Such a pendulum, then, becomes itself a measure of determinate length, to which all others may be referred to as a standard.

Molti storici ritengono ¹ che gli Stati Uniti non adottarono la struttura del sistema metrico francese anche perché il modello di base di lunghezza del sistema metrico era definito attraverso misurazioni che potevano essere effettuate solo in Europa. Inoltre, il nuovo governo degli Stati Uniti non aveva partecipato a nessuna delle elaborate cerimonie diplomatiche che avevano sancito l'adozione del sistema metrico in Francia. Così, mentre negli Stati Uniti i tempi erano maturi per prendere in considerazione quelle riforme che venivano contemporaneamente introdotte in Europa - nel 1790 e negli anni successivi – diversi furono i fattori che spinsero verso l'adozione del sistema inglese o di una riforma indipendente. Il Congresso non fu affatto sollecito nell'esaminare la proposta di Jefferson e oscillò tra i due progetti.

Nel 1805 in Francia furono realizzate alcune copie del metro e del chilogrammo standard, e due di esse furono date a Ferdinand Hassler, scelto dal presidente Jefferson per coordinare le attività relative alla standardizzazione di pesi e misure. Hassler affidò questi campioni alla American Philosophical Society; essi furono utilizzati in numerose ricerche scientifiche condotte dal 1807 al 1893.

Nel 1816, su pressioni del Presidente James Madison, il Congresso prese nuovamente in esame la necessità di creare un sistema di pesi e misure uniformi.

Il 3 marzo 1817 venne approvata una risoluzione in cui si chiedeva al Segretario di Stato, allora John Quincy Adams, di approntare una ricerca sul problema dei pesi e delle misure. Adams sottopose una relazione al Congresso il 22 febbraio 1821 ².

In questo documento si poteva, tra l'altro, leggere quanto segue:

Weights and Measures may be ranked among the necessities of life to every individual of human society. They enter into the economical arrangements and daily concerns of every family. They are necessary to every occupation of human industry; to the distribution and security of every species of property; to every transaction of trade and commerce; to the labors of the husbandman; to the ingenuity of the artificer; to the studies of the philosopher; to the researches of the antiquarian; to the navigation of the mariner; and the marches of the soldier; to all the exchanges of peace, and all the operations of war. The knowledge of them, as in established use, is among the first elements of education, and is often learned by those who learn nothing else, not even to read and write. This knowledge is riveted in the memory by the habitual application of it to the employments of men throughout life. (Adams, *Report to Congress*, 1821, citazione da US Dept. Of Commerce-NBS, 1976, VI)

La relazione di Adams considerò in dettaglio il sistema metrico francese, individuandone con chiarezza i vantaggi e i difetti. E' importante ricordare che Adams effettuò i suoi studi nel periodo in cui in Francia un decreto napoleonico tentava di ripristinare l'uso delle unità di misura tradizionali. Il futuro del sistema metrico a quell'epoca non era affatto chiaro. Adams riconobbe anche che, di fatto, gli stati avevano raggiunto un certo grado di uniformità nelle procedure di

¹ Vedi per esempio McCoubrey, 1983; US Dept. Of Commerce-NBS, 1976 e US Dept. Of Commerce-NBS, 1971

² In questo stesso anno Albert Gallatin, ambasciatore degli Stati Uniti in Francia, comprò copie in platino del metro e del chilogrammo certificate dal fisico francese Arago. Nel contenitore del chilogrammo vi era anche un piatto d'argento con su scritto: "Kilogramme comparé pour son Poids à l'Etalon Prototype des Archives de France, et vérifié par M. Arago. Fortin fecit"

misurazione. Inoltre i “diritti degli stati” stavano già iniziando ad essere un problema per la nuova nazione e Adams non era propenso a consigliare nessuna azione che avrebbe avuto diritto di prelazione su leggi degli stati già in vigore ¹.

Adams suggerì anche delle azioni specifiche che avrebbero potuto essere prese all'interno di questo vincolo e propose un piano per ognuna di queste azioni. Le ultime azioni proposte erano le seguenti:

1. To fix the standard, with the partial uniformity of which it is susceptible, for the present, excluding all innovation.
2. To consult with foreign nations, for the future and ultimate establishment of universal and permanent uniformity".(US Dept. Of Commerce-NBS, 1976, 5)

La relazione di Adams fu causa presso il Congresso di ulteriori considerazioni sulle azioni che avrebbero, poi, portato all'adozione delle copie degli standard inglesi come modelli ufficiali di misura. Ci fu anche una risoluzione che avrebbe impegnato gli Stati Uniti a seguire quanto si stava affermando in Inghilterra.

Nel 1830, il Congresso adottò una risoluzione con la quale si richiedeva al ministro del tesoro di individuare lo stato dei pesi e delle misure in uso nelle dogane e di presentarne una relazione nella sessione successiva.

La ricerca effettuata da Ferdinand Hassler, che all'epoca lavorava per la Coast Survey, mise ancora una volta in luce la presenza di notevoli differenze nei modelli di misura, differenze che furono oggetto di una relazione presentata al Congresso nel 1832. L'azione intrapresa dal ministro del Tesoro Louis McLane fu di natura correttiva, ma non fu supportata da nessuna nuova legge. McLane incaricò Hassler di fornire tutte le dogane di modelli di misura precisi e uniformi (basati sugli standard inglesi).

In base a questi atti amministrativi, il Congresso, in una risoluzione congiunta approvata il 14 giugno 1836, chiese al ministro del Tesoro di consegnare ad ogni stato un set completo di tutti i pesi e le misure adottati come modelli nelle dogane. Lo scopo di questo atto era quello di stabilire uno standard uniforme di pesi e misure in tutti gli Stati Uniti.

Nel 1838, successivamente a questa azione, venne approvata dal Congresso un'ulteriore legislazione che prevedeva la distribuzione di bilance utilizzabili con i modelli dei pesi in tutti gli Stati. Quando, nel 1850, si giunse al completamento di tale operazione, fu chiaro che solo gli aspetti nazionali della raccomandazione di John Quincy Adams erano stati realizzati, mentre altri venti anni sarebbero dovuti trascorrere prima che la sua raccomandazione inerente la collaborazione internazionale fosse ascoltata.

Così, a metà del XIX secolo, gli Stati Uniti si erano vincolati, sia nella pratica che attraverso l'azione legislativa, ad un sistema di misure basato su copie di standard obsoleti importati dall'Inghilterra. Ciò nonostante, non c'erano meccanismi adeguati in grado di mettere in relazione il sistema statunitense con i modelli imperiali inglesi. Di conseguenza, gli standard inglesi usati in America e gli standard inglesi usati in Inghilterra iniziarono a procedere su due strade diverse e si delinearono presto notevoli differenze.

L'Accademia Nazionale delle Scienze fu fondata grazie ad un legge del Congresso il 3 marzo 1863 e, immediatamente, prese in considerazione il problema dell'uniformità nelle misurazioni. Il 28 luglio 1866, il presidente firmò una legge con la quale veniva legalizzato l'uso dei pesi e delle misure del sistema metrico per qualsiasi scopo all'interno degli Stati. In questa legge si poteva leggere:

Be it enacted by the Senate and House of Representatives of the United States of America in Congress assembled, That from and after the passage of this act it shall be lawful throughout the United States of America to employ the weights and measures of the metric system; and no contract or dealing, or pleading in any court, shall be deemed invalid or liable to objection because the weights or measures expressed or referred to therein are weights or measures of the metric system.

¹ Vedi McCoubrey, 1983 e US Dept. Of Commerce-NBS, 1976

SEC. 2. *And be it further enacted*, That the tables in the schedule hereto annexed shall be recognized in the construction of contracts, and in all legal proceedings, as establishing, in terms of the weights and measures now in use in the United States, the equivalents of the weights and measures expressed therein in terms of the metric system; and said tables may be lawfully used for computing, determining, and expressing in customary weights and measures the weights and measures of the metric system.(cit. da US Dept. Of Commerce-NBS, 1976, 10)

Come visto gli Stati Uniti presero parte alla conferenza diplomatica del 1875 (par. 2.6) divenendo una delle prime nazioni, ed il solo paese anglofono, ad aderire alla *Convenzione del Metro*. Al termine del XIX secolo, gli standard metrici erano effettivamente diventati la base dei modelli per le misurazioni necessarie in tutto il paese. Queste azioni, per quanto fossero di estrema importanza, non ebbero effetti sull'uso quotidiano delle misure o sul linguaggio delle misurazioni stesse. Non ci furono disposizioni di legge obbligatorie e le unità inglesi tradizionali rimasero in uso nelle attività di tutti i giorni. Cionondimeno la crescita e il maggior prestigio acquisito dalle scienze negli Stati Uniti furono fattori importanti nel riconoscimento del sistema metrico.

Alla fine del XIX secolo il sistema metrico nella sua totalità era diventato *il sistema di misura adoperato dagli scienziati*, anche se nel commercio e in vari campi dell'ingegneria, la situazione era del resto diversa.

Il National Bureau of Standards (ora, come detto precedentemente, NIST, National Institute for Standards and Technology), creato nel 1901 (il Congresso approvò una legge in tal senso il 3 marzo) su richiesta di scienziati, tecnici ed industriali, ebbe il compito di sviluppare gli standard e realizzare tutta la ricerca necessaria a questo scopo.

A poco a poco il dibattito sull'adozione del sistema metrico uscì dai laboratori scientifici e dalle sale del Congresso per entrare nell'ambito politico.

Negli anni '60, dopo che l'XI CGPM, sollecitata dalle raccomandazioni degli scienziati, ribattezzò il sistema metrico con il nome di Sistema Internazionale, negli Stati Uniti ci fu un rinnovato interesse per una sua eventuale adozione ufficiale. Prendendo in considerazione questi fatti, il 9 agosto 1968, il Congresso approvò una Public Law (90-472), con la quale si autorizzava un studio intensivo di tutti i vantaggi e gli svantaggi che l'adozione del sistema metrico avrebbe comportato. Lo studio, effettuato dal National Bureau of Standards, fu completato nel 1971¹. Questo studio mise in luce che gli Stati Uniti si servivano già del sistema metrico in alcuni ambiti e che tale sistema si diffondeva di giorno in giorno. Le conclusioni furono che gli Stati Uniti si sarebbero inevitabilmente uniti al resto del mondo nell'uso del sistema metrico e raccomandarono al Congresso di approvare una legislazione che avrebbe consentito a questo processo di andare avanti su una base volontaria, ma regolata, in tutti i settori dell'economia.

Nella parte finale dello studio si poteva leggere:

If the U.S. decides to go metric in a coordinated program, as the British are doing, what lessons can be gleaned from their progress? It is unrealistic to attempt fully to translate British experience directly to U.S. problems. The British economy is smaller and less complex. Moreover, we do not have under consideration joining a regional economic union such as the Common Market, which is wholly metric, although we do value trading with it.

On the other hand, Britain is, like us, an advanced industrial nation and one with which we share many common traditions. At least to this extent, their metrication effort serves as our pilot program.

(US Dept. Of Commerce-NBS, 1971, 137)

Il Congresso allora elaborò una legge (Metric Conversion Act) che fu firmata dal Presidente Gerald Ford il 23 dicembre 1975. Lo scopo affermato della legge era "to coordinate and plan the increasing use of the metric system in the United States".

Questa legge non conteneva obblighi e affermava che "la politica degli Stati Uniti dovrà essere coordinata e dovrà pianificare l'uso crescente del Sistema Metrico negli Stati Uniti, oltre a stabilire un United States Metric Board con il compito di coordinare il passaggio volontario al sistema metrico". Questa commissione, formata da 17 membri che rappresentavano interessi trasversali, fu nominata dal Presidente Jimmy Carter.(McCoubrey, 1983, 597)

¹ US Dept. Of Commerce-NBS, 1971

Nell'Atto mancava un chiaro obiettivo ed un calendario per l'implementazione; il processo di transizione al sistema metrico gradualmente perse il suo slancio. Riconoscendo il carattere critico dell'adesione degli Stati Uniti agli standard internazionali per il commercio, il Congresso incluse dei forti nuovi incentivi per la "metrication" industriale statunitense nell'"Omnibus Trade and Competitiveness Act" del 1988. Tale legislazione designò il sistema metrico come "sistema preferito di peso e di misura per il commercio statunitense." Il NIST diede il via al "Programma Metrico":

The Metric Program helps implement the national policy to establish the metric system as the preferred system of weights and measures for U.S. trade and commerce. It provides leadership and assistance on metric use and conversion to federal agencies, state and local governments, businesses, trade associations, standards organizations, and the educational community. Implementing the 1988 amendments to the [Metric Conversion Act of 1975](#), the Metric Program coordinates the metric transition activities of all federal agencies. Executive Order 12770, "Metric Usage in Federal Government Programs," issued in 1991, reaffirms the legislation by instructing federal agencies to implement formal plans for using the metric system and to report metric progress. The order authorizes the Secretary of Commerce to direct and coordinate the federal agency metric transition and to assess progress. The Program carries out the direction and coordination responsibilities of the Secretary of Commerce. Because of the metric system's importance as an international standard, its use in product design, manufacturing, marketing, and labeling is essential for U.S. industry's success in the global marketplace. The use of the metric system in federal agency programs relating to trade, industry, and commerce is intended to support industry's voluntary adoption of the metric system. Current Metric Program initiatives focus on education and public awareness to gain broad-based support for national metrication from industry and the general public. (Sito web del NIST, http://ts.nist.gov/ts/htdocs/200/202/mpo_fact.htm)

Le unità tradizionali di misura continuano ad essere utilizzate ancora in molti aspetti della vita quotidiana e continua ad essere scarso l'interesse popolare per il cambiamento. Tuttavia è chiaro che il Sistema Internazionale si è saldamente affermato in importanti settori dell'economia statunitense e il suo uso si sta diffondendo ulteriormente.

Nel 1991 il presidente George Bush ha firmato l'*Executive Order 12770, Metric Usage in Federal Government Programs*, indirizzando tutti i dipartimenti e le agenzie esecutive verso l'implementazione dell'uso del sistema metrico. Nel 1994 al *Fair Packaging and Labeling Act* (FPLA) è stato effettuato un emendamento dalla *Food and Drug Administration* (FDA) per imporre l'uso di doppie unità (pollice-libbra e metrico) per tutti i prodotti di consumo. Tutte le quattro *Canadian Stock Exchanges* hanno iniziato le trattazioni decimali il 15 aprile del 1996, essendo le prime borse nordamericane ad abbandonare il vecchio sistema e a dare il benvenuto al sistema decimale. La precedente trattazione delle azioni in parti da un ottavo di dollaro, o 12.5 centesimi, risaliva alla divisione cosiddetto in "pezzi da otto" del cosiddetto "dollaro spagnolo". Dal luglio del 1996 tutte le misure della temperatura di superficie nei rapporti del Servizio Nazionale di Meteorologia vengono trasmesse in gradi Celsius. Il 9 agosto 2001 le *U.S. Stock Exchanges* hanno concluso la conversione al sistema decimale. La *Securities and Exchange Commission* ha dichiarato che tutte le azioni devono essere rappresentate in dollari e centesimi anziché in frazioni entro la data citata. Il 7 Novembre 2002, su iniziativa del NIST, è stata organizzata una conferenza, "*Efforts to Update Federal and State Packaging and Labeling Laws and Regulations to Give Manufacturers the Option to Voluntarily Label Packages with Only Metric Units*", nell'Herbert C. Hoover Building del Department of Commerce a Washington. Il forum ha visto una nutrita partecipazione di esperti ¹ ed ha all'unanimità approvato una proposta di emendamento al FPLA per rendere possibile l'uso *delle sole unità metriche* in tutte le merci negli Stati Uniti.

Nel 1994 il NIST ha elaborato uno studio nella forma di "Question and Answer", nella cui parte finale si può leggere:

By working with industry on metrication, federal agencies found no major barriers to the conversion of nonmetric U.S. industries. However, the federal agencies also found that some firms believe that U.S. customers may be unwilling to use the metric system. In actual experience, U.S. customers readily accepted metric beverage containers, automobiles, nutrition labeling, vitamins, and track and field events.

¹ Vedi l'articolo di Frysinger all'indirizzo <http://www.cofc.edu/~frysingj/background.htm>

Some firms responded to a federal survey that they are unable to justify upfront investments in metric conversion because the benefits are diffuse and not immediate. Some said that they do not plan to convert because their current customers are not demanding metric products. Companies that do not export say that there is no need for them to change to metric units.

Although such views may appropriately reflect individual firms' assessments of their business environment, they do not reflect the national "big picture" economic benefits that can be gained from metric conversion. Also, such views do not reflect the hidden costs of using two measurement systems. Besides eliminating the costs of two measurement systems, the national benefits include removing the self-imposed trade barrier caused by a nonstandard measurement system. *Based upon the positive experiences of firms and industries that have converted, the federal agencies have concluded that widespread metric use will yield long-term benefits that are beyond any one-time costs or inconveniences.* (Carver, 1994, 4) (il corsivo è mio)

Negli ultimi anni si sono venute a formare posizioni ed organizzazioni che reclamano con forza l'adozione immediata e totale del sistema metrico e altre ancora che, con analoga energia, si oppongono ad ogni modifica.

Per me, europeo educato sin da bambino ad apprezzare l'efficienza e la "semplicità" del sistema metrico, e che per di più ha sempre visto ed ammirato negli Stati Uniti il paese leader nel processo di globalizzazione degli scambi commerciali attualmente in atto, sarebbe in particolare difficile riportare e discutere senza *troppi pregiudizi* i motivi sicuramente importanti di chi si oppone al processo di "metrication and standard globalization". Posso però suggerire al lettore interessato l'importante intervista (Marzo 1996) su questi temi al professor of Public Policy alla George Mason University e autore di *American Exceptionalism* Seymour Martin Lipset (consultabile al sito <http://www.pbs.org/newshour/gergen/lipset.html>), autorevole oppositore di una veloce adozione del sistema metrico. Riporto solo la fase finale dell'intervista:

I think efforts to change us in directions which go against our – you know, the American creed – just won't work.

Inoltre si può trovare un interessante articolo (*Waits and Measures. Meet the least powerful men in Washington*, Jan./Feb. 1999) di Jason Zengerle, che riassume importanti commenti sulla attuale situazione, all'indirizzo www.motherjones.com/mother_jones/JF99/zengerle.html. Ne accludo alcune righe:

Metric advocates love to dissect the failure of the 1970s metrication effort in the United States. They point to the fact that no national time table was ever set for the transition, and they carp that the Metric Conversion Act called only for voluntary conversion rather than mandating it. Others complain that some of the 17 members of the Metric Board were actually anti-metric and worked to sabotage the conversion[...]. Then again it's possible that Americans will never assent to metrication, so long as the metric system is closely identified with the government. "The American style has never been to impose radical changes after state commissions decide on their superiority" says Edward Tenner, a visiting researcher in the history of science and technology at Princeton University. "Americans even hate seeing dual mile and kilometre road signs. The metric system has been a casualty of its identification with political authority."

La tecnologia dei computer moderni potrebbe inoltre aver ostacolato il movimento favorevole al sistema metrico. Come Edward Tenner ha recentemente sostenuto ¹,

printers, fax machines, and other equipment made in Asia for global sales can generally accept both 8.5 x 11 inch and A4 ecc. paper. Microsoft Word can define margins in inches or mm. And a search of European computer sales web sites suggests to me that the inch (Zoll) retains a foothold at least in Germany for one parameter: diagonal monitor size, even though nearly all displays are manufactured in metric lands.

Un'ulteriore ipotesi sulle recenti delusioni potrebbe anche riguardare il fatto che gli anni '70 ed '80 furono un periodo di grande preoccupazione negli USA circa un declino industriale (problema di nuovo attuale!) e la forte competizione giapponese. Certo, la tendenza sempre più spinta alla

¹ Comunicazione personale

globalizzazione internazionale dell'ultima decade potrebbe d'altro canto trasformarsi in un fattore favorevole, ma ora come risaputo vi sono forti tensioni politiche tra gli USA e “la madre” del sistema metrico (Francia) e quella della standardizzazione tecnologica (Germania).

Chi fosse interessato ad approfondire la propria conoscenza della discussione odierna può trovare utili informazioni, documenti, links e bibliografia aggiornata in due siti internet di opposta tendenza. Il primo www.metricsucks.com la cui posizione al riguardo è fin troppo esplicita nel nome stesso, il secondo, GO METRIC, raggiungibile navigando nel sito <http://lamar.colostate.edu/>, è l'organo on line ufficiale della USMA¹ (US Metric Association).

La vicenda qui tratteggiata è anche un esempio significativo di quanto le misure siano una istituzione sociale ed il dibattito sugli standard da utilizzare esca dall'ambito squisitamente tecnico o scientifico per assumere un connotato prettamente politico.

¹ Questa organizzazione no-profit, originariamente The Metric Association, fu creata nel 1916 per sostenere l'adozione del sistema metrico nel commercio e nell'istruzione

3. LE LEGGI DELLA FISICA

Il più profondo desiderio della mente, perfino nelle sue operazioni più elaborate, corrisponde al sentimento inconscio dell'uomo di fronte al suo universo: è un insistere sulla sua familiarità, una brama di chiarezza. Capire il mondo significa per l'uomo convertirlo all'umano, segnarlo con il proprio sigillo.

Albert Camus

Qualsiasi grandezza fisica misurabile direttamente per confronto con un campione può essere considerata come *grandezza fondamentale*. Si sceglie poi un certo numero di grandezze fondamentali ¹ in modo che sia possibile derivare da esse tutte le altre grandezze ² che compaiono nella descrizione dei fenomeni fisici. La pratica, e la stessa storia della scienza, hanno indicato come convenienti alcune scelte di grandezze fondamentali che verranno indicate nel seguito (cap. 4). Le grandezze legate da relazioni algebriche alle grandezze fondamentali sono dette *grandezze derivate*. Supposto che per la meccanica siano state scelte come grandezze fondamentali lunghezza, massa e tempo, sono grandezze derivate il volume, la superficie, la velocità, l'accelerazione, la densità, ecc....

Le grandezze derivate possono pertanto essere definite tramite le relazioni che le collegano alle grandezze fondamentali. Stabilite queste relazioni restano fissate anche le unità di misura delle grandezze derivate, nel senso che fissate quelle per le grandezze fondamentali, tramite esse è possibile ottenere le unità di misura per le grandezze derivate. Per esempio l'unità di densità sarà

$$\frac{\text{unità di massa}}{\text{unità di volume}}$$

Le stesse relazioni che regolano il comportamento delle grandezze derivate forniscono il modo di ottenerne la misura per mezzo dei valori misurati delle grandezze che intervengono nelle relazioni.

Così la densità media di un corpo $\rho = \frac{m}{V}$ può essere appunto ottenuta misurando la sua massa e il suo volume.

Tale tipo di *misura* è detta *indiretta* e può essere usato per la misura di qualsiasi grandezza derivata. D'altra parte, molto spesso è praticamente impossibile dare dei veri e propri campioni omogenei con la grandezza da misurare (per es., se si tratta di una velocità, di un campo elettrico ecc.) e in questo caso le misure indirette sono le sole praticamente possibili. *Ma come arriviamo a formulare quelle relazioni che ci permettono di misurare anche le grandezze derivate?*

Un passo fondamentale della fisica consiste nell'astrarre da tutte le misure e le osservazioni effettuate la *legge* che regola il fenomeno. Per esempio, la legge della gravitazione di Newton è stata costruita a partire da una molteplicità di osservazioni riguardanti fenomeni assai disparati, quali le traiettorie dei pianeti nel loro moto intorno al Sole, l'accelerazione dei corpi in prossimità della Terra (cioè la caduta dei gravi), l'accelerazione della Luna nella sua orbita, la variazione giornaliera e stagionale delle maree.

Le leggi della fisica sono dunque congetture che consentono di dar conto di osservazioni e risultati sperimentali e si presentano solitamente sotto forma di equazioni matematiche. *Tali equazioni mettono in relazione le grandezze che influenzano la classe di fenomeni che la legge intende descrivere.*

¹ Una grandezza fondamentale, *base quantity*, è così definita nella Guida ISO: *one of the quantities that, in a system of quantities, are conventionally accepted as functionally independent of one another*

² Una grandezza derivata, *derived quantity*, è così introdotta nella Guida: *quantity defined, in a system of quantities, as a function of base quantities of that system*

Questo modo di interrogare la natura e quantificare i risultati si è imposto con la Rivoluzione scientifica del XVII secolo:

Careful measurements in the seventeenth century and subsequently led to the discovery of many exact quantitative laws. According to Galileo the 'times of vibration of bodies suspended by threads bear to each other the same proportion as the square roots of the lengths of the thread'[...]Many other quantitative laws were discovered in the seventeenth century and subsequently. Thomas Harriot *circa* 1600, the Dutchman Willibrod Snell (1580-1626) in the early 1600s and Descartes *circa* 1626, all apparently discovered the sine law of refraction independently, Harriot with the assistance of experiment and Descartes through reasoning[...]Robert Boyle (1627-91) and Mariotte, who were among the best experimentalists of the seventeenth century, independently discovered the law of the 'spring of air'. This asserted that the pressure and expansion of air are in reciprocal proportion. Robert Hooke (1635-1702) states that, around 1660 (the same year as the publication of Boyle's law), he discovered that the extension of a spring is proportional to the stretching force Hooke states his law as '*Ut tensio sic vis*'. Curiously, in the seventeenth century the term 'tension' meant extension and 'vis', tension.(Roche, 1998, 61)

Sottolineo di nuovo (vedi par. 1.1) che si può arrivare a formulare una legge fisica non soltanto a partire dal metodo sperimentale:

Newton's great law of gravity, "that the power of gravity ... operates according to the quantity of solid matter which[bodies]contain, decreasing always in duplicate proportion of the distances", was not a direct experimental discovery It was, rather, the result of a complex sequence of deductions which relied upon measurements by others of the Earth's diameter and of the lunar orbit, observations of Jupiter's moons, Kepler's laws and the law of centripetal force.(ivi, 61-62)

Una volta formulata una legge, è possibile grazie a essa fare *previsioni qualitative e quantitative* su quello che succederà in determinate condizioni. Queste previsioni consentono di sottoporre a conferma sia la correttezza della legge formulata sia l'ambito delle situazioni in cui essa è effettivamente applicabile.

Tra i fisici si dice che una legge fisica è "vera" se descrive in modo adeguato tutti i fenomeni che la chiamano in causa. E' quindi impossibile affermare che una certa legge è vera in modo assoluto (perché è impossibile verificare concretamente tutte le infinite situazioni descrivibili con quella legge), mentre generalmente si pensa che basti anche un solo esperimento (o osservazione) che dia un risultato in disaccordo con le previsioni teoriche per *falsificare* una legge, cioè per concludere che essa non è più valida ¹.

Il concetto di legge di natura invero pone differenti problemi di ordine teoretico ed è ormai uno tra i più discussi sia in ambito filosofico che scientifico:

Il concetto filosofico che rappresenta e al tempo stesso presuppone l'esistenza di ordine e di regolarità è quello di *legge di natura*. Sebbene la ricerca di leggi sia considerata lo scopo più importante dell'attività scientifica, e la loro conoscenza sia alla base delle rivoluzioni tecnologiche che continuano a trasformare la nostra vita con ritmo sempre più rapido, il significato della nozione di legge naturale non è stato ancora ben compreso, ed è tuttora al centro di vivaci discussioni sia da parte di scienziati che di filosofi[...]ma anche[...]le principali tappe culturali che hanno portato alla nascita di tale idea non sono ancora state delineate in modo universalmente accettato.(Dorato, 2000, 1-2)

Sappiamo che se la scienza e la tecnologia ci permettono di prevedere e quindi, almeno in parte, controllare gli eventi naturali ciò dipende in prima istanza dal carattere quantitativo della formulazione delle leggi naturali. Un quesito sicuramente discusso è per esempio proprio quello relativo alla comprensione del *perché le leggi siano formulabili matematicamente*.

[...]diversamente da Platone e Aristotele, noi, salvo poche eccezioni, accogliamo l'ipotesi che la matematica e il mondo materiale siano immediatamente e intimamente correlati. Accettiamo pertanto come cosa ovvia il fatto che la fisica, scienza della realtà tangibile, debba essere essenzialmente matematica; ma una tale proposizione non è così ovvia: è un miracolo sul quale molti saggi hanno nutrito seri dubbi.(Crosby, 1997, trad. it.24)

¹ Vedi Popper, 1934; riprenderò criticamente quest'ultima osservazione nell'ultimo capitolo

Tra gli altri problemi elencabili

i tre problemi filosofici fondamentali[...]sono fra loro strettamente connessi, dato che il primo solleva la questione di *che cosa siano le leggi di natura*, e il secondo riguarda *il loro ambito di validità* e il terzo s'interroga[...]su *come arriviamo a conoscerle*.(Dorato, 2000, 3)

Anche la più semplice discussione di questi punti andrebbe ben oltre il compito di un lavoro che vuole limitarsi ad introdurre più che a riassumere in maniera dettagliata i possibili dibattiti connessi alla metodologia della misura. Voglio qui comunque indicare il fatto che “anche sul concetto di legge possiamo ritrovare l’opposizione tra un atteggiamento *costruttivista* ed una posizione *oggettivista* della realtà”¹.

Questa opposizione si esplica già nella concezione dello spazio (che come visto, par. 2.1, fu probabilmente il primo concetto astratto prodotto dagli uomini), e ciò ha particolare importanza in una discussione sulle misure, considerato che la lunghezza è una delle grandezze fisiche fondamentali, e la prima per la quale furono definite unità di riferimento.

About half the Western scientists and philosophers (Descartes, Newton, Samuel Alexander, and others) have considered space the very hallmark of objective reality. The other half (Kant, Bergson, the scientific operationalists, and others) have considered space a subjective product of our sense perception or our conceptual construction.(Williams, 1983, 353)

L’opposizione tra costruttivismo ed oggettivismo può essere chiarita con esempi. La gnoseologia platonica e quella aristotelica possono essere definite oggettiviste. Esse considerano infatti l’*oggetto* (sia esso l’idea trascendente o la forma immanente) come qualcosa di dato e *indipendente dal soggetto* che lo apprende. Nell’orientamento costruttivista l’esistenza di una realtà esterna al soggetto conoscente non è più accolta come un presupposto indiscusso, o, per meglio dire, indipendente dal soggetto che la indaga. Colui che più contribuì a chiarire questi problemi fu sicuramente Immanuel Kant. Nei *Prolegomeni ad ogni futura metafisica che vorrà presentarsi come scienza* del 1783 egli scrive chiaramente, a proposito delle leggi:

dobbiamo distinguere le leggi empiriche della natura, che presuppongono sempre particolari percezioni, dalle sue leggi pure o universali, le quali[...]contengono semplicemente le condizioni della unione necessaria di queste in una esperienza: riguardo alle ultime, natura ed esperienza *possibile* son tutt’uno; e siccome in quest’ultima la conformità a leggi si fonda sulla connessione necessaria dei fenomeni in una esperienza[...]e quindi sulle leggi originarie dell’intelletto, così certo a principio suona strano, ma è, non di meno, certo, dire riguardo alle ultime, *l’intelletto non attinge le sue leggi (a priori) dalla natura, ma le prescrive ad essa*.(Kant, trad. it. 1996, 153-155)(il corsivo è mio)

Questo atteggiamento, pur tra differenti ed importanti sfumature o differenze, dà origine ad una interpretazione contemporanea su come si forma la concezione della natura da parte dell’uomo che, credo, sia ben riassunta da questa citazione dell’economista Jeremy Rifkin:

Le diverse concezioni della natura si concentrano sempre sulle grandi questioni: Da dove veniamo? Chi siamo? Dove andiamo? Gli esseri umani hanno avuto a loro disposizione una serie di risposte facilmente accessibili su cosa sono la natura e la vita. Da dove vengono tutte queste risposte? Quanto sono attendibili? Perché le risposte che abbiamo per lungo tempo pensato al di sopra di ogni sospetto diventano all’improvviso oggetti di scherno e di ridicolo? Le nuove risposte che le sostituiscono sono più valide o saranno prima o poi condannate allo stesso fato ignominioso?

Robert Young, storico della scienza dell’Università di Cambridge[...]afferma che non esiste un naturalismo neutro. Se esaminiamo attentamente, a fondo, le conoscenze e convinzioni scientifiche di un certo periodo della storia, dice Young, ci rendiamo conto che esse sono influenzate dalla cultura del tempo esattamente come le teorie vigenti in ogni altro campo in quel periodo storico. L’antropologo C.R. Hallpike, dell’Università McMaster in Canada, spiega, ancora più chiaramente, che «le rappresentazioni della natura che noi costruiamo» derivano direttamente dal modo «in cui noi interagiamo con l’ambiente che ci circonda e con i nostri simili».

Cercate di immaginare una società che aderisce fiduciosamente a una concezione della natura in contrasto con il modo in cui costruisce l’attività quotidiana. Ovviamente, qualunque concezione della natura deve essere compatibile con il

¹ Dorato, 2000

modo in cui la gente si comporta in un dato ambiente culturale, perché abbia un senso e allo stesso tempo risulti accettabile. E' sempre stato così. (Rifkin, 1998, trad. it. 317-318)

L'idea di natura si conforma quindi agli schemi intellettuali del soggetto umano. Soggetto che, peraltro, come sottolinea il filosofo della scienza Elena Gagliasso ¹, è sempre anche un soggetto biologico e dunque parziale per ragioni bio-strutturali oltre che storico-sociali. In generale alcuni sottolineano ² che il *reale* sia definibile solo ponendolo in relazione al soggetto e al suo sistema sociale e culturale. Il reale, dunque, poggia su una base in qualche misura convenzionale e può variare da un periodo storico all'altro, in base anche, ovviamente, al livello di conoscenze scientifiche raggiunte.

Sin nelle sue rappresentazioni scientifiche più elaborate, la società descrive spesso la natura per analogia con la propria organizzazione. Non di rado il modo in cui concepisce l'ordine della natura è anche un modo di legittimare la propria struttura. (Deléage, 1991, cit. in Gagliasso, 2001, 46)

Il ruolo del soggetto è ormai all'ordine del giorno nella ricerca epistemologica attuale, come intersoggettività attiva e costruttiva in una comunità scientifica ³. Riprenderò questo tema nell'ultimo capitolo.

Anche Kuhn sottolinea i presupposti culturali e storici di ogni attività sperimentale:

Ma l'esperienza sensibile è davvero immutabile e neutra? Le teorie sono davvero semplicemente interpretazioni umane di dati inequivocabili? Il punto di vista epistemologico che ha dominato nella filosofia occidentale per tre secoli impone un immediato e deciso: Sì! In mancanza di una alternativa evidente, trovo impossibile abbandonare interamente un simile punto di vista. Tuttavia esso non funziona più con efficacia e i tentativi per farlo funzionare attraverso l'introduzione di un linguaggio descrittivo neutrale mi sembrano oggi disperati. (Kuhn, 1962, trad. it. 155)

Il pensiero che Kuhn maturò a questo riguardo fu in effetti uno sviluppo originale di una problematica che prima di lui lo stesso Popper, nella sua critica all'induttivismo tradizionale, aveva contribuito a chiarire ⁴. Si afferma la tendenza a ricercare *nel soggetto il fondamento e la regola del conoscere* e in seguito a scorgere nell'attività conoscitiva del soggetto stesso il principio che costituisce e ordina "il mondo":

In conseguenza dell'esperienza, fatta sotto la guida di paradigmi, del mondo umano, della cultura e infine della professione, il mondo dello scienziato è diventato popolato di pianeti e di pendoli, di condensatori, di minerali composti e di tanti altri oggetti simili. In confronto a questi oggetti della percezione, sia le letture del metro che le impressioni retiniche sono costruzioni elaborate, cui l'esperienza ha diretto accesso soltanto quando lo scienziato, per gli speciali scopi della sua ricerca, predispone che l'uno o l'altro di essi vi si presti[...]è però soltanto dopo che l'esperienza è stata determinata in questo modo che può cominciare la ricerca di una definizione operativa o di un puro linguaggio osservativo. Lo scienziato o il filosofo, che chiedono quali misurazioni e quali impressioni retiniche permettono al pendolo di apparire ciò che è, devono già essere in grado di riconoscere un pendolo quando ne vedono uno[...]Perciò, sebbene siano sempre legittimi e spesso straordinariamente fecondi, gli interrogativi che vengono posti a proposito delle impressioni retiniche o delle conseguenze di particolari manipolazioni di laboratorio presuppongono un mondo che sia già stato percettivamente e concettualmente suddiviso in un certo modo. (ivi, 157-159)

Se io vedo una sedia in una stanza e noto che ogni volta che mi dimentico delle sue relazioni spaziali col resto dell'ambiente mi capita di andarci a sbattere contro, io finirò col costruirmi un modello di quell'ambiente che presuppone la "realtà" di un oggetto materiale in quella posizione rispetto alla geometria della stanza. Ciò non toglie che questo non basta a definire la realtà della sedia, che niente se non il ripetersi dell'esperienza mi assicura della realtà della sedia, e *non esiste nessuna legge sicuramente e assolutamente valida che possa garantire che la realtà sia proprio in un certo modo*. Il considerare la realtà dell'esistenza della sedia con certi rapporti geometrici

¹ Gagliasso, 2001

² Vedi per esempio Piaget, 1937, 1946, e 1975

³ Vedi per esempio Fox Keller, 1995 e Gagliasso, 2001

⁴ Popper, 1934

rispetto all'ambiente in cui mi muovo mi è comodo solo per costruire un modello della realtà esterna che mi sia utile e *mi consenta di fare previsioni* (ad esempio evitare di andarci a sbattere inavvertitamente). Estremizzando potremmo addirittura asserire che per *realtà* non possiamo che intendere il modello che meglio di ogni altro interpreta i dati a nostra disposizione in modo da permetterci di fare delle valide previsioni.

Oggi sappiamo, in effetti, che il mondo costituito dagli oggetti e dagli eventi che viviamo come presenti intorno a noi, il *nostro mondo fenomenico*, non è replica diretta dell'ambiente fisico, ma il risultato di una *serie di mediazioni*. L'attività percettiva ci fornisce cioè una conoscenza mediata e indiretta degli oggetti ed eventi fisici: questi ultimi rappresentano soltanto l'inizio di una catena di processi assai complessa. In questo senso si può affermare che la percezione è un'esperienza personale (benché condivisa) di ciascun osservatore, in quanto nell'organismo di ogni singolo osservatore si avvera un distinto processo corticale. Come riassume lo psicologo e studioso di teoria della percezione Gaetano Kanizsa, il tema è all'ordine del giorno anche nelle ricerche specialistiche:

Oltre ad avere una certa grandezza, una forma, un colore, una posizione nello spazio e determinate proprietà cinetiche, gli oggetti percettivi, in special modo quei particolari oggetti che sono le altre persone, possiedono pure un gran numero di *qualità terziarie* e di *valenze*: sono attraenti o ripugnanti, sereni o minacciosi, inquieti, perentori, e via dicendo. Queste qualità sono, o almeno sembrano, far parte della natura stessa degli oggetti, sono vissuti in modo immediato come loro caratteristiche costitutive. In che modo tali qualità vengono trasportate dall'oggetto fisico o dalle persone all'osservatore? In altre parole, è possibile determinare un rapporto di correlazione costante tra condizioni di stimolazione e la percezione delle valenze, dei sentimenti, delle intenzioni, dei rapporti causali?

Ed infine, in quale modo e fino a che punto *l'esperienza passata* dell'osservatore, i suoi *bisogni*, *le sue motivazioni*, i suoi *atteggiamenti*, in una parola la sua *personalità* influiscono sulle sue percezioni? A questo proposito l'evidenza sperimentale è ancora esigua e contraddittoria, anche perché il campo d'indagine è di estrema difficoltà. Si tratta comunque di un tema del massimo interesse, al quale oggi si guarda con grande attenzione e che va analizzato a fondo. (Kanizsa, 1980, 37)

Il contributo su questi aspetti del filosofo David Hume, la cui posizione è collocabile genericamente all'interno dell'atteggiamento costruttivista, è davvero una pietra miliare al riguardo. Hume, che appartiene a quella che fu definita "nuova filosofia inglese" e che ha il suo precursore in John Locke, afferma il primato del *sentimento*, anziché della *ragione*, quale principio esplicativo delle valutazioni umane. Come spiega Dorato,

una[...]possibilità è che la necessità legata al concetto di legge sia puramente *psicologica o soggettiva*, come suggerito già nel Settecento dal filosofo empirista David Hume. Per questo filosofo, la necessità del legame causa-effetto consisteva solo *nell'anticipazione avvertita dalla nostra mente* e dovuta al fatto che, in presenza di un evento di tipo *a* - che nel passato avevamo spesso osservato precedere un evento di tipo *b* - noi (e altri animali) siamo *naturalmente* portati a predire che avverrà *b*. (Dorato, 2000, 9)

Per l'influenza che storicamente ha esercitato questa ipotesi cercherò di chiarire il pensiero di Hume sul fondamento della necessità del legame causa-effetto (anche la sua è essenzialmente una critica al processo tradizionale di *induzione*) tramite brevi citazioni dalla *Ricerca sull'intelletto umano* del 1748:

Ecco una palla da biliardo che sta ferma su un tavolo ed un'altra palla che si muove verso essa con rapidità; le due palle si urtano e quella delle due che prima era ferma, ora acquista un movimento. E' evidente che le due palle si sono toccate l'una con l'altra prima che il movimento fosse comunicato alla seconda e che non vi fu intervallo fra l'urto e il movimento della seconda palla. (Hume, cit. in Cioffi et al., 1998, 434)

Perché siamo assolutamente certi che le palle in questione si comporteranno sempre alla stessa maniera? Non potrebbero forse fermarsi e rimanere in quiete? Ovvero, cosa ci *induce ad inferire* dal movimento della prima palla il movimento della seconda? Hume esclude qualsiasi tipo di considerazioni *a priori*:

Se un uomo fosse creato, come Adamo, nel pieno vigore della sua intelligenza, egli senza esperienza non sarebbe in grado di inferire dal movimento della prima palla il movimento della seconda. Non esiste nella causa nulla che la ragione veda e che poi ci faccia inferire l'effetto. (Hume, *ivi*, 435)

Ne segue che tutti i ragionamenti sono fondati sull'esperienza e

sulla supposizione che il corso della natura continuerà ad essere uniformemente lo stesso. (*ibidem*)

E qual è il fondamento di tale supposizione?

Solo l'abitudine ci induce a supporre che il futuro sia conforme al passato. Quando vedo una palla da biliardo che si muove verso un'altra, la mia mente è immediatamente spinta dall'abitudine verso il consueto effetto ed anticipa la mia vista concependo la seconda palla in movimento. (*ibidem*)

Il principio di causalità secondo Hume dunque non si fonda su alcuna proprietà oggettiva delle cose, né su una ragione a priori, e, in effetti, neppure sulla base della sola esperienza. La *regolarità* dei fenomeni naturali (base delle leggi universali) non è garantita da alcuna prova. L'uomo è portato a *credere* a essa (il futuro assomiglia al passato) sulla base di una disposizione psicologica e istintiva come l'*abitudine*. Ma la nostra esperienza del passato non può mai essere una prova sicura per il futuro.

Un esempio, anche se macabro, per illustrare questo punto è l'aneddoto del tacchino induttivista riferito da Bertrand Russell¹. Fin dal primo giorno questo tacchino constatò che nell'allevamento dove era stato portato gli veniva dato il cibo alle 9 di mattina. Da buon induttivista, però, non volle trarre nessuna conclusione. Attese finché non ebbe collezionato un gran numero di osservazioni intorno al fatto che veniva nutrito alle 9 di mattina ed eseguì queste osservazioni in una vasta gamma di circostanze, di mercoledì e di giovedì, nei giorni caldi e nei giorni freddi, sia che piovesse sia che splendesse il sole. Ogni giorno arricchiva il suo elenco di una nuova proposizione osservativa. Finalmente, la sua coscienza induttivista fu soddisfatta e elaborò un'inferenza induttiva per concludere: "Mi danno sempre il cibo alle 9 di mattina". Ma purtroppo questa conclusione si rivelò incontestabilmente falsa la vigilia di Natale, quando, invece di essere nutrito, venne sgozzato. Un'inferenza induttiva da premesse vere ha così portato a una conclusione falsa.

Il pensiero di Hume avrà un'influenza davvero enorme, e dichiaratamente ammessa, su tutti i filosofi ed i fisici che si sono pronunciati in merito al concetto di legge di natura, da Kant a Einstein.

Il dibattito costruttivista sul concetto di legge si è ulteriormente articolato in chiave *convenzionalistica*. Il convenzionalista non crede affatto che il mondo sia semplice e presenti delle regolarità universali. Le leggi sono semplici solo perché sono nostre autonome creazioni e la scienza è quindi una pura costruzione logica. E ciò non può non influenzare lo stesso concetto di misurazione:

Secondo il punto di vista convenzionalistico, le leggi di natura non sono falsificabili dall'osservazione: esse sono necessarie per determinare che cosa sia un'osservazione e, più in particolare, che cosa sia una misurazione scientifica. Sono queste leggi, enunciate da noi, a formare la base indispensabile per la regolazione dei nostri orologi e per la correzione dei nostri regoli cosiddetti "rigidi". Un orologio si dice "esatto", e un regolo "rigido", soltanto se i movimenti misurati con l'aiuto di questi strumenti soddisfano gli assiomi della meccanica che abbiamo deciso di adottare. (Popper, 1934, trad. it. 67)

Popper comunque, pur riconoscendo qualche merito a questo approccio, non lo ritiene certo accettabile:

La filosofia del convenzionalismo dev'essere considerata altamente meritevole per il modo in cui ha contribuito a chiarificare le relazioni tra teoria ed esperimento. Essa ha riconosciuto l'importanza, a cui gli induttivisti avevano prestato così poca attenzione, della parte che le nostre azioni e le nostre operazioni, pianificate secondo convenzioni e

¹ Esempio ripreso da Chalmers, 1977

ragionamento deduttivo, hanno nell' esecuzione e nell'interpretazione dei nostri esperimenti scientifici. Io ritengo che il convenzionalismo sia un sistema autosufficiente e difendibile. E' improbabile che i tentativi di cogliere in esso qualche contraddizione abbiano successo. Però, nonostante tutto, lo trovo assolutamente inaccettabile. Sotto la sua superficie sta un'idea della scienza, dei suoi scopi e dei suoi propositi che trovo estremamente diversa dalla mia. (ivi, 68)

3.1 Dimensioni di una grandezza

Le leggi della fisica sono formulate in termini di grandezze fisiche, cioè di quantità misurabili caratterizzate da un valore numerico e da un'unità di misura: una legge fisica ha la forma di relazione quantitativa (uguaglianza o disuguaglianza) tra due o più grandezze.

Quando si cerca di descrivere le dimensioni (dal latino *mensio*, *dimensio*, misura) di qualcosa, anche nel linguaggio comune, si ricorre quasi automaticamente a una qualche unità di misura: metro, ora, grammo, ecc. Ciò è perfettamente naturale, poiché un'entità sconosciuta la si può misurare unicamente in funzione di qualche cosa nota, normalmente in funzione delle unità di una scala. La misura si può definire, abbiamo visto, come il mezzo tramite il quale due entità diverse (ma della stessa classe) possono essere confrontate in termini numerici. Una volta fissato, questo mezzo fornisce un'unità nei cui termini si può assegnare un coefficiente numerico a ogni membro della classe a cui la misura è applicabile. Ciò implica che si riconoscano proprietà astratte comuni a tutti i membri della classe. *Ne consegue che il concetto di misura implica a sua volta un concetto di dimensione*, nel senso che una certa misura si applica a una certa classe di oggetti, accomunati dalla stessa dimensione. Le *dimensioni* quindi indicano attraverso quali grandezze fondamentali, e quali operazioni algebriche tra di queste, la grandezza derivata è definita. Per poter definire le dimensioni di una grandezza derivata vanno preventivamente fissate le grandezze fondamentali. Tale scelta, come abbiamo visto, fissa anche le unità di misura, una volta che siano stati definiti i campioni per le grandezze fondamentali. Sinteticamente diremo che la scelta delle grandezze fondamentali e dei loro campioni definisce un *sistema di unità di misura*.

Nel Sistema Internazionale (vedi cap. 4) si scelgono come grandezze fondamentali per la meccanica la lunghezza, la massa e il tempo.

L'area di una figura piana si trova moltiplicando una lunghezza per un'altra lunghezza. Per esempio l'area di un rettangolo avente lati di 2 m e 3,5 m è data da: $A = (2 \text{ m}) \cdot (3,5 \text{ m}) = 7,0 \text{ m}^2$. L'unità di misura di questa superficie è il *metro quadrato* (m^2). Poiché l'area è dunque il prodotto di due lunghezze, si dice che ha le *dimensioni* di una lunghezza al quadrato.

La *dimensione* di una grandezza fisica è quindi la sua rappresentazione come prodotto (o quoziente) di grandezze fondamentali, e viene indicata racchiudendo il simbolo della grandezza tra parentesi quadre. Con riferimento all'esempio precedente scriveremo $[A] = [L^2]$.

Poiché, per esempio, la velocità è il rapporto tra una lunghezza e un tempo, diremo che la velocità ha le dimensioni di una lunghezza diviso un tempo, e scriveremo:

$$[v] = [L][t]^{-1} \text{ oppure } [v] = [L \cdot t^{-1}].$$

E ancora, per esempio considerando l'accelerazione

$$[a] = [L][t]^{-2}$$

e la densità

$$[\rho] = [L]^{-3}[m] \quad (\text{in questi casi ovviamente il simbolo } m \text{ si riferisce alla massa})$$

Il concetto di dimensione è utile proprio *perché le leggi fisiche vengono espresse come equazioni tra grandezze*.

La legge $f = ma$ fissa per esempio le dimensioni della forza:

$$[f] = [l] [m] [t]^{-2}$$

Una grandezza priva di dimensioni si chiama grandezza adimensionale o *numero puro*.

Essa possiede soltanto un valore numerico e non un'unità di misura ed è solitamente il rapporto di due grandezze che hanno le stesse dimensioni.

Da questi esempi possiamo trarre le seguenti considerazioni:

- le dimensioni non necessariamente definiscono la grandezza fisica a cui si riferiscono (per esempio si potrebbe vedere che energia e momento di una forza hanno le stesse dimensioni);
- poiché un cambiamento di unità o di grandezze fondamentali non deve influire sulla validità della legge, grandezze fisiche o loro funzioni possono essere legate da uguaglianze in una legge fisica solo se i due membri hanno le stesse dimensioni; infatti il segno di uguaglianza implica equivalenza delle operazioni di misura, oltre a uguaglianza numerica dei due membri;
- perché l'espressione tramite la quale si esprime una legge sia dimensionalmente corretta possono essere necessari dei coefficienti aventi le dimensioni opportune e quindi aventi valore numerico

dependente dal sistema di unità. Per esempio nella legge di gravitazione universale $f = k \frac{M_1 M_2}{r^2}$ la costante k non è un numero puro, ma ha dimensioni

$$[k] = [l]^3 [m]^{-1} [t]^{-2}$$

- le dimensioni di una grandezza fisica hanno sempre la forma “prodotto dimensionale” delle grandezze fissate come fondamentali nel sistema di unità scelto, elevate a potenza con esponente intero o frazionario, positivo o negativo. Inoltre è possibile sommare solo grandezze omogenee (si possono infatti sommare solo valori diversi della stessa grandezza). Da ciò deriva che grandezze fisiche diverse possono essere combinate solo con operazioni di moltiplicazione, divisione ed elevazione a potenza.

In fisica è risaputo che spesso è possibile controllare la bontà di un calcolo o di un ragionamento tramite *l'analisi dimensionale* (o *controllo dimensionale*), che consiste nel confronto delle dimensioni dei due membri di un'equazione. Se tali dimensioni risultano diverse, sicuramente abbiamo commesso un errore. Si noti però che l'uguaglianza delle dimensioni è una condizione necessaria ma non sufficiente per la correttezza di un'equazione.

3.2 Un approfondimento: il tempo

L'Horologium non solo mostra e registra l'ora a vantaggio della nostra vista, ma con la sua campana annuncia all'orecchio di quanti sono lontani o al chiuso della propria casa il passare del tempo. Così, muovendosi di propria iniziativa a beneficio dell'uomo, giorno e notte, esso ci sembra quasi vivo e niente può essere più utile e piacevole.

Giovanni Tortelli

*A rocket explorer named Wright
Once traveled much faster than light.
He sat out one day*

*In a relative way,
And returned on the previous night.
The Pan Book of Limericks*

Ho già sottolineato l'importanza di studiare e discutere i concetti in chiave storica: non è certo stato un processo lineare e semplice quello che ha portato al tipo di definizioni attuali. Una utile esemplificazione può essere la ricostruzione del concetto di una delle grandezze fondamentali, *il tempo*. Questo prima di tutto perchè tra le grandezze fisiche il tempo assume spesso un ruolo privilegiato. *Frequentemente infatti si presenta la necessità di seguire le variazioni di tutte le altre grandezze al trascorrere del tempo*. Inoltre si può notare che dal punto di vista della metrologia pratica piuttosto che teorica, i più grandi successi nell'ambito della coerenza e della precisione sono stati raggiunti nel campo del tempo e della durata. Il tempo può essere misurato con maggior precisione delle altre due variabili di base della meccanica, la massa e la lunghezza. Le unità in cui il tempo e la durata vengono misurate sono poi più uniformi nel mondo – e lo sono da molto tempo – di quanto non lo siano le unità di lunghezza e massa.

Solo per accennare agli innumerevoli problemi di ordine squisitamente filosofico che qualsiasi riflessione sul tempo indubbiamente ci propone, vorrei citare brevemente un fisico e filosofo della fisica che si è occupato a lungo negli ultimi anni della questione del divenire temporale:

Il tempo, ancor più dello spazio, ha un ruolo primario, addirittura costitutivo, per il nostro essere nel mondo e per la soggettività in generale, che è presente con varie gradazioni negli organismi viventi.

La profonda contrapposizione tra la formale unificabilità intersoggettiva del tempo e dello spazio nella descrizione scientifica del mondo, da un lato, e la diversità ontologica del tempo rispetto allo spazio nella soggettività dell'esperienza, dall'altro, rappresenta probabilmente il problema più profondo e difficile posto dalla fisica alla riflessione filosofica. (Pauri, 1997, 247)

E in effetti nel 1971 il filosofo americano Wilfrid Sellars può sostenere: “Ho scoperto ben presto che il problema del tempo può soltanto essere posto a confronto con il problema mente-corpo nella misura in cui esso pone inesorabilmente in gioco tutte le principali questioni della filosofia”¹.

La nostra intima convinzione, basata sull'esperienza del cambiamento, che, mentre il passato è già finito, il futuro rimane aperto sta davvero alla base della nostra vita:

E tuttavia, viviamo sovente anche la suggestione che, a un livello ontologico più profondo, sussista una realtà atemporale che include, compatibilmente con la libertà delle nostre scelte, l'intera storia nostra e del mondo. Non a caso, lo status del divenire e della permanenza è stato considerato da sempre la questione più profonda della riflessione filosofica. (ivi, 248)

Privilegiando qui una ricostruzione storica del concetto, dobbiamo innanzi tutto chiederci come giunsero gli uomini a considerare quell'esperienza che noi oggi chiamiamo “tempo” alla stregua di qualcosa di misurabile, ossia come una dimensione quale, per esempio, la lunghezza. Sembra molto probabile (par. 2.1) che gli uomini ebbero prima coscienza della categoria dello spazio rispetto a quella del tempo, e il linguaggio stesso proverebbe questa assunzione:

le designazioni di tempo, come “breve” o “lungo,” sono prese dal vocabolario dei concetti spaziali. Noi parliamo di uno “spazio” o di un “intervallo” di tempo: “prima”, etimologicamente, significa “davanti a.” Sotto questo aspetto le lingue semitiche sono particolarmente istruttive, fatto messo in evidenza da Ignaz Goldziber. La parola ebraica corrispondente a “prima” è *lifney*, il cui significato originario è “di fronte a,” “davanti a”; molte altre parole, per esempio *Kedem*, *aharey*, mostrano chiaramente la tendenza a passare dalle qualificazioni spaziali a quelle temporali. Come dato di fatto, questo orientamento si può già riconoscere nell'antica parola sumerica *danna*, che esprimeva in origine una misura di lunghezza e più tardi indicò una certa parte del giorno (unità di tempo). (Jammer, 1954, trad. it. 17-18)

¹ Cit. in Pauri, 1997

Il modo di “concepire” le grandezze e i relativi campioni sono strettamente collegate *al contesto sociale e culturale* in cui queste nozioni sono usate (il campione di tempo “più lungo” di cui si ha traccia è la *kalpa*, che nella cronologia indù equivarrebbe circa a 4320 milioni di anni!). Sembra che in particolare si siano succeduti cinque differenti modi di concepire il tempo, indipendenti o tra loro combinati:

Atteggiamento primitivo[...]. Il tempo può essere considerato come un ciclo ricorrente. Certi eventi si ripetono in un ordine definito che è continuità senza principio né fine, e perciò senza una chiara distinzione tra passato e presente[...]

Tempo storico. Il tempo può essere considerato come storia. Qui l'attenzione viene posta su una successione di fasi complete che sono uniche e non si ripetono mai allo stesso modo. Una concezione di tal genere comporta l'elencazione e il conteggio degli eventi in un ordine regolare, ma[...]lo spazio fra un evento e l'altro è generalmente assegnato non in base al tempo intercorso, bensì in base all'importanza storica.

Tempo magico. Il tempo può essere considerato una qualità religiosa o magica che influenza gli eventi e può, a sua volta, essere controllata con un'opportuna azione rituale. Tale computo del tempo fa parte di una serie più ampia di procedure magico-religiose[...]Da tali procedure magiche può nascere una specie di pseudo-scienza, poiché nel tentativo di scoprire le leggi divine[...]gli uomini sono stati indotti a fare delle osservazioni che equivalgono a trattare il tempo come misurabile.

Tempo politico. Il tempo può essere trattato opportunisticamente, seguendo i capricci e le ambizioni dei singoli capi. Nello sviluppo del nostro sistema europeo di computo del tempo questo fattore accidentale ha avuto notevole importanza. Basta pensare ai calendari di vari movimenti rivoluzionari.

Tempo scientifico. Il tempo può essere considerato semplicemente come durata, senza riguardo ai suoi nessi economici, storici, o magici. In questo modo il tempo diventa una semplice dimensione, analoga alla lunghezza, e può essere misurato in intervalli eguali rispetto a una qualunque scala conveniente. *Questo atteggiamento è molto più recente di quanto non si creda.*(Leach, 1954, trad. it. 114)

I popoli primitivi quindi non pensavano al tempo come a una somma di brevi intervalli eguali, per esempio i minuti o i secondi. L'interesse che nell'uomo primitivo destarono la regolarità dei moti celesti e le loro connessioni con i cambiamenti stagionali del suo ambiente è forse il fattore culturale più importante delle civiltà primordiali. Per loro il tempo appariva come *un ciclo ricorrente* di eventi naturali familiari. Il giorno era seguito dalla notte, e le subentrava di nuovo la mattina seguente. Anche le stagioni si succedevano l'una all'altra, in un ciclo annuale che si ripeteva di continuo. Anche il movimento delle stelle era ciclico. I corpi celesti si ripresentavano sempre uguali, e negli stessi punti della volta, dopo determinati intervalli. Per effetto di questi fenomeni che si osservavano costantemente, il tempo non veniva percepito come un flusso unidirezionale onnipresente. L'idea di mutamenti ciclici solo temporanei e dell'invarianza del mondo nella sua totalità dominò nella mente dei pensatori per molti secoli. Si pensava che tutti i fenomeni mutassero ciclicamente, tornando agli stati loro appropriati. Il farsi astratto del tempo, il suo rendersi autonomo, il suo sganciarsi dai fatti, è davvero operazione relativamente recente. Come noto il simbolo più antico per rappresentare il tempo è l'Uroborus, il serpente che inghiotte la propria coda, di cui ci sono rimaste testimonianze del 10000 a.C. circa.

Ciò ha ovviamente influenzato il modo di misurare il tempo. Alcune tribù delle Indie Occidentali assumevano come misura del tempo gli intervalli fra le successive epidemie di vaiolo da cui erano frequentemente infestate. Gli scavi del santuario di Hera (VII sec a.C.) nel Peloponneso ci hanno tramandato un sistema di misura del tempo basato sui periodi di incarico della sacerdotessa del tempio ¹.

Oltre probabilmente al ciclo giorno-notte attribuito “al movimento del sole”, l'osservazione delle variazioni nell'aspetto della luna durante un tempo fissato (fasi lunari) e l'identificazione del tempo necessario perché la luna tornasse ad assumere lo stesso aspetto - per noi moderni il tempo impiegato dalla luna per tornare nella stessa posizione rispetto alla terra (detto anche *mese sinodico*) - dovette essere una delle prime osservazioni condotte dall'uomo preistorico e uno dei modi possibili per calcolare il trascorrere del tempo ². Per formulare anche la più semplice teoria

¹ Vedi Mella, 1990

² Uno dei primi problemi da affrontare fu così il fatto che il mese lunare non è composto da un numero esatto di giorni. Per precisione di linguaggio ricordo che il *mese sinodico* è il periodo di tempo che la Luna impiega per completare un'orbita intorno la Terra e per riallinearsi con il Sole (circa 29,5 giorni). Diverso è il *mese siderale*, che è il tempo che

astronomica del resto è essenziale non soltanto un'osservazione qualitativa dei cieli ¹, ma anche una misurazione della posizione di stelle e pianeti in tempi definiti.

Una proposta che tiene conto di questi fattori è quella dell'archeologo statunitense Alexander Marschak ². Egli ipotizzò, partendo da un osso con incisioni risalenti al Paleolitico superiore ritrovato nel Riparo Blanchard in Dordogna (Francia), che questi segni potessero dare un'indicazione relativa ai cicli lunari, e non fossero invece simboli aritmetici, come avevano proposto per segni analoghi alcuni studiosi.

Un'analogia funzione è stata ipotizzata per la *Calendar Stone* di Knowth, in Irlanda, risalente alla metà del IV millennio a.C.. Su questa pietra è incisa, a formare un ovale, una sequenza di 29 segni in parte circolari e in parte semicircolari, che sembrano chiaramente indicare il movimento della luna durante un mese sinodico.

La costruzione di monumenti nei quali è stato riconosciuto un interesse per il movimento ciclico degli astri ha inizio con l'età neolitica, che vide il passaggio degli antichi abitatori dell'Europa da un'economia di caccia e raccolta a un'economia basata sulla produzione del cibo (par. 2.1). Per esempio, è con la fine del IV millennio che si diffuse nelle Isole Britanniche un nuovo tipo di costruzioni che, dal nome della più famosa tra di esse - Stonehenge - viene chiamata *henge*. Per tutto il Novecento questi monumenti sono stati il principale campo d'indagine dell'*archeoastronomia* ³ europea, che si è sviluppata principalmente a opera di studiosi anglosassoni, tra cui emerge l'ingegnere scozzese Alexander Thom il quale, a partire dagli anni trenta, ha esaminato e misurato circa 300 tra circoli, allineamenti e pietre isolate. Da tali ricerche si evincerebbe ⁴ che i monumenti *henges* furono costruiti tenendo conto dei punti cardinali, delle posizioni stagionali del Sole e dei cicli della Luna; è stato inoltre possibile individuare raggruppamenti di tipo geografico ad esempio presso le entrate di Stonehenge, Woodhenge, Mambury, tutti collocati nel Wessex.

Anche gli astronomi babilonesi e greci, i quali finirono per giungere a una concezione del tempo simile alla nostra, cominciarono con una vaga scala ciclica di tempo-distanza. Essi dapprima osservarono che la Luna compie il suo tragitto nel cielo in 29 giorni circa, poi notarono che particolari stelle e costellazioni segnavano ciò che più tardi i Romani avrebbero denominato *mansiones* (da manere, soggiornare), ovvero i movimenti giornalieri della Luna ⁵. Da poco prima del 400 a.C., sia le stelle che le costellazioni vennero impiegate per indicare le distanze percorse dal Sole durante i mesi lunari. Quindi si può affermare che gli studi dei moti del Sole si basarono su quelli intrapresi per la Luna.

I Babilonesi per descrivere le tappe del Sole e della Luna utilizzavano la parola *danna* e in un primo momento si ritenne che in un giorno vi fossero dodici tappe. Una *danna* comprendeva 30 *lunghezze*. Il percorso del Sole e della Luna fu considerato come una circonferenza di 360°, ovvero di 360 *lunghezze*.

Non appena i primi astronomi iniziarono ad osservare il cielo e ad annotare i loro dati, alcuni angoli si imposero alla loro attenzione. Così, dallo zenit, il punto del cielo posto direttamente al di sopra

la Luna impiega per percorrere un'orbita intorno alla Terra e per riallinearsi con una stella (circa 27.3 giorni)

¹ Il cielo, per tutti i popoli antichi e al contrario di noi, era della massima importanza. I nostri antenati ne avevano una ottima conoscenza, ed esso era parte importante del loro mondo quotidiano

² Vedi su questi aspetti Costantini, 2001

³ Cioè lo studio delle credenze e delle pratiche riguardanti l'astronomia nelle culture dell'antichità. La nascita di questa disciplina si fa di norma risalire al 1723, quando William Stukely scriveva in un suo manoscritto:

The entrance of Stonehenge is 4° from the true north-east because that is the sun's utmost elongation in summer solstice. (cit. in Castellani, 2001, 9)

⁴ Questi risultati oggi sono, in parte, messi in discussione da nuovi punti di vista teorici. Per esempio Clive Ruggles (Ruggles, 1999 e 2001) propone di interpretare un allineamento di pietrefitte orientato con il sorgere della Luna piena al solstizio come il riflesso di principi simbolici che erano già stati stabiliti quando le pietre furono erette, e che già definivano la natura, la collocazione ed i tempi di cerimonie o rituali o una varietà di altre attività. In generale questo punto di vista suggerisce di "considerare gli allineamenti astronomici come il riflesso simbolico di principi cosmologici"

⁵ Vedi Leach, 1954

delle nostre teste, fino all'orizzonte, in quella lontana pianura, l'angolo corrispondeva esattamente a un quarto di una circonferenza, cioè a 90° .

La separazione angolare, rappresentata da 1° , era troppo grande rispetto alle esigenze di questi astronomi, che la suddivisero per 60, il loro numero base. Oggi, come sappiamo, ogni sessantesimo di grado è chiamato minuto di angolo ed è simboleggiato con $1'$.

Il rapporto tra la misurazione degli angoli e le unità di tempo va ben oltre la semplice considerazione che in entrambi i casi si utilizzi il minuto. Tutti gli orologi non digitali mettono in rapporto una posizione angolare di un cerchio a un punto di un infinito flusso temporale. Le lancette dell'orologio compiono movimenti rotatori in qualche modo analoghi a quelli realizzati dai corpi celesti e dalla terra: l'orologio è, quindi, una specie di riproduzione del cielo.

Fu in Mesopotamia, e non in Egitto, che vennero sviluppati per la prima volta la misurazione e il confronto sistematici degli angoli – angoli formati da strutture poste sulla superficie piatta della Terra e angoli formati tra gli oggetti stellari e la Terra. E' qui che fu per la prima volta pienamente realizzato un “modello numerico del cosmo”¹, che a sua volta generò il primo modello puramente numerico del tempo.

Il sistema dei numeri adottato in Mesopotamia era basato sul numero 60, ed è anche plausibile che ciò derivi in qualche modo dai “360” giorni dell'anno e dai “30” del mese². Nella ripartizione dell'anno in mesi e giorni è probabile che si lasciarono influenzare dal tempo che intercorre tra una luna piena e l'altra (oggi questo periodo è di 29,25 giorni).

Utilizzare un sistema con base 60 in un periodo in cui non esistevano ancora le frazioni né un sistema comprensivo di calcolo basato sulle frazioni comuni, ha i suoi vantaggi. La nostra base 10 è divisibile solo per 2 e per 5, mentre la base 60³ adoperata in Mesopotamia è divisibile per dieci numeri: 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20 e 30. E' possibile inoltre che abbiano deciso di suddividere l'anno in 360 giorni, pur se con l'avanzo di qualche giorno, per analogia con la suddivisione della circonferenza (che, come l'anno, equivale ad una rotazione completa), in 360 parti o angoli uguali.

E' in Egitto comunque che nascono gli studi di astronomia e cosmologia, che culminano nella divisione dell'anno in 12 mesi e del mese in 30 giorni, con un'aggiunta di 5 giorni ad ogni anno. Questi 5 giorni erano associati ai compleanni delle più importanti divinità del pantheon egiziano⁴. L'interesse degli Egiziani per le stelle è visibile nei disegni sulle tombe che rappresentano elementi astronomici, tra cui mappe raffiguranti la posizione degli astri, dato necessario per calcolare il trascorrere delle ore notturne. Tali informazioni costituivano un valido aiuto per le comunità contadine che operavano nella valle del Nilo. Gli Egiziani portarono ancora più in avanti le loro ricerche, dando origine al sistema moderno della divisione del giorno in 12 ore diurne e 12 ore notturne (circa!).

L'osservazione degli astri fornisce anche il mezzo per dividere la notte – e il giorno - in unità di tempo stabilite, scegliendo come punti di riferimento stelle fisse, spaziate a intervalli uguali nella volta celeste. Ciò sicuramente non è semplice. Il cielo cambia ogni notte così come per gran parte dell'anno in cui molti tra gli astri noti sono addirittura invisibili; la visuale del cielo notturno muta anche a seconda della collocazione fisica dell'osservatore. Questo problema fu risolto combinando le risorse matematiche disponibili con la costante osservazione del cielo notturno. Fu così che in Egitto emerse il prototipo del giorno di ventiquattro ore.

¹ Zellini, 1999

² Klein, 1988

³ I Sumeri furono i primi a creare un modo di scrivere i numeri in cui il valore della cifra era determinato anche dalla sua posizione. Il problema fondamentale della numerazione è sempre stato quello di rappresentare con un numero limitato di segni particolari, detti cifre, l'“infinità” dei numeri. Le nostre cifre base vanno da 0 a 9. Lo zero, chiamato dagli arabi “vuoto” e dagli orientali “circolo”, fu introdotto in Italia dal pisano Leonardo Fibonacci, nel 1223, col nome che dura ancora oggi e che proviene da “zefiro” (dolce venticello)

⁴ L'anno era così lungo 365 giorni. Gli egiziani non fecero nessun tentativo per forzare il loro calendario a tenere il passo con le stagioni (vedi par. 2.2), come facciamo noi attualmente aggiungendo i giorni bisestili

Nel quindicesimo secolo a.C. gli Egiziani furono anche i primi ad utilizzare la meridiana per determinare il tempo durante il giorno ¹: anche in questo caso, il fatto che il percorso del Sole variasse di giorno in giorno rendeva impossibile una calibratura precisa. Prima dell'era moderna, quasi tutti i sistemi per dividere il giorno in ore, o in altre piccole unità di tempo, consentivano alla loro durata di variare secondo la durata della notte e del giorno nelle diverse stagioni dell'anno. In Giappone, questa pratica fu abbandonata appena cent'anni fa ².

Anche in Grecia era predominante una concezione che postulava la natura ciclica del tempo. Una posizione originale fu quella del filosofo greco Eraclito, vissuto alla fine del VI secolo a.C., che come noto è riconosciuto fra i primi filosofi dell'antichità a esporre la concezione che nel mondo tutto cambia e che questa mutabilità è la legge suprema della natura (“*tutto diviene e niente è*”). Eraclito sosteneva che il mondo è pieno di contraddizioni e di variabilità. Tutte le cose cambiano. Il tempo scorre incessantemente, e tutto ciò che esiste si muove insieme con lui. Le stelle e i pianeti si muovono, i corpi si muovono e ciò vale anche per i pensieri degli uomini. L'universo stoico, così come descritto per esempio nei frammenti attribuiti a Crisippo ³, propose una sintesi originale che fu in auge a lungo:

Belief in the cyclic nature of time was widespread in antiquity, and it gave rise to the idea of the Great Year. There were two versions of this idea. In one, the Great Year was considered simply as the period required for the sun, moon, and planets to attain the same positions relative to one another as they had held at some previous given time. This was the sense in which Plato used the idea. On the other hand, the Great Year for Heraclitus signified the period of the world from its formation to its destruction and rebirth. These two versions were combined by the Stoic philosophers. The Stoics believed that when the heavenly bodies returned to the same relative positions they had at the beginning of the world, everything would be restored as it was before and the entire cycle would be renewed in every detail. (Whitrow, 1983, 750)

Nella Grecia classica ogni città-stato aveva un metodo diverso per indicare gli anni, i mesi e i giorni. Ad Atene vi era una persona responsabile del calcolo dell'anno, chiamata *archon eponymos* cioè arconte, la cui carica era “annuale”, cosicché gli ateniesi piuttosto che parlare di anno, si riferivano a qualcosa che era avvenuto, ad esempio, “durante l'arcontato di Euclide”. Il sistema per effettuare tale computo non era certo immediatamente comprensibile. Così per riferirsi agli anni si svilupparono altri sistemi.

Diversi furono i metodi escogitati per stabilire un anno zero di partenza, tra cui la data di inizio dei Giochi Olimpici e quella a cui tradizionalmente viene fatta risalire la caduta di Troia. I Giochi Olimpici, che furono organizzati per la prima volta nel 776 a.C. e si ripetevano ogni quattro anni, vennero utilizzati come sistema di riferimento a partire dal IV secolo a.C. fino a tutta la durata dell'Impero Bizantino. Il 776 a.C. fu pertanto considerato l'anno Ol. 1,1 (dove Ol. sta per Olimpiade; 775 a.C. fu quindi 1,2), il 772 a.C., anno dei secondi Giochi Olimpici, fu definito Ol. 2,1. Fu Eratostene a suggerire la data tradizionale della caduta Troia (1183 a.C.) come punto di partenza alternativo nel computo degli anni. Tale avvenimento doveva, secondo i suoi calcoli, essersi verificato 860 anni prima della morte di Alessandro Magno, avvenuta nel 323 a.C. ⁴.

Per quanto riguarda i Romani, si può affermare innanzi tutto che, nel periodo classico, l'anno veniva definito con i nomi dei due consoli in carica. Tali nomi potevano essere seguiti, se necessario, da un aggettivo numerale, ad esempio III, cioè *tertio* o *tertium*, che voleva dire “console per la terza volta”

Un metodo più “scientifico” fu utilizzato alla fine dell'era repubblicana e si basava sull'adozione della data della fondazione di Roma come anno di partenza, fondazione che viene fatta risalire da alcuni ad un periodo compreso tra il 754 e il 751 a.C., e da altri al 753 a.C. *Ab urbe condita* (A.U.C.) era la frase abitualmente usata e che significava appunto “a partire dalla fondazione di

¹ Vedi Macey 1980

² Vedi Crump, 1990

³ Vedi per esempio Andolfo, 1999

⁴ Vedi Dilke, 1993

Roma". Questa cronologia, che venne adoperata a lungo, è riscontrabile perfino nelle mappe rinascimentali conservate nei Musei Vaticani o in alcuni manuali.

Fu il monaco cristiano Dionysius Exiguus che tra il 525 e il 540 d.C., introdusse il computo degli anni proprio dell'era cristiana, considerando l'anno della nascita di Cristo l'anno 1.

I nomi dei mesi romani sono utilizzati ancora oggi, ma il loro significato non è immediatamente evidente. E' chiaro che i nomi di quelli compresi tra settembre e dicembre significano ovviamente settimo, ottavo, nono e decimo mese, anche se, in realtà, si riferiscono ai mesi compresi tra il nono e il dodicesimo. Infatti per i Romani marzo era il primo mese ¹; inoltre, durante il periodo monarchico (dal 753 al 510 a.C.), unicamente i dieci mesi compresi tra marzo e dicembre avevano dei nomi. Solo nel 509 a.C., in era repubblicana, vennero introdotti i nomi gennaio – che deriva da *Janus*, dio dei cancelli -, e febbraio (da *februa*, le offerte di espiazione agli dei). Fu nel 153 d.C. che gennaio divenne il primo mese, mentre, in seguito, i mesi che vanno da marzo a giugno assunsero i nomi degli dei e delle festività religiose. Nel periodo post-repubblicano, i mesi *Quintilis* e *Sextilis*, che corrispondevano rispettivamente al quinto e al sesto mese, furono ribattezzati luglio e agosto in onore di Giulio Cesare e di Augusto ². La più importante riforma di Cesare fu quella di adottare come riferimento l'anno solare (tropico), la cui lunghezza media era 365.25 giorni ³. Giulio Cesare riformò il calendario verso il 45 a. C.; egli stabilì l'anno civile ⁴ della durata di 365 giorni, diviso in 12 mesi. Ogni tre anni, poi, ne intercalò un quarto di 366 giorni, onde recuperare le sei ore circa dell'anno tropico che - in quello civile - non erano calcolate; quest'anno fu detto *bisestile*. Tale calendario venne chiamato *Giuliano*. Però l'aggiunta di un *giorno ogni quattro* anni era un valore troppo elevato giacché l'anno solare non è di 365d e 61h, ma di 365d 5h 48min 46s; e questa differenza di 11min e 14s all'anno, faceva sì che, in ogni anno bisestile, il primo marzo iniziasse - secondo il calendario - con vari minuti di ritardo. Nel 1582 lo spostamento tra l'anno solare e quello civile era divenuto di ben 10 giorni!

Papa Gregorio XIII corresse questo spostamento, stabilendo che – in detto anno - si passasse dal 4 ottobre direttamente al 15 ottobre. Inoltre, affinché esso non si verificasse più nell'avvenire, riformò il calendario, stabilendo che, *degli anni secolari*, si ritenesse *bisestile* soltanto uno *ogni quattro*, e precisamente quello le cui due prime cifre formassero un numero divisibile per quattro.

Non furono bisestili il 1700, il 1800 ed il 1900; lo è stato invece il 2000.

Il calendario così riformato, detto *calendario Gregoriano*, è ormai usato in quasi tutti gli Stati civili. Per quanto riguarda la misura delle ore, nel Medio Oriente e nel mondo greco-romano esistevano due modi per tale computo. Uno, adottato dall'Egitto dei faraoni, consisteva nel suddividere il

¹ I Romani erano molto superstiziosi. Ritenevano i numeri dispari “fortunati”, quelli pari “sfortunati”, e così tutti i mesi ad eccezione di febbraio (28) avevano un numero dispari di giorni: marzo, maggio, luglio (vedi oltre) e ottobre 31, tutti gli altri 29

² Vedi sempre Dilke, 1993

³ Per *anno sidereo* si intende il periodo della rivoluzione terrestre: esso corrisponde all'intervallo di tempo che passa fra due ritorni consecutivi del Sole nella stessa posizione fra le stelle ed ha una durata di 365d 6h 9m 10s (per i simboli qui utilizzati vedi par. 4.6). Il periodo di tempo impiegato dalla Terra a compiere un intero giro dell'orbita - cioè *l'intervallo di tempo che intercede tra due successivi equinozi di primavera* - è detto *anno tropico o solare*; la sua durata è di 365d, 5h, 48min e 46s, circa 20 minuti più breve quella dell'anno sidereo: questa differenza è dovuta alla precessione degli equinozi, cioè al fatto che gli equinozi ed i solstizi si verificano ogni anno un po' prima che la Terra abbia compiuto una rivoluzione completa intorno al Sole. Si noti l'anno sidereo non è dato dalla somma di tutti i giorni siderali compresi in un anno, né quello solare corrisponde all'insieme dei giorni dello stesso nome, tant'è vero che nessuno dei due comprende un numero intero di giorni; inoltre, fra i due tipi di anno è quello solare che ha una durata minore, a differenza di quanto avviene fra le due specie di giorno. (Vedi Palmieri, Parlotto, 2000)

⁴ Generalmente quando si usa la parola anno ci si riferisce all'anno tropico o solare, poiché esso indica il periodico susseguirsi delle stagioni a cui sono collegati molti dei fenomeni fisici e biologici che si svolgono sulla superficie terrestre, comprese le stesse attività umane (per esempio, quelle agricole, quelle turistiche ecc.). Però, nella pratica comune non è possibile utilizzare l'anno tropico con la sua durata effettiva, dato che essa non corrisponde ad un numero intero di giorni; per ovviare a questo inconveniente, si è resa necessaria l'introduzione dell'anno *civile*, formato appunto da un numero non frazionato di giorni: su questa unità di misura convenzionale sono basate le divisioni del tempo adottate dai vari popoli per poter fissare le epoche di determinati avvenimenti naturali o umani cioè i *calendari* (dal latino *calendarium*, libro dei crediti). (Vedi Palmieri, Parlotto, 2000)

giorno in 24 ore della stessa durata ed era utilizzato in astronomia. Il secondo era per gli usi di tutti i giorni, e proveniva originariamente dalla cultura babilonese. Le ore del primo erano chiamate in greco *hōrai isēmerinai*. Nel secondo venivano invece denominate *merē o hōrai kairikai*.

In questo sistema il periodo di luce solare era diviso in 12 ore, di conseguenza ogni ora aveva maggiore durata in estate rispetto all'inverno: in tal modo, alla latitudine di Roma, la più lunga e la più breve delle ore stagionali corrispondevano rispettivamente a un'ora e un quarto e a tre quarti d'ora.

Quanto alla strumentazione, uno dei più antichi dispositivi per misurare il tempo fu l'orologio solare fisso. Molto presto gli uomini dovettero accorgersi che l'ombra proiettata da un palo verticale indicava una direzione diversa nelle diverse ore del giorno. Non è grande il passo dal segnare l'ombra di qualche edificio, palo od oggetto naturale, alla costruzione di una lastra verticale od orizzontale per proiettare un'ombra di sufficiente lunghezza.

Il più antico tipo di strumento per tali misurazioni sembra sia stato un orologio a ombra egiziano ¹ (dal decimo all'ottavo secolo a.C.); dispositivi molto simili sono tuttora in uso in quel paese. L'orologio a ombra non è altro che un'asta orizzontale graduata, con una sporgenza verticale. Le graduazioni dell'asta sembra siano state ottenute empiricamente.

La meridiana o gnomone fu, fino al quattordicesimo secolo d.C., l'unico strumento attendibile per calcolare il tempo. In Egitto tale mezzo, che venne adottato molto presto, presentava una scala suddivisa secondo regole semplici comportanti numeri interi.

Secondo lo storico antico Diogene Laerzio l'inventore del gnomone sarebbe Anassimandro.

I più antichi strumenti per misurare il tempo senza basarsi su fenomeni astronomici si limitavano a indicare il trascorrere di periodi fissati arbitrariamente, come, per esempio, la clessidra.

L'orologio a sabbia non è conosciuto in base a esplicite citazioni fino alla seconda metà del quattordicesimo secolo, ma il suo precursore, la clessidra appunto, che usava acqua invece di sabbia, era già nota in Egitto nel 1400 a.C. circa. Una rinvenuta a Karnak è stata fatta risalire al periodo del regno di Amenhetep III (circa 1415-circa 1380 a.C.) ed è formata da una bacinella di alabastro con un forellino nel fondo, attraverso cui si lasciava fluire l'acqua. Alcuni vasi da clessidra, provenienti dall'Egitto e tuttora esistenti, hanno scale segnate all'interno ², ma per misurare intervalli uguali di tempo la graduazione avrebbe dovuto essere fatta empiricamente. E' bene notare infatti che in un vaso cilindrico l'uscita dell'acqua è maggiore quando il vaso è pieno, per cui i contrassegni delle ore non erano equidistanti ³.

Anche uno strumento astronomico come l'*astrolabio* fu impiegato per molto tempo per conoscere il tempo. Esso serviva per determinare l'ora anche di notte purchè fossero visibili il Sole o una delle stelle principali segnate sullo strumento. Cristoforo Colombo, Amerigo Vespucci e Magellano ne fecero ampio uso. Vi sono molti tipi di astrolabio, e il più usato per leggere l'ora

consisteva essenzialmente in un disco metallico su cui era incisa una proiezione della sfera celeste su di un piano parallelo all'equatore. Questa proiezione mostra gli *azimut* (archi di cerchio massimo compresi tra lo zenit e l'orizzonte) e gli *almucantarati* (cerchi paralleli all'orizzonte) ed è limitata dal tropico del Capricorno; intorno a questa proiezione vi è una scala per la misura del tempo in ore. (Mella, 1990, 45)

Forse si può dire che le origini della concezione scientifica del tempo siano da ricercare in Aristotele. A differenza di Platone, Aristotele rifiutò la nozione di un mondo ideale sottratto al corso del tempo. Mentre per Platone le idee rappresentano anche l'eternità, il mondo è soggetto alla mutabilità. E la vera "realtà" è rappresentata per Platone dal mondo delle idee.

¹ Vedi Leach, 1954

² Vedi Price, 1954

³ Una curiosità. In Cina, sin da tempi antichi, per misurare il tempo si ricorreva anche al fuoco. Un esempio, vedi Mella 1990, è il seguente: ad una estremità di una corda con nodi ad intervalli equidistanti veniva appiccato il fuoco e veniva misurato il tempo in base alla estensione della bruciatura (numero dei nodi bruciati)

Aristotele giunse a discutere l'importanza del tempo attraverso lo studio del moto dei corpi. Utilizzo ora alcune citazioni dalla sua *Fisica*, opera scritta intorno al 355 a.C.:

E dal momento che il tempo sembra essere soprattutto movimento e [10] un certo cambiamento, occorre prendere in esame questa tesi[...]Se dunque la convinzione che non esiste tempo [30] noi l'abbiamo quando non distinguiamo alcun mutamento, ma la coscienza sembra rimanere immutata in uno stesso istante indivisibile; mentre invece, quando percepiamo l'«ora» e lo determiniamo, allora diciamo che del tempo è trascorso: è allora evidente che, non esiste tempo senza movimento [219 a] e cambiamento[...]In effetti il tempo è questo: il numero del movimento secondo «prima» e «poi».(Aristotele, vedi trad. it. 1999, *Fisica* IV 10, 209-215)

Aristotele riteneva che il movimento potesse essere misurato dal tempo ed il tempo dal movimento:

[15] Non solo misuriamo il movimento mediante il tempo, ma anche «con» il movimento il tempo, in quanto essi si determinano reciprocamente. Il tempo, infatti, determina il movimento in quanto è numero di questo, e il movimento il tempo. E diciamo che il tempo è «molto» o «poco» misurandolo con il movimento, come anche misuriamo il numero mediante ciò che è numerabile: ad esempio, [20] con un cavallo assunto come unità di misura, determiniamo il numero dei cavalli. Con il numero conosciamo infatti la quantità dei cavalli, e di nuovo con un cavallo assunto come unità conosciamo lo stesso numero dei cavalli.

E la medesima cosa avviene in rapporto al tempo e al movimento: con il tempo, infatti, misuriamo il movimento, e con il movimento il tempo. E questo è corretto, poiché il movimento [25] corrisponde alla grandezza, e il tempo al movimento, in quanto tutte queste sono quantità continue e divisibili.(Aristotele, vedi trad. it. 1999, *Fisica* IV 12, 221)

E' chiaro così che per Aristotele l'episteme, ovvero il processo con cui conosciamo le cose, è *il poter misurare le cose stesse*:

E questo è ciò che è più conoscibile[...]Il numero del moto locale è, infatti, tempo, mentre l'«ora» è numero del corpo che si muove, così come l'unità lo è del numero[...]E poiché il tempo è misura[...]del movimento e dell'esser mosso, il tempo misura il movimento con il determinare un certo movimento che misurerà l'intero, così come il cubito misura la lunghezza con il determinare una certa grandezza che misurerà l'intero. Per il movimento «essere nel tempo» è essere misurato[...] (Aristotele, vedi trad. it. 1999, *Fisica* IV 11, 217-221)

Aristotele conclude con il famoso interrogativo se le cose possano esistere senza che ci sia un intelletto a misurarle:

Ma qualcuno potrebbe sollevare questa difficoltà: il tempo esisterebbe o meno, se non esistesse l'anima? Se non esiste infatti ciò che può numerare, è impossibile che vi sia qualcosa che può essere numerato.(Aristotele, vedi trad. it. 1999, *Fisica* IV 14,233)

Questo dubbio può essere considerato una questione puramente speculativa. Mostrerò comunque fra poco come, nella relatività speciale e generale, *il tempo venga a dipendere anche operativamente dalla condizione fisica dell'osservatore*. Ricordo pure come, almeno secondo l'interpretazione standard della meccanica quantistica, le grandezze misurabili di un sistema assumerebbero in effetti valori “determinati” *solo quando le misuriamo*. Un sistema microscopico, infatti, può esistere in uno stato cosiddetto di "sovrapposizione": per esempio, se il sistema può percorrere due cammini, a destra e a sinistra, nello stato di sovrapposizione esso si troverà contemporaneamente a destra e a sinistra. Succede che l'azione di misura da parte di uno sperimentatore sia proprio quella di imporre al sistema, per esempio un elettrone, di collassare su uno dei suoi stati possibili o di percorrere un certo cammino tra quelli predisposti dall'esperimento.

La tradizionale natura ciclica del divenire fu messa in discussione la prima volta dalla cultura cristiana.

Le figure più autorevoli della prima Cristianità furono impegnate in una seria discussione sulla tradizionale visione ciclica del tempo. Sant'Agostino sosteneva che la crocifissione di Cristo dovesse essere considerata un evento unico e irripetibile, arrivando così a proporre una visione del tempo lineare e non ciclica. Fu, inoltre, il primo a parlare di tempo interiore o mentale: non soddisfatto dell'associazione aristotelica del tempo con il movimento, Agostino scelse di

considerare il primo come un'attività dell'"anima", in grado di ricordare, prestare attenzione e prevedere ¹.

Galileo fu il primo scienziato a considerare il tempo come una grandezza fisica moderna, misurabile accuratamente ed essenziale nell'attività ordinata del cosmo. Si racconta ² che, seduto in una chiesa, misurando con il battito del suo polso l'oscillazione di una lampada, riuscì a scoprire la legge fondamentale del pendolo, secondo la quale il periodo è indipendente dall'ampiezza delle oscillazioni. Da allora gli artigiani europei iniziarono a progettare orologi sempre più precisi.

Ed in effetti i primi orologi non erano certo della precisione a cui oggi siamo abituati (vorrei a questo proposito solo ricordare che il primo strumento denominato "cronografo" fu brevettato dallo svizzero Adolphe Nicole nel 1862!):

Il termine inglese *clock* è legato al francese *cloche* e al tedesco *Glocke*, parole che indicano tutte "campana": nel Medioevo e nel Rinascimento la vita nelle città era regolata dalle campane - «una città senza campane», diceva lo sregolato Rabelais, «è come un cieco senza bastone». Ma le ore che esse suonavano all'inizio del secondo millennio erano quelle canoniche, dunque imprecise e troppo poco numerose durante il giorno per regolare opportunamente le scansioni della vita urbana.(Crosby, 1997, trad. it. 89)

Questo aspetto ci rimanda ovviamente alle considerazioni, su cui mi sono soffermato nel precedente capitolo, sul *rapporto tra l'esigenza di precisione della società moderna ed i relativi sviluppi tecnici e scientifici*. Afferma Koyrè:

Solo una civiltà urbana, evoluta e complessa, per i bisogni precisi della sua vita[...]può provare la necessità di sapere l'ora, di misurare un intervallo di tempo. Solamente là appariranno gli orologi[...]in Grecia come a Roma, la vita quotidiana sfugge alla precisione - tutta relativa d'altronde - degli orologi. La vita quotidiana si muove nel pressappoco del tempo vissuto.

Lo stesso accade nel corso del Medioevo. E anche più tardi. Senza dubbio la società medievale ha sull'antica l'insigne vantaggio di avere abbandonato l'ora variabile, sostituendola con un'ora a valore costante. Solo che essa non prova molto bisogno di conoscere quest'ora. Essa viene perpetuando, come ha detto tanto bene Febvre, «le abitudini di una società di contadini che accettano di non sapere mai l'ora esatta, se non quando suona la campana (supponendo che questa sia ben regolata) e che per il resto si riferiscono alle piante, alle bestie, al volo di quest'uccello o al canto di quell'altro. "Verso il levar del sole", oppure "verso il tramonto"».

La vita quotidiana è dominata dai fenomeni naturali, dall'alba e dal tramonto - ci si alza presto e non si va a letto tardi - e la giornata è scandita, piuttosto che misurata, dalla suoneria delle campane che annunziano le «ore»- le ore dei servizi religiosi ben più di quelle dell'orologio.(Koyré, 1961 B, trad. it. 103)

Non c'è quindi da stupirsi, afferma sempre Koyrè citando anche Lucien Febvre, che

il tempo del secolo XVI[...]sia sempre e di nuovo il tempo vissuto, il tempo del pressappoco, e che in ciò che concerne il tempo - e tutto il resto - nella mentalità degli uomini di quell'epoca «regni dovunque fantasia, imprecisione, inesattezza. Così ci sono uomini che non sanno esattamente neppure la loro età: sono innumerevoli i personaggi storici di quel tempo che ci lasciano la scelta fra tre o quattro date di nascita, talora lontane di parecchi anni»: così accade che gli uomini non conoscano né il valore né la misura del tempo.(ivi, 105-106)

La posizione fondamentale occupata dal tempo nelle leggi dell'universo venne svelata completamente solo grazie all'opera di Newton. Isaac Newton era dell'opinione che il tempo esistesse indipendentemente non solo dalla mente umana, ma anche dagli oggetti materiali.

Nella fisica di Newton, il tempo è un flusso continuo, che interessa tutti i processi senza eccezione e il cui corso è sottratto a qualsiasi influenza. Nei *Principia* egli afferma che

il tempo assoluto, vero e matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente, e con altro nome è chiamato durata.(Newton, vedi trad. it. 1965, 101)

¹In *De quantitate animae* (L'estensione dell'anima) del 387, scritto a Ostia

² Vedi Davies, 1996

Come sottolineato da lui stesso in quest'ultima citazione, per Newton il tempo è essenzialmente matematico. Ed è proprio utilizzando questo "concetto" che Newton sviluppò una delle teorie per le quali è universalmente riconosciuto come uno dei più grandi pensatori di tutti i tempi:

Partendo dall'idea di un flusso universale del tempo, egli sviluppò la sua «teoria delle flussioni», una branca della matematica oggi meglio conosciuta con il nome di analisi infinitesimale. L'ansia dell'uomo moderno di ottenere una misurazione precisa del tempo può essere condotta alla concezione newtoniana del tempo come un flusso continuo rigidamente regolato da leggi matematiche. Dopo Newton il trascorrere del tempo diventò qualcosa di più del nostro semplice flusso di coscienza; esso cominciò infatti ad avere un ruolo fondamentale nella descrizione del mondo fisico, divenendo un'entità analizzabile con estrema precisione. Newton fece per il tempo quello che i geometri greci avevano fatto per lo spazio: lo nobilitò in una dimensione perfettamente misurabile. (Davies, 1996, trad. it. 22-23)

Per Newton non esiste che un tempo universale onnicomprensivo. Questo atteggiamento non è certo così scontato, come oggi potrebbe sembrarci. Per esempio Leibniz, contemporaneo di Newton, considerava il tempo semplicemente come l'ordine di successione dei fenomeni.

La possibile riconciliazione di queste concezioni diverse del tempo fu esaminata da Kant. Il filosofo tedesco era un aperto sostenitore della filosofia naturale di Newton, ma ne respinse la definizione di tempo. Per Kant, infatti, il tempo è semplicemente il modo in cui la mente umana percepisce il mondo e non è affatto una caratteristica specifica della realtà esterna.

L'affermazione di Kant sull'idealità trascendentale dello spazio e del tempo è esposta sia nei *Prolegomeni* sia nella *Critica della ragion pura*, dove l'esame di tale trascendentalità svolge un ruolo fondamentale. È noto che Kant cerca di argomentare che l'oggetto immediato della percezione trova la sua origine in parte negli oggetti esterni e in parte nell'apparato della nostra percezione. La prima componente è chiamata "sensazione," e la seconda "forma" del fenomeno. È questa seconda componente che mette ordine nella molteplicità delle nostre sensazioni; essa è un elemento a priori della nostra percezione ed è anteriore ad ogni esperienza. In quanto forma pura della sensibilità, Kant chiama questa componente "intuizione pura". L'esposizione metafisica di Kant tenta di dimostrare che spazio e tempo sono le condizioni della percezione sensibile. Le idee a priori di spazio e di tempo non sono immagini che corrispondano ad oggetti esterni. Nei *Prolegomeni* (1783) Kant afferma esplicitamente:

Ora spazio e tempo sono quelle intuizioni che la matematica pura pone a fondamento di tutte le sue conoscenze e giudizi che si presentano nello stesso tempo come apodittici e necessari[...]soprattutto la meccanica pura può formare i suoi concetti di movimento solo per mezzo della rappresentazione di tempo. Ma entrambe le rappresentazioni sono semplicemente intuizioni[...]semplici forme della nostra sensitività. (Kant, vedi trad. it. 1996, 67-69)

Nel XIX secolo prevalse l'idea moderna del tempo come avanzamento lineare, grazie anche agli argomenti dei biologi evolucionisti. Agli inizi del Novecento accadde però qualcosa di nuovo e rivoluzionario.

It[...]came as a shock when, in 1905, Albert Einstein pointed out an unsuspected difficulty in the prevailing idea of time and concluded that time depends on the observer in a way not previously imagined, even by Kant. (Whitrow, 1983, 752)

La teoria della relatività speciale di Einstein introduce nella fisica una nozione di tempo intrinsecamente flessibile, nel senso che essa ancorò saldamente l'esperienza del tempo alle condizioni di moto dell'osservatore individuale. Secondo la teoria della relatività speciale il tempo cambia con il movimento, è appunto relativo. A proposito della nascita di questa teoria, Einstein riconobbe più volte l'influenza che ebbe su di lui il pensiero del fisico e filosofo della scienza Ernst Mach. Secondo Mach lo spazio e il moto assoluti sono soltanto enti ideali, non conoscibili sperimentalmente. Per introdurre il principio d'inerzia non è necessario quindi ricorrere allo spazio assoluto, un concetto che, come quello di moto assoluto, è privo di significato e non utilizzabile per fini scientifici. Mach critica innanzi tutto l'interpretazione di quei fatti che secondo Newton dimostrerebbero l'esistenza dello spazio e del moto assoluto:

Consideriamo ora i fatti sui quali Newton ha creduto di fondare solidamente la distinzione tra moto assoluto e moto relativo. Se la Terra si muove con moto rotatorio assoluto attorno al suo asse, forze centrifughe si manifestano su di essa, il globo terrestre si appiattisce, il piano del pendolo di Foucault ruota, ecc. Tutti questi fenomeni scompaiono se la Terra è in quiete, e se i corpi celesti si muovono intorno ad essa di moto assoluto, in modo che si verifichi ugualmente una rotazione relativa. Rispondo che le cose stanno così solo se si accetta fin dall'inizio l'idea di uno spazio assoluto. Se invece si resta sul terreno dei fatti, non si conosce altro che spazi e moti relativi. (Mach, 1883, trad. it. 248-249)

Quando pensiamo al tempo abbiamo la sensazione di uno scorrere “inarrestabile”, che non può essere né ritardato né accelerato. Ebbene con la relatività speciale prima e quella generale poi divenne chiaro che non si dà un tempo universale! La durata di un evento si può espandere man mano che cresce la velocità relativa del sistema di riferimento in cui l'evento si svolge (molti anni per esempio sulla Terra “a riposo” possono corrispondere a poche settimane su un'astronave che viaggia a velocità paragonabili a quella della luce); anche la vicinanza di masse gravitazionali contribuisce a “determinare il tempo”(e se l'astronave di prima incontrasse un cunicolo spazio-temporale per alcuni sarebbe addirittura ipotizzabile percorrere il tempo all'inverso e ritrovarsi nel passato!).

Tanto per cominciare, il tempo di Einstein non è provvisto di una freccia: non conosce distinzione tra passato e futuro. Certamente esso non *scorre*, come il tempo di Shakespeare, di Joyce o, se è per questo, di Newton. E' facile concludere che si perde qualcosa di essenziale, che un'ulteriore qualità del tempo rimane esclusa dalle equazioni, o che addirittura esiste *più di un tipo* di tempo. (Davies, 1996, trad. it. 8)

Questi diversi passaggi, anche se qui brevemente riassunti, spiegano anche il fatto che l'unità di misura del tempo sia stata discussa solo relativamente di recente. Nel par. 2.6 ho già riassunto come si è arrivati alla attuale definizione del secondo. Ricordo con una bella citazione quale è la situazione al riguardo:

In un tetro laboratorio di Bonn giace un cilindro metallico a forma di sottomarino. Lungo circa tre metri, è comodamente adagiato in una struttura d'acciaio e circondato da quadranti, da fili e da tubi[...]Il dispositivo di Bonn costituisce, insieme a una rete di analoghe apparecchiature sparse per il mondo, l'«orologio standard». I singoli strumenti, di cui quello tedesco è attualmente il più preciso, sono orologi atomici al cesio. Per convincerli a mantenere un ritmo quasi perfetto, questi orologi sono continuamente controllati, confrontati, regolati e perfezionati mediante segnali radio provenienti da satelliti e da stazioni televisive. I dati vengono raccolti e poi analizzati nell'Ufficio internazionale dei pesi e delle misure di Sèvres, alla periferia di Parigi, e da qui diramati in un mondo ossessionato dal tempo[...]Mentre noi svolgiamo il nostro duro lavoro quotidiano, l'orologio atomico di Bonn tiene il tempo. E', per così dire, il custode del tempo terrestre. Il problema è che non sempre la Terra gli tiene perfettamente dietro. Ogni tanto i nostri orologi, tutti apparentemente collegati come un seguito di schiavi obbedienti al sistema principale che si trova in Francia, devono essere regolati di un secondo per adeguarsi alle variazioni della velocità di rotazione della Terra. L'ultimo di questi «secondi di scatto» è stato aggiunto il 30 giugno 1994. La rotazione del nostro pianeta, considerata per generazioni e generazioni sufficientemente precisa da poter essere degnamente utilizzata come orologio, non rappresenta più un cronometro affidabile. In un'epoca in cui la tecnica offre strumenti di grandissima precisione per la registrazione del tempo, la povera vecchia Terra non tiene il passo. Soltanto un misterioso orologio atomico, costruito dall'uomo, è in grado di diffondere i suoi importantissimi tic-tac con la precisione richiesta da naviganti, astronomi e piloti d'aereo. Il secondo non è più definito come la 86.400^a parte del giorno, bensì come 9.192.631.770 oscillazioni della radiazione emessa da un atomo di cesio.(ivi, 11-12)

Vorrei introdurre ancora alcune considerazioni critiche riguardo la misura dal tempo che almeno in parte si applicano al problema della misura in generale ¹.

Abbiamo già visto (par. 2.5 e par. 2.6) che come unità di misura temporale conviene assumere il *periodo* di un fenomeno ricorrente, e che la relativa scelta ha comportato un processo di "aggiustamenti" successivi, sulla base del confronto tra diversi fenomeni ricorrenti; tra questi, sembra che debba prevalere quello considerato in qualche modo *più regolare*.

¹ Malgrado la bibliografia su questo argomento sia davvero innumerevole, molte delle ultime considerazioni di questo paragrafo sono state riassunte da un utile e davvero istruttivo lavoro del 1989 (Giannoli, 1989; vedi anche Giannoli, Giaquinto, 1992)

Ma, come fa notare il filosofo della fisica Giovanni Iorio Giannoli, cosa significa appunto più regolare? Tutto quello che possiamo dire è che esistono fenomeni periodici tali che, se si assume la regolarità di uno di essi, allora anche gli altri esibiscono una certa regolarità.

Ma dato che abbiamo solo tali "strumenti" per misurare il tempo, se *tutti* i moti periodici fossero soggetti alle stesse fluttuazioni (ovvero se il tempo si "dilatasse" ovunque in maniera omogenea), non avremmo possibilità di accorgercene. Accertiamo inoltre, misurandolo per esempio con le oscillazioni di un atomo di cesio, che un giorno solare è diverso da un altro giorno: ma misurata in giorni solari, una oscillazione di cesio è diversa da un'altra! Assumiamo che le oscillazioni di cesio siano regolari nel tempo per *congruenza*, ovvero perché non avremmo modo di verificarlo, ovvero perché non disponiamo di teorie che ci spingano a pensare il contrario, ovvero perché assumendo tale regolarità come data *le leggi della fisica possono essere scritte in forma più semplice*[...]siamo spinti ad assumere come regolari - fino a prova contraria - i fenomeni che appaiono sincronizzati con la *classe più numerosa* di fenomeni ricorrenti. Si tratta di una questione di mera "economia", se si vuole[...]*Si tratta di una mera decisione*, atta a rendere la fisica meno difficile.(Giannoli, 1989, 91-92)(i corsivi sono miei).

Per presupporre quindi la costanza dell'unità temporale, che a sua volta ci permette di definire l'unità stessa, gli scienziati debbono aderire, di fatto, *tramite una decisione*, ad una convenzione. In generale la convenzionalità è evidente, anche se ad un livello che definirei più "formale" che "sostanziale", nella definizione di tutte le unità di misura "universali" sin dall'origine. Nel caso della più recente definizione del metro, dove bisogna fissare per convenzione il valore della velocità della luce (al di là poi della scala scelta), vi è però, come nel caso in questione, anche una componente più "sostanziale". A mio avviso questi fatti sono anche esemplificativi di come lo sviluppo della metodologia della misura (*e scegliere una unità di misura ne è il primo e fondamentale passo*) sia emblematico dello stesso processo epistemologico (come per primo affermò, come visto, Aristotele!). Alla base dello sviluppo del procedere scientifico c'è sempre un momento *in cui bisogna, per così dire, mettersi d'accordo*. Popper stesso nella sua opera più famosa chiarisce che anche il falsificare una teoria scientifica richiede, almeno per quanto riguarda le cosiddette asserzioni-base o singolari, un accordo fra gli scienziati (e non è, possiamo così dire, dato sperimentalmente):

Ora possiamo forse rispondere alla questione: come e perché accettiamo una teoria a preferenza di altre? La preferenza non è certo dovuta a nulla che somigli a una giustificazione sperimentale delle asserzioni che compongono la teoria; non è dovuta a una riduzione logica della teoria all'esperienza. Scegliamo la teoria che regge meglio il confronto con le altre teorie: quella che, per selezione naturale, si dimostra la più adatta a sopravvivere. Non soltanto tale teoria sarà l'unica che fino a quel momento avrà superato i controlli più severi: sarà anche l'unica che può essere controllata nel modo più rigoroso[...]*Da un punto di vista logico, il controllo di una teoria dipende da asserzioni-base la cui accettazione o il cui rifiuto dipendono, a loro volta, dalle nostre decisioni*.

Sono dunque queste *decisioni* a segnare il destino delle teorie[...]*Dunque la base empirica delle scienze oggettive non ha in sé nulla di "assoluto". La scienza non posa su un solido strato di roccia. L'ardita struttura delle sue teorie si eleva, per così dire, su una palude. E' come un edificio costruito su palafitte. Le palafitte vengono conficcate dall'alto, giù nella palude: ma non in una base naturale o "data"; e il fatto che desistiamo dai nostri tentativi di conficcare più a fondo le palafitte non significa che abbiamo trovato un terreno solido. Semplicemente, ci fermiamo quando siamo soddisfatti e riteniamo che almeno per il momento i sostegni siano abbastanza stabili da sorreggere la struttura.*(Popper, 1934, trad. it. 104-108)

E' utile credo, leggere come anche Cini introduce questo aspetto:

C'è a questo punto una prima distinzione da fare. Essa riguarda la differenza fra apprendimento individuale e apprendimento sociale. Nel primo caso, che si tratti di una cavia sottoposta a ricompense e punizioni in un labirinto sperimentale, oppure di un cacciatore che apprende a riconoscere le tracce lasciate dalle possibili prede, la verifica del successo o dell'insuccesso ad ogni tappa della costruzione del proprio modello di realtà è un atto che implica una valutazione dei risultati da parte del soggetto in rapporto alla propria esperienza passata e al soddisfacimento delle proprie finalità individuali.

Nel secondo invece occorre distinguere tra il momento, ancora individuale, dell'invenzione di uno schema interpretativo delle proprietà dell'oggetto da quello collettivo della valutazione dell'efficacia e della rilevanza di questa proposta rispetto al patrimonio conoscitivo socialmente condiviso, tramandato dalla memoria storica della comunità. Insomma la conoscenza deve essere riconosciuta come valida da un soggetto diverso, collettivo, che, a seconda dei casi può essere

l'intera comunità o un gruppo particolare socialmente investito dell'autorità di adempiere a questo compito. (Cini, 1994, 184)

Il *presupposto* della costanza - nel tempo - dell'unità temporale non è comunque sufficiente - da solo - a risolvere in maniera esauriente il "problema della misura".

Una tacita assunzione deve essere fatta, vale a dire l'ipotesi che il confronto avvenga nello stesso luogo fisico, oppure che non comporti problema il confronto effettuato in luoghi diversi. Per comprendere quanto la cosa sia delicata, converrà riferirsi ancora ad operazioni concrete, necessarie per effettuare il confronto:

Prima del 1925, i conducenti delle vetture postali regolavano ogni mattina l'orologio su quello delle stazioni ferroviarie e lo comunicavano poi ai vari sacrestani e ai postini che lo diffondevano a loro volta tra la popolazione. Il punto di riferimento era dunque negli orologi ferroviari, che dal 1880 erano mossi da dispositivi elettromeccanici e sincronizzati sull'intera rete nazionale. Dal 1925 circa, l'ora cominciò a essere diffusa per radio. Il fatto che prima di allora gli orologi dovessero essere "rimessi" ogni giorno sulla base delle notizie dei postini e dei sacrestani dimostra quanto sia fragile l'idea che, per garantire la sincronizzazione tra due luoghi lontani, basti regolare gli orologi nel primo luogo e spostarne uno fino al secondo. Presupporre che gli orologi siano ancora sincronizzati equivale ad ammettere quanto deve esser mostrato.

Le cose non migliorano se si ricorre a un segnale elettromagnetico, a un'onda radio. In questo caso per effettuare la sincronizzazione, sarebbe necessario conoscere quanto tempo impiega il segnale per raggiungere il secondo luogo, ma ciò richiederebbe a sua volta la possibilità di disporre preventivamente di due orologi sincronizzati - uno alla partenza e l'altro all'arrivo. (Giannoli, 1989, 92-93)

L'unica via d'uscita sarebbe quella di *postulare* l'isotropia dello spazio rispetto alla radiazione, sicché la velocità di un'onda elettromagnetica risulti uguale in tutte le direzioni. E' quanto in effetti si conviene. Ciò risolve un problema, ma ne apre, come chiarisce Giannoli, immediatamente un altro:

Nell'elettromagnetismo classico, l'onda luminosa era concepita come vibrazione d'un mezzo. Considerando l'etere isotropo, per ammettere che sulla Terra la velocità delle onde non dipendesse dalla direzione, bisognava supporre che la Terra fosse ferma nell'etere, ipotesi alquanto bizzarra, avanzata già da Cartesio. In alternativa, occorre supporre che la velocità della luce non dipendesse dalla velocità della sorgente luminosa rispetto all'etere. In questo secondo caso, l'etere poteva essere rimosso del tutto. E' proprio quanto postulò Einstein nel 1905, sulla base del requisito che le leggi fisiche dovessero avere la stessa espressione formale in tutti i sistemi inerziali. (ivi, 93-94)

Nella relatività speciale si postula che le leggi della fisica siano *formalmente invarianti* in tutti i sistemi inerziali, indipendentemente dalla loro velocità relativa. Ne consegue che la velocità della luce deve essere sganciata dal sistema di riferimento.

In questo quadro, la sincronizzazione tra orologi distanti, in quiete reciproca, non pone più alcun problema. Emerge però una questione ben più rilevante, relativa all'impossibilità di conservare la *simultaneità* tra sistemi in movimento reciproco: tutto ciò che dal *mio* punto di vista succede "adesso" nel mondo, non succede "adesso" dal punto di vista di un *altro* osservatore, che qualche istante fa era sincronizzato con me ed in moto uniforme rispetto a me:

In questo senso, parlare *del* presente, del *mio* presente, come di un istante assolutamente caratteristico e privilegiato, non appare più possibile dopo i lavori del 1905. (ivi, 94)

Era stato dato per scontato sia da coloro che seguivano le idee di Kant, sia da chi le contrastava – che esistesse un singolo ordine mondiale del tempo e che ogni istante di quest'ordine corrispondesse ad uno stato definito contemporaneo di tutto l'universo. Ciò, come osservò Einstein, e come ci ricorda Giannoli, era una mera presunzione. L'ordine nel quale gli eventi vengono percepiti non è sempre quello in cui si crede che siano successi. Un esempio semplice, si vede il lampo prima di sentire il tuono, ma entrambi sono manifestazioni dello stesso scarica elettrica nell'atmosfera.

E' questo uno dei risultati più importanti della teoria della relatività speciale.

La crisi dell'idea newtoniana di un unico tempo universale, crisi indotta dalla relatività ristretta, è però in definitiva ancora parziale. Ognuno può infatti ancora pensare che il tempo solidale con il proprio sistema di riferimento sia ovunque identico, nel cosmo.

Con la relatività generale, le cose cambiano ancora drasticamente. La durata temporale acquista un carattere decisamente *locale*, in relazione alla distribuzione della materia e dell'energia nell'universo. La "metrica" dello spazio-tempo viene a dipendere allora dalla localizzazione e dal moto delle masse. In particolare, vicino alle grandi masse la "durata" del tempo è maggiore, gli orologi camminano più lentamente:

Dal punto di vista operativo, si può intuire che le cose debbano in effetti cambiare, giacché il tempo non è misurabile altro che mediante fenomeni fisici periodici: è dunque impensabile che tali fenomeni (rivoluzioni astronomiche, caduta di gravi, movimenti meccanici, oscillazioni atomiche) non risentano degli effetti gravitazionali.

Con la relatività generale, la mia "ora" non sarà dunque l'"ora" di tutti i punti materiali in quiete rispetto a me. Un mio eventuale fratello gemello che viva nell'appartamento all'ultimo piano di un grattacielo, raggiungerebbe i cinquant'anni prima di me, se io abitassi al piano terra del medesimo stabile. (ivi, 95-96)

Negli anni che seguirono il lavoro di Einstein, gli scienziati hanno esplorato sempre più a fondo gli interrogativi relativi al tempo. *Tipi diversi di orologi possono misurare diversi tipi di tempo?* (Su questa questione si possono avanzare considerazioni analoghe a quelle per esempio presentate nel par.1.1 a proposito della lunghezza). Esiste una misura del *tempo naturale* per l'universo nel suo insieme?

Gli interrogativi ovviamente non si fermano al problema della misura. C'è stato un inizio del tempo e ci sarà una fine? Che cos'è che sembra imprimere al tempo una chiara direzionalità?

Gli interrogativi appena ricordati aspettano ancora una risposta soddisfacente.

L'avvento della meccanica quantistica apre, inoltre, nuovi ed inediti dubbi.

Una profonda analisi epistemologica di certi principi di questa meccanica sembra infatti suggerire che le concezioni tradizionali intorno allo spazio e al tempo non sono forse le strutture più idonee per la descrizione di processi microfisici (vedi anche par. 6.1). Così, il principio di indeterminazione di Heisenberg stabilisce che l'indeterminazione implicata nella misura della coordinata x di una particella e la indeterminazione implicata nella simultanea determinazione del momento p sono governate dalla relazione $\Delta x \times \Delta p \geq h$ (h è la costante di Planck). L'impossibilità di una localizzazione esatta e insieme una determinazione della quantità di moto può essere interpretata come un appello per una revisione critica dei concetti correnti di spazio e tempo.

Alcuni fisici si spingono ad affermare addirittura (anche se le congetture in questione non hanno ad oggi alcun sostegno empirico), sommando gli interrogativi posti dalla relatività e dalla meccanica quantistica, che nel futuro il tempo potrebbe essere eliminato dalle teorie fondamentali della fisica. Adottando un certo approccio alla "quantizzazione del campo gravitazionale" si arriverebbe in effetti a trovare una equazione che non dipende esplicitamente dal tempo e che descriverebbe le condizioni atemporalmente del cosmo. Ci si può chiedere allora davvero se – a livello fondamentale -- una teoria unitaria del mondo fisico non debba prevedere alcun parametro interpretabile alla stregua del tempo (sicché il tempo, per come lo conosciamo, sarebbe solo una proprietà "emergente", in casi del tutto particolari).

In effetti, la "questione del tempo" è appunto – come osserva Sellars¹ – "una vera e propria costellazione di problemi, costellazione che coinvolge praticamente l'intera conoscenza, e in particolare, il senso di nozioni come verità, identità, esistenza e livelli di realtà, cosa, evento, cambiamento, azione, casualità". Si deve inoltre sottolineare che una difficoltà non secondaria nell'analisi di questi temi è costituita, come abbiamo ampiamente visto, proprio dall'assunzione diretta di risultati della fisica entro il dibattito filosofico. E che

tuttavia nessuna teoria fisica può esprimere, da se, concezioni secondo cui il mondo oggettivo è di un certo tipo piuttosto che un altro. Sono sempre i filosofi che utilizzano le teorie scientifiche per sostenere le loro concezioni del

¹ Cit. in Pauri, 1997

mondo, oscurando talvolta la distinzione fra una teoria scientifica e le sue (inevitabili) interpretazioni filosofiche.(Pauri, 1997, 249)

Alla fine di questo paragrafo credo che davvero possiamo concordare che, alla domanda “che cos’è il tempo?”, la famosa risposta data da sant'Agostino, «*se nessuno me lo chiede, lo so; se dovessi spiegarlo a chi me lo chiede, non lo so*», non suona così inattuale.

4. SISTEMI DI UNITA' DI MISURA

Measurement demands some one-one relations between the numbers and magnitudes in question - a relation which may be direct or indirect, important or trivial, according to circumstances.

Bertrand Russell

Una determinata scelta di grandezze fondamentali e dei loro campioni costituisce un sistema di unità di misura ^{1 2}. Due sistemi possono perciò differire o per una diversa scelta delle grandezze fondamentali, o per una diversa definizione dei campioni, o per entrambe le ragioni.

La scelta delle unità di misura ³ delle grandezze fondamentali, come è stato detto, è arbitraria. Tuttavia la prima preoccupazione dei metrologi è quella di garantire la migliore esattezza possibile non soltanto al livello della definizione dell'unità, ma anche al livello della sua materializzazione sotto forma di campione e nelle operazioni di confronto che permettono di collegarsi a questo campione.

In pratica per assolvere alla loro funzione nel contesto contemporaneo le unità dovrebbero essere:

- pratiche, nel senso di non essere né eccessivamente grandi né eccessivamente piccole rispetto ai valori delle grandezze che più frequentemente si devono misurare; altrimenti si dovrebbe usare troppo spesso un loro multiplo o sottomultiplo, che, di fatto, verrebbe ad essere l'unità di misura;
- costanti nel tempo o nello spazio, affinché una misura riferita a loro possa conservare il suo significato;
- definite senza ambiguità ed in modo da essere disponibili in qualsiasi laboratorio opportunamente attrezzato.

Al termine della Seconda Guerra Mondiale, erano molti i sistemi di unità di misura che esistevano nel mondo. Alcuni erano delle varianti dei sistemi metrici, altri erano i sistemi tradizionali dei paesi anglofoni. Nel 1948, la nona Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure chiese al Comitato dei Pesi e delle Misure di condurre un'indagine internazionale allo scopo di individuare le esigenze specifiche di quanti operavano negli ambiti tecnico-scientifici e didattici. Sulla base dei dati ottenuti, la decima Conferenza Generale, nel 1954, stabilì che un sistema pratico sarebbe dovuto derivare da sei unità di base al fine di ottenere la misurazione delle radiazioni ottiche e di quelle della temperatura, oltre che delle quantità meccaniche ed elettromagnetiche. Le sei unità di base raccomandate erano il *metro*, il *chilogrammo*, il *secondo*, l'*ampere*, il *grado Kelvin* (poi chiamato semplicemente *kelvin*) e la *candela*.

La scelta delle grandezze fondamentali del *Sistema Internazionale di unità di misura* si è basata sullo stesso sviluppo dei concetti astratti e dei concetti scientifici ⁴. Il concetto di spazio, come detto, fu probabilmente il primo ad essere stato concepito dagli uomini, e del resto la geometria è basata sul concetto di *lunghezza*: è normale così che la *lunghezza* sia stata selezionata come prima grandezza fondamentale. L'astronomia ha accompagnato la nascita del concetto di *tempo* (o, almeno agli inizi, di *intervalli di tempo*). Nacque la cinematica, che studia il moto dei corpi indipendentemente dalle cause che lo generano. Quando si iniziò a studiare tali cause, si trovò che le due grandezze fondamentali non erano sufficienti per una completa descrizione dei fenomeni. Bisognava introdurre una terza grandezza. A seconda dell'adozione della massa o della forza

¹ Per approfondimenti di tipo generale dei temi di questo capitolo si possono vedere, oltre al più volte citato Fazio, 1995, anche Jackson, 1978 (in particolare l'appendice) e il datato ma storicamente utile Ferraro, 1965.

² Un sistema di unità di misura (*system of units of measurement*) è così definito nella Guida ISO: *set of base units, together with derived units, defined in accordance with given rules, for a given system of quantities*

³ Una unità di misura (*unit of measurement*) è così definita nella Guida: *particular quantity, defined and adopted by convention, with which other quantities of the same kind are compared in order to express their magnitudes relative to that quantity*

⁴ Vedi anche Fazio, 1995

nacquero due diversi sistemi. Il Sistema Internazionale ha assunto la *massa* come terza grandezza fondamentale. In questo sistema la forza è quindi una grandezza derivata, la cui dimensione è il prodotto d'una massa per una lunghezza, diviso per un tempo al quadrato. Questa scelta è stata effettuata principalmente (vedi però anche le considerazioni di fine paragrafo), per lo stesso motivo per cui furono scelte la lunghezza ed il tempo. La scelta di grandezze quali la lunghezza, il tempo e la massa va infatti oltre i già citati motivi storici:

The numerical measures of angle, length, time and weight or mass continued to be the quantities in terms of which almost all other quantities were measured, even the newly quantified properties of physics such as 'magnetic intensity' or fluid pressure. This was partly because of established tradition, partly because these quantities were easy to measure by direct comparison, and more fundamentally, perhaps, because they were properties possessed by all objects. (Roche, 1998, 52)

Quando iniziarono poi gli studi sulla termodinamica fu necessario introdurre una quarta grandezza fondamentale, la *temperatura*¹. L'analisi dei fenomeni elettromagnetici richiese infine la scelta di una quinta grandezza. Si pensò dapprima alla carica elettrica, poi alla resistenza elettrica, ma lo studio dell'elettromagnetismo moderno suggerì di adottare come grandezza fondamentale *l'intensità di corrente elettrica*. A questo punto il quadro delle grandezze fondamentali poteva dirsi completato: restava però la necessità di introdurre una grandezza fotometrica, per sopperire alla mancanza di un campione nel campo dell'ottica. Come sesta grandezza fondamentale venne così ufficializzata *l'intensità luminosa*. Nel 1983 il quadro delle grandezze fondamentali è stato aggiornato con l'adozione della *quantità di sostanza* come settima grandezza fondamentale, con unità la *mole*.

Il SI prevede quindi 7 grandezze fondamentali e ne definisce le unità di misura (le date in tabella sono quelle delle prime definizioni):

Grandezza	Unità di Misura	Simbolo
Intervallo di tempo	secondo	s (1832)
Lunghezza	metro	m (1795)
Massa	chilogrammo	kg (1795)
Temperatura	kelvin	K (1954)
Quantità di sostanza	mole	mol (1971)
Intensità di corrente	ampere	A (1881)
Intensità luminosa	candela	cd (1946)

Le grandezze fisiche necessarie alla descrizione dei fenomeni naturali sono molto numerose, cionondimeno esse possono essere tutte definite (*e quindi misurate*) in funzione di queste sette grandezze fondamentali.

Perhaps the reference quantities even defined to a large extent what could be quantified accurately and incorporated into the body of mathematical natural philosophy. Quantitative concepts which could not be accurately related to them directly, or indirectly, usually could not even be defined with acceptable rigour. Concepts such as impact, power, density, capacity for heat, the ability to conduct heat, illumination, loudness, magnetic intensity, electric charge, electric tension and electric capacitance had to wait, sometimes for centuries, before they could be related precisely to these basic measures and incorporated into exact quantitative science. (*Ibidem*)

Il SI (che è appunto un'evoluzione del sistema metrico decimale) è stato introdotto (par. 2.6) nel 1960 dalla XI Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure e perfezionato dalle Conferenze successive. Esso è oggetto di direttive della Comunità Europea fin dal 1971, è stato legalmente

¹ Per le definizioni attuali delle grandezze fisiche più comuni (generalmente accettate e riportate nei manuali scientifici) vedi Fazio, 1995

adottato in Italia nel 1982 ed è ora riconosciuto in tante differenti nazioni, tra le quali tutti i più importanti ed industrializzati paesi del mondo.

Il SI è:

completo: tutte le grandezze fisiche considerate si possono ricavare dalle grandezze fondamentali tramite relazioni analitiche;

coerente: le relazioni analitiche che definiscono le unità delle grandezze derivate non contengono fattori di proporzionalità diversi da 1;

decimale (tranne che per la misura degli intervalli di tempo): multipli e sottomultipli delle unità di misura sono potenze di 10.

L'intera struttura del Sistema Internazionale è intimamente connessa e *forma parte della descrizione matematica dei fenomeni fisici su cui si basa la scienza moderna*. Mentre la scienza continua ad evolvere, ci si aspetta che il Sistema Internazionale richiederà miglioramenti e modifiche al fine di soddisfare sempre nuove esigenze.

Storicamente il primo sistema metrico introdotto (vedi par. 2.5) è anche conosciuto come sistema *mks*.

Il *sistema mks* trae il proprio nome dalle iniziali delle tre unità di misura delle grandezze meccaniche fondamentali in esso adottate: il *metro* (m) per la lunghezza, il *chilogrammo* (kg) per la massa e il *secondo* (s) per gli intervalli di tempo: in questo sistema il metro (m) è la lunghezza a 0 °C del regolo campione depositato nel 1799 a Parigi; il chilogrammo è la massa del campione depositato a Parigi; il secondo è l'intervallo di tempo pari a $\frac{1}{86400}$ del giorno solare medio. Le

unità derivate hanno gli stessi nomi e simboli del sistema SI. Tale sistema è incompleto. Dato che esso non può descrivere tutte le grandezze, mancando l'unità di misura di una grandezza fondamentale elettrica o magnetica, ne sono state fatte successive estensioni introducendo una quarta unità: a seconda che la quarta grandezza fondamentale fosse la carica elettrica (unità di misura: *coulomb*, C), la resistenza elettrica (unità di misura: *ohm*, Ω) o l'intensità di corrente elettrica (unità di misura: *ampere*, A) vennero introdotti i tre sistemi mksC, mks Ω ed mksA. In pratica l'ultimo, completato con le tre unità di temperatura (*kelvin*, K), di intensità luminosa (*candela*, cd) e di quantità di sostanza (*mole*, mol), è quello che va appunto sotto il nome di Sistema Internazionale.

Prima di concludere le considerazioni introduttive di questo capitolo, credo sia opportuno (in particolare per le ragioni descritte al par. 2.5) riflettere brevemente sul concetto (o meglio i concetti) di massa.

L'origine della nozione moderna di massa si può far risalire alla concettualizzazione della *massa inerziale* avvenuta nel Seicento principalmente ad opera di Newton e di Keplero:

In genere si afferma che la nozione di 'massa', nel senso di massa inerziale, sia stata introdotta nella fisica da Isaac Newton[...]la nozione di massa inerziale rappresentò la conclusione di uno sviluppo graduale del concetto, iniziato con Keplero e concluso con Eulero. Pur essendo tale concetto senza dubbio un prodotto del Seicento, la sua origine remota può esser fatta risalire all'idea neoplatonica dell'inerzia e dell'inattività della materia, in contrasto con la vitalità e la spontaneità della mente. L'antica opposizione metafisica tra materia e spirito costituisce il prototipo dell'antitesi fisica tra massa e forza. Benché a prima vista la dinamica newtoniana sia riuscita a liberare questi concetti da ogni relazione metafisica, essa ha lasciato insolute alcune difficoltà concettuali.(Jammer, 1961, trad. it. 15)

Nei libri di fisica generale (come per esempio il citato manuale di Bernardini) si legge che in base al principio di inerzia sappiamo che un moto accelerato si può sempre attribuire ad una "causa". A questa causa si dà il nome di *forza*. In particolare diciamo che un corpo è soggetto ad una forza quando essendo inizialmente fermo a un certo momento comincia a muoversi. Il concetto fu in origine assunto in base ad analogie con la forza di volontà oppure lo sforzo muscolare, e venne solo successivamente proiettato sugli oggetti inanimati come un potere insito negli oggetti stessi:

Nella fase prescientifica l'idea di forza si è formata molto probabilmente attraverso la coscienza degli sforzi compiuti nelle nostre azioni volontarie, ad esempio nell'esperienza immediata di muovere braccia o gambe, oppure attraverso la sensazione di una resistenza da vincere nel sollevare da terra un oggetto pesante e nel trasportarlo da un posto a un altro. Termini come "forza," "vigore," "sforzo," "potenza" e "lavoro" erano certamente sinonimi, così come lo sono oggi nell'ambito del linguaggio comune. L'immissione della nostra esperienza personale entro l'ambiente esterno - immissione caratteristica dello stadio animistico della crescita intellettuale dell'umanità - condusse a un'ampia generalizzazione del concetto di forza: alberi, fiumi, nubi e rocce vennero dotati di forze e furono considerati centri di potenza. (Jammer, 1957, trad. it. 30)

In età moderna il concetto di forza assunse una posizione unica tra tutti i possibili concetti fondamentali delle scienze fisiche, in quanto come detto può venir considerato in diretta relazione col concetto di causa:

molti studiosi del problema, e tra questi, in particolare, gli aderenti alla scuola filosofica kantiana, ritengono che "forza" sia l'effettiva formulazione fisica della "causa" e della causalità. In base a questo punto di vista le scienze naturali mettono in relazione tutti i fenomeni della natura con certi substrati, di cui i fenomeni stessi vengono concepiti alla stregua di effetti. (ivi, 27)

E' facile comprendere che, a causa di questa posizione, il concetto di forza divenne obiettivo di attacchi da parte dei positivisti, secondo i quali l'eliminazione del concetto di forza dalla fisica avrebbe condotto all'emancipazione della scienza nel suo complesso dalla schiavitù della "causalità".

Come primo esempio di forza ci si può riferire alla forza *peso*: sappiamo infatti che qualsiasi corpo prossimo alla superficie terrestre tende a cadere seguendo la verticale. Sappiamo inoltre che per uno stesso corpo il rapporto tra la forza f e l'accelerazione a è costante: $f/a = m$, dove m è sempre lo stesso numero (in effetti la forza e l'accelerazione sono due vettori, ma per le nostre considerazioni non serve complicare il formalismo e ne indico in formula solo il modulo). Questa costante è definita appunto *massa inerziale*: per ogni corpo, ed è qui potremmo dire che emerge il suo significato, *m ha un valore specifico*. La massa inerziale può essere quindi definita come la misura dell'inerzia di un corpo, dove per inerzia si intenda la proprietà di un corpo che causa la sua resistenza ai cambiamenti del suo stato di moto.

La forza peso è una forza molto singolare: a qualsiasi corpo il peso imprime una accelerazione che non dipende dal corpo. In un determinato luogo (altitudine, latitudine), l'accelerazione cui è soggetto un corpo che cade (g) è sempre la stessa, qualunque sia il corpo in considerazione (a livello del mare, in Italia, g è circa di 9,806 metri al secondo ogni secondo). Una conseguenza fondamentale della costanza di g è che, in ogni luogo, *il peso di un corpo è proporzionale alla sua massa inerziale*. Infatti, poiché vale la relazione $f/a = m$, anche per il peso p del corpo si può scrivere $p/g = m$, cioè $p = mg$. Quanto detto ha una conseguenza di importanza pratica fondamentale: *il confronto di due pesi equivale al confronto delle corrispondenti masse inerziali*.

Secondo la legge di Newton sulla gravitazione universale, due corpi si attirano tra loro in maniera direttamente proporzionale alle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Nel caso della forza di gravità uno dei corpi è la Terra, e quindi una delle masse è sempre la stessa. Ne segue che la forza risulta proporzionale alla massa dell'altro corpo; cioè, come detto, la forza peso è rigorosamente proporzionale alla massa. In altre parole, per la legge di Newton, in un dato luogo (ciò significa che l'azione di attrazione della Terra è la medesima) il valore di g deve essere indipendente dal valore della massa e dalla composizione chimica del corpo esaminato. Si deve però osservare che la proprietà che ha la massa come agente fisico della gravitazione è, *a priori, del tutto indipendente* dalla definizione data quale rapporto tra forza e accelerazione. La legge di Newton è solo la constatazione sperimentale, *a posteriori*, di una proprietà delle masse inerziali. Come *agente gravitazionale* la massa è dunque un attributo di un dato corpo come potrebbe esserlo una carica elettrica, un suo momento magnetico ecc...; e questo attributo non ha, *a priori*, nessuna relazione con il rapporto di cui sopra. A questo *quid* proprio dei corpi materiali è dato appunto il nome di *massa gravitazionale*. La massa gravitazionale quindi può essere definita come la misura

dell'attrazione gravitazionale che un corpo esercita verso altri corpi. *Dal fatto che g è costante scaturisce poi anche la proporzionalità fra massa inerziale e massa gravitazionale.* Si stabilisce quindi di misurare le masse gravitazionali prendendo come massa gravitazionale unitaria quella che compete all'unità di massa inerziale. Ne seguirà che, per ogni corpo, *il valore della massa inerziale coinciderà con quello della massa gravitazionale.* E' allora chiaro che l'equivalenza (che non significa identità; una cosa, vedi par. 1.2, è l'ammettere che i termini teorici devono essere interpretati in modo tale da poter essere applicati operativamente, ma tutt'altra cosa è il sostenere che una tale interpretazione esaurisce il significato del termine teorico in questione) dei due tipi di masse è un fatto *a posteriori*, che si riduce in verità a constatare che g è costante per i corpi materiali e a scegliere per le masse gravitazionali una conveniente unità di misura.

I concetti di massa inerziale e gravitazionale così introdotti da Newton, come proprietà della materia, erano certo in contrapposizione con l'"estensione" cartesiana:

Newton[...]concepisce la "massa" come l'attributo più essenziale della materia; in tal modo si oppone diametralmente a Descartes che identificò la materia con l'estensione e considerò l'estensione come la maggiore caratteristica della materia. Il concetto newtoniano di "massa puntiforme," ancora usato nei moderni manuali, indica la frattura che separa il concetto di massa di Newton dal concetto di estensione spaziale di Descartes. Stabilire a priori a quale delle due, la massa o l'estensione, dovesse essere data la priorità fu, forse, una questione di predilezione o di preferenza in quanto ogni corpo reale le ha entrambe ed è inconcepibile senza l'una e l'altra. L'astrazione di Newton si dimostrò la più fruttuosa.(Jammer, 1954, trad. it. 88)

Nell'approssimazione in cui è valida la meccanica classica, la massa è da considerarsi costante ed è molto più conveniente assumerla come unità primitiva che non il peso, che come visto varia da luogo a luogo.

Con la relatività speciale la massa assume una nuova definizione: ora la massa di un corpo è *la sua energia a riposo* ed è uguale in tutti i sistemi di riferimento ¹. Come ci ricorda Jammer citando il fisico Herbert Jackson dunque una difficoltà insita nel concetto di massa risiede nelle sue capacità trasformistiche:

"La massa può venire paragonata a un attore che appare sulla scena sotto varie spoglie, ma non mai nel suo vero aspetto. La massa è in effetti, come Dio, una e trina. Essa può presentarsi come carica gravitazionale, come inerzia o come energia, ma non appare mai ai nostri sensi nella sua identità libera e spoglia."(Jackson, cit. in Jammer, 1961, trad. it. 12)

Nella relatività generale l'equivalenza fra massa inerziale e massa gravitazionale fu elevata da Einstein a rango di principio, ed anzi si potrebbe addirittura affermare che proprio questa analogia condusse Einstein alla formulazione della teoria stessa. Egli ricorda:

La teoria generale della relatività deve la sua origine al tentativo di spiegare un fatto noto già ai tempi di Galilei e Newton, ma fino ad allora sfuggito a tutte le interpretazioni teoriche: l'inerzia e il peso di un corpo, due cose di per sé stesse distinte, sono misurati da una stessa costante, la massa. Da questa corrispondenza segue che è impossibile scoprire mediante un esperimento se un sistema è accelerato o se il suo moto è rettilineo e uniforme e gli effetti osservati sono dovuti a un campo gravitazionale (principio di equivalenza della teoria della relatività generale). Il concetto di sistema inerziale viene così distrutto non appena interviene la gravitazione. Si può osservare, a questo punto, che il sistema inerziale costituisce un punto debole della meccanica galileiana e newtoniana. Infatti in essa si presuppone una proprietà misteriosa dello spazio fisico, che condiziona i tipi di sistemi di coordinate per i quali il principio d'inerzia e la legge newtoniana del moto sono valide.(Einstein, 1940, trad. it. 571)

Inserendo il campo di forza gravitazionale nella struttura spazio-temporale, diventa postulabile, come conseguenza del principio di covarianza, l'equivalenza o proporzionalità fra la massa inerziale e quella gravitazionale, che nella fisica newtoniana era una caratteristica empirica e puramente accidentale.

¹ Per quanto riguarda questo risultato, e per i prossimi di questo paragrafo citati in relatività generale e meccanica quantistica, e per un approfondimento delle considerazioni riportate si può vedere per esempio l'esauriente trattazione fatta in Boniolo, Dorato, 1997

E comunque, anche qui, una volta introdotta l'idea che una accelerazione rispetto ad un sistema inerziale possa essere interpretata come la produzione di un "campo inerziale":

l'equivalenza fra il campo inerziale e il campo gravitazionale è quantitativa, ovvero numerica, e locale. Affermare che i due campi sono equivalenti non significa affatto sostenere che sono la stessa cosa. (Boniolo, Dorato, 1997, 106)

Un ulteriore problema deriva (analogamente al caso del tempo e dello spazio) dalla meccanica quantistica. Nella meccanica quantistica è ancora in parte oscuro lo *status* del concetto di massa, la cui chiarificazione è uno degli obiettivi principali delle cosiddette teorie dei campi unitarie rispetto alla massa. In questo caso la massa è rappresentata in termini di quantità di moto, onde e costante di Planck. Mentre il termine è generalmente usato in senso newtoniano, ciò non è affatto consistente perché è impossibile derivare le equazioni fondamentali della teoria quantistica dalla meccanica classica. La massa appare così come un parametro estraneo nella formulazione di problemi quantistici trattati mediante operatori e funzioni di stato. La questione se la massa stessa non sia un'osservabile e se di conseguenza non debba essere rappresentata da un operatore come tutte le altre osservabili, viene in genere trascurata ¹. Cionondimeno questo uso "classico" continua, a ulteriore dimostrazione che una definizione "logicamente non ambigua" di un concetto di massa ancora non esiste.

Nel corso dello scorso secolo la fisica ha certo compiuto grandi progressi, ma nonostante i risultati i concetti chiave che sono alla base di tutta la struttura sembrano sfidare tutti i nostri sforzi di comprensione.

Pur essendo di primaria importanza in tutti i rami della fisica e pur essendo altresì uno strumento concettuale indispensabile al pensiero scientifico, il concetto di massa sembra eludere tutti i tentativi di una chiarificazione completa e di una definizione logicamente e scientificamente inattaccabile. In tutta la lunga storia di questo concetto, dai primi accenni nella filosofia neoplatonica, dalla sua espressione mistica e ancora inarticolata nella teologia, alla sua manifestazione scientifica nella fisica di Keplero e di Newton, alle sue accurate ridefinizioni nelle formulazioni positivistiche e assiomatiche, fino alle modifiche di vasta portata introdotte dalle moderne teorie della fisica, mai la scienza ha dato l'impressione di padroneggiare pienamente l'intero intrico concettuale connesso a questa nozione. Si deve ammettere che, nonostante gli sforzi concertati di fisici e di filosofi, di matematici e di logici, una chiarificazione definitiva del concetto di massa non è ancora stata raggiunta. Il fisico moderno può giustamente essere orgoglioso dei suoi spettacolari successi nella scienza e nella tecnologia; deve tuttavia tener sempre presente che le fondamenta del suo imponente edificio, le nozioni basilari della sua disciplina, come il concetto di massa, sono avvolte da un groviglio di dubbi e di difficoltà ancora irrisolti. (Jammer, 1961, trad. it. 227-228)

Tutte queste considerazioni sono indicative del fatto che le riflessioni sui concetti possono condurre a risultati pratici fondamentali ed allo stesso tempo contribuire alla generazione di nuove teorie (par.1.2).

4.1 Enti normativi

Le ricerche sul continuo aggiornamento del SI sono affidate all'Ufficio Internazionale dei Pesì e Misure con sede a Sèvres, presso Parigi.

Il BIPM è controllato dalla Conferenza Generale dei Pesì e Misure, le cui strategie sono a loro volta guidate (tramite l'emissione di norme e raccomandazioni) dall'ISO, e si riunisce di regola ogni 4 anni in quanto "*The SI is not static but evolves to match the world's increasingly demanding requirements for measurement*" ². Le decisioni della CGPM vengono rese operative dal Comitato Internazionale dei Pesì e Misure (CIPM), che è convocato annualmente.

In Italia la divulgazione e il controllo dell'applicazione del SI sono state a lungo affidate all'Ente Nazionale per l'Unificazione (UNI), ed i campioni nazionali delle unità di misura realizzati presso

¹ Vedi per dettagli Jammer, 1974

² Sito internet del BIPM

l'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferrarsi (tempo, frequenza, grandezze elettriche, fotometriche, optometriche, acustiche), l'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti (meccanica e termologia) e l'Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (radiazioni ionizzanti).

Il 16 gennaio 2004 il Consiglio dei ministri ha approvato però in via definitiva, dopo il parere delle Commissioni parlamentari competenti e su proposta del ministro dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca Letizia Moratti, la creazione dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, che comporterà tra l'altro la fusione degli Istituti Ferrarsi e Colonnetti. Questa azione, unanimemente auspicata da molti anni, allinea il nostro Paese con gli altri Paesi industrializzati, in cui la ricerca di base sulla metrologia contribuisce allo sviluppo continuo di riferimenti sempre più avanzati per le unità di misura in tutti i campi di interesse scientifico e tecnologico, e dovrebbe permettere quindi di rafforzare e rilanciare la ricerca in generale e fornire una base per il successivo trasferimento, attraverso collegamenti con gli enti applicativi, dei suoi risultati all'ambiente industriale ¹. Compito primario del nuovo ente sarà infatti, secondo un comunicato stampa del ministero che è stato divulgato subito dopo l'approvazione del decreto legislativo, quello di garantire "la disponibilità dei metodi più sofisticati di confronto nel sistema di misure internazionale, che è la base per una forte competitività nel sistema industriale". A questo specifico fine il nuovo Istituto fornirà supporto al Ministero delle Attività Produttive e alla rete degli uffici metrologici delle Camere di Commercio, sulla base di apposite convenzioni.

In ambito CEE sin dal 1993 (anno dell'unificazione europea) tutte le comunicazioni scientifiche, commerciali e industriali fra i vari paesi membri devono far uso del SI.

4.2 Definizioni delle unità di misura

Concepire i rapporti significa concepire limiti, invarianti che dominano variazioni, un'obbedienza.

Simone Weil

Perchè ci sia uniformità in una nazione, la misurazione di una quantità ignota comporta sempre il confronto, il rapporto, di quella quantità con una nota che viene accuratamente conservata in un luogo specifico - e in genere lontano - in quella stessa nazione ². Nella pratica, tale processo prevede la seguente procedura:

1. una quantità ignota viene misurata confrontandola direttamente con un dispositivo noto (per esempio una barra della lunghezza di un metro) o utilizzando uno strumento (per esempio una bilancia).
2. Il dispositivo o strumento di misura è stato costruito in fabbrica in conformità con i modelli di riferimento della misurazione.
3. I modelli di riferimento per la produzione sono tarati di volta in volta mediante un confronto con gli standard di riferimento. Tale operazione avviene in un laboratorio preposto alla taratura stessa.
4. I modelli di riferimento della misurazione di un laboratorio industriale di taratura vengono essi stessi tarati di volta in volta. In molti casi sono inviati direttamente all'organismo nazionale

¹ Al punto 1 del secondo articolo ("Finalità dell'ente") del decreto legislativo del 16 gennaio 2004 si può in particolare leggere:

L'I.N.R.I.M. è ente pubblico nazionale con il compito di svolgere e promuovere attività di ricerca scientifica nei campi della metrologia. L'I.N.R.I.M. svolge le funzioni di istituto metrologico[...].valorizza, diffonde e trasferisce le conoscenze acquisite nella scienza delle misure e nella ricerca sui materiali, allo scopo di favorire lo sviluppo del sistema Italia nelle sue varie componenti

² Una parte delle informazioni riportate nelle tabelle di questo paragrafo e dei successivi di questo capitolo sono state tratte dalla Guida all'impiego del SI (*The International System of Units*, con versione ufficiale francese e traduzione inglese) emessa nel 1998 dal BIPM, dal sito Internet <http://www.science.unitn.it/~labdid/sisint/si.html> gestito dal prof. Paolo Fornasini, e dal libro citato di Fazio. Per ulteriori approfondimenti si può anche vedere Nelson, 1981 ed il sito del NIST <http://physics.nist.gov/cuu/Units/index.html>

preposto alla standardizzazione per un confronto con gli altri standard di riferimento nazionali. In altri casi sono tarati da laboratori di metrologia di stato o dipendenti dalle amministrazioni locali. In tal modo, l'atto pratico della misurazione di quantità ignote comporta un confronto graduale con diversi modelli di riferimento di misurazione intermedi, che riconducono agli standard di riferimento nazionali.

Gli standard ¹ di riferimento nazionali per la realizzazione delle unità di misura di un intero paese devono essere adeguati ai più alti livelli di precisione necessari in quel paese, devono rimanere stabili nel tempo e permettere un confronto con gli standard degli altri paesi.

Gli standard di riferimento nazionali per la realizzazione delle unità di misura sono in genere conservati in condizioni ideali e sotto una rigida supervisione; non sono usati frequentemente o per attività di routine, pertanto le loro caratteristiche di precisione e la loro stabilità sono ritenuti più importanti della loro robustezza e della loro resistenza nel tempo in caso di uso frequente o in condizioni ambientali sfavorevoli.

D'altro canto, i modelli di riferimento preposti all'uso a livelli intermedi del sistema di misura nelle fabbriche devono avere delle caratteristiche adatte a tali applicazioni.

Riassumendo possiamo dire che i requisiti che deve presentare un buon campione sono: *precisione, accessibilità, riproducibilità e invariabilità*:

Un campione ideale dovrebbe essere innanzi tutto estremamente preciso in modo da poter costituire un riferimento perfetto per ogni sperimentatore che ad esso volesse eventualmente ricorrere per controllare la taratura dei propri strumenti di laboratorio o l'esattezza delle unità di cui fa uso; deve essere facilmente disponibile per chiunque intenda accedervi per seri motivi scientifici; deve essere riproducibile qualora dovesse andare accidentalmente distrutto, quindi devono esserne precisati nei minimi particolari i criteri costruttivi, e, infine, deve mantenere costante il proprio valore senza risentire minimamente dell'azione di fattori esterni quali la temperatura, la pressione, l'umidità o di reagenti chimici ossidanti o corrosivi. Il secondo e il quarto requisito sono spesso inconciliabili tra loro, poiché, se un campione deve essere tenuto in particolari condizioni di controllo e di conservazione, viene automaticamente a mancare l'accessibilità: in genere si deve trovare un conveniente compromesso tra i due. (Fazio, 1995, 11)

Gli standard primari sono ovviamente costruiti sulla base delle definizioni delle unità di misura.

L'unità di massa, il chilogrammo, è l'unica unità di misura moderna che non è definita sulla base di fenomeni fisici naturali o di proprietà di materiali. Il chilogrammo viene definito in base ad un artefatto conservato a Parigi ²: tale campione è custodito in una tripla teca sotto vuoto per impedire variazioni di massa dovute a eventuali reazioni chimiche con agenti atmosferici.

Tutti gli standard nazionali per il chilogrammo si rifanno a questo artefatto. La ventunesima CGPM (ottobre 1999) ha approvato una risoluzione che invita tutti i laboratori degli standard di riferimento nazionali a intensificare la ricerca *“to link the fundamental unit of mass to fundamental or atomic constants with a view to a future redefinition of the kilogram”*.

Dell'attuale chilogrammo sono in discussione tanto il nome - essendo quanto meno discutibile, anche se giustificata da motivi storici, la scelta di un nome che contiene per un'unità fondamentale il nome di un prefisso - quanto il campione, che risulta uno dei meno precisi essendo nella sua definizione operativa presenti espliciti riferimenti ad altri campioni, quello di lunghezza per realizzare il decimetro cubo e quello di temperatura per misurare la temperatura alla quale è massima la densità dell'acqua[...].le ultime verifiche delle copie ufficiali del BIPM e dei più di 40 prototipi nazionali

¹ La Guida ISO, per i principali tipi di standard, propone le seguenti definizioni:

Standard: *material measure, measuring instrument, reference material or measuring system intended to define, realize, conserve or riproduce a unit or one or more values of a quantity to serve as a reference;*

Primary standard: *standard that is designed or widely acknowledged as having the highest metrological qualities and whose value is accepted without reference to other standards of the same quantity;*

Secondary standard: *standard whose value is assigned by comparison with a primary standard of the same quantity;*

International measurement standard: *standard recognized by an international agreement to serve internationally, as the basis for assigning values to other standards of the quantity concerned;*

National measurement standard: *standard recognized by a national decision to serve, in a country, as the basis for assigning values to other standards of the quantity concerned*

² Talvolta chiamato affettuosamente “l'Grand K”

hanno fatto mettere in discussione la stabilità del prototipo internazionale a causa delle derive a lungo termine osservate. E' in avanzata fase di studio un progetto che prevede di collegare il chilogrammo al numero di Avogadro mediante esperimenti basati sulla purezza chimica e sulla stabilità meccanica di cristalli di silicio. In tal modo il chilogrammo potrebbe essere definito come il numero di atomi contenuti in un monocristallo di silicio; ciò richiede la precisa conoscenza della massa del silicio rispetto a quella del carbonio, già misurata con una precisione dell'ordine di 10^{-8} .(ivi, 66)

Oltre all'idea di collegare il chilogrammo al numero di Avogadro, ultimamente sta riscuotendo molta attenzione l'adozione di una definizione che fissa il valore della costante di Planck h ¹. Utilizzando le relazioni $E = mc^2$ e $E = hv$, possiamo infatti introdurre la seguente equivalenza:

$$h = \frac{(1\text{kg})(299792458\text{ms}^{-1})^2}{135639274 \cdot 10^{42}\text{Hz}} = 6.6260689\dots \cdot 10^{-34}\text{ Js}$$

dove è stato utilizzato il valore esatto di c . Fissando h , il chilogrammo potrebbe essere definito come segue:

Il chilogrammo è la massa di un corpo (a riposo) la cui energia è equivalente ad un insieme di fotoni le cui frequenze totalizzano $135639274 \cdot 10^{42}$ Hz.

Di seguito sono riportate le *definizioni delle unità di misura delle grandezze fondamentali* del SI. Per ogni unità di misura viene indicata la Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure che l'ha introdotta.

Intervallo di tempo

Il **secondo** è la durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione emessa dall'atomo di Cesio 133 nella transizione tra i due livelli iperfini ($F=4, M=0$) e ($F=3, M=0$) dello stato fondamentale $^2S(1/2)$ (13^a CGPM, 1967).

Lo stato fondamentale è lo stato in cui un atomo ha la configurazione elettronica di minima energia. La suddivisione dello stato fondamentale in livelli iperfini è dovuta all'interazione degli elettroni con il momento magnetico del nucleo; la differenza in energia ΔE tra i livelli iperfini è molto piccola rispetto alla differenza in energia tra i livelli principali dell'atomo.

Durante la transizione tra due livelli di energia l'atomo emette onde elettromagnetiche di frequenza $\nu = \Delta E/h$, corrispondente ad una lunghezza d'onda $\lambda = c/\nu$ e un periodo $T = 1/\nu$; h è la costante di Planck e c è la velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto.

La radiazione emessa dal ^{133}Cs durante la transizione in questione ha frequenza $\nu = 10^{10}$ Hz e lunghezza d'onda $\lambda = 3$ cm (cade quindi nella regione delle microonde).

Il secondo è pertanto definito come un multiplo intero dei periodo $T = 1/\nu$ della radiazione emessa dal cesio. Il campione primario del secondo è costituito da un *orologio al cesio*.

Lunghezza

Il **metro** è la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di $1/299\,792\,458$ di secondo (17^a CGPM, 1983).

¹ Vedi per esempio Kramer, Sassetti, 2001

La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto (velocità della luce) è una costante fondamentale della fisica. Con la definizione del metro introdotta nel 1983, il suo valore è assunto come esatto (cioè privo di incertezza) e immodificabile: $c=299\,792\,458$ m/s (vedi su questo le considerazioni al par 4.8).

Per la realizzazione pratica dei campioni di metro, è raccomandato in particolare l'uso della radiazione monocromatica emessa da un laser ad elio-neon nella regione del rosso visibile (lunghezza d'onda $\lambda=633$ nm).

Massa

Il **chilogrammo** è la massa del prototipo internazionale conservato al Pavillon de Breteuil (Sevres, Francia) (3^a CGPM, 1901).

E' l'unica unità fondamentale del SI basata su un campione artificiale. Si tratta di un cilindro di platino-iridio di 38 mm di diametro e di altezza, custodito in una tripla teca sotto vuoto insieme ad altre 6 copie di riscontro.

La precisione relativa dei campioni è dell'ordine di 10^{-9} .

E' allo studio la possibilità di introdurre un campione naturale di massa basato su proprietà atomiche.

Il termine proviene dall'associazione kilo + grammo = 1000 grammi.

Il termine *grammo* (francese *gramme*) fu introdotto con il significato attuale dalla riforma metrica francese di fine 700. Deriva dal tardo latino *gramma* = 1/24 di oncia.

Temperatura

Il **kelvin**¹ è la frazione $1/273.16$ della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua (13^a CGPM, 1967).

Per punto triplo di una sostanza si intende lo stato termodinamico in cui sono in equilibrio le tre fasi liquida, solida e gassosa. Il punto triplo dell'acqua si verifica ad una pressione di 610 Pa e (per definizione) ad una temperatura di 273.16 K, pari a 0,01 °C. La precisione della determinazione della temperatura del punto triplo dell'acqua è di circa 1×10^{-6} .

La temperatura termodinamica assoluta è definita in relazione al rendimento di un ciclo termodinamico ideale, il ciclo di Carnot; la sua misurazione è ricondotta alla misurazione di un rapporto tra quantità di calore, o più in generale di un rapporto tra due valori di un'altra grandezza direttamente misurabile.

Dal nome del fisico inglese William Thomson, lord Kelvin (Belfast 1824 - Netherhall 1907), professore di Fisica all'Università di Glasgow, presidente della Royal Society, che ha dato contributi fondamentali alla ricerca nel campo della termodinamica.

Quantità di sostanza

La **mole** è la quantità di sostanza che contiene tante entità elementari quanti sono gli atomi in 0.012 kg di Carbonio 12. Quando si usa la mole, deve essere specificata la natura delle entità elementari, che possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni, altre particelle o gruppi specificati di tali particelle (17^a CGPM, 1983).

Il ¹²C è l'isotopo più abbondante del carbonio: il nucleo atomico è composto da 6 protoni e 6 neutroni.

¹ Originariamente denominato **grado Kelvin**

Il numero di entità elementari che costituiscono 1 mole è detto Numero di Avogadro; il suo valore approssimato è $N_A = 6.022 \times 10^{23}$.

Intensità di corrente elettrica

La **ampere** è la corrente che, se mantenuta in due conduttori paralleli indefinitamente lunghi e di sezione trascurabile posti a distanza di un metro nel vuoto, determina tra questi due conduttori una forza uguale a 2×10^{-7} newton per metro di lunghezza (9^a CGPM, 1948).

L'ampere è definita con riferimento alla legge che dà la forza di interazione F tra due conduttori paralleli di lunghezza s posti a distanza d e percorsi rispettivamente dalle correnti I_1 e I_2 :

$$F = 2 k_m I_1 I_2 s / d$$

imponendo alla costante k_m il valore numerico 10^{-7} .

In genere k_m viene espresso in funzione della permeabilità magnetica del vuoto μ_0 . $k_m = \mu_0 / 4\pi$.

Secondo la definizione SI, l'ampere può essere realizzato mediante un elettrodinamometro, cioè uno strumento che misura la forza tra due conduttori percorsi da corrente. Nella pratica si preferisce far ricorso alla legge di Ohm $I = V/R$ e realizzare l'unità di corrente (ampere) come rapporto tra le unità di differenza di potenziale (volt) e di resistenza (ohm).

I campioni dei volt e dell'ohm sono oggi realizzati ricorrendo a due fenomeni quantistici, rispettivamente l'effetto Josephson e l'effetto Hall quantistico.

Dal nome del fisico e matematico francese André-Marie Ampère (Lione 1775 - Marsiglia 1836). Professore di matematica all'Ecole Polytechnique e di fisica al Collège de France ha dato un contributo fondamentale alla comprensione e sistemazione teorica dell'elettrodinamica.

Intensità luminosa

La **candela** è l'intensità luminosa, in un'assegnata direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza 540×10^{12} Hz e la cui intensità energetica in tale direzione è $1/683$ W/sr (16^a GCPM, 1979).

4.3 SI. Grandezze derivate

Le unità di misura delle grandezze derivate si ottengono mediante semplici operazioni aritmetiche a partire dalle unità di misura delle grandezze fondamentali. Non esistono fattori di conversione

diversi da uno (il SI è, come visto, coerente) ¹. Nelle tabelle seguenti sono comunque riportate le grandezze derivate con *unità di misura dotate di nome proprio*:

Angoli

Grandezza	Unità	Simbolo
Angolo Piano	radiante	rad
Angolo solido	steradiane	sr

L'XI CGPM (1960) aveva creato per l'angolo piano e l'angolo solido una classe separata di grandezze, le *grandezze supplementari*. La XX CGPM (1995) ha soppresso la classe delle *grandezze supplementari*, inserendo l'angolo piano e l'angolo solido nella classe delle grandezze derivate. Il **radiante** è l'angolo piano che sottende, su una circonferenza centrata nel suo vertice, un arco di lunghezza uguale al raggio. Lo **steradiane** è l'angolo solido che sottende, su una sfera centrata nel suo vertice, una calotta sferica di area uguale al quadrato del raggio.

Grandezze definite in meccanica

Grandezza	Unità	Simbolo	Conversione
Frequenza	hertz	Hz	1 Hz = 1s ⁻¹
Forza	newton	N	1 N = 1kgms ⁻²
Pressione	pascal	Pa	1 Pa = 1Nm ⁻²
Lavoro, energia	joule	J	1 J = 1Nm
Potenza	watt	W	1 W = 1Js ⁻¹

Grandezze definite in termodinamica

Grandezza	Unità	Simbolo	Conversione
Temperatura Celsius	grado celsius	°C	T(°C) = (TK)-273.15

Grandezze definite in elettromagnetismo

Grandezza	Unità	Simbolo	Conversione
Carica elettrica	coulomb	C	1C = 1As
Differenza di potenziale elettrico	volt	V	1V = 1WA ⁻¹
Capacità elettrica	farad	F	1F = 1CV ⁻¹
Resistenza elettrica	ohm	Ω	1Ω = 1VA ⁻¹
Conduttanza elettrica	siemens	S	1S = 1Ω ⁻¹
Flusso d'induzione magnetic	weber	Wb	1Wb = 1Vs
Induzione magnetica	tesla	T	1T = 1Wb m ⁻²
Induttanza	henry	H	1H = 1Wb A ⁻¹

Grandezze definite in fotometria

¹ Un elenco esaustivo di grandezze derivate nel SI e delle loro unità di misura può essere consultato nel libro di Fazio, dove il lettore interessato può anche trovare informazioni sulle realizzazioni dei campioni, ed in particolare di quelli nazionali

Grandezza	Unità	Simbolo	Conversione
Flusso luminoso	lumen	lm	1 lm = 1 cd sr
Illuminamento	lux	lx	1 lx = 1 lm m ⁻²

Grandezze definite in dosimetria

Grandezza	Unità	Simbolo	Conversione
Attività (di un radionuclide)	becquerel	Bq	1 Bq = 1 s ⁻¹
Dose assorbita, kerma	gray	Gy	1 Gy = 1 J kg ⁻¹
Dose equivalente	sievert	Sv	1 Sv = 1 J kg ⁻¹

4.4 Prefissi

Dal momento che talune unità risultano di scomodo uso perché troppo grandi (vedi il farad, unità di capacità) o troppo piccole (vedi il pascal, unità di pressione) o comunque per scrivere in modo più sintetico il risultato numerico di una misura, il SI prevede anche un certo numero di prefissi di multipli e sottomultipli delle unità e relativi simboli:

Fattore moltiplicativo	prefisso	Simbolo
10 ²⁴	yotta-	Y-
10 ²¹	zetta-	Z-
10 ¹⁸	exa-	E-
10 ¹⁵	peta-	P-
10 ¹²	tera-	T-
10 ⁹	giga-	G-
10 ⁶	mega-	M-
10 ³	kilo-	k-
10 ²	etto-	h-
10	deca-	da-
10 ⁻¹	deci-	d-
10 ⁻²	centi-	c-
10 ⁻³	milli-	m-
10 ⁻⁶	micro-	μ
10 ⁻⁹	nano-	n-
10 ⁻¹²	pico-	p-
10 ⁻¹⁵	femto-	f-
10 ⁻¹⁸	atto-	a-
10 ⁻²¹	zepto-	z-
10 ⁻²⁴	yocto-	y-

4.5 SI. Regole di scrittura

Il SI codifica le norme di scrittura dei nomi e dei simboli delle grandezze fisiche.

Questo punto, ad una prima valutazione può apparire non importante e di scarso interesse teorico. *Anche il dibattito sulla scelta tra diverse possibilità di scrittura è stato invece lungo e serrato* e le decisioni finali hanno richiesto diversi approfondimenti. Mi limito qui a riportare le norme finali più importanti adottate ¹.

I nomi delle unità di misura vanno sempre scritti in carattere minuscolo, privi di accenti o altri segni grafici.

Es: ampere, non Ampère.

I nomi delle unità di misura non hanno plurale.

Es: 3 ampere, non 3 amperes

I simboli delle unità di misura vanno scritti con l'iniziale minuscola, tranne quelli derivanti da nomi propri o dai prefissi da mega a yotta.

Es: mol per la mole

I simboli non devono essere seguiti dal punto (salvo che si trovino a fine periodo).

I simboli devono sempre seguire i valori numerici.

Es: 1kg, non kg1

Il prodotto di due o più unità va indicato con un punto a metà altezza o con un piccolo spazio tra i simboli.

Es: N·m oppure N m

Il quoziente tra due unità va indicato con una barra obliqua o con esponenti nega

Es.: J/s oppure $J s^{-1}$

- Il modo preferito di indicare una frazione decimale è quello di usare una virgola (345,678) per separare la parte intera da quella decimale. La pratica di usare un punto, come in America, è comunque “accettabile”.

- Non si devono usare prefissi composti.

Es: ns, non mµs

4.6 Unità non SI

Il processo di standardizzazione non può dirsi certo concluso nella pratica con l'adozione formale del SI. In molti campi permane l'uso di unità di misura non SI, anche se spesso ancora autorizzate. Nella tabella seguente sono elencate alcune unità non SI utilizzate in fisica:

Unità	Simbolo	Grandezza	Conversione
angström	Å	lunghezza (fisica atom.)	$10^{-10}m$

¹ Chi fosse interessato a dettagli, almeno in parte anche di carattere storico, può trovare utile leggere la guida emessa dal BIPM citata al par. 4.2

anno luce	a.l.	lunghezza (astronomia)	$9.46 \times 10^{15} \text{ m}$	(1)
barn	b	sezione d'urto	10^{-28} m^2	
centimetri inversi	cm^{-1}	numero d'onda	100 m^{-1}	(2)
fermi	fm	lunghezza (fisica nucl.)	10^{-15} m	
hartree	Hartree	energia	27.2 eV $4.36 \times 10^{-18} \text{ J}$	(3)
millimetri mercurio	mmHg	pressione	133.322 Pa	(4)
parsec	pc	lunghezza (astronomia)	$3.08 \times 10^{16} \text{ m}$	(1)
röntgen	R	esposizione	$2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$	
rydberg	Ry	energia	13.6 eV $2.18 \times 10^{-18} \text{ J}$	(3)
unità astronomica	UA	lunghezza (astronomia)	$1.496 \times 10^{11} \text{ m}$	(1)
unità di massa at.	amu	massa	$1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$	(4)

In astronomia si utilizzano peculiari unità di misura delle lunghezze:

l'anno luce è la distanza percorsa nel vuoto dalla radiazione elettromagnetica in un anno tropico (vedi anche par. 1.2 e par. 3.2);

l'unità astronomica corrisponde al valore arrotondato della distanza media Terra-Sole;

il *parsec*, contrazione di *parallasse secondo*, è la distanza alla quale la distanza di 1 Unità Astronomica sottende un angolo di 1" ($1'' = 4.84814 \times 10^{-6} \text{ rad}$).

Il *numero d'onda* è l'inverso della lunghezza d'onda .

L'hartree e il *rydberg* sono unità di misura naturali dell'energia, definite con riferimento allo stato fondamentale dell'atomo di idrogeno.

1 Hartree corrisponde al valore assoluto dell'energia potenziale dell'elettrone nello stato fondamentale dell'atomo di idrogeno.

1 Ry = 0.5 Hartree corrisponde all'energia di ionizzazione dell'atomo di idrogeno.

L'unità di massa atomica corrisponde ad 1/12 della massa di un atomo di carbonio 12.

Alcune unità non-SI, di uso più generale, legalmente autorizzate sono le seguenti:

Grandezza	Unità	Simbolo	Conversione SI
Volume	litro	l	$1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$
Massa	tonnellata	t	$1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$
Massa	unità di massa atomica	μ	$1 \mu = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Tempo	minuto	min	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$
Tempo	ora	h	$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$
Tempo	giorno	d	$1 \text{ d} = 86400 \text{ s}$
Pressione	bar	bar	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
Energia	elettronvolt	eV	$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
Angolo piano	angolo giro		$1 \text{ angolo giro} = 2 \pi \text{ rad}$
Angolo piano	grado sessagesimale	$^\circ$	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
Angolo piano	minuto d'angolo	'	$1' = (\pi/10800) \text{ rad}$

Ed infine alcune unità non ammesse dal SI, ma ancora in uso.

Grandezza	Unità	Simbolo	Conversione
Lunghezza	miglio marino	n mi	1852.0 m
Lunghezza	angström	Å	10^{-10} m
Volume	stereo	st	1 m^3
Velocità	nodo	kn	0.514 m s^{-1}
Forza	chilogrammo-forza	kgf	9.80665 N
Pressione	torr	torr	33.322 Pa
Pressione	atmosfera	atm	101325 Pa
Energia	caloria a 15 °C	cal ₁₅	4.1855 J
	caloria internaz.	cal _{it}	4.1868 J
	caloria termochim.	cal _{tc}	4.1840 J
	frigoria	fg	-4.1868 J
Potenza	cavallo vapore	CV	735.499 W
Luminanza	stilb	sb	10^4 nt
Viscosità cinematica	stokes	St	$10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Viscosità dinamica	poise	P	10^{-1} Pa s
Attività	curie	Ci	3.7×10^{10} Bq
Dose assorbita	rad	rd	10^{-2} Gy
Dose assorbita equivalente	rem	rem	10^{-2} Sv
Esposizione	röntgen	R	$2.58 \times 10^{-4} \text{ C kg}^{-1}$

Una considerazione finale legata ad una citazione dal libro di Fazio, citazione che bene riassume l'attuale situazione per quanto riguarda il corretto utilizzo delle unità di misura e delle relative norme vigenti. E' un dato almeno in parte sorprendente che in importanti paesi industrializzati (come il nostro) siano ancora usate antiche unità: questo permette davvero di valutare una grandezza non scientifica come la forza dell'abitudine. In Italia i mass media del resto non contribuiscono ad una corretta diffusione della normativa metrica, e la grande maggioranza degli italiani sono ignoranti in materia; buona parte degli stessi insegnanti non conosce bene la corretta simbologia delle unità di misura:

Molti ritengono indifferente l'impiego di un simbolo al posto di un altro o l'impiego di un'unità di misura per una grandezza diversa da quella per la quale è stata adottata, essendo convinzione diffusa che i responsabili degli enti metrologici si divertano a cambiare ogni tanto la simbologia, come in una sorta di gioco dei bussolotti. Vale la pena di citare alcuni esempi: i quotidiani sportivi esprimono la durata di una corsa usando il simbolo " per i secondi e il simbolo ' per minuti, ignorando che " indica il secondo d'angolo, mentre ' indica il minuto d'angolo; del tutto risibile, poi, che la velocità di un'auto venga espressa in kmh. E ancora, nelle scuole elementari si continua a insegnare al bambino il miriametro, multiplo del metro scomparso fin dal 1960, mentre in edilizia si insiste nell'indicare il metro col simbolo ml (che invece rappresenta il millilitro) e il metro quadrato con mq (che invece rappresenta il milliquintale, ovvero l'ettogrammo!). Ma gli esempi negativi si possono moltiplicare a piacere: giornalisti di quotidiani che esprimono la potenza di una centrale elettrica in kilowattora anziché in kilowatt, idraulici che misurano la pressione dell'acqua in un acquedotto in kili, meteorologi che esprimono la pressione in atmosfere, costruttori di strumenti di misura che continuano imperturbati a incidere sui quadranti dei manometri la aberrante scritta kg/cm², riuscendo con encomiabile analfabetizzazione metrica a commettere tre errori in un sol colpo. (Fazio, 1995, 84-85)

4.7 Sistemi cgs

Un cenno meritano alcuni sistemi denominati cgs¹.

¹ Vedi per approfondimenti Jackson, 1984

Nei sistemi cgs, le unità fondamentali della meccanica sono il centimetro, il grammo e il secondo. Per quanto riguarda la meccanica, quindi, la differenza tra SI e cgs si limita a fattori potenze di 10 nei valori delle grandezze fondamentali e derivate.

La differenza sostanziale tra i sistemi cgs e il Sistema Internazionale riguarda le grandezze elettromagnetiche. Mentre il SI introduce una grandezza fondamentale per l'elettromagnetismo (l'intensità di corrente), nei sistemi cgs le grandezze elettromagnetiche sono tutte derivate da quelle meccaniche.

Storicamente si sono sviluppati vari sistemi cgs, a seconda della legge utilizzata per definire le grandezze elettromagnetiche in funzione delle grandezze meccaniche.

Il *Sistema cgs elettrostatico* ricava l'unità di carica elettrica (lo *statcoulomb*) dalla legge di Coulomb che esprime la forza tra due cariche elettriche, imponendo che la costante di proporzionalità sia adimensionale ed abbia il valore 1.

Il *Sistema cgs elettromagnetico* ricava l'unità di corrente (*l'abampere*) dalla legge dell'interazione elettrodinamica tra due conduttori paralleli percorsi da corrente imponendo che la costante di proporzionalità sia adimensionale ed abbia il valore 1.

(L'unità di carica del sistema cgs elettromagnetico (l'abcoulomb) è diversa da quella del sistema cgs elettrostatico per un fattore c .)

Il *Sistema cgs simmetrizzato di Gauss* adotta le unità del sistema cgs elettrostatico per le grandezze elettriche, le unità del sistema cgs elettromagnetico per le grandezze magnetiche. In alcune equazioni che collegano grandezze elettriche e magnetiche compare come coefficiente la velocità della luce nel vuoto, c .

La tabella seguente presenta un confronto tra alcune unità cgs di Gauss e le corrispondenti unità SI

Grandezza	Unità	Simbolo	Conversione SI
Forza	dina	dyn	1 dyn = 10^{-5} N
Lavoro, energia	erg	erg	1 erg = 10^{-7} J
Carica elettrica	statcoulomb	statC	1 statC = 3.333×10^{-10} C
Corrente elettrica	statampere	statA	1 statA = 3.333×10^{-10} A
Potenziale elettrico	statvolt	statV	1 statV = 300V
Campo magnetico H	oersted	Oe	1 Oe = $(1/4\pi) \times 10^3$ A/m

4.8 Costanti fisiche e sistemi di unità di misura

This velocity is so nearly that of light, that it seems we have strong reasons to conclude that light itself (including radiant heat, and other radiations if any) is an electromagnetic disturbance in the form of waves propagated through the electromagnetic field according to electromagnetic laws.

James Clerk Maxwell

Con l'eccezione dell'unità di tempo, i campioni materiali hanno rappresentato per molto tempo la miglior risposta alle esigenze della metrologia grazie alla superiorità dimostrata rispetto ad ogni realizzazione basata su fenomeni fisici: mano, piede, braccio, pollice, seme, meridiano terrestre, pendolo. La situazione è evoluta con l'affermarsi del modello atomico della materia. La realizzazione atomica delle unità macroscopiche richiese quasi un secolo di sviluppo scientifico e tecnologico.

Attualmente (par.2.5) si sta discutendo se definire il sistema di unità di misura basandolo su valori assegnati per convenzione ad alcune costanti fondamentali della natura.

In tutte le formulazioni delle teorie della fisica e la loro applicazione al mondo reale, appaiono alcune quantità invarianti fondamentali. Queste quantità, chiamate *costanti fisiche fondamentali (o universali)*, sono di tal importanza che devono essere conosciute con la più alta precisione possibile¹. I valori delle costanti di natura dipendono dalle misurazioni effettuate nei laboratori e non possono essere calcolati a priori. Queste costanti vengono dunque misurate sperimentalmente a partire da campioni delle grandezze che intervengono nelle relazioni fondamentali. Si potrebbe - fissando un valore convenzionale per una costante fondamentale - definire una delle unità partendo da quelle delle altre grandezze. Procedendo in questo modo per un numero sufficiente di costanti fondamentali, si potrebbe ridurre drasticamente (addirittura a zero!) il numero di grandezze fondamentali. Riporto un esempio, illustrato dal fisico Patrik Bouchareine alla voce *Misura* dell'Enciclopedia Einaudi, con il solo scopo di introdurre il possibile procedimento, grazie a un caso concreto:

Per collegare il chilogrammo alla quantità di materia, basterebbe per esempio dare per definizione un valore numerico esatto alla costante di Avogadro. Per assicurare la continuità con il sistema attuale, bisognerebbe attribuire a tale costante un valore in accordo con le migliori determinazioni sperimentali. Ma non ci sono obiezioni, almeno in linea di principio, a fissare questo valore arbitrariamente. Si potrebbe quindi collegare l'unità di massa all'unità di tempo fissando per definizione un valore esatto per la costante di Planck. Si fa così derivare l'unità d'energia dall'unità di tempo tramite il quanto d'azione e di conseguenza l'unità di massa è definita dal metro, dal secondo e dal valore del quanto d'azione. Fissando un valore esatto per la costante di Boltzmann, si stabilirebbe una scala energetica per la temperatura, e la sua unità sarebbe definita dal metro, dal secondo e dai valori numerici attribuiti alle costanti di Planck e di Boltzmann.(Bouchareine, 1977, 334-335)

Oltre un problema di esattezza delle misure², vi è una importante ragione che impedisce di ridurre notevolmente il numero delle grandezze fondamentali:

Lo spirito umano ha bisogno, per lavorare in condizioni soddisfacenti, d'una certa classificazione dei concetti che deve «manipolare». Ridurre a zero il numero di grandezze fondamentali farebbe di ogni misura (ogni risultato di una misurazione) un numero senza dimensioni, indipendentemente da qualsiasi unità, e questa astrazione sopprimerebbe completamente tutta un'attività intellettuale chiamata *analisi dimensionale*. A questa attività, a volte contestata, sono dovuti malgrado tutto dei progressi della conoscenza scientifica come la scoperta del numero di Reynolds e la legge di Poiseuille sulla dinamica dei liquidi viscosi.(ivi, 336)

Per questa ragione si eviterà di ridurre il numero delle grandezze fondamentali molto al di sotto del suo valore attuale.

Nel par. 2.5 ho accennato al fatto che definire il sistema di unità di misura basandolo su valori assegnati ad alcune costanti presenti qualche problema tecnico. Oltre ai problemi tecnici, comunque, lo stesso concetto di “costante universale” può essere oggetto di discussione (è ciò che cercherò di riassumere brevemente in questo paragrafo), i cui esiti influiranno *su come misureremo il mondo che ci circonda*³.

Come il loro stesso nome suggerisce, si presume che le così dette costanti fisiche siano immutabili: si ritiene, infatti, che riflettano una *costanza fondamentale* di natura.

Le costanti fisiche sono molto numerose (la densità di un particolare pezzo di metallo, per esempio, o la distanza tra i piani di atomi di un particolare cristallo di silicio, o la distanza tra la Terra e la Luna) anche se solamente alcune sono considerate universalmente come davvero fondamentali: tra

¹ Per una ottima introduzione alle costanti universali si può vedere il sito del NIST all'indirizzo <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/introduction.html>, e Taylor, Cohen, 1993

² Vedi per dettagli Bouchareine, 1977

³ Una trattazione introduttiva di questa problematica può essere trovata nell'articolo online del 1999 *Le costanti fisiche fluttuano?*, del filosofo inglese Rupert Sheldrake, all'indirizzo www.transaction.net/science/seven/constant.html (per approfondimenti ulteriori consultare anche il sito www.sheldrake.com), cui spesso mi richiederò nelle considerazioni seguenti

queste la velocità della luce (c), la carica elementare (e), la massa dell'elettrone (m_e), la massa del protone (m_p), la costante di Planck (h) e la costante gravitazionale universale (G). In tabella sono riportati i valori di alcune fra le più note costanti universali con la relativa incertezza percentuale ¹.

Frequently used constant

Quantity	Symbol	Value	Unit	Relative std. uncert. u_r
Speed of light in vacuum	c, c_0	299 792 458	m s ⁻¹	(exact)
Newtonian constant of gravitation	G	6.673(10) x 10 ⁻¹¹	m ³ kg ⁻¹ s ⁻²	1.5 x 10 ⁻³
Planck constant	h	6.62606876(52) x 10 ⁻³⁴	J s	7.8 x 10 ⁻⁸
Elementary charge	e	1.602176462(63) x 10 ⁻¹⁹	C	3.9 x 10 ⁻⁸
Electron mass	m_e	9.10938188(72) x 10 ⁻³¹	kg	7.9 x 10 ⁻⁸
Proton mass	m_p	1.67262158(13) x 10 ⁻²⁷	kg	7.9 x 10 ⁻⁸
Avogadro constant	N_A, L	6.02214199(47) x 10 ²³	mol ⁻¹	7.9 x 10 ⁻⁸

E' importante conoscere il valore numerico delle costanti fondamentali con grande accuratezza, almeno per due ragioni:

First, the quantitative predictions of the basic theories of physics depend on the numerical values of the constants that appear in the theories. An accurate knowledge of their values is therefore essential if man hopes to achieve an accurate quantitative description of the physical universe. Second, and more important, the careful study of the numerical values of these constants, as determined from various experiments in the different fields of physics, can in turn test the overall consistency and correctness of the basic theories of physics themselves. (Sito web del NIST)

Come semplice esempio accenno davvero brevemente ai primi tentativi di misurazione della velocità della luce, la prima tra le costanti universali cui è stato assegnato convenzionalmente un valore *esatto* per scopi metrologici, come visto nel par. 2.5.

I filosofi antichi erano convinti che la luce si trasmettesse istantaneamente. Anche Keplero e Cartesio erano d'accordo sul fatto che la velocità della luce fosse infinita. A suggerire un modo per dirimere la questione in maniera empirica fu proprio Galileo. Nel 1638 ² egli propose il seguente metodo. Fece salire su due colline lontane meno di un chilometro e mezzo l'una dall'altra due persone, ognuna con una lanterna accesa coperta da uno schermo: uno dei due soggetti doveva scoprire la sua lanterna; l'altro soggetto, sull'altra collina, doveva a sua volta togliere lo schermo quando vedeva la luce della prima torcia. Il primo osservatore doveva misurare il tempo trascorso fra la rimozione del primo schermo e il momento in cui vedeva la luce della seconda lanterna. Il tempo così ottenuto era quello impiegato dalla luce a percorrere la distanza fra le due colline in avanti e all'indietro. Successivamente i due soggetti avrebbero provato a distanze maggiori, forse di alcune miglia. Se non si fosse osservato alcun aumento del tempo trascorso potevano concludere che la luce di fatto viaggia ad una velocità infinita.

¹ Informazioni riprese da *Reviews of Modern Physics*, Vol. 72, N. 2, 2000

² Per dettagli vedi per esempio Westfall, 1983

The crudity of Galileo's proposed experiment suggests how difficult it was to imagine a velocity so great that one could not easily detect the time of transit over a path several miles long.

Although Galileo apparently did not carry out his experiment, the Florentine Accademia del Cimento did so about two decades after the proposal. Two observers separated by roughly 1 mile (1.6 km) failed to detect any increase in the elapsed time. (Westfall, 1983, 451)

Il primo a misurare effettivamente la velocità della luce fu, nel 1675, il danese Ole Romer. Nella seconda metà del Seicento erano state elaborate alcune misurazioni del moto dei satelliti di Giove scoperti da Galileo. Altri studi avevano dimostrato che i tempi calcolati in cui il satellite più interno di Giove, Io, doveva entrare nell'ombra del pianeta gigante, non coincideva sempre con i dati d'osservazione. Nel mese in cui la Terra, muovendosi intorno al Sole, si trovava alla massima distanza da Giove (ossia con Giove prossimo alla congiunzione col Sole), i momenti delle eclissi dei satelliti ritardavano di quasi 22 minuti rispetto ai tempi calcolati. Quando le osservazioni venivano compiute con Giove alla distanza minima dalla Terra tale ritardo non veniva riscontrato. Romer pensò che il ritardo fosse dovuto al tempo impiegato dalla luce a percorrere la differenza fra la distanza massima di Giove dalla Terra e la sua distanza minima, spazio pari al diametro dell'orbita terrestre. Dividendo la lunghezza del diametro terrestre (per come era conosciuto allora) per 22 minuti, Romer ottenne la prima stima numerica della velocità della luce: circa 214.000 km/s, inferiore di circa un terzo rispetto alle attuali misurazioni.

Solo alla metà dell'Ottocento la velocità della luce fu misurata direttamente in esperimenti sulla Terra, compiuti per primi dai fisici francesi Armand-Hippolyte Fizeau e Léon Foucault. Queste misurazioni fornirono una velocità prossima a 300.000 km/s. Nel 1880 poi il fisico americano Albert A. Michelson (il primo americano a ricevere il premio Nobel in fisica) ottenne sperimentalmente il valore di 299.910 km/s.

Ovviamente se le unità di misura cambiano, anche i valori delle costanti mutano. Inoltre, come abbiamo visto, le unità sono arbitrarie, dipendono cioè da definizioni che possono variare di volta in volta.

I valori ufficiali delle costanti fondamentali variano ogni volta che vengono effettuate nuove misurazioni: esse sono continuamente aggiornate dagli esperti e dalle commissioni internazionali. I vecchi valori sono sostituiti dai nuovi, basati sugli ultimi "migliori valori" ottenuti nei laboratori di tutto il mondo. Scrive Sheldrake:

I valori "migliori" sono già il risultato di una lunga selezione. In primo luogo, coloro che conducono gli esperimenti tendono a scartare i dati inattesi partendo dal presupposto che siano errori. Secondo, una volta eliminate le misurazioni che più si distaccano dalle altre, le variazioni ottenute all'interno di uno stesso laboratorio vengono attenuate calcolando la media dei valori ottenuti in momenti diversi: il valore finale viene, poi, sottoposto a una serie di correzioni in qualche modo arbitrarie. Infine, i risultati provenienti da diversi laboratori nel mondo sono selezionati, messi in ordine e utilizzati per ricavare delle medie con lo scopo di ottenere un valore ufficiale definitivo. (Sheldrake, www.transaction.net/science/seven/constant.html)

In pratica, sottolinea Sheldrake, i valori delle costanti cambiano, anche se, in teoria, si suppone siano immutabili.

Si pensi inoltre che *il valore anche di una singola costante è determinato da una catena indiretta di informazioni basate su fenomeni indipendenti*. Per esempio, il valore della massa dell'elettrone in chilogrammi è basato principalmente su informazioni combinate provenienti da esperimenti che implicano misure elettromagnetiche e di meccanica classica, la più alta precisione possibile nella spettroscopia laser, fenomeni quantistici, teoria della materia condensata e complessi calcoli di elettrodinamica quantistica. Non sono rari, al riguardo, esempi storici:

One of the earlier experiments to measure a fundamental constant to high accuracy, as well as an example of how the accurate determination of a fundamental constant using different methods can lead to an improved understanding of a particular physical phenomenon, was the measurement of the fundamental unit of charge (e) by Robert A. Millikan, a physicist in the United States. From about 1907 to 1917 he carried out his now-famous oil drop experiment to determine e . In this method, the displacement of small, charged oil drops (the charge on the drop is usually just a few e) moving in

air between two horizontal and parallel metal plates (with and without an applied known voltage) is followed as a function of time. The value of the fundamental constant e is then calculated from many observations on different drops and knowledge of other relevant quantities, especially the viscosity (resistance to flow) of the air. Millikan's final value, reported in 1917, was: $(4.774 \pm 0.002) \times 10^{-10}$ esu (esu being the electrostatic unit, one of the units of charge in the centimeter-gram-second [cgs] system of units; this cgs-esu system was in wide use before the general adoption of the SI system). (Sito web del NIST)

Questo conflitto tra teoria e realtà empirica è in genere messo da parte senza particolare discussione, perché si ritiene che tutte le variazioni siano dovute ad errori sperimentali, mentre gli ultimi valori sono sempre considerati i migliori. Shelldrake è critico con questo atteggiamento, ed esprime un punto di vista che merita di essere conosciuto:

Ma che cosa accadrebbe se nella realtà le costanti cambiassero? Che cosa accadrebbe “se la natura fondamentale della natura cambiasse”? Prima di esaminare questo argomento è necessario riflettere su uno degli assunti della scienza a noi noti: la fede nell'uniformità della natura. Per chi crede ciecamente in questo precetto tali interrogativi appaiono come mere sciocchezze: le costanti, infatti, non possono che essere costanti.

Per alcuni decenni si è proceduto alla misurazione della maggior parte delle costanti solo in questa piccola regione dell'universo e le attuali misurazioni variano in modo casuale. L'idea che tutte le costanti siano le stesse sempre e dovunque non è un assioma basato sui dati: se lo fosse, sarebbe un oltraggio. I valori delle costanti, così come sono state misurate sulla terra, sono cambiati notevolmente negli ultimi cinquant'anni. Non c'è alcuna prova che dimostri che non abbiano subito alcuna modifica in quindici miliardi di anni in qualsiasi parte dell'universo. Il fatto che questo assunto sia così poco dibattuto e sia così dato per scontato mostra la forza della fede scientifica nelle verità eterne. (Shelldrake, www.transaction.net/science/seven/constant.html)

In base all'approccio più tradizionale della scienza, la Natura è governata da leggi immutabili e da verità eterne. Le leggi della natura sono le stesse in ogni tempo e in ogni luogo, trascendendo lo spazio e il tempo. Per i padri fondatori della scienza moderna le leggi della natura (cap. 3) sono come “Idee immutabili” nella mente divina. Dio è un matematico. La scoperta di leggi matematiche, come sottolinea sempre Shelldrake, è “il risultato di uno sguardo diretto nella Mente di Dio”. Questi sentimenti sono stati alla base delle indagini dei fisici per tantissimo tempo. Fino al 1960 l'universo era ancora considerato eterno e immutabile, anche se evidenze di una sua “espansione” si erano in effetti accumulate per anni. La scoperta della radiazione di fondo nel 1965 diede inizio ad una vera rivoluzione cosmologica, iniziando dalla teoria del Big Bang. Il cosmo è ora considerato in continua evoluzione. Ed una nuova domanda sorge spontanea. Se tutta la natura evolve, perché non dovrebbero evolvere anche le leggi naturali? E come si giustificherebbe la “costanza” delle costanti fondamentali?

Oggi tali problematiche, con particolare riferimento ai valori delle costanti, vengono discusse in base al *principio antropico cosmologico* nei seguenti termini: tra i molti universi possibili, solo quello con le costanti stabilite in base ai valori scoperti attualmente avrebbe potuto dare origine ad un mondo dotato di una vita così come noi la conosciamo e consentire la nascita di studiosi del cosmo capaci di discuterne. Se i valori delle costanti fossero stati diversi, non ci sarebbero state stelle, atomi, pianeti, persone.

In generale eventuali piccole variazioni delle costanti fondamentali avrebbero prodotto strutture stellari e planetarie totalmente diverse da quelle attuali con conseguenze negative per l'esistenza di quelle forme di vita che oggi conosciamo¹.

Ad esempio, con solo un piccolo cambiamento nelle forze relative delle forze nucleari ed elettromagnetiche, non ci sarebbero atomi di carbonio e, di conseguenza, nessuna forma di vita basata su questo elemento chimico, noi inclusi. In effetti, il principio antropico cosmologico costituisce la base epistemologica per molte ricerche sul significato del valore delle costanti fondamentali e sulla loro variazione spaziale o temporale².

Diversi fisici, tra cui Paul Dirac, hanno asserito che almeno alcune delle costanti fondamentali possono cambiare col tempo. Per esempio l'idea di una variazione temporale di G ha origine in

¹ Vedi per esempio Carter, 1974

² Vedi per es. Barrow, Tipler, 1986

un'ipotesi, formulata da Dirac ¹, sulla base di alcune considerazioni di Arthur Stanley Eddington circa la grandezza delle costanti adimensionali; l'ipotesi di Dirac prende il nome di "Ipotesi dei Grandi Numeri" ed è stata lo stimolo che ha dato vita a tutta una serie di lavori teorici e di verifiche sperimentali atti, rispettivamente, a considerare una variabilità temporale di G e a misurarne l'entità di variazione. In particolare Dirac ha proposto una teoria secondo la quale la costante gravitazionale universale G , potrebbe decrescere col tempo: la forza gravitazionale diminuirebbe man mano che l'universo si espande. Il ragionamento di Dirac è stato soprattutto filosofico. Supponiamo di aver scelto un gruppo di unità fondamentali per la massa, la lunghezza e il tempo. In tal caso tutte le costanti fisiche possono essere espresse in funzione di tali unità fondamentali, rendendo possibile il confronto fra costanti di differenti dimensioni. Dirac scelse come unità di massa la massa dell'elettrone, come unità di lunghezza il raggio dell'orbita dell'elettrone nell'atomo di idrogeno e come unità di tempo il tempo impiegato da un fotone che viaggia alla velocità della luce a percorrere tale raggio. Quando le costanti universali vengono espresse mediante tali unità, esse risultano numeri adimensionali. Per esempio la massa del protone è 1836, la velocità della luce è 1, e la costante gravitazionale è circa 10^{-40} . L'età dell'universo in questo caso è quasi 10^{40} . Così il valore di G in unità fondamentali risulta essere il reciproco (circa) dell'età dell'universo. E' questa solo coincidenza? O esiste una qualche relazione sconosciuta tra la costante gravitazionale e l'età dell'universo? Dirac optò per la seconda ipotesi e sottolineò che questa relazione implica due alternative: dato che l'età dell'universo varia (aumenta) col tempo, anche il valore di G deve cambiare (diminuire); oppure si contempla la possibilità che siano le unità fondamentali stesse a variare nel tempo.

In un articolo apparso l'8 Agosto 2002 su *Nature*, Paul Davies et al. asseriscono che vi sono prove sperimentali che la velocità della luce potrebbe essere cambiata negli ultimi 12 miliardi di anni.

Ma quanti propongono tali supposizioni affermano anche che non intendono affatto mettere in discussione l'idea delle leggi eterne; stanno semplicemente suggerendo che proprio queste ultime governano la variazione delle costanti. L'idea che le stesse leggi evolvano è ancora più radicale.

Il filosofo Alfred North Whitehead ha messo in evidenza che se abbandoniamo l'idea delle leggi platoniche imposte alla natura e concepiamo, invece, leggi immanenti alla natura, allora queste devono necessariamente evolvere con la natura: "Poiché le leggi della natura dipendono dalle caratteristiche individuali delle cose che costituiscono la natura, poiché le cose cambiano, allora, di conseguenza, anche le leggi cambieranno. In tal modo la moderna visione evolutiva dell'universo fisico dovrebbe concepire delle leggi di natura che evolvono simultaneamente alle cose che formano l'ambiente. Così, bisogna smettere di concepire un Universo in evoluzione soggetto a leggi eterne". (*ibidem*)

Finora sono state sviluppate solo due congetture sulle costanti fondamentali. Secondo l'approccio tradizionale, esse sono considerate come assolutamente costanti e tutte le variazioni dei dati empirici sono dovute ad errori di uno o dell'altro tipo. Mentre la scienza progredisce, questi errori vengono ridotti. Con sempre maggiore precisione ci si avvicina man mano ai veri valori delle costanti. La seconda congettura si basa, invece, sulle supposizioni di alcuni fisici teorici secondo le quali una o più costanti possono variare in modo regolare insieme all'età dell'universo oppure oltre le distanze astronomiche. Queste idee sono state sottoposte a varie verifiche attraverso osservazioni astronomiche e i test effettuati sembrano aver escluso la possibilità di tali cambiamenti. Ma questi test ripropongono, secondo Sheldrake, la solita questione: essi si basano sulle ipotesi che devono dimostrare e cioè che le costanti siano costanti e che l'attuale cosmologia sia corretta in tutti i suoi fondamenti. Sheldrake pensa anche ad una terza ipotesi:

Alla terza possibilità[...] non è stata ancora prestata molta attenzione: essa asserisce che le costanti possano fluttuare, entro certi limiti, attorno a valori medi che, a loro volta, rimangono più o meno costanti. L'idea delle leggi e delle costanti immutabili è l'ultimo elemento che sopravvive dall'era della fisica classica in cui si supponeva che un ordine regolare e (per principio) completamente prevedibile da un punto di vista matematico prevalesse sempre e dovunque. In realtà, non esiste niente di simile nelle vicende umane, nel regno biologico, nel tempo atmosferico e neanche nei cieli.

¹ Dirac, 1937

La rivoluzione del caos ha rivelato che questo ordine perfetto era solo un'ingannevole illusione. La maggior parte del mondo naturale è caotico per natura.

I valori fluttuanti delle costanti fondamentali nelle misurazioni sperimentali sembrano compatibili con piccoli ma reali cambiamenti dei loro valori, così come lo sono con una perfetta costanza oscurata da errori sperimentali. (*ibidem*)

Che cosa accadrà se un giorno si scoprisse davvero che le “costanti” universali fluttuano nel tempo? Credo sia davvero difficile prevedere tutte le conseguenze di una tale scoperta, ma forse qualcuno potrà pensare che il metro, anche se basato su un valore convenzionale della velocità della luce, dovrà essere definito di nuovo!

5. CARATTERISTICHE DEGLI STRUMENTI DI MISURA

La scoperta e l'uso del ragionamento scientifico, ad opera di Galileo, segnano il vero inizio della fisica. Questa scoperta insegnò che non sempre ci si può fidare delle conclusioni intuitive basate sull'osservazione immediata, poiché esse conducono talvolta fuori strada.

Albert Einstein

Non è stato ancora possibile stabilire in maniera inequivocabile se Galileo abbia comprato o costruito il primo cannocchiale da lui utilizzato ¹. Si tratta ovviamente di un problema del tutto relativo. Ciò che interessa, ed ebbe un'influenza determinante, è il fatto che in qualche modo l'abbia utilizzato e che dopo averne constatato l'efficienza nell'ingrandire gli oggetti intorno a lui, più o meno lontani, l'abbia considerato *uno strumento*, ossia un mezzo capace di estendere fino a limiti prima inconcepibili, la possibilità umana di esplorare l'universo.

Questo per alcuni è forse *il più grande contributo dato da Galilei alla scienza*.

Galileo mostrò che gli strumenti oltre al compito immediato di effettuare le misure hanno anche quello fondamentale di estendere la nostra percezione a domini direttamente inaccessibili ai sensi umani.

Si determina così una evoluzione sostanziale ed inarrestabile dei concetti di fenomeno e di esperienza. I fenomeni e tutte le esperienze che si possono escogitare per rendersi ragione di essi sono tutti quelli osservabili con gli strumenti di oggi e con quelli che saranno inventati domani.

Fra il fenomeno osservato e le nostre sensazioni (fase ultima dell'osservazione) gli strumenti si *interpongono* per rendere l'osservazione non solo obiettiva ma anche possibile, comunque indiretta possa essere la correlazione *razionale* così stabilita fra fenomeno e sensi.[...]l'occhio umano è quasi cieco rispetto alla gamma delle onde luminose, che vanno dai raggi γ alle onde elettromagnetiche.(Bernardini, 1974, 27-28).

Uno strumento è costituito da un dispositivo più o meno complicato che traduce la sollecitazione applicata per mezzo della grandezza da misurare nella variazione di un'altra grandezza più facilmente misurabile, per esempio nello spostamento di un indice su una scala graduata.

Nel nostro contesto siamo interessati agli strumenti da un punto di vista generale, per analizzarne il comportamento inteso come risposta (spostamento dell'indice sulla scala) in funzione della sollecitazione (grandezza da misurare "applicata" allo strumento) ². Normalmente la scala è *tarata*, cioè in corrispondenza delle divisioni porta segnato il valore della grandezza. La taratura è fatta sollecitando lo strumento con una grandezza di valore noto. Alcune volte uno strumento può essere usato solo per misure relative, dove cioè interessano solo i rapporti tra diversi valori senza richiedere la conoscenza del valore assoluto (ad es. quando si studia un andamento) : in questi casi non è necessaria la taratura della scala.

Le principali caratteristiche di uno strumento sono le seguenti.

- *Precisione*– La precisione è la capacità di uno strumento di riprodurre sempre la stessa risposta quando riceve la stessa sollecitazione (a parità delle altre condizioni). Solo uno strumento infinitamente preciso ha però questa capacità, mentre in pratica nel funzionamento del meccanismo intervengono delle cause (attriti, gioco tra le parti in movimento, cattivo isolamento elettrico, ecc.) le quali fanno sì che lo strumento fornisca risposte più o meno diverse a parità di sollecitazione. Pertanto si può opportunamente assumere come valutazione della precisione l'inverso della semidispersione delle risposte (vedi par 6.5).

¹ Bernardini, 1974

² Per un eccellente approfondimento degli argomenti trattati in questo capitolo si può vedere, anche se datato, Pancini, 1965

2) *Sensibilità*– Definiamo sensibilità il rapporto tra la variazione della risposta e variazione della sollecitazione. Ovviamente tale rapporto determina la minima variazione apprezzabile della risposta. Generalmente la risposta di uno strumento è esprimibile in termini di “divisioni” di una scala, opportunamente segnate .

Non necessariamente la sensibilità di uno strumento è uguale per tutti i valori della sollecitazione, per cui è utile conoscere l’andamento della sensibilità in funzione della sollecitazione allo scopo di eseguire, per quanto è possibile, le misure nelle condizioni più opportune.

3) *Giustezza (o Accuratezza)*– Si definisce giustezza l’assenza di errori sistematici (vedi par. 6.2). Per adesso limitiamoci a considerare la giustezza come una stima di quanto il valore ottenuto sia pertinente a ciò che si deve realmente misurare. Nel caso di strumenti tarati, tale caratteristica implica necessariamente la bontà della taratura. Si noti la particolare relazione che c’è tra precisione e giustezza. Uno strumento può essere preciso senza essere giusto, ma non viceversa. Uno strumento giusto deve essere anche infinitamente preciso.

4) *Intervallo di funzionamento*- Questo intervallo è dato dal valore massimo, detto portata, e minimo, detto soglia, della grandezza da misurare, che lo strumento è in grado di fornire.

5) *Prontezza* – La prontezza è legata al tempo necessario perché lo strumento risponda ad una data variazione della sollecitazione: quanto minore è questo tempo, detto "tempo caratteristico", tanto maggiore è la prontezza.

5.1 Osservazioni su alcune caratteristiche degli strumenti

Talvolta si è portati a confondere tra loro precisione e sensibilità, nel senso di chiamare “molto preciso” uno strumento “molto sensibile”. Effettivamente le cose vanno in modo che l’esistenza di una caratteristica porta con sé anche l’altra, ma ciò è solo conseguenza di un compromesso. Infatti, non solo precisione e sensibilità sono due cose diverse, ma possono essere considerate antitetich. La precisione di uno strumento può andare a scapito della sua sensibilità e viceversa. Non ha però senso avere una caratteristica molto più spinta dell’altra, infatti:

- una precisione molto elevata non è sfruttabile se la sensibilità è scarsa; grande precisione significa infatti possibilità di avere sempre la stessa risposta anche per piccole variazioni della sollecitazione e tali piccole variazioni non sono osservabili se la sensibilità è bassa.
- Una sensibilità molto elevata unitamente ad una scarsa precisione produce risposte sempre diverse a parità di sollecitazione e quindi costringe ad eseguire molte misure, interpretare la distribuzione dei valori ottenuti ed eventualmente calcolare la media aritmetica. Se invece la precisione è adeguata, la risposta fornisce direttamente tale media.

Adeguare, con ragionevole compromesso, la sensibilità alla precisione significa determinare il “meccanismo” dello strumento in base alla precisione che si vuole ottenere e fissare la sensibilità (rispecchiata dalla scala) in modo che la “precisione” con cui la risposta è sempre la stessa a parità di sollecitazione sia dello stesso ordine della minima risposta apprezzabile. E’ questo il motivo per cui è sbagliato cercare di leggere su di una scala graduata una frazione molto piccola del più piccolo intervallo segnato. Ciò significherebbe infatti cercare di attribuire allo strumento una precisione che non possiede. Nella teoria convenzionale degli errori è fortemente raccomandato *di apprezzare al massimo la metà della più piccola divisione segnata della scala. Ciò è considerato essere sufficientemente “oggettivo”* (riprenderò questo punto nell’ultimo capitolo).

E’ ora opportuno introdurre alcune notazioni: con G si indicherà la grandezza fisica in se stessa, con $M(G)$ il risultato di una data operazione di misura effettuata su G , con $V(G)$ il *valore vero* (vedi

anche prossimo capitolo), sconosciuto, che G aveva mentre veniva effettuata quell'operazione di misura (si noti che $M(G) = V(G)$ solo nel caso di una misura "perfetta") e con $R(G)$ la risposta dello strumento usato, quale risultato dell'operazione di misura su G . Possiamo quindi definire in maniera rigorosa la sensibilità S come il rapporto tra la variazioni di $R(G)$ e la corrispondente variazione di $V(G)$ quando questa sia molto piccola.

E' facile rendersi conto che in ogni strumento esiste un limite alla accuratezza con cui si può rilevare la risposta; in altre parole, valori di $R(G)$ che differiscono per meno di una certa quantità, che sarà indicata con $2\Delta R(G)$, vengono percepiti come lo stesso valore dall'osservatore. Ciò determina un'incertezza sulla conoscenza di $V(G)$ legata ad S mediante la relazione

$$2\Delta V(G) = 2\Delta R(G)/S$$

La presenza dei fattori 2 è una semplice questione di comodità: infatti dall'indeterminazione sulla lettura del valore di $R(G)$ segue che il suo valore effettivo è compreso tra $R(G) - \Delta R(G)$ e $R(G) + \Delta R(G)$, il che, a sua volta, corrisponde, per il valore della grandezza misurata, all'intervallo compreso tra $M(G) - \Delta V(G)$ e $M(G) + \Delta V(G)$. La quantità $\Delta V(G)$ è detta *errore di sensibilità* (vedi prossimo capitolo).

6. ERRORI DI MISURA. LA MISURAZIONE DELLA MISURAZIONE

Just as the nearly universal use of the International System of Units has brought coherence to all scientific and technological measurements, a worldwide consensus on the evaluation and expression of uncertainty in measurement would permit the significance of a vast spectrum of measurement results in science, engineering, commerce, industry, and regulation to be readily understood and properly interpreted. In this era of the global marketplace, it is imperative that the method for evaluating and expressing uncertainty be uniform throughout the world so that measurements performed in different countries can be easily compared.

International Organization for Standardization

In questo e nei prossimi due capitoli cercherò di riassumere brevemente, anche con alcuni cenni storici, gli elementi fondamentali della *teoria convenzionale degli errori di misura*, così come è oggi, almeno in parte, presentata nella maggior parte dei corsi universitari delle facoltà scientifiche e tecniche, e che è di norma ampiamente utilizzata in tutte le attività ingegneristiche ¹. Nell'ultimo capitolo presenterò una critica ad alcuni concetti e risultati espressi appunto in questa teoria, insieme a possibili correzioni ed un'introduzione ad un emergente approccio teorico, parte integrante di un nuovo paradigma scientifico.

La teoria convenzionale degli errori ha iniziato a svilupparsi su larga scala agli inizi dell'Ottocento e si consolidò pienamente in periodo neopositivista (ed almeno l'impostazione di base è rimasta sostanzialmente invariata quasi sino ai nostri giorni). Errore significa qui l'indeterminazione che è presente in tutte le misure. Come tali, gli errori non sono sbagli e non si possono eliminare, almeno in pratica, operando con molta cura.

Per realizzare gli obiettivi della scienza, le misure devono essere suscettibili di confronto. Il confronto delle misure richiede un riconoscimento comune della loro precisione, un modo per misurare ed esprimere l'indeterminazione dei loro valori e le affermazioni inferenziali che ne risultano. Anche se ciò avvenne compiutamente per la prima volta agli inizi dal XIX secolo, la consapevolezza del problema dell'accuratezza di una misura era presente fin dall'antichità.

La mancanza di strumenti matematici adeguati, con cui poter trattare la propagazione degli errori e la rappresentazione dell'indeterminazione nel caso di misure di tipo statistico, non permise l'elaborazione di una teoria completa:

There has always been an awareness of accuracy and errors in exact science. Ptolemy has frequent references to observational accuracy, error and approximation. There was a corresponding awareness of errors of various sorts during the Renaissance and subsequently, and increasing efforts were made to allow for them. Thomas Digges discussed at length errors made by his predecessors in neglecting to put a sight at the eye end of the *radius astronomicus*. Tycho Brahe drew up tables to compensate for refraction errors in measuring low solar and stellar altitudes. The most important publication in the sixteenth century on practical problems of accuracy and error was Edward Wright's *Certain Errors in Navigation*, published in 1599. Henry Briggs (1561-1630) in 1616 is fully aware of the number of significant figures which are reliable in Napier's logarithmic tables. Advances in the theory of statistics and probability were required before errors of measurement could be treated mathematically. (Roche, 1998, 57)

Ma fu innanzi tutto la mancanza di un *ambiente culturale* (filosofico, sociale, economico e politico) come quello creatosi alla nascita della società moderna che impedì un pieno sviluppo della problematica relativa alla teoria degli errori. Il problema del grado di precisione di una misura e della relativa rappresentazione dell'indeterminazione inizia ad uscire dagli ambiti della semplice

¹ Per approfondimenti vedi per esempio Taylor, 1982, Caporaloni et al., 1987, Bevington e Robinson, 1994 e Severi, 1986. Una avvertenza generale: si potrà fare riferimento a questi testi se si è interessati alle dimostrazioni di alcuni risultati tecnici che in questo ambito verranno, per lo più, *solamente riassunti*. Per gli aspetti più propriamente storici si può consultare Stigler, 2000; Hacking, 1975; Roche, 1998 e Birnbaum 1983.

curiosità di uno studioso per diventare terreno comune di ricerca solo con la nascita della società moderna, con i suoi ideali di razionalità, universalità e precisione.

Gli storici sono d'accordo sul fatto che sia stato Galileo ¹ il primo a formulare dei concetti chiari, anche se qualitativi, relativi agli errori di misura. Egli usava questi concetti per guidare le sue analisi delle osservazioni astronomiche. Mario Barra, docente di Calcolo delle Probabilità all'Università di Roma "La Sapienza", mostra in particolare in un suo recente studio ² come nel *Dialogo sopra i massimi sistemi* Galileo, nel confutare mirabilmente la concezione cosmologica aristotelica, esprime alcune considerazioni qualitative, sicuramente originali, sulla distribuzione degli errori di misurazione, in particolare affermando che in una misurazione strumentale gli errori sono inevitabili, che tali errori sono distribuiti simmetricamente e che effettuando più misurazioni, la maggioranza dei valori si distribuisce intorno al valore vero della lunghezza che viene misurata.

Osserviamo che calcolare la media *appare intuitivamente come un procedimento logico. Ciò non significa che sia affatto un procedimento ovvio*: questa tecnica infatti ha iniziato ad essere riconosciuta universalmente solo con l'inizio della rivoluzione scientifica. In realtà, è probabile che gli astronomi dell'Antichità trattassero le loro osservazioni con una certa arbitrarietà. Tuttavia, l'assenza di regole stabilite può essere giustificata dalla grandezza degli errori di osservazione. Per esempio, per "cattive" distribuzioni degli errori, la media aritmetica non è, dal punto di vista stocastico, certo migliore (anzi a volte è peggiore) di una singola osservazione.

Il primo esempio di trattamento dei dati che usa il concetto di media aritmetica si riscontra tra gli astronomi di Baghdad nel IX secolo ³, ma fu Roger Cotes ⁴ il primo ad asserire esplicitamente (in una pubblicazione del 1722) che si sarebbe dovuto scegliere la media; egli comunque non giustificò tale consiglio, né lo formulò chiaramente. Solo nel 1755 Thomas Simpson provò che la media aritmetica di n misure ripetute, che era già in uso limitato, è più affidabile ad una singola misura in un senso precisamente specificabile.

Nel 1826, Jean-Baptiste-Joseph Fourier definì il "vero oggetto dello studio" il limite della media aritmetica di n osservazioni per n che tende a infinito, e molti autori successivi, indipendentemente l'uno dall'altro e senza menzionare Fourier, introdussero la stessa definizione per il "valore vero".

Problemi relativi alla teoria degli errori erano importanti nello sviluppo classico della teoria della probabilità iniziata da Laplace, Gauss e Legendre nel primo '800. Quello più rilevante riguardava la distribuzione di probabilità della media aritmetica di un gruppo di misure, sotto varie possibili assunzioni matematiche circa le misure (o gli errori) individuali.

Laplace and later writers proved that if the individual measurements are independent and approximately equally variable, the distribution of the arithmetic mean approaches the normal, or Gaussian, distribution as n increases. This provides an approximation to the distribution of errors incurred when the arithmetic mean is used as an estimate. The same mathematical results make it plausible that if, as Galileo, Gauss, and others suggested, a measurement error is the net result of numerous independent, largely uncontrollable, and unknown disturbances, then in many circumstances the distribution of errors should be approximately normal. (Birnbaum, 1983 A, 560)

Fra i principali problemi della teoria degli errori possono annoverarsi i seguenti: (1) la determinazione delle prove empiriche e teoriche delle varie assunzioni riguardo la forma di una distribuzione degli errori. (2) Sulla base di tali assunzioni, l'individuazione delle migliori stime basate sulle osservazioni disponibili, e la determinazione della precisione di tali stime. (3) Il chiarimento dei problemi concettuali coinvolti nell'inferenza statistica. (4) L'estensione di tutte le considerazioni menzionate a problemi più complessi d'importanza pratica, in particolare il problema della valutazione simultanea di molte costanti sconosciute partendo da un singolo gruppo di dati.

¹ Vedi per esempio Birnbaum 1983 I, Erto 1999

² *Galileo Galilei e la Probabilità*, disponibile in rete all'indirizzo <http://www.iac.es/project/galileo/neo/escpth1si3barra.html>

³ Vedi per esempio Grasshoff, 1990

⁴ Vedi Sheynin, 2001

Anticipo, in questa parte iniziale del capitolo (vedi poi cap. 9), che le risposte fornite dalla teoria convenzionale a questi problemi *sono però oggi considerate tutt'altro che soddisfacenti*. La stessa esigenza di produrre la più volte citata Guida dell'ISO *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (detta in maniera colloquiale GUM) è nata e si è sviluppata proprio per contribuire a ridurre la mancanza di consenso internazionale oggi esistente sul problema della espressione di un risultato di misura. Si legge nel "Foreword" della Guida stessa:

In 1978, recognizing the lack of international consensus on the expression of uncertainty in measurement, the world's highest authority in metrology, the Comité International des Poids et Mesures (CIPM), requested the Bureau international des Poids et Mesures (BIPM) to address the problem in conjunction with the national standards laboratories and to make a recommendation.[...]

The BIPM then convened a meeting for the purpose of arriving at a uniform and generally acceptable procedure for the specification of uncertainty; it was attended by experts from 11 national standards laboratories. This Working Group on the Statement of Uncertainties developed Recommendation INC-1 (1980), Expression of Experimental Uncertainties. The CIPM approved the Recommendation in 1981 and reaffirmed it in 1986.

The task of developing a detailed guide based on the Working- Group Recommendation (which is a brief outline rather than a detailed prescription) was referred by the CIPM to the International Organization for Standardization (ISO), since ISO could better reflect the needs arising from the broad interests of industry and commerce.(ISO, 1993, v)

Lo scopo della Guida ISO è la creazione di "*general rules for evaluating and expressing uncertainty in measurement that can be followed at various levels of accuracy and in many fields--from the shop floor to fundamental research.*" Di conseguenza, l'intenzione è quella di rendere i principi applicabili ad un ampio spettro di misure ¹, comprese quelle per:

il mantenimento dei controlli di qualità e dell'assicurazione della qualità nella produzione;

il rispetto e l'attuazione delle leggi e dei regolamenti;

la conduzione di ricerca di base, di ricerca applicata e di sviluppo, nella scienze e nell'ingegneria;

la taratura degli strumenti e le specifiche per lo svolgimento dei test attraverso un sistema nazionale di misura per realizzare una tracciabilità secondo standard nazionali;

lo sviluppo, il mantenimento, e il confronto degli standard di riferimento a livello nazionale e internazionale, compresi tutti i materiali di riferimento.

E l'obiettivo finale è palese:

Just as the nearly universal use of the International System of Units (SI) has brought coherence to all scientific and technological measurements, a worldwide consensus on the evaluation and expression of uncertainty in measurement would permit the significance of a vast spectrum of measurement results in science, engineering, commerce, industry, and regulation to be readily understood and properly interpreted. In this era of the global marketplace, it is imperative that the method for evaluating and expressing uncertainty be uniform throughout the world so that measurements performed in different countries can be easily compared.(ivi, VII)

La GUM è stata adottata dall'*American National Standards Institute* (ANSI) come "American National Standard". La sua designazione ufficiale è ANSI/NCSL Z540-2-1997 ed il suo titolo completo *American National Standard for Expressing Uncertainty--U.S. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.

It is noteworthy that NIST's adoption of the GUM approach to expressing measurement uncertainty was done with considerable forethought. Although quantitative statements of uncertainty had accompanied most NIST measurement

¹ La Guida afferma a questo proposito anche quanto segue:

The ideal method for evaluating and expressing uncertainty of the result of a measurement should be universal: the method should be applicable to all kinds of measurements and to all types of input data used in measurements

results, there was never a uniform approach at NIST to the expression of uncertainty. Recognizing that the use of a single approach within NIST instead of a variety of approaches would simplify the interpretation of NIST outputs, and that U.S. industry was calling for a uniform method of expressing measurement uncertainty, in 1992 then NIST Director J. W. Lyons appointed a NIST Ad Hoc Committee on Uncertainty Statements to study the issue. In particular, the Ad Hoc committee was asked to ascertain if the GUM approach would meet the needs of NIST's customers. The conclusion was that it most definitely would, and a specific policy for the implementation of the GUM approach at NIST was subsequently adopted. (sito web del NIST, <http://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/international2.html>)

Più recentemente (1998) è stata creata una nuova organizzazione internazionale per assumere la responsabilità del mantenimento e la revisione della GUM. Il nome dell'organizzazione è *Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM)* ed i suoi membri sono:

BIPM Bureau International des Poids et Mesures
 IEC International Electrotechnical Commission
 IFCC International Federation of Clinical Chemistry
 ISO International Organization for Standardization
 IUPAC International Union of Pure and Applied Chemistry
 IUPAP International Union of Pure and Applied Physics
 OIML International Organization of Legal Metrology

A causa dell'errore il risultato di una misura è espresso da un intervallo di valori. *Si tratta ora di decidere quale è il modo più conveniente per indicare tale intervallo.* La sola indicazione degli estremi dell'intervallo è molto scomoda nel caso in cui ci si debba servire del risultato della misura per fare dei calcoli, poiché si avrebbe a che fare con due valori. Si suole allora indicare il centro dell'intervallo e la sua semiampiezza. Così, se dobbiamo misurare uno spigolo e se la fine dello spigolo è compresa tra la linea dei 528 cm e quella dei 529 cm, si scrive $l = 528,5 \pm 0,5$ cm.

In questo modo, accanto al valore della grandezza, si è indicato l'errore con cui tale valore può ritenersi noto. La Guida ISO definisce *l'errore di misura* la "differenza fra il risultato di una misura e il valore vero del misurando" (vedi anche oltre). Diremo che la misura è tanto più precisa quanto più è piccolo l'errore. Sottolineo subito che la differenza tra l'approccio convenzionale e quello che sarà discusso nell'ultimo capitolo di questo scritto è *il concetto stesso di indeterminazione*. Anche nella teoria convenzionale per errore di misura non va ovviamente inteso un eventuale sbaglio, ad esempio di lettura (peraltro tali sbagli possono succedere per cui è sempre un buon metodo quello di fare due volte la misura per mettersi al riparo da simile eventualità). Ma, nell'approccio convenzionale, si può provare comunque, *almeno in linea di principio*, a ridurre l'errore. *L'inevitabilità delle incertezze* di misura fa sì invece che nel nuovo approccio non è dato di conoscere con esattezza, *neppure in teoria*, il valore del misurando.

When reporting the result of a measurement of a physical quantity, it is obligatory that some quantitative indication of the quality of the result be given so that those who use it can assess its reliability. Without such an indication, measurement results cannot be compared, either among themselves or with reference values given in a specification or standard. It is therefore necessary that there be a readily implemented, easily understood, and generally accepted procedure for characterizing the quality of a result of a measurement, that is, for evaluating and expressing its *uncertainty*. (ISO, 1993, VII)

Innanzitutto la Guida, dunque, preferisce al termine errore quello di *incertezza* (sottolineo qui che il concetto di incertezza ¹ quale *caratteristica quantificabile* è relativamente nuovo nella storia della misura). La Guida mette in evidenza poi che:

¹ Nella Guida ISO si può anche leggere:

In this Guide, great care is taken to distinguish between the terms "error" and "uncertainty". They are not synonyms, but represent completely different concepts; they should not be confused with one another or misused (ISO, 1993, 5)

when all of the known or suspected components of error have been evaluated and the appropriate corrections have been applied, there still remains an *uncertainty* about the correctness of the stated result, that is, a doubt about how well the result of the measurement represents the value of the quantity being measured. (*ibidem*)

Ne segue allora che ad ogni risultato di misura è associato un certo grado di incertezza, ove con questo termine si intenda qualitativamente

a parameter[...]that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand. (ivi, 2)

Sottolineo anche che non è certo chiaro che cosa debba intendersi per *valore vero*:

Although the final result is sometimes viewed as the best estimate of the “true” value of the measurand, in reality the result is simply the best estimates of the value of the quantity intended to be measured[...]The correct result may be called the best estimate of the “true value”, “true” in the sense it is a value of the quantity that is believed to satisfy fully the definition of the measurand. (ivi, 40)

E' in questo contesto che la Guida fornisce comunque una definizione di valore vero:

a value consistent with the definition of a given particular quantity ¹. (ivi, 32)

Va sottolineato l'utilizzo dell'articolo indeterminativo, in quanto ci possono essere più valori consistenti con la definizione di una data grandezza particolare. *Questa definizione, che può sembrare un po' vaga, è in effetti quella più pragmatica.* (Sul concetto di valore vero si veda anche il par. 9.5).

Nei paragrafi che seguiranno assumeremo comunque che si stiano effettuando misure su quantità per le quali il valore vero esiste. Pur riconoscendo infatti che il concetto di valore vero è, di fatto, una idealizzazione, ha senso parlare di valore *convenzionalmente vero* se con esso si intende quello attribuito a una grandezza particolare e accettato, per convenzione, in quanto avente un'incertezza appropriata all'uso che se ne sta facendo. Dovremo comunque riflettere sul fatto che non è corretto affermare che una ben determinata quantità osservabile abbia un valore completamente definibile. Dobbiamo limitarci a constatare che la media di un gran numero di osservazioni ha un determinato valore. Questa incertezza basilare è ora una delle nozioni fondamentali della fisica.

L'ultima affermazione viene spesso fatta risalire alla nascita della meccanica quantistica, come ho cercato di riassumere nel prossimo paragrafo. In generale dovremo accontentarci di valutare statisticamente (o meglio *probabilisticamente*, come vedremo nell'ultimo capitolo) *una certa incertezza* anche a livello macroscopico.

Il nuovo approccio alla definizione dell'incertezza di misura è reso possibile da (e allo stesso tempo contribuisce a definire un) nuovo paradigma scientifico. Nel momento in cui, come mostra Cini ², si mette in discussione il fatto che il mondo che ci circonda sia governato da leggi lineari che, in linea di principio, “ci garantiscono che quanto più piccole sono le perturbazioni casuali dei fattori d'ingresso, tanto più piccole sono le deviazioni che il sistema introduce rispetto ai valori prefissati dell'effetto voluto in uscita, la ricerca affannosa della precisione non garantisce più nulla”.

6.1 L'incertezza e la meccanica quantistica

God does not play dice with the universe.
Albert Einstein

¹ Dove per *value of a quantity* deve intendersi: “*magnitudo of a particular quantity generally expressed as a unit of measurement multiplied by a number*”

² Cini, 1994; vedi anche cap. 2

Who are you to tell God what to do?
Niels Bohr

God not only plays dice, but sometimes throws them where they cannot be seen.
Stephen Hawking

Nella meccanica classica è possibile prevedere il comportamento futuro di un corpo se si conoscono in un dato istante due informazioni sul suo stato, due cosiddette *coordinate canoniche*. Le più semplici tra queste coppie di coordinate sono la posizione e la velocità. Nelle esperienze che riguardano gli oggetti macroscopici si è sempre ammesso che fosse possibile assumere informazioni empiriche circa le coordinate canoniche senza perturbare lo stato degli oggetti in esame: si ammette, per esempio, che si possa misurare in un certo istante la posizione e la velocità di un corpo con precisione grande a piacere senza alterare il suo movimento. Se, invece di considerare un corpo macroscopico, si considera ora un oggetto atomico, ciò non risulta più possibile: non è possibile misurare con precisione grande a piacere le coordinate canoniche di un oggetto atomico.

Nel caso di un elettrone in movimento, per esempio, i tentativi di misurarne la posizione o velocità alterano inevitabilmente il suo stato di moto a causa della quantizzazione dell'energia tanto delle particelle quanto delle radiazioni luminose; quantizzazione che impedisce che si possa render piccolo a piacere il disturbo prodotto dalla interazione tra particella e apparato di misura. Questa perturbazione avviene in modo tale che se si cerca di diminuire l'incertezza della misurazione di una delle due coordinate, si interagisce con l'elettrone in maniera da aumentare l'incertezza con la quale si può misurare l'altra coordinata. La precisione nella misurazione di una coordinata canonica va necessariamente a discapito della precisione nella misurazione dell'altra. Per esempio, se si cerca di determinare con precisione assoluta la posizione di un elettrone in un dato istante facendolo scontrare con una lastra fotografica che ne registra l'arrivo, l'urto con la lastra consente effettivamente di annullare l'incertezza circa la misurazione della posizione, ma contemporaneamente altera del tutto il movimento della particella e dunque preclude la possibilità di ottenere informazioni su quella che era la velocità dell'elettrone nel momento in cui giungeva sulla lastra.

L'indagine sulle procedure sperimentali possibili per gli oggetti atomici condusse Heisenberg (nella primavera del 1927) a enunciare *il principio di indeterminazione*: nella misura delle coordinate canoniche di un oggetto atomico l'incertezza dei risultati di misura non si può rendere piccola a piacere. Il prodotto delle incertezze nella misurazione delle coordinate canoniche non può scendere sotto un limite inferiore. Perciò la diminuzione dell'incertezza, *ovvero l'aumento di precisione nella misurazione* di una coordinata, provoca necessariamente *un aumento di imprecisione nella misurazione* dell'altra. Non è così possibile conoscere contemporaneamente con precisione assoluta i valori di due coordinate canoniche che, come per esempio la posizione e la velocità di una particella, ne determinerebbero completamente, secondo le equazioni della dinamica classica, la traiettoria: il prodotto delle indeterminazioni non può mai essere inferiore al valore di una costante, la costante di Planck. (In questo senso, come più volte affermò Heisenberg, *il vero significato della costante di Planck è quello di costituire la misura universale dell'indeterminazione presente nelle leggi della natura*).

Planck (in *La conoscenza del mondo fisico* del 1929) scrive a questo proposito:

Questa relazione di indeterminazione di Heisenberg è per la meccanica classica qualcosa di assolutamente inaudito. Si è sempre saputo che ogni misurazione è gravata da una certa incertezza; ma si era sempre ammesso che con opportuni perfezionamenti dei metodi di misura si sarebbe potuta aumentare la precisione senza alcun limite. Ora invece bisogna porre per principio un limite alla precisione delle misurazioni, e lo straordinario è che questo limite non si riferisce alle singole grandezze, posizione e velocità, ma alla loro combinazione. (Planck, cit. in Gembillo, 2001, 185)

Il contesto in cui nasce il principio di indeterminazione è quello della *quantizzazione dell'energia*, cioè dell'enunciazione del *quanto di azione* espressa da Planck. Consideriamo che nella formulazione delle leggi matematiche classiche *non comparivano costanti aventi carattere di criterio universale di misura*. Come scrive lo storico della fisica Giuseppe Gembillo, citando Heisenberg (*Oltre le frontiere della scienza*),

diversamente da questa sorta di "invarianza di scala" tipica della meccanica classica, «nella teoria di Planck, invece, compariva il cosiddetto "quanto d'azione": un ben determinato metro di misura veniva introdotto nella natura. Fu chiarito che i fenomeni nei quali gli effetti sono molto grandi rispetto alla costante di Planck hanno luogo in modo essenzialmente diverso da quelli in cui gli effetti sono invece ad essa paragonabili». (Gembillo, 2001, 187)

Ciò significa

che a livello atomico i fenomeni manifestano «caratteristiche che sfidano la nostra intuizione immediata». (ivi, 187)

Possiamo ¹ quindi cercare di comprendere il nuovo l'atteggiamento presente tra gli scienziati agli inizi del '900 considerando che

i problemi principali dei fisici del Novecento erano secondo Heisenberg due: 1) riorientare la ricerca delle leggi fisiche dalle *proprietà* dei corpi alla loro *misurazione*; 2) cercare un contenuto fisico intuitivo per le nuove formulazioni teoriche che si andavano imponendo alla luce dei nuovi fatti sperimentali. (*ibidem*)

Ed è questo atteggiamento che portò alla enunciazione del principio di indeterminazione, e con esso ad una vera e propria *nuova concezione della natura*. Il dibattito sul fatto che tale concezione possa essere solo temporanea e molto presto superata da una nuova teoria fisica è decisamente aperto. Questo dibattito coinvolge ovviamente, anche e soprattutto, il concetto di "misura", o addirittura, una volta accettata la concezione offerta dalla meccanica quantistica, mette in discussione l'opportunità dell'uso stesso del termine "misura". Scrive il fisico inglese John Bell (ricordo che quest'ultimo diventò famoso per un lavoro, pubblicato sulla rivista *Physics* nel 1965, nel quale, riprendendo la discussione sull'interpretazione standard della meccanica quantistica, per la prima volta si mostrava che i differenti punti di vista ² potevano condurre, in condizioni particolari, a previsioni fisiche diverse ³):

The first charge against "measurement", in the fundamental axioms of quantum mechanics, is that it anchors there the shifty split of the world into "system" and "apparatus". A second charge is that the word comes loaded with meaning from everyday life, meaning which is entirely inappropriate in the quantum context. When it is said that something is "measured" it is difficult not to think of the result as referring to some pre-existing property of the object in question. This is to disregard Bohr's insistence that in quantum phenomena the apparatus as well as the system is essentially involved. If it were not so, how could we understand, for example, that "measurement" of a component of "angular momentum" - in an -arbitrarily chosen direction - yields one of a discrete set of values? When one forgets the role of the apparatus, as the word "measurement" makes all too likely, one despairs of ordinary logic - hence "quantum logic". When one remembers the role of the apparatus, ordinary logic is just fine.

In other contexts, physicists have been able to take words from everyday language and use them as technical terms with no great harm done. Take for example, the "strangeness", "charm", and "beauty" of elementary particle physics. No one is taken in by this "baby talk", as Bruno Touschek called it. Would that it were so with "measurement". But in fact the

¹ Gembillo fa a questo punto anche un interessante paragone:

Come, del resto, accade anche nell'altra teoria rivoluzionaria del Novecento, che nel caso specifico presenta le stesse caratteristiche della meccanica quantistica. Infatti, come rileva sempre Heisenberg, «già qualche anno dopo la scoperta di Planck vennero formulate, una seconda volta, leggi che contenevano un'analoga costante di misura. Questa seconda costante, la velocità della luce, era nota ai fisici già da tempo. Ma il suo ruolo fondamentale di metro di misura nelle leggi della natura è stato capito solo con la teoria della relatività di Einstein».

Ciò significa che Einstein ci ha fatto capire che «la velocità della luce è una misura posta dalla natura. Essa non ci dà informazioni su qualcosa di particolare bensì sulla struttura del tempo e dello spazio. Struttura che però non è direttamente accessibile alla nostra intuizione». (ivi 187-188)

² Einstein e Schrödinger da una parte, Bohr e Heisenberg dall'altra; vedi a questo proposito per esempio Cini, 1994

³ E sembra che gli esperimenti, almeno sino ad ora, diano ragione all'interpretazione standard di Bohr e Heisenberg

word has had such a damaging effect on the discussion that I think it should now be banned altogether in quantum mechanics. (Bell, 1989, 72)

Bell propone di utilizzare solo la parola *esperimento*:

Even in a low-brow practical account, I think it would be good to replace the word "measurement", in the formulation, by the word "experiment". For the latter word is altogether less misleading. However, the idea that quantum mechanics, our most fundamental physical theory, is exclusively even about the results of experiments would remain disappointing. In the beginning natural philosophers tried to understand the world around them. Trying to do that they hit upon the great idea of contriving artificially simple situations which the number of factors involved is reduced to minimum. Divide and conquer. Experimental science was born. But experiment is a tool. The aim remains: to understand the world. To restrict quantum mechanics to be exclusively about piddling laboratory operations is to betray the great enterprise. A serious formulation will not exclude the big world outside the laboratory. (*ibidem*)

Il principio di indeterminazione spiega, per Heisenberg, la *natura probabilistica* della nuova teoria, l'apparente caduta del determinismo. Infatti, se non siamo in grado di avere informazioni precise sullo stato di un oggetto, non potremo neppure fare previsioni *precise* sul suo comportamento futuro. La meccanica classica compie previsioni deterministiche solo a patto che siano disponibili informazioni sui valori delle coordinate canoniche dell'oggetto in esame in un dato istante e ammette che sia sempre possibile ottenere simili informazioni. Il principio di indeterminazione stabilisce invece l'impossibilità di conoscere con precisione le coordinate canoniche e dunque esclude che si possa prevedere con precisione il futuro comportamento di un oggetto.

E' il disturbo provocato dagli apparati di misura sulle particelle ad impedire di conoscere le coordinate canoniche, è l'interazione tra oggetto e apparato di osservazione a generare un comportamento apparentemente indeterministico degli oggetti microscopici. Heisenberg (in *I principi fisici della teoria dei quanti* del 1929) chiarisce:

In particolare, nella discussione di alcune esperienze, occorre prendere in esame quell'interazione tra oggetto e osservatore che è necessariamente congiunta a ogni osservazione. Nelle teorie classiche, quest'interazione veniva considerata o come trascurabilmente piccola o come controllabile, in modo tale da poterne eliminare in seguito l'influenza, per mezzo di calcoli. Nella fisica atomica, invece, tale ammissione non si può fare, poiché a causa della discontinuità degli avvenimenti atomici ogni interazione può produrre variazioni parzialmente incontrollabili e relativamente grandi. (Heisenberg, cit. in Gembillo 2001, 200)

Non avrebbe però senso, afferma in diverse occasioni Heisenberg, porsi la questione di come si comportino questi oggetti quando nessuno li osserva, quando nessuno strumento li disturba, e chiedersi se "in realtà" il loro comportamento è di tipo deterministico oppure no, in quanto è evidente che *lo scienziato non ha nulla da dire circa quello che fa la natura allorché nessuno la osserva*. Limitandosi a quel che dicono le esperienze, la scienza non può far altro che sottolineare come nel mondo atomico le esperienze non consentono di misurare con precisione quei dati che sarebbero necessari per poter effettuare una previsione deterministica e, da questo punto di vista, non ha senso discutere se la natura sia o no "in se stessa" intrinsecamente deterministica.

Fino agli inizi del XX secolo la natura appariva come un accadimento nello spazio e nel tempo regolato da leggi e nella descrizione di esso si poteva prescindere dall'uomo e dal suo intervento. La meccanica quantistica ha messo in crisi questo atteggiamento *anche in linea di principio*, partendo dall'indagine sul mondo atomico.

A proposito di ciò che definiamo microscopico va anche ricordato che negli ultimi tempi sono stati fatti notevoli progressi, sia concettuali che pratici, per riuscire a rivelare proprietà quantistiche di corpi di dimensioni ordinarie, senza dover ricorrere a mezzi così drastici come quello di disintegrarli nelle loro particelle costituenti:

Fenomeni come la superconduttività, la superfluidità, l'emissione di luce coerente laser, sono tutti interpretati come manifestazioni su scala macroscopica della meccanica quantistica. Si tratta sempre tuttavia di fenomeni risultanti dall'identico comportamento di un enorme numero di sistemi atomici ognuno dei quali, per la proprietà tipicamente quantistica dell'interferenza (sovrapposizione) fra stati fisici differenti, manifesta un effetto quantistico microscopico

che si somma a quello degli altri, dando origine a un effetto su scala macroscopica. Molto diversa sarebbe la situazione in cui un sistema macroscopico manifestasse proprietà quantistiche perché si trova in uno stato che è sovrapposizione di due stati macroscopici differenti[...]. Nel primo caso infatti i fenomeni nuovi e inaspettati che sono stati individuati pur non trovando spiegazione nell'ambito delle leggi classiche della meccanica e dell'elettromagnetismo, non appaiono in contraddizione con esse. Nel secondo caso invece, si tratterebbe di fenomeni che[...]sembrerebbero contraddire la nostra esperienza quotidiana sulle proprietà degli oggetti fisici che ci circondano. Sembra questo essere il caso dei fenomeni di *tunnelling* quantistico macroscopico (MQT) e di coerenza quantistica macroscopica (MQC). (Cini, 1994, 106-107)

Quest'ultima questione tuttavia è ancora controversa, come ci avverte Cini. Per alcuni infatti l'eventuale conferma sperimentale di questi fenomeni potrebbe addirittura vanificare ogni tentativo di definire una realtà oggettiva esterna alla mente umana. Per altri invece è possibile conciliare la convinzione nell'oggettiva concretezza del mondo macroscopico circostante con l'ambiguità delle proprietà del mondo quantico. Non è questo il luogo per approfondire tali quesiti, ma, sul piano epistemologico, possiamo comunque trarre conseguenze dalla portata generale: *oggetto dell'indagine scientifica non è la natura in sé, ma è sempre la natura subordinata al modo umano di porre il problema*¹.

Va, pertanto, evidenziata la validità a tutti i livelli delle conseguenze filosofiche dei principi della meccanica quantistica, conseguenze che i fisici hanno potuto stabilire agli inizi del '900, e sulla quale i filosofi hanno dibattuto sin dalle prime origini della *Filosofia naturale*.

Il filosofo greco Protagora (490-410 A.C.) affermava che la verità non può essere concepita come sapere assoluto, espressione dell'immutabile natura delle cose, ma risulta relativa alla prospettiva e al campo di attività dei soggetti umani: "*l'uomo è misura di tutte le cose*" è la famosa frase che gli si attribuisce per riassumerne la filosofia.

6.2 Le cause di errore

*Se chiudiamo la porta di fronte all'errore,
come farà la verità ad entrare?*

Rabindranath Tagore

Nella *teoria convenzionale*, gli errori, dovuti al fatto che non esistono né strumenti perfetti né condizioni ideali in cui effettuare la misura, possono essere di natura sia *sistematica che accidentale*:

- a. gli *errori sistematici* sono dovuti a imperfezioni strumentali o a una procedura sperimentale non corretta. Essi tendono ad alterare la misura sempre nello stesso modo e possono essere individuati e corretti solo utilizzando strumenti e tecniche differenti (quindi, *nella teoria convenzionale, non si ha modo di fatto di trattare gli errori sistematici*, almeno nel contesto di una specifica realizzazione di un esperimento: bisogna appunto utilizzare altre tecniche e strumenti);

gli *errori casuali o accidentali* sono invece dovuti a tutte le piccole variazioni delle condizioni ambientali che non si riescono a tenere completamente sotto controllo. Essi influenzano la misura in modo casuale e non possono, *in pratica*, mai essere eliminati (vedi anche par 6.6).

Vediamo meglio il concetto di errore sistematico.

¹ La stessa formulazione delle *leggi della termodinamica*, che valgono a livello macroscopico, aveva a suo tempo introdotto un ideale metodologico diverso da quello fino ad allora dominante: anziché cercare la spiegazione dei fenomeni nell'elaborazione di modelli ipotetici miranti a raffigurare una realtà profonda, nascosta dietro il velo delle apparenze, essa si *accontentava* di costruire equazioni matematiche idonee a stabilire collegamenti tra grandezze che sono state introdotte artificialmente e convenzionalmente per ragioni di opportunità teorica ed utilità pratica

Consideriamo la misura dello spigolo di un tavolo. Se il nostro metro campione è fatto di un materiale con un grosso coefficiente di dilatazione termica è possibile trovare due risultati diversi a seconda della temperatura a cui si opera. Se non si tiene conto di tale fenomeno si commette un errore sistematico. Ancora può succedere che il campione da noi usato non corrisponda alla sua definizione per cui ripetendo la misura con un altro campione troviamo un altro risultato.

Errori di questo tipo sono detti sistematici perché, a parità delle condizioni in cui si svolge la misura, essi influenzano il risultato della misura sempre nello stesso senso. Essi sono quindi ineliminabili con ripetizione di misure e possono essere “scoperti” solo cambiando metodo, strumento o ambedue (in tal caso ci si aspetterebbe di trovare infatti lo stesso risultato: l'eventuale differenza tra i due risultati da un'idea dell'importanza degli errori sistematici presenti).

Vediamo un esempio in cui possono essere presenti anche errori casuali. Se misuriamo il tempo impiegato da un oggetto a cadere da un'altezza nota utilizzando un cronometro manuale, la misura risulterà alterata da un grosso errore sistematico, dovuto ai nostri tempi di reazione nell'utilizzo del cronometro, e non sarà quindi accurata, indipendentemente dal fatto che il cronometro sia preciso o meno. Perché la misura sia accurata, occorre collegare il nostro cronometro a un sistema di fotocellule. Se usiamo un cronometro al decimo di secondo, la precisione del risultato non potrà mai essere migliore di un decimo di secondo, poiché il nostro strumento di misura non è in grado di risolvere intervalli di tempo inferiori e, se ripetiamo molte volte la misura, otterremo sempre lo stesso risultato. Se utilizziamo ora un cronometro al millesimo di secondo, la precisione aumenta, ma se ripetiamo la misura molte volte troveremo risultati leggermente diversi tra loro. Ora la precisione della misura è limitata non dallo strumento ma dagli errori casuali (dovuti p.e. a variazioni di temperatura o di pressione, o a correnti d'aria), il cui effetto è di alterare il fenomeno fisico che stiamo misurando. Poiché le variazioni agiscono in modo casuale, causando a volte errori per eccesso e altre volte per difetto, la precisione della misura può essere aumentata ripetendola molte volte e prendendo poi il *valore medio* (vedi par 6.5) dei risultati ottenuti.

Anche solo da questi brevi cenni appare chiaro che la discussione degli errori sistematici, così fondamentale nell'acquisizione dell'informazione sperimentale, è molto delicata, anche perché, per la loro stessa natura, non si può mai essere sicuri di aver tenuto conto completamente di tale tipo di errori (un possibile approccio che supera la usuale classificazione in errori casuali e sistematici sarà discusso nel par. 9.5).

In generale, *le cause degli errori sono comunque molteplici*. La Guida ISO introduce il seguente elenco:

Incompleta definizione del misurando.

Ad esempio l'“accelerazione di gravità al livello del mare” non definisce completamente il misurando in quanto essa dipende anche dalla latitudine.

Imperfetta realizzazione della definizione del misurando.

Molto spesso non si riesce a realizzare sperimentalmente un dato fenomeno fisico così come lo si è delineato concettualmente. Consideriamo la caduta di un grave: se si vuole verificare la legge del moto di un corpo sottoposto alla forza di gravità occorre eliminare l'effetto della presenza dell'aria che introduce un'altra forza i cui effetti sulle misure sono ovviamente di natura sistematica.

Campione non rappresentativo, ovvero il campione misurato non rappresenta il misurando definito.

Consideriamo per esempio i sondaggi. Talvolta, in mancanza di un modello teorico per la scelta del campione, si rischia di effettuare un sondaggio su un campione appunto non rappresentativo.

Imperfetta conoscenza delle condizioni ambientali di influenza o inadeguata conoscenza degli effetti di tali condizioni.

Ad esempio una misura di precisione può essere falsata dalla non esatta conoscenza della temperatura ambientale.

Errore di lettura di uno strumento.

La lettura delle scale analogiche dipende dall'acuità visiva e dall'abilità di stima dello sperimentatore. Ad esempio, un errore grossolano è quello di *parallasse*.

Risoluzione finita o soglia di discriminazione dello strumento.

Ad esempio, se la lettura avviene con uno strumento digitale si è limitati alla cifra meno significativa del display anche se la qualità del *segnale di misura* è tale da essere significativamente sensibile a variazioni di valori ben minori dell'entità dell'ultima cifra del display.

Valori inesatti dei campioni e dei materiali di riferimento.

Un caso particolare è quello relativo ad un difetto di taratura (l'impiego di campioni costituisce, nella maggioranza dei casi, una difficoltà e nella pratica giornaliera si fa sempre uso di apparecchi già tarati): anche se il funzionamento dello strumento può apparire normale, in realtà non è verificata la corrispondenza prevista tra la sua risposta ed il valore della grandezza. Sarebbe come misurare delle distanze con un regolo che riteniamo essere lungo un metro, ma che in realtà è per esempio 99.5 centimetri. Il modo di ovviare a questo tipo di errore è quello di controllare la taratura dello strumento prima, ed eventualmente anche dopo, l'esecuzione della misura. Inoltre sono sempre possibili errate condizioni di impiego. Anche se lo strumento in sé non presenta difetti, esso può essere impiegato in modo non corretto, come per esempio una bilancia tenuta in posizione non orizzontale, ed in particolare non nelle condizioni in cui è previsto essa abbia la taratura giusta.

Valore inesatto di costanti e altri parametri che intervengono nell'analisi dei dati.

Spesso le misure indirette dipendono da costanti e parametri misurati dallo stesso sperimentatore, da suoi colleghi o semplicemente riportate su articoli o libri. Ogni incertezza su queste grandezze si *propaga* su quelle misurate.

Approssimazioni e assunzioni che intervengono nel metodo e nella procedura di misura.

Ad esempio, nel modello teorico elementare che descrive l'oscillazione del pendolo sono usualmente trascurati gli effetti che derivano dal fatto che l'angolo di oscillazione è diverso da zero.

Variazioni in osservazioni ripetute del misurando sotto condizioni di misura apparentemente identiche.

Queste variazioni sono evidentemente quelle legate agli errori casuali (vedi par. 6.6)

Ovviamente, nella maggior parte delle misure, lo sperimentatore fa parte integrante del processo di misura. Il risultato dipende molto da abilità ed esperienza di chi effettua le misure, sia per quanto riguarda la manualità nell'operare gli strumenti, e in particolare nella lettura di strumenti analogici, che per la capacità di vagliare i vari contributi all'errore di misura. Bisogna inoltre

tener conto dell'interazione tra strumento e sistema in misura. Ogni strumento, per operare, deve essere messo in relazione col fenomeno fisico di cui si vuole misurare una grandezza. Da ciò derivano due diversi tipi di errori sistematici:

- uno stesso strumento può essere messo in relazione col fenomeno per mezzo di dispositivi diversi, ciascuno dei quali può a sua volta introdurre un errore sistematico. Per es. misure di spessore eseguite con un calibro risentono di eventuali corpi estranei, come polvere, vernice, ecc.,

- quale che sia il sistema usato per farlo, la parte sensibile dello strumento viene posta in relazione col sistema fisico. Come conseguenza quest'ultimo, almeno in linea di principio, ne risulta sempre modificato, nel senso che il sistema fisico su cui si esegue la misura non è più quello in studio, ma uno nuovo che comprende, come parte non sempre trascurabile, anche lo strumento stesso con la sua fenomenologia. In altri termini l'inserzione dello strumento modifica il fenomeno iniziale introducendo in esso variazioni sistematiche che possono essere apprezzabili.

6.3 Documentazione del lavoro sperimentale

Un'importante fase del processo di misurazione è ovviamente quella della *rappresentazione dei risultati*.

Particolare attenzione deve sempre essere utilizzata *nella stesura scritta dei risultati originali di una misura*. La documentazione del lavoro sperimentale consiste, di norma, in ¹:

1. *Quaderno di laboratorio:*

rappresenta il diario di bordo dello sperimentatore. In esso sono riportati *i dati originali* ed eventuali informazioni che potranno servire alla loro elaborazione.

2. *Nota tecnica:*

è indirizzata ai colleghi di un programma di ricerca. Essa è comunque utile anche quando si lavori in piccoli gruppi e addirittura alla stessa persona che ha eseguito le misure. Nella nota tecnica si cerca di descrivere il più fedelmente possibile *l'apparato sperimentale* e le *procedure eseguite*, in modo da fornire le informazioni sufficienti per poter ripetere le misure nelle stesse condizioni.

3. *Articolo scientifico o tecnico:*

rappresenta il punto conclusivo di un esperimento o di una serie di esperimenti. Riassume il risultato di un lavoro di ricerca ed è infatti utilizzato come uno dei criteri di valutazione delle capacità di un ricercatore. Deve contenere una descrizione accurata dell'*oggetto della misura* in modo tale da permettere ad altri sperimentatori *di riprodurre il risultato*.

Vediamo ora come si redige un quaderno di laboratorio. Durante lo svolgimento di un esperimento è infatti indispensabile documentare il lavoro svolto. Per mantenere un buon quaderno di laboratorio è importante partire da alcune considerazioni.

- Esso rappresenta la sorgente primaria dei dati sperimentali. Va compilato durante le misure e deve poter essere riletto a distanza di tempo.
- Va compilato prima, durante e dopo la raccolta di dati.

¹ Molte delle informazioni di questo paragrafo sono state tratte dal sito Internet <http://zeual1.roma1.infn.it/~agostini/prob+stat.html>, gestito dal prof. Giulio D'Agostini, dove si può trovare una descrizione completa di tutti questi aspetti.

- Va sottolineato che nel mondo della ricerca contemporanea, specialmente in fisica, gli esperimenti tendono ad essere sempre più complessi e i calcolatori svolgono un ruolo essenziale nell'acquisizione, archiviazione e trattamento dei dati. Il quaderno *comunque esiste ancora*, anche se rappresenta soltanto la parte cartacea di una enorme massa di informazione dislocata su dischi di computer ed altri supporti di dati.

Alcune raccomandazioni per una buona conduzione del quaderno consistono nel:

- *Numerare le pagine.*
- Prima di cominciare ogni misura annotare immediatamente *data*, ora e nome dei *partecipanti* all'esperienza.
- Indicare il *titolo* dell'esperienza.
- Elencare il *materiale* a disposizione e gli strumenti utilizzati.
- Aggiungere un disegno dell'apparato con sopra i vari simboli utilizzati.
- Registrare i valori delle grandezze che possono influenzare (secondo il parere dello sperimentatore) i risultati delle misure (ad esempio temperatura, umidità, ecc.).
- Preparare subito delle *tabelle* su cui riportare i valori letti e le successive elaborazioni previste

6.4 Un esempio istruttivo

Il lavoro dello sperimentatore è davvero complesso e non seguire sempre tutte le procedure può portare a risultati disastrosi, anche da parte di persone esperte ¹. Molte sono le vicende storiche che si potrebbero citare al riguardo, ma esemplare è il famoso caso verificatosi nel 1989 a proposito della pretesa scoperta della *fusione fredda*.

Nel marzo del 1989 B. Stanley Pons, un chimico americano, annunciò di avere ottenuto, insieme con Martin Fleischmann, un chimico inglese, una reazione di fusione controllata in una piccola cella elettrolitica. Nei loro esperimenti essi cercarono di fondere due nuclei di deuterio (idrogeno-2) ². Quando due nuclei di deuterio si fondono, formano un nucleo di trizio (idrogeno-3) e un protone, oppure un nucleo di elio-3 e un neutrone, o, ancora, un nucleo di elio-4 e un raggio gamma. Un nucleo di deuterio è composto da un protone e un neutrone. Quando, come normalmente accade, intorno al nucleo di deuterio, vi è un elettrone, abbiamo un atomo di deuterio (idrogeno pesante), che a temperatura ambiente si trova allo stato gassoso. La difficoltà di raggiungere la fusione consiste nel fatto che due nuclei di deuterio si respingono l'un l'altro elettricamente perché sono entrambi caricati positivamente, e normalmente non si avvicinano abbastanza per interagire. E' dunque chiaro che la fusione fredda è possibile se due atomi di deuterio possono essere spinti l'uno contro l'altro. E' noto anche che molti metalli, incluso il palladio, assorbono l'idrogeno. Non sarebbe, dunque, ragionevole supporre che, se il deuterio fosse incorporato a forza nel palladio usando della corrente elettrica, gli atomi di deuterio potrebbero essere spinti l'uno verso l'altro abbastanza perché i loro nuclei si fondano? In effetti, per varie ragioni, ciò non è affatto così scontato. Su questa ipotesi si basavano comunque gli esperimenti di Pons e Fleischmann. I due scienziati commisero numerosi errori per quanto riguarda le misurazioni e *soprattutto non produssero una adeguata documentazione*. Ritengo utile leggere la critica centrale di Cromer:

¹ E' per questo che le considerazioni riportate al paragrafo precedente, che possono apparire di scarso interesse teorico, assumono un'importanza fondamentale nel contesto dei temi trattati in questo scritto

² Oggi sappiamo che non è mai stato possibile riprodurre tale esperimento con gli stessi risultati. Per dettagli su questa vicenda vedi Cromer, 1993

L'articolo di Fleischmann e Pons non offre alcun dato a sostegno di tutte le sue pretese stravaganti. Per quanto Fleischmann e Pons abbiano misurato i cambiamenti di temperatura nella loro cella di fusione, *non forniscono alcun dato sulle loro misurazioni. Riportano solo numeri altamente elaborati, senza dare alcuna indicazione su come siano stati calcolati.* Quando videro solo un decitrilionesimo (10^{-13}) dei neutroni che una fusione dell'entità da loro asserita avrebbe dovuto produrre, affermarono che si trattava della scoperta "di uno o più processi nucleari sinora sconosciuti". Quando arrivarono un mattino al loro laboratorio e trovarono la loro cella distrutta per il calore, affermarono che ciò era avvenuto a causa della fusione. (Cromer, 1993, trad. it. 227) (Il corsivo è mio)

Anche le conclusioni sono, sempre con riferimento alla fase di documentazione delle misurazioni (che permette alla comunità scientifica di valutare e riprodurre correttamente un esperimento), molto istruttive:

Nessuno, indipendentemente dalla sua esperienza, può effettuare un esperimento così complesso senza la guida e le critiche degli altri. L'isolamento è la morte della scienza. (ivi, 228)

Ho voluto brevemente accennare a questi fatti, ormai di dominio comune, solo per sottolineare con un esempio davvero eclatante quanto sia importante la fase relativa alla documentazione di una misurazione. La consapevolezza di tutto ciò è ben presente nelle relative indicazioni della Guida ISO:

Although in practice the amount of information necessary to document a measurement result depends on its intended use, the basic principle of what is required remains unchanged: when reporting the result of a measurement and its uncertainty, it is preferable to err on the side of providing too much information rather than too little. For example, one should

describe clearly the methods used to calculate the measurement result and its uncertainty from the experimental observations and input data;

list all uncertainty components and document fully how they were evaluated;

present the data analysis in such a way that each of its important steps can be readily followed and the calculation of the reported result can be independently repeated if necessary;

give all corrections and constants used in the analysis and their sources. (ISO, 1993, 8)

6.5 Media e deviazione standard

Discutiamo ora il problema della ripetizione della misura e di che cosa ci si attende da essa. Esistono due possibilità :

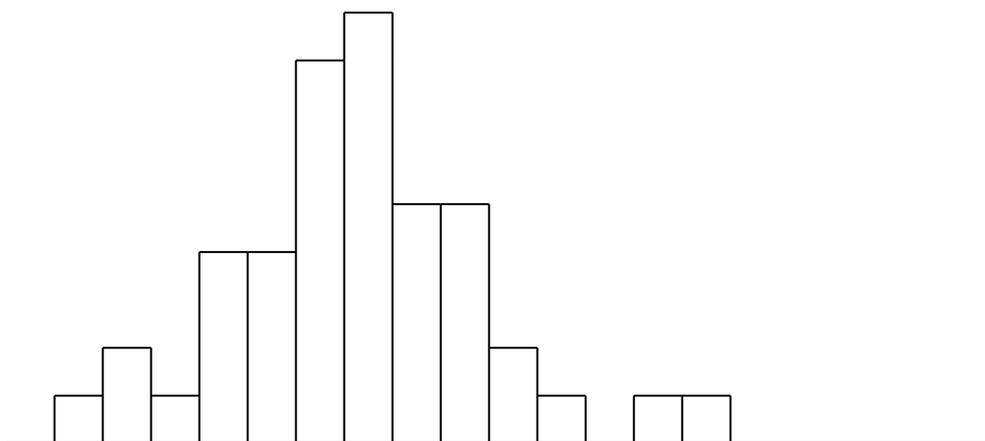
- a) si ottiene sempre lo stesso risultato entro i limiti di sensibilità del campione;
- b) si ottengono risultati differenti, cioè con differenze non comprese nella sensibilità.

Nel primo caso il risultato è ovvio, e per l'errore si raccomanda di norma di indicare la metà della più piccola divisione segnata sulla scala dello strumento. Veniamo al secondo caso. Abbiamo già visto che possiamo definire come casuale quel tipo di errore, dovuto all'impossibilità pratica di avere sotto controllo infinitamente accurato tutte le variabili in gioco, che può far variare il risultato di una misura con eguali probabilità nei due sensi. Le considerazioni che seguono servono per indicare come si fa, in un caso come questo, quando cioè l'elevata sensibilità del campione mette in evidenza la presenza degli errori casuali, ad indicare un valore ed un errore per un primo risultato di una misura.

E' conveniente rappresentare i risultati delle misure in un grafico (istogramma, vedi figura), in cui si divide l'asse X in intervalli di ampiezza uguale o multipla del valore della sensibilità (non avrebbe senso usare intervalli minori della sensibilità), riportando poi sull'asse y, in corrispondenza

ad ogni intervallo, un segmento di lunghezza proporzionale al numero di misure che hanno dato un risultato compreso nell'intervallo stesso. Il modo di distribuirsi dei risultati è suscettibile, come vedremo più avanti, di interpretazioni quantitative; tuttavia la semplice osservazione di tali distribuzioni permette conclusioni e stime qualitative. E' ragionevole ad esempio supporre che, purché le misure siano eseguite con cura, i "grandi" valori degli errori siano meno probabili dei "piccoli" valori. Di conseguenza ci si può aspettare una distribuzione di valori caratterizzata da un addensamento di risultati in alcuni intervalli ed approssimativamente simmetrica. Segnando con una crocetta per ogni misura, per l'esempio prima citato, si otterrebbe l'istogramma in figura. Risulta ragionevole, data una distribuzione circa simmetrica e dotata di massimo:

- 1) adottare come stima migliore del misurando la media aritmetica dei valori ottenuti. Essa è infatti il valore da cui si discosta meno il maggior numero dei risultati (questa grandezza viene anche spesso chiamata *media dei campioni*);
- 2) assegnare come errore a tale valore la semilarghezza della distribuzione (cioè il modulo della semidifferenza tra il valore massimo e il valore minimo riscontrati). Questo errore, cui si dà nome di *semidispersione massima*, ha il significato che se si ripetesse ancora una volta la misura si troverebbe "quasi certamente" un valore compreso tra i limiti definiti dalla media aritmetica più o meno la semidispersione.



Vediamo ora di definire meglio alcuni concetti appena introdotti, insieme ad altri che ci saranno utili in tutta la nostra trattazione.

Supponiamo di voler misurare con accuratezza il diametro di un tubo cilindrico con un micrometro. Supponendo che il tubo abbia un "diametro vero", noi probabilmente otterremmo risultati diversi se ripetessimo più volte la misura. Può darsi infatti che alcune volte la vite micrometrica venga stretta più che in altre, vi possono essere piccole particelle di polvere, può avvenire che si compiano piccoli errori nell'apprezzare i decimi della minima divisione sulla scala, ecc...Comunque, si intuisce che dovrebbe potersi ottenere un risultato più attendibile per il diametro utilizzando dieci misure piuttosto che una soltanto.

Che uso faremo dunque ora delle dieci misure? Il primo passo è calcolare la media aritmetica. La media di una serie di N numeri è definita come la somma di tutti i numeri, divisa per N . Se abbiamo dieci misure, ne facciamo la somma e la dividiamo per dieci. In termini più generali chiamiamo con x_i il risultato di una generica misura. Se si hanno dieci osservazioni, l'indice i può assumere un qualunque valore compreso fra 1 e 10. Se le misure sono N , i varia da 1 a N . In generale, possiamo definire la media di una serie di numeri x_i così:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Nel seguito una barretta sulla lettera significherà sempre un valore “medio”.

Ci sono buone ragioni per ritenere la media aritmetica di una serie di misure come la migliore stima del valore vero della grandezza misurata.

Una volta ottenuta una serie di misure x_i , potremmo voler disporre di un criterio per stabilire quantitativamente in che modo le singole osservazioni sono distribuite intorno alla media. Una descrizione quantitativa dalla dispersione delle misure ci darà un’idea della precisione di queste misure.

Per ottenere una simile descrizione quantitativa, definiamo dapprima per ogni misura x_i lo *scarto* d_i . Lo scarto d_i è definito come la differenza tra ogni misura x_i e la media della serie di numeri, vale a dire:

$$d_i = x_i - \bar{x}$$

(Alcuni autori chiamano d_i “deviazione” invece che scarto: i due termini sono equivalenti).

Si noti che non sarebbe corretto chiamare d_i l’“errore” sulla misura x_i , perché la media non è affatto il valore vero della grandezza osservata. Si può solo dimostrare che in molti casi, se si esegue un gran numero di osservazioni (*ammettendo che non intervengano errori sistematici*), allora gli scarti d_i approssimano i veri errori di cui le misure x_i sono affette.

Questo è il caso, per esempio, in cui gli errori siano distribuiti secondo la legge di Gauss, o “funzione normale”, che discuteremo oltre.

Per il modo in cui abbiamo definito la media e gli scarti, la “media degli scarti” è sempre zero. Ciò significa che, la media degli scarti non serve in pratica per una caratterizzazione della dispersione. Forse un’idea migliore sarebbe quella di prendere il valore assoluto di ogni scarto, e calcolare la media dei valori assoluti. Otteniamo così la cosiddetta *deviazione media*, che si indica con α , cioè:

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |d_i| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|$$

Questa grandezza si indica spesso come deviazione media, ma si tratta di una denominazione imprecisa, come anche l’altra: “scarto medio”. Essa non è infatti lo scarto medio, bensì la media dei valori assoluti degli scarti. Questa grandezza è talora usata per caratterizzare la dispersione delle misure. Per una serie di motivi però, essa risulta meno utile della *deviazione standard*. Nel definire quest’ultima aggiriamo il problema di trattare con degli scarti negativi, quadrando ogni deviazione e ottenendo così una quantità sempre positiva. Allora calcoliamo la media dei quadrati e poi estraiano la radice quadrata del risultato ottenuto.

Così la deviazione standard risulta essere la radice quadrata della media dei quadrati degli scarti. La deviazione standard si indica generalmente con σ e la relazione che la definisce è:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Il quadrato della deviazione standard, σ^2 , è detto *varianza*.

Si noti che σ ha sempre le stesse dimensioni di x_i e che è sempre positiva. Vedremo nel prossimo paragrafo (e nel cap. 7) che uso fare di queste definizioni.

6.6 Errori casuali

Per il postulato di invarianza spazio-temporale ci si aspetterebbe, in teoria, che la stessa operazione di misura, fatta con uno strumento infinitamente preciso ed infinitamente sensibile, dia sempre lo stesso risultato a parità di condizioni. In pratica però questo non è vero: ripetendo più volte la misura si trovano valori diversi anche operando rigorosamente nelle stesse condizioni.

Qualitativamente (nella teoria convenzionale) si può dare ragione di questo fatto, per fenomeni macroscopici, considerando che quando si parla di condizioni si intende qualcosa di generale, mentre *il valore assunto da una grandezza è poi dovuto all'effetto concomitante di tanti contributi* di cui non si riesce a tener conto individualmente nell'analisi delle condizioni generali. Per esempio, le forze di attrito sono date dall'effetto delle tante azioni, non valutabili, di ciascuna delle parti dei due corpi in contatto; la corrente ed il potenziamento elettrico sono dovuti in realtà al moto ed alla posizione di moltissimi piccoli corpi elettricamente carichi, i quali però sono soggetti anche a moti disordinati, come quelli dovuti alla agitazione termica (per fenomeni microscopici, invece, per i quali non ha senso parlare di condizioni di carattere generale, vale come visto il principio di indeterminazione che pone un limite superiore alla quantità di informazione che si può ottenere su di essi).

Ciò vale anche per *l'operazione di misura*, dato che *il funzionamento di ogni strumento è determinato da fenomeni fisici*: ad una non riproducibilità intrinseca del valore di una grandezza (con G indico qui di nuovo una grandezza fisica e con $V(G)$ il *valore vero*, sconosciuto) si sovrappone una non-riproducibilità del funzionamento dello strumento. Per l'osservatore, la cui unica informazione è la risposta dello strumento, i due effetti sono sovrapposti e possono manifestarsi o no a seconda della loro entità confrontata con l'errore di sensibilità dello strumento stesso, $\Delta V(G)$.

Da queste considerazioni segue che $V(G)$ non può essere conosciuto se non con una certa indeterminazione, chiamata appunto *errore casuale*.

Nel caso in cui le misure siano ripetibili (ciò che non sempre accade) si danno dunque le seguenti possibilità:

- **Errori massimi.** Se ripetendo la misura si ottiene sempre lo stesso risultato significa che $\Delta V(G)$ è molto maggiore della deviazione standard σ della distribuzione di valori prodotta dalla fluttuazione intrinseca di G e dalle fluttuazioni introdotte dall'apparato di misura a causa della sua limitata precisione. In questo caso, pertanto, $\Delta V(G)$ assume il significato di *errore massimo*.
- **Errori statistici.** Nel caso opposto, $\Delta V(G) \ll \sigma$, ripetendo l'operazione di misura si ottengono effettivamente valori diversi, il cui istogramma approssima tanto meglio la distribuzione che esso rappresenta sperimentalmente, generalmente una gaussiana (vedi par 7.5), quanto più $\Delta V(G)$ è minore di σ e quanto maggiore è il numero delle misure effettuate. In questo caso si usa rappresentare l'indeterminazione sulla conoscenza di $V(G)$ con σ , che è in effetti la stima di σ ottenuta sperimentalmente dai dati (vedi par 7.4), e questa indeterminazione è detta *errore statistico* (vedi par 7.5).

6.7 Misure non ripetibili

Non sempre, però, le misure sono ripetibili.

Può capitare di riuscire ad eseguire una sola operazione di misura, o perché si è nell'impossibilità, per varie ragioni, di effettuarne più di una, oppure perché è il fenomeno ad essere unico, per lo meno in determinate condizioni, come capita per es. in molti fenomeni naturali (eclissi, fenomeni meteorologici, ecc...).

In quest'ultimo caso, naturalmente, non ha senso parlare di fluttuazione intrinseca della grandezza, per cui l'indeterminazione sulla conoscenza della $V(G)$ è dovuta solo alle caratteristiche dell'apparato. Queste vanno valutate separatamente eseguendo misure ripetibili su una grandezza omogenea a quella in misura e preferibilmente nelle stesse condizioni, anche per tenere conto di eventuali effetti sistematici.

6.8 Errori massimi su funzioni di grandezze. La propagazione degli errori.

In una misura indiretta, il valore di una grandezza fisica viene determinato utilizzando una formula (spesso denominata *equazione di misura*) che lega tale grandezza ad altre quantità già misurate. L'errore nasce in questo caso dagli errori associati a queste quantità; si parla a tale proposito di *propagazione degli errori*.

In particolare, se una grandezza è funzione di altre, misurate effettivamente, ha interesse un calcolo a priori del massimo errore da cui può essere affetta: cioè dell'intervallo, intorno al suo valore medio, entro cui varieranno i risultati della misura, quando le grandezze misurate assumano valori compresi entro i rispettivi errori.

Vogliamo in altre parole vedere come si calcola in generale l'errore massimo su una grandezza y che sia funzione di altre grandezze misurabili direttamente (x_1, x_2, \dots).

Sappiamo dall'analisi matematica che il differenziale totale della funzione, $dy = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)dx_1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)dx_2 + \dots$, rappresenta la variazione infinitesima che il valore $y(x_1, x_2, \dots)$ subisce per variazioni infinitesime delle singole variabili. Facendo l'ipotesi che tale espressione *sia sufficientemente approssimata anche per variazioni finite* ma piccole delle variabili, considerando dx_1, dx_2, \dots come gli errori da cui sono affette le grandezze misurate, otteniamo l'errore risultante su y :

$$\Delta y \approx \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots$$

ad esempio

$$y = x_1 \pm x_2 \quad \Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2$$

Il valore assoluto delle derivate sta a significare che dovremmo calcolare l'errore massimo nel modo più "pessimista", che è quello che si ottiene quando gli errori sulle singole misure non si compensano, ma si combinano in modo da far variare y sempre nello stesso senso. (*Nell'ultimo capitolo questo risultato sarà discusso criticamente*).

6.9 Errore relativo ed errore percentuale

Definiamo *errore relativo* il rapporto tra l'errore e il valore della grandezza

$$\epsilon_r = \frac{\Delta y}{y}$$

L'*errore percentuale* si ottiene semplicemente moltiplicando per 100 l'errore relativo.

L'errore relativo e l'errore percentuale permettono di confrontare la precisione di misura di più grandezze molto meglio che non l'errore assoluto. Se si tratta poi di grandezze non omogenee l'errore assoluto non permette affatto tale confronto. Diciamo che una misura è tanto più precisa quanto più è piccolo l'errore relativo.

6.10 Digressione sul numero di cifre significative. Esempio dell'errore massimo.

Dovrebbe già essere chiaro che *le cifre con cui si scrive un errore non possono essere arbitrarie*. Per discutere in pratica questa affermazione vediamo il caso dell'errore massimo per misure dirette ed indirette.

Caso di misure dirette: analizziamo prima l'errore di sensibilità (che si attribuisce alla misura quando ripetendola si ottiene sempre lo stesso valore).

Nell'approccio convenzionale è stabilito che *non ha senso* leggere una frazione più piccola di $\frac{1}{2}$ della divisione di scala dello strumento.

Scrivendo, come si suole, 0,5 div, non si intende che l'errore non è 0,4 o 0,6 div, ma che non è 0,25.

Caso di misure indirette: ricordiamo che l'errore (come differenziale) è calcolato combinando nel più pessimista dei modi i singoli errori massimi e risulta quindi, in generale, sovrastimato rispetto all'effettiva dispersione dei valori di volta in volta calcolati in base alle misure fatte. L'errore relativo indica il grado di precisione della misura e quindi il numero di cifre significative per essa.

6.11 Errori statistici su funzioni di grandezze

Nel par. 6.8 abbiamo analizzato il caso della propagazione degli errori massimi. Vediamo ora il caso degli errori statistici.

Per una misura indiretta di una grandezza fisica l'errore statistico si ricava dagli errori sulle misure dirette delle grandezze a cui la prima è legata da una relazione analitica che sarà qui indicata con $y=f(x_1, x_2, \dots)$. Come già visto per gli errori statistici generati da misure dirette, anche in questo caso si usa rappresentare l'indeterminazione con σ , che è in effetti la stima di σ ottenuta sperimentalmente dai dati (vedi par 7.4) ed è anch'essa detta errore statistico. Con considerazioni di carattere statistico appunto (in parte analoghe a quelle viste nel par. 6.8), si può mostrare che la $\sigma(y)$ si può ricavare in buona approssimazione dalle $\sigma(x_i)$ mediante l'espressione

$$\sigma^2(y) = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \sigma^2(x_1) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \sigma^2(x_2) + \dots$$

per esempio

$$y = x_1 \pm x_2 \Rightarrow \sigma(y) = \sqrt{\sigma^2(x_1) + \sigma^2(x_2)}$$

Nell'ultimo capitolo *si discuterà criticamente anche l'interpretazione di quest'ultima formula*.

Prima però, nel prossimo capitolo, si definirà, una volta introdotti i concetti di probabilità e funzione di distribuzione di probabilità, come meglio stimare le $\sigma(x_i)$ e come meglio utilizzarle per stimare le indeterminazioni.

7. UNO SGARDO ALLA “COMBINAZIONE DELLE OSSERVAZIONI”

The rules of clockwork might apply to familiar objects such as snookerballs, but when it comes to atoms, the rules are those of roulette.

Paul Davies

Nei capitoli precedenti ho discusso il significato da attribuire al valore di una misura. L'errore massimo delimita un intervallo entro cui si è *praticamente certi* debba trovarsi il valore della grandezza. Ciò significa che si può prevedere che, ove si ripeta la misura, il risultato di essa sarà *molto probabilmente* compreso entro l'intervallo definito dall'errore.

Abbiamo anche già visto come attribuire un errore alla misura eseguita se il valore della grandezza varia in modo statistico. In questo capitolo verranno brevemente introdotti alcuni elementi di calcolo delle probabilità che possono essere di stimolo per ulteriori approfondimenti e fornire soprattutto lo spunto per alcune considerazioni critiche ¹.

La conoscenza di alcuni elementari metodi statistici per l'elaborazione degli errori di misura e per l'analisi delle osservazioni sperimentali è indispensabile agli scienziati ed a chi si interessa di misure tecniche. I concetti fondamentali di probabilità, di distribuzione e propagazione degli errori sono parte importante della conoscenza di chiunque si trovi a trattare dei numeri connessi a delle misure sperimentali.

Il problema è trovare un numero che esprima il risultato della misura e un numero che ne esprima l'indeterminazione, in modo che sia consentito fare previsioni circa il risultato di ulteriori misure. Il calcolo delle probabilità permette appunto di fare previsioni su una base matematica. Ciò non significa ovviamente che le osservazioni fatte in seguito debbano corrispondere rigorosamente alle nostre previsioni; significa semplicemente che si possono fare le migliori previsioni consistenti con i dati a disposizione. Il linguaggio del calcolo delle probabilità permette di esprimersi quantitativamente circa un fenomeno che può essere grandemente variabile.

7.1 Le origini

Dobbiamo alla debolezza dello spirito umano una delle teorie più delicate e più ingegnose della matematica, cioè la scienza del caso o della probabilità.

Pierre-Simon de Laplace

Lo studio del calcolo delle probabilità si è sviluppato insieme al commercio mercantile, quando la gente ha cominciato a calcolare i costi necessari ad assicurarsi al fine di coprire i rischi economici a cui si esponeva nell'intraprendere un certo affare. E' in questo modo che sono nate le assicurazioni. Solo più tardi, gli scommettitori si avvicinarono alla matematica per avere risposte a quesiti inerenti le probabilità con cui un avvenimento casuale avrebbe potuto verificarsi. Ed è così che, anche se il gioco d'azzardo ha radici storiche molto antiche (affreschi tombali egizi risalenti al 3500 a.C. testimoniano la diffusione del gioco dei dadi), la prima testimonianza scritta relativa alla probabilità risale ad un esercizio del trattato *Summa de aritmetica, geometria, proportioni e proportionalità*

¹ I risultati tecnici presentati in questo capitolo ed il successivo sono stati in massima parte tratti da Young, 1968 e Kempthorne e Folks, 1971 (vedi anche Giolanella, 2001; Staford e Vardeman, 1994, e Baldi, 1998); si potrà far riferimento a questi testi per le relative dimostrazioni. Per un approfondimento di tipo storico vedi Stigler, 2000 e Hacking, 1975

pubblicato a Venezia nel 1494 dal francescano Luca Pacioli ¹, riguardante comunque i giochi d'azzardo. La soluzione corretta del problema posto in quell'esercizio fu trovata solo ben 160 anni più tardi da Blaise Pascal.

Il primo libro dedicato all'argomento fu probabilmente il *Liber de ludo alca* di Gerolamo Cardano, giocatore di professione, scritto attorno al 1550 e tenuto segreto per l'evidente vantaggio che un concorrente poteva trarne al tavolo da gioco. Il libro, più un diario che un trattato, fu scoperto solo nel secolo successivo.

Alcune questioni relative alla probabilità furono trattate anche da Nicolò Tartaglia nel 1500 e da Galileo Galilei agli inizi del 1600.

Ufficialmente il calcolo delle probabilità è nato comunque come disciplina scientifica solo nel 1600 inoltrato, grazie studiosi quali Christian Huygens (nel 1657 pubblicò il suo primo trattato sulla probabilità, *De ratiociniis in ludo aleae*), Pierre de Fermat e lo svizzero di origini olandesi Jacob Bernoulli, i quali si cimentarono tutti nell'analisi dei giochi d'azzardo. Infatti i giochi costituivano allora, come del resto anche oggi, un'ottima palestra per lo studio della probabilità, per il fatto che uniscono alla semplicità della loro struttura la possibilità di formulare problemi sufficientemente complicati per suscitare l'interesse dello studioso.

Alcuni ² affermano in particolare che la nascita della teoria della probabilità può essere fatta risalire al 1654, anno in cui Pascal e Pierre de Fermat, nel risolvere in particolare il problema riguardante la divisione della posta nel momento in cui si interrompeva una serie di giocate, introdussero la nozione di *guadagno atteso* (ossia, nozione teoricamente importantissima, di *valore atteso* di una variabile casuale).

Negli anni immediatamente successivi Pascal propose la prima applicazione di ragionamenti probabilistici al di fuori dei giochi, inventando di fatto la teoria delle decisioni ³. La sua famosa "scommessa" sull'esistenza di Dio non fu pubblicata integralmente fino al 1670, ma era già accennata alla fine della *Logica* di Port Royal del 1662 (scritta da Antoine Arnauld ed altri). In questo libro possiamo trovare menzionate le prime misure numeriche di qualcosa chiamato effettivamente "probabilità". Nello stesso periodo, ma indipendentemente, Leibniz, allora giovane studente di legge, pensò di applicare ragionamenti quantitativi relativi al calcolo di probabilità per risolvere problemi legali. Egli scrisse anche la prima monografia sulla teoria delle combinazioni.

Nel 1733, Abraham De Moivre, francese fuggito in Inghilterra per la repressione religiosa degli Ugonotti, formulò una prima versione del cosiddetto *teorema del limite centrale* (vedi par 7.5), che venne incluso senza dimostrazione nella seconda e terza versione del suo trattato *Doctrine of chances*. De Moivre espresse la distribuzione limite del teorema del limite centrale con un'espansione in serie della distribuzione oggi nota come *normale* (vedi par 7.5). La scoperta della distribuzione normale è attribuita da alcuni storici ⁴ agli scritti di Laplace datati attorno al 1783, mentre da altri è attribuita ad un articolo del 1808 dello statunitense Robert Adrian.

Tra il 1766 e il 1771 Daniel Bernoulli (nipote di Jacob) scrisse tre importanti contributi alla statistica delle popolazioni. Il primo ⁵ prendeva in esame i benefici delle iniziali forme di "vaiolizzazione", che erano allora le sole misure preventive contro tale malattia mortale (la vaccinazione cominciò a diffondersi solo alla fine del secolo, mentre la vaiolizzazione era praticata sin dagli anni Venti del Settecento). Questa tecnica preventiva non era sicura: una piccola percentuale di coloro a cui venivano inoculati i germi di forme vaiolose non gravi morivano lo stesso e, per giunta, coloro che erano stati trattati diffondevano la malattia tra la popolazione. La memoria di Daniel Bernoulli fu il primo serio tentativo di studiare il fenomeno, anche se non servì a evitare il secondo dei pericoli sopra citati. In essa erano formulate ipotesi statistiche (necessariamente rozze) sulle epidemie di vaiolo ed era calcolato l'aumento medio della durata di

¹ Vedi Paruolo, 1999 e Erto, 1999

² Vedi per esempio Sheynin, 2001

³ Vedi in particolare Hacking, 1975

⁴ Vedi Stigler, 2000

⁵ Vedi Sheynin, 2001

vita prodotto dalla vaiolizzazione. Avendo egli concluso che tale aumento era pari a due anni, si dichiarò a favore del perseguimento di questa forma di prevenzione.

Nella seconda memoria Bernoulli studiò la durata dei matrimoni, un problema direttamente collegato a questioni assicurative. Il suo ragionamento si basava sulla soluzione, trovata nello stesso anno (1768), di un problema di estrazione da un'urna di sequenze di due colori diversi. La terza memoria fu invece dedicata al rapporto tra i sessi alla nascita.

Già nel 1774 due saggi di Laplace connessi al calcolo della probabilità erano stati pubblicati dall'Accademia, previa valutazione e approvazione di Condorcet quale segretario permanente¹. Il primo definiva un tipo di serie da lui scoperto per l'integrazione di equazioni differenziali in due variabili indipendenti. Si osservava che la forma era potenzialmente utile nella teoria delle probabilità. Condorcet, però, fu colpito maggiormente dal secondo saggio, *Mémoire sur la probabilité des causes par les événements*. Egli osservava, nella prefazione a questo scritto, che

tratta una branca dell'analisi dei casi ben più importante e meno conosciuta di quella che costituisce il soggetto del primo saggio; qui la probabilità è sconosciuta, vale a dire che, il numero delle probabilità pro o contro un evento proposto è indeterminato; si sa solamente che in un dato numero di esperimenti questo evento è accaduto un certo numero di volte, e si domanda come con questo unico dato si possa concludere la probabilità di ciò che capiterà in seguito. Si vede che tale questione comprende tutte le applicazioni della dottrina dei casi che si usano nella vita, ed è l'unica parte utile di questa scienza, l'unica degna di interessare seriamente i filosofi; il calcolo ordinario non serve ad altro che a dare la probabilità dei giochi d'azzardo e lotterie, e non serve neppure per eliminare questi divertimenti ugualmente funesti per l'industria e per i costumi. Gli uomini che sono in grado di occuparsi del calcolo non sono quelli che si rovinano col gioco o con le lotterie. (Condorcet, cit. in Gillispie, 1980, trad. it. 61)

L'attualità di questo commento di Condorcet emergerà più avanti (vedi ultimo capitolo). In questo articolo Laplace poneva le fondamenta *dell'inferenza probabilistica, e non semplicemente statistica*. Condorcet intitolò la sua prefazione “calcul des probabilités”, frase che Laplace preferì da allora alla tradizionale “théorie des hasards”, usata dal tempo di Gerolamo Cardano che l'aveva coniata.

Nel 1809 anche Gauss introdusse, indipendentemente da Laplace, la distribuzione normale. Data la poca diffusione degli scritti precedenti, la distribuzione normale venne subito chiamata *distribuzione gaussiana*.

Laplace pubblicò solo successivamente, tra il 1810 e il 1820, il suo trattato *Théorie analytique des probabilités* in cui si riconosce la distribuzione normale come distribuzione limite nel teorema del limite centrale. All'inizio del secolo scorso, lo statistico inglese Karl Pearson, nel tentativo di rendere ragione della paternità di tale distribuzione, avrebbe suggerito l'aggettivo *normale* in alternativa a *gaussiana*, per sottolineare le numerose istanze conoscitive in cui tale legge trova applicazione.

Laplace inoltre sin dagli inizi del 1800 fornì numerosi altri contributi tra cui i primi studi sugli *errori di misura* (vedi cap. 6). Nello stesso periodo Gauss e Legendre elaborarono indipendentemente il *metodo dei minimi quadrati* (vedi par 8.1) e Siméon Denis Poisson propose la famosa distribuzione che porta il suo nome².

Durante la maggior parte di questo periodo ci si riferiva comunemente ai metodi statistici come “la combinazione di osservazioni”.

Tutto questo fermento d'idee e contributi rese il calcolo delle probabilità una scienza alla moda di cui si forzò l'applicazione nei campi più disparati. Nella seconda metà del 1800 si sviluppò la scuola russa che restituì un rinnovato impianto scientifico al calcolo delle probabilità con i contributi di studiosi quali Pafnuty Lvovich Chebyshev o del suo allievo Andrei Andreyevich Markov che lavorò sino agli inizi del 1900 costruendo i fondamenti della teoria dei processi stocastici. Chebyshev introdusse per primo la nozione di variabile aleatoria e formulò il teorema centrale del limite per la prima volta in termini moderni.

¹ Vedi Gillispie, 1980

² Vedi Birnbaum, 1983

Fanno parte della storia più recente i nomi di Andrei Nikolaevich Kolmogorov, Vladimir Ivanovic Smirnov e Boris Vladimirovich Gnedenko sempre della scuola russa, a cui si affiancano quelli dell'americano William Feller, dell'italiano Bruno De Finetti e dell'inglese Tennis Lindley.

Per quanto riguarda le origini della statistica pura sembra ¹ che i primi studi a carattere tipicamente statistico siano stati condotti nel 1600 dall'inglese John Graunt, che si cimentò nell'analisi dei dati raccolti durante la terribile peste che colpì Londra nel 1603. In effetti, i dati erano serviti fino ad allora solo per controllare, ogni settimana, se il numero di morti fosse in aumento in maniera che, nell'eventualità che ciò accadesse, si potesse suggerire tempestivamente al re di tralasciare i propri interessi cittadini per la più sicura campagna. Graunt, invece, utilizzando gli stessi dati, riuscì a compiere svariate valutazioni a carattere tipicamente inferenziale.

Prima di concludere questo paragrafo vorrei almeno menzionare il fatto che i nuovi metodi di calcolo statistico ebbero un effetto anche sulla quantificazione delle "scienze morali" e sulla "misura" dei fenomeni morali. L'introduzione di nuovi metodi di misura nelle scienze morali è stata centrale per la loro popolarità verso la fine del XVIII secolo e la loro stretta associazione con le nuove tecniche di governo. Tale processo ha portato infine all'emergenza di scienze sociali più o meno autonome nella terza decade del secolo successivo e ad una dissociazione del morale dallo scientifico. *Si potrebbe dire che l'introduzione della misura nelle pratiche delle scienze morali sia stato un altro risultato di quell'idea di una società misurabile, gestibile e ordinata che ho cercato di ricordare nel secondo capitolo.*

7.2 La probabilità

La parola "hasard" non esprime dunque altro che la nostra ignoranza delle cause dei fenomeni che vediamo accadere e succedersi senza alcun ordine apparente. La probabilità è relativa in parte a questa ignoranza, in parte a queste conoscenze.

Pierre-Simon de Laplace

Un concetto fondamentale definito nella teoria del calcolo delle probabilità è appunto quello di probabilità. Storicamente si sono succedute davvero numerose definizioni di probabilità, ma in questo lavoro mi soffermerò solo su quelle più conosciute e del resto più pertinenti ai temi trattati: due *convenzionali* e una cosiddetta di *probabilità soggettiva* (par. 9.2).

Esistono *principalmente* due definizioni convenzionali universalmente accettate del concetto di probabilità. La prima è la cosiddetta *definizione classica* e la si può enunciare nel modo seguente:

la probabilità, $P(A)$, di un evento A è il rapporto tra il numero N di casi "favorevoli" (cioè il manifestarsi di A) e il numero totale M di risultati ugualmente possibili e mutuamente escludentesi:

$$P(A) = \frac{N}{M}$$

Questa probabilità è talvolta detta probabilità *oggettiva* o anche probabilità *a priori*.

La seconda definizione è quella *frequentista* ed è la definizione sperimentale di probabilità come *limite della frequenza* misurabile in una serie di esperimenti. Essa ricalca lo schema della definizione classica, introducendo però un'importante variazione: sostituisce al rapporto numero casi favorevoli / numero di casi possibili il rapporto numero di esperimenti effettuati con esito

¹ Vedi Paruolo, 1999 e Hacking, 1975

favorevole / numero complessivo di esperimenti effettuati. Vediamo allora come viene definita questa probabilità:

la probabilità di un evento è il limite cui tende la frequenza relativa di successo all'aumentare del numero di prove.

In pratica, se abbiamo un esperimento ripetuto m volte ed un certo risultato A che accade n volte, la probabilità di A è data dal limite della *frequenza* (n/m) quando m tende all'infinito, e si scrive:

$$P(A) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{n}{m}$$

Gli m tentativi possono essere effettuati sia ripetendo in sequenza m volte lo stesso esperimento sia misurando simultaneamente m esperimenti identici. Se lanciamo una moneta in aria, sappiamo intuitivamente che la probabilità che venga testa è il 50%. Se gettiamo un ordinario dado, sappiamo ancora che la probabilità che esca 5 è $1/6$.

Che cosa significa questo in realtà? Ad ogni lancio della moneta esce o testa o croce (non è concepibile l'eventualità che in un lancio esca per metà testa e per metà croce). Ciò che voglio dire, in effetti, è che, se lanciamo la moneta un numero molto grande di volte, il numero di volte che uscirà testa sarà all'incirca uguale alla metà del numero totale dei lanci. E se gettiamo un dado un gran numero di volte, il 5 uscirà pressappoco in un sesto delle prove.

Per gli scopi di questo capitolo utilizzeremo la definizione frequentista della probabilità. In altre parole, noi ci chiediamo quante volte un certo evento avviene, se facciamo un numero elevato di prove.

E' opportuno precisare che nel problema del lancio della moneta abbiamo stabilito soltanto che il rapporto fra il numero delle volte in cui esce testa e il numero complessivo dei tentativi si avvicina al valore di un mezzo, appena il numero dei tentativi *diventa elevato*.

Se sappiamo calcolare le probabilità per alcuni semplici eventi, come il lancio di una moneta o di un dado, possiamo calcolare probabilità per eventi più complicati, che risultino composti da questi semplici eventi (si noti che queste probabilità sono sempre numeri minori di 1). Se sommiamo le probabilità di tutti gli eventi che possono avvenire, otteniamo la probabilità che si verifichi una qualsiasi delle cose che possono avvenire, probabilità che naturalmente è uguale ad uno.

7.3 Il gioco delle tre scatole

Il concetto di probabilità è certamente uno dei più problematici nella storia della scienza. Nell'ultimo capitolo di questo scritto affronteremo ancora il problema. Anche le più note e ricorrenti definizioni di probabilità, quelle appunto convenzionali, sono tutt'altro che semplici ed ovvie da concepire. Moltissime persone, anche di spiccata intelligenza, convinte di averle comprese (con tutte le aporie che ciò comporta, vedi par 9.2), di fronte ad un problema pratico hanno difficoltà ad applicarle. Non mi riferisco alla eventuale complessità di calcolo di eventi composti, ma ai concetti stessi appena introdotti. Emblematico è il test che va sotto il nome di "gioco delle tre scatole".

Ci sono tre scatole sul tavolo e colui che conduce il gioco ha messo *precedentemente* un premio in una delle tre. Il compito è quello di trovare il premio, ed il gioco avviene in due passi successivi. Si chiede di fare una prima scelta. Una volta effettuata la scelta su una delle tre scatole (che rimane chiusa), viene precisato che in una tra le due rimanenti sicuramente non c'è il premio, e quest'ultima scatola viene tolta dal tavolo. A questo punto è possibile conservare la prima scelta o modificarla.

Il problema è il seguente: converrà mantenere la prima scelta o converrà cambiare?

La maggioranza delle persone (provare per credere) è convinta che non c'è nessun vantaggio nel cambiare ora la scelta precedentemente effettuata e, di norma, mantiene la scelta iniziale.

La risposta giusta è che invece bisogna cambiare: nella scatola rimasta vi è una probabilità di 2/3 di trovare il premio, e non 1/2 come erroneamente molti ritengono. L'errore che si compie è quello di ritenere che, essendo la scelta che vi si propone quella tra due sole possibilità, entrambe debbano avere necessariamente la stessa probabilità.

Presento una delle possibili spiegazioni.

Se per caso la prima scelta fosse stata quella giusta, dopo l'apertura della scatola il cambio sarà *certamente* (non solo probabilmente) penalizzante. Al contrario, se la prima scelta fosse caduta sulla scatola vuota, il cambio sarebbe *certamente* (non solo probabilmente) vantaggioso. Quanto spesso capiterà di scegliere la scatola giusta (risultando così *necessariamente penalizzati* dal cambio)? Una volta su tre. Quante volte vi capiterà di scegliere una scatola vuota (essendo così necessariamente favoriti dal cambio)? Due volte su tre ¹.

7.4 Distribuzioni di probabilità

Per l'analisi di osservazioni complesse è spesso necessario trattare le probabilità di intere classi di eventi. A questo proposito si introduce il concetto di *distribuzione di probabilità*.

Allo scopo di introdurre l'idea di distribuzione di probabilità, supponiamo di lanciare dieci monete simultaneamente. Con procedimento elementare si può determinare la probabilità che quattro monete presentino testa e le rimanenti sei croce. Orbene, supponiamo di chiederci: qual è la probabilità di ottenere 5 volte testa e 5 croce, o 7 volte testa e 3 croce, o, più in generale, di ottenere n volte testa e $(10 - n)$ croce, dove n è un intero compreso tra 0 e 10? La risposta a questa domanda è una serie di numeri, uno per ogni valore di n . Questi numeri possono essere visti come funzione di n , $f(n)$; cioè, per ogni n si ottiene un valore di $f(n)$ che fornisce la probabilità dell'evento caratterizzato dal numero n . Una funzione di questo tipo è chiamata "distribuzione di probabilità".

Una distribuzione di probabilità è sempre definita per un campo definito di valori dell'indice n . Nell'esempio sopra citato, n è un intero compreso tra 0 e 10. Se il campo di variabilità dell'indice include tutti i possibili eventi, e questo sarà generalmente il caso che si presenta nei nostri problemi, allora la somma di tutte le probabilità deve essere l'unità (la certezza). In questo caso,

$$\sum_n f(n) = 1$$

dove la somma si estende a tutto il campo dei valori n , proprio dello specifico problema che si considera.

Fino a qui ho trattato le distribuzioni di probabilità in base alla definizione di probabilità che consiste nel fare il rapporto tra il numero degli eventi favorevoli ed il numero, molto grande, di prove eseguite.

Anche le discussioni fatte sulla media e sulla deviazione standard si basano sull'assunzione che siano state eseguite molte prove.

Può tuttavia non essere immediatamente chiaro quale relazione intercorra tra queste quantità e i risultati che si sarebbero ottenuti se avessimo fatto un esperimento con un numero relativamente piccolo di prove. In poche prove, per esempio, la media molto probabilmente non è uguale alla media di un numero infinito di prove. La stessa cosa dicasi per la deviazione standard calcolata per un modesto numero di prove.

Per descrivere la differenza tra il numero infinitamente grande di prove pensato per definire $f(n)$ e un numero piccolo di prove qualunque in un esperimento reale, chiamiamo $f(n)$ la *distribuzione*

¹ Per una trattazione più dettagliata si può vedere Piattelli Palmarini, 1995 o anche Agnoli, Di Nicola, 2001.

teorica infinita, e i risultati di ogni gruppo di prove un *campione* di quella data distribuzione. E' chiaro che *la media di un campione è solo una stima della media della distribuzione teorica infinita*. Per alcuni tipi di distribuzione si può mostrare che la precisione di questa stima aumenta con le dimensioni del campione, ma è importante ricordare che essa non è mai niente più che una stima. Ugualmente, *la deviazione standard di un campione è una stima della deviazione standard della distribuzione teorica infinita*.

Vi sono buone ragioni teoriche, per stabilire che la formula di σ introdotta nel par 6.5, non dia ancora la migliore stima della deviazione standard della distribuzione teorica, che si può ottenere da un campione dato.

Risulta che una stima alquanto migliore è fornita da:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

che differisce dalla precedente per il fatto che la somma dei d_i^2 è divisa per $N-1$ invece che per N . Per dirla in breve, la ragione di questo fatto è che le deviazioni non sono tutte indipendenti; gli stessi dati sono stati prima adoperati per calcoliar la media del campione, a sua volta usata per calcolare i d_i^2 , e così il numero di deviazioni indipendenti è solo $N-1$. Sebbene questa modifica abbia un suo significato teorico, non è di solito di alcuna importanza pratica. Ordinariamente N è abbastanza grande, sicchè la deviazione standard del campione è influenzata molto poco dalla scelta di N o di $N-1$.

7.5 La distribuzione di Gauss, o “legge normale degli errori”

Passiamo ora a considerare una particolare distribuzione di probabilità, la già citata distribuzione di Gauss. Importante per molte ragioni, ma, qui, soprattutto perché:

sotto condizioni molto generali descrive *la distribuzione degli errori casuali in differenti tipi di misure*;

è possibile dimostrare che, anche se i singoli errori non seguono questa distribuzione, *le medie di gruppi di siffatti errori sono distribuite in maniera da approssimare la legge di Gauss*, con la sola ipotesi che i gruppi siano abbastanza numerosi. Possiamo avere, per esempio, un gruppo di osservazioni che seguono la distribuzione $f(x)$; questa può essere una funzione qualsiasi, del tutto generica. Se prendiamo gruppi di N osservazioni e ne facciamo la media, allora, purchè N sia un numero molto grande, le medie seguiranno la distribuzione di Gauss. L'unica condizione da imporre è che sia finita la varianza della distribuzione $f(x)$. Questo risultato è conosciuto come il *teorema del limite centrale*, ed è molto importante negli sviluppi più avanzati della statistica matematica.

La distribuzione di Gauss può essere riguardata come un risultato analitico derivato da elementari considerazioni matematiche, o come una formula empirica che si è trovato essere in accordo con la distribuzione degli errori casuali che realmente intervengono in un data misura:

Qualcuno ha osservato a questo proposito, non senza una certa malizia, che tutti sono convinti che la distribuzione di Gauss descriva fedelmente il comportamento degli errori casuali, i matematici perché credono che i fisici l'abbiano verificata sperimentalmente, e i fisici perché credono che i matematici l'abbiano dimostrata su rigorose basi teoriche!(Young, 1968, trad. it. 75)

Da un punto di vista teorico si può affermare ragionevolmente che ogni errore accidentale può essere pensato come il risultato di un gran numero di errori elementari, tutti di eguale entità, e ciascuno con uguale probabilità di produrre una variazione in eccesso o in difetto. In questo caso si può dimostrare che, se il numero degli eventi indipendenti (corrispondente appunto agli errori elementari) diventa elevato, la distribuzione tende ad una gaussiana.

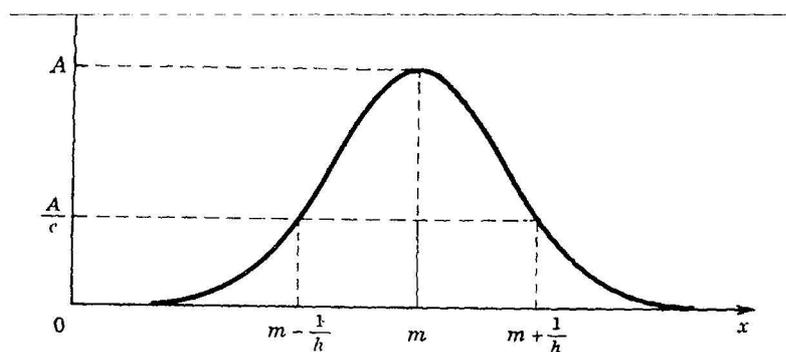
Molti sono tuttavia dell'avviso che la vera giustificazione della validità della legge di Gauss e della sua applicazione nel descrivere il comportamento degli errori casuali è che molti gruppi di osservazioni sperimentali finiscono per obbedire ad essa. Questa argomentazione è più convincente di qualsiasi dimostrazione matematica. E' pertanto valido il punto di vista secondo il quale questa distribuzione va trattata come un fatto sperimentale, nel senso che si stabilisce la sua espressione assiomaticamente e si esaminano quindi il suo significato e le sue applicazioni.

La funzione di distribuzione gaussiana è spesso chiamata la "legge normale degli errori" e gli errori che seguono tale distribuzione si dice che sono "distribuiti normalmente".

La forma della legge di Gauss è:

$$f(x) = Ae^{-h^2(x-m)^2}$$

ove A , h e m sono delle costanti e x è il valore che si ottiene in una qualsiasi misura. Innanzi tutto, raffiguriamo $f(x)$ in un grafico per avere un'idea del suo andamento:



La figura è un diagramma della funzione di distribuzione di Gauss, la cui forma è data dalla $f(x)$. Il massimo valore della funzione è A , m rappresenta il valore di x in corrispondenza del quale la funzione assume il massimo valore, ed h ha qualcosa a che vedere con il tipo di configurazione, piatta o slanciata, della curva a foggia di campana. Un valore elevato di h corrisponde ad una curva agile e appuntita, mentre un valore basso di h corrisponde ad una curva piatta e schiacciata.

Quanto al significato della funzione $f(x)$, potrebbe sembrare che la $f(x)$ rappresenti la probabilità di osservare il valore x della quantità misurata. Ma ciò non è corretto. Ricordando che x è una variabile continua, facciamo notare che la probabilità che x assuma esattamente un qualsiasi particolare valore è zero. Dobbiamo invece cercare la probabilità che x assuma un valore compreso in un certo intervallo, ad esempio tra x e $x+\Delta x$.

L'esatta interpretazione della funzione $f(x)$ è, pertanto, che per un piccolo intervallo dx , $f(x)dx$ rappresenta la probabilità che una misura cada nell'intervallo compreso tra x e $x+dx$.

Ciò significa in altre parole che l'integrale $\int_a^b f(x)dx$ è la probabilità che una misura dia un risultato nell'intervallo $a \leq x \leq b$. Questo integrale può essere calcolato. In particolare, possiamo calcolare la probabilità che una misura cada entro una deviazione standard σ dal valore vero (potremmo ugualmente trovare la probabilità per un risultato per esempio entro 2σ ecc.).

Si può dimostrare che la probabilità che una misura cada entro una deviazione standard dal valore vero è il 68% (si può anche dimostrare che per 2σ è 95.4% e per 3σ è 99.7%).

Nell'ultimo capitolo *discuterò criticamente questi ultimi risultati.*

8. INVITO AD APPROFONDIMENTI

Si accennerà qui, brevemente, ad alcuni principi e metodi spesso utilizzati dagli scienziati e dai tecnici sperimentali. E ciò con lo scopo di mostrare ancora come l'approccio statistico (e *talvolta il giudizio soggettivo!*) siano insostituibili, *anche* nell'approccio convenzionale, per arrivare ai risultati operativi ¹.

8.1 Principio della massima verosimiglianza e principio dei minimi quadrati.

Spesso bisogna affrontare il problema della stima, mediante informazioni estraibili da misure, di uno o più parametri incogniti che caratterizzano funzioni di distribuzione. Il *principio di massima verosimiglianza* afferma che, tra i valori possibili per i parametri incogniti, si devono scegliere quelli che rendono massima la probabilità dell'evento osservato. E' questo, se vogliamo, *un principio basato sul buon senso*.

Vediamo ora un metodo molto efficace per ottenere l'informazione più attendibile che si possa ricavare da una serie di osservazioni sperimentali. Dapprima stabiliamo il *principio dei minimi quadrati* per una serie di misure di una grandezza (si può dimostrare che questo principio deriva dal principio della massima verosimiglianza se gli errori seguono la legge di Gauss). Il nome si riferisce alla minimizzazione della somma dei quadrati delle rispettive differenze fra i valori osservati e i valori teorici delle misure sperimentali. I valori teorici sono delle funzioni di costanti sconosciute di cui si cercano i valori. Qualora tali funzioni siano lineari, si possono trovare questi valori come soluzioni di certe equazioni lineari chiamate equazioni normali.

Formalmente il principio dei minimi quadrati si può enunciare come segue:

il valore più attendibile di una grandezza che si ottiene da una serie di misure è quello che rende minima la somma dei quadrati delle differenze tra le singole misure e tale valore. Per una serie di misure x_i il più attendibile valore di x è quello che rende minima la quantità

$$\sum_{i=1}^N (x - x_i)^2$$

dove x è la variabile di cui si cerca il valore che rende minima la funzione.

Notiamo per inciso che questa espressione è proprio N volte la varianza della x_i , calcolata in base al valore più attendibile x . Quindi un enunciato equivalente del principio dei minimi quadrati è il seguente:

il valore più attendibile di una grandezza è quello che rende minima la varianza (o se si vuole la deviazione standard) delle misure rispetto ad esso.

Il problema più semplice che può essere risolto con il metodo dei minimi quadrati è il classico problema della combinazione di misure ripetute della stessa costante. Supponiamo, ad esempio, che si voglia ottenere un preciso valore per un angolo A (la costante sconosciuta). Si misura l'angolo ripetutamente, ottenendo i valori osservati $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$. La somma dei quadrati delle deviazioni di questi valori osservati da A è $(a_1 - A)^2 + (a_2 - A)^2 + \dots + (a_n - A)^2$. Tale funzione di A è minimizzata quando ad A si dà il valore $a = (a_1 + a_2 + \dots + a_n) / n$, la media aritmetica dei valori osservati. Quindi a è la stima di A .

¹ Vedi anche Worthing, Geffner, 1964

Il metodo dei minimi quadrati è stato sviluppato originalmente da Gauss per calcolare le costanti che si incontrano in astronomia. Nel 1801 Gauss fece una previsione decisamente accurata dell'orbita di un pianeta appena scoperto ¹ partendo da dati limitati e usando per primo questo metodo. Gauss continuò a lavorare sul metodo dei minimi quadrati a lungo, e pubblicò i risultati completi come parte di un lavoro di astronomia nel 1809 ². All'incirca nello stesso periodo, Legendre arrivò indipendentemente a formulare questo metodo per combinare osservazioni e derivarne le equazioni normali da cui si possono calcolare le stime delle variabili desiderate. Nel 1805 in particolare pubblicò il lavoro con il quale è principalmente noto nella storia della statistica ³, *Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes*. L'appendice, che si occupa specificatamente del metodo dei minimi quadrati, è intitolata *Sur la méthode des moindres quarrés*. Così la commenta lo storico della statistica Stephen M. Stigler:

For stark clarity of exposition the presentation is unsurpassed; it must be counted as one of the clearest and most elegant introductions of a new statistical method in the history of statistics. In fact, statisticians in the succeeding century and three-quarters have found so little to improve upon that[...]the explanation of the method could almost be from an elementary text of the present day.(Stigler, 2000, 12-13)

Ciò nonostante, egli non fornì alcuna giustificazione per questo metodo, tranne notare il fatto che preveniva la prevalenza degli errori estremi stabilendo una sorta di equilibrio fra tutti gli errori. Il principio dei minimi quadrati deriva da quello della massima verosomiglianza. Verso la fine del suo trattato *Teoria del Movimento dei Corpi Celesti*, Gauss diede una giustificazione probabilistica del metodo, in cui mostrò essenzialmente che se gli errori sono normali, il principio dei minimi quadrati fornisce le stime di massima verosomiglianza. Le sue argomentazioni non erano comunque dimostrate chiaramente.

In all periods it has been widely but erroneously believed that the method of least squares has conclusive scientific justification. The theoretical justification that has proved most influential historically is the one Gauss provided in bis book of 1809. This justification was partly circular, being based on the assumption that in the simple problem described above the least squares estimator (the mean) is the best estimator.(ivi.)

È noto comunque che Gauss stesso non è mai stato completamente soddisfatto di tale giustificazione.

8.2 Eliminazione di dati

Il problema che considero ora coinvolge una questione controversa. Esso riguarda il modo di procedere nell'eventualità che in una serie di osservazioni una o più di una presentino scarti *così grandi da sembrare irragionevoli*.

Se, per esempio, un gruppo di osservazioni fatte con un micrometro ha una deviazione standard di 0,001 cm, ma una misura differisce dalla media di 0.010 cm, allora siamo tentati di riguardare questo grosso scarto come il risultato di uno sbaglio o di uno svarione piuttosto che di un errore casuale. Come procederemo di fronte a questa situazione?

La presenza di un simile scarto crea in verità una situazione imbarazzante per lo sperimentatore. Se si tiene conto della misura discutibile, di quella cioè che presenta uno scarto irragionevole, essa può avere un effetto assai considerevole sul calcolo della media. Avrà anche, naturalmente, un effetto ancora maggiore sulla deviazione standard. Se, d'altro canto, la si scarta, si corre il rischio di gettare via una informazione che potrebbe guidare alla scoperta di qualche fenomeno inaspettato nell'esperimento. Scoperte importanti sono state compiute in seguito a dati apparentemente

¹ Vedi Birnbaum, 1983 B

² Da quella data in poi il metodo è stato sempre ampiamente applicato nelle scienze fisiche, e nel '900 è stato anche utilizzato nelle scienze biologiche e sociali

³ Vedi Stigler, 2000

anormali. In ogni caso, non si può negare che buttar via un'osservazione significa procedere sommariamente.

Come è stato detto, questo è un problema controverso, e a lungo dibattuto senza un esito definitivo. Per un verso, a meno che non ci sia una ragione ben precisa per sospettare che una data osservazione non sia valida, non c'è mai alcuna giustificazione per eliminare dati su basi meramente statistiche, ed anzi agire così è disonesto. Se si accetta questo punto di vista, non c'è niente da dire, se non che ricorrere all'accorgimento di prendere un numero sufficiente di dati, tale che il risultato non riesca di molto influenzato dalle osservazioni discutibili.

Per l'altro verso, un'osservazione dovrebbe essere eliminata se la probabilità che essa capiti è così piccola che non sarebbe ragionevole aspettarsi che essa si trovi in un dato gruppo di numeri. Il ragionamento che si fa è il seguente: supponiamo di eseguire N misurazioni di una grandezza; ammettiamo che una di queste sembri avere uno scarto insolito perché troppo grande. Calcoliamo con la distribuzione di Gauss la probabilità che capiti uno scarto così grosso: se questa probabilità è maggiore di $1/N$, concludiamo che è ragionevole ottenere un siffatto scarto; se invece la probabilità che si presenti uno scarto simile è molto più piccola di $1/N$, ciò significa che era molto improbabile che in una serie di N misure capitasse anche una sola volta uno scarto del genere. In tal caso potremmo prendere in considerazione l'eliminazione di questa misura, in quanto dovuta probabilmente a uno sbaglio o a qualche fluttuazione anomala delle condizioni sperimentali. In genere ci si aspetta di avere scarti la cui probabilità di presentarsi sia un po' minore di $1/N$, ma non molto più piccola.

Talvolta l'eliminazione dei dati viene fatta mediante il “*criterio di Chauvenet*”. Con questo criterio un'osservazione viene eliminata se la probabilità di ottenerla è minore di $1/2N$.

8.3 Bontà dell'approssimazione

Spesso è opportuno verificare l'ipotesi che una variabile della quale si sono rilevati valori sperimentali segua una certa legge di distribuzione. Si tratta di un caso particolare del cosiddetto *test di ipotesi* che consiste nell'esprimere in termini probabilistici le divergenze tra la distribuzione dei valori sperimentali e una particolare distribuzione teorica ipotizzata.

In altri termini, se noi sospettiamo che un'assegnata serie di osservazioni venga da qualche particolare distribuzione teorica (per esempio una gaussiana), come possiamo provare che esiste veramente un accordo fra i dati e questa distribuzione?

Il problema è: quale disaccordo ci aspettiamo ragionevolmente che ci sia fra la distribuzione teorica e la nostra distribuzione campione, nell'ipotesi che il campione provenga proprio da questa distribuzione teorica?

La distribuzione campione è meglio espressa in termini di frequenza dei vari eventi, ove la frequenza di un evento è definita come il numero complessivo di volte che si presenta l'evento fra tutte le prove; perciò è conveniente esprimere le nostre distribuzioni in termini di frequenza piuttosto che di probabilità. In particolare, sia $F(n)$ la frequenza dell'evento n per il campione, che assumiamo consista di N prove. Se la distribuzione teorica che stiamo confrontando col campione è $f(n)$, allora la frequenza attesa è proprio $Nf(n)$. La differenza $Nf(n) - F(n)$ per ogni n caratterizza la differenza fra le due distribuzioni.

Il test più usato per confrontare le frequenze del campione con quelle teoriche (o per esaminare, come si dice, la “bontà dell'approssimazione” del campione) consiste nel calcolare una media pesata dei quadrati delle differenze relative fra la frequenza teorica e quella campione per ogni n . Il numero che si trova si indica con χ^2 ; questo numero, con una opportuna interpretazione, costituisce il “test del χ^2 ” usato per giudicare della bontà di un'approssimazione.

Così si suole definire una misura della bontà dell'approssimazione, indicata dal simbolo χ^2 ,

mediante la relazione ¹:

$$\chi^2 = \sum_n \frac{[Nf(n) - F(n)]^2}{Nf(n)^2} Nf(n)$$

Va notato che il test del χ^2 è collegato al principio dei minimi quadrati, che come ho ricordato non ha una giustificazione scientifica sicura. In ogni caso sottolineo che la formula sembra intuitivamente la definizione *ragionevole* di un indice atto a giudicare sulla bontà dell'approssimazione.

Rimane il problema di come interpretare questo risultato. Chiaramente, se il campione e la distribuzione teorica presentano un accordo perfetto, allora è $\chi^2=0$. Ciò è molto improbabile; anche se il campione proviene dalla distribuzione teorica considerata, non ci si aspetterebbe un accordo perfetto in ogni intervallo. Ma, più grande è il χ^2 , più grande è il disaccordo che esiste fra le due distribuzioni. Il modo appropriato di porre la questione è: se il campione proviene dalla distribuzione teorica considerata, qual è il massimo valore del χ^2 che possiamo ragionevolmente tollerare, in considerazione delle mere fluttuazioni statistiche? Se otteniamo un valore del χ^2 maggiore di questo, allora diremo che il campione non è in accordo con la distribuzione teorica.

Il calcolo dei valori del χ^2 che possono presentarsi caso per caso è assai complicato, e non possiamo discutere qui il problema. Si noti però che il test del χ^2 non fornisce mai una risposta precisa e inequivocabile, "approssima" o "non approssima"; in ogni caso si richiede un *giudizio soggettivo*.

¹ Per una giustificazione matematica, basata ovviamente su considerazioni statistiche, di questo risultato si può vedere in particolare Young, 1970

9. NUOVI SVILUPPI

Se volete apprendere qualcosa [dagli scienziati] sui metodi che essi usano, vi consiglio di tener fermo un solo principio: non ascoltate le loro parole in proposito ma fissate la vostra attenzione su ciò che fanno.

Albert Einstein

Immaginiamo dei marinai che, in mare aperto, stiano modificando la loro goffa imbarcazione da una forma circolare ad una più affusolata[...]. Per trasformare lo scafo della loro nave essi fanno uso di travi alla deriva assieme a travi della vecchia struttura. Ma non possono mettere la nave in bacino per ricostruirla da capo. Durante il loro lavoro essi stanno sulla vecchia struttura e lottano contro violenti fortunali e onde tempestose[...]. Questo è il nostro destino di scienziati.

Otto Neurath

Vengono qui delineati alcuni nuovi sviluppi che sono emersi in diversi campi scientifici e tecnici negli ultimi 15-20 anni e che stanno proponendo un nuovo approccio nella determinazione delle incertezze di misura ¹.

E' utile presentare innanzi tutto alcuni problemi che scaturiscono dalla applicazione della teoria convenzionale.

Nei miei anni di lavoro come sperimentatore ho potuto verificare personalmente che la situazione in cui ci si viene a trovare sulla base della teoria convenzionale *può portare a diversi motivi di insoddisfazione*. Lascio comunque a D'Agostini fare un commento di carattere generale sullo stato attuale:

[...] studenti poco convinti di quanto viene loro insegnato, in quanto spesso privo di consistenza logica e di corrispondenza con l'esperienza di laboratorio; *laureandi e neolaureati* che, inseriti nella ricerca, sia pura che applicata, sperimentano l'inadeguatezza dei metodi appresi per far fronte alle analisi complesse che si presentano e sono confusi dalle tante "ricette monouso", spesso contraddittorie, che trovano in libri, note tecniche e articoli; *ricercatori* che, delusi dall'incongruenza fra teoria e pratica, affermano francamente di non usare la statistica, o, addirittura, di non essere interessati al "calcolo degli errori"; *docenti universitari* che si rendono conto[...] che le cose stanno cambiando ed in effetti provano a riaggiornare i corsi, pur ostacolati dalla mancanza di testi validi e da colleghi con i quali devono interagire per uniformità di programma; *insegnanti* delle scuole medie superiori in dubbio su come comportarsi nei corsi di laboratorio e indecisi se affrontare o meno il discorso delle incertezze di misura, con quali metodi e a quale livello. (D'Agostini, gennaio 1999, 5)

Sarebbero molti gli argomenti che si potrebbero analizzare per spiegare questa situazione. Mi limiterò qui a discutere criticamente due importanti risultati presentati nella precedente parte di questo scritto, che si riferiscono alle tecniche per la valutazione delle indeterminazioni usate a proposito della propagazione degli errori casuali, sia massimi che statistici ².

9.1 Critica della teoria degli errori casuali.

¹ Molte delle informazioni di questo capitolo sono state raccolte soprattutto per la disponibilità di Giulio D'Agostini, professore di fisica alla Sapienza di Roma e convinto protagonista del nuovo approccio. In particolare ho intrattenuto con lui più di una conversazione sui suoi lavori e le sue pubblicazioni (da cui ho tratto molte delle mie considerazioni e alcuni degli esempi riportati, insieme alle indicazioni di una aggiornata bibliografia al riguardo): vedi D'Agostini, gennaio 1999, luglio 1999, dicembre 1999, ottobre 2001 e 2003. Su alcuni degli aspetti discussi si può anche vedere "The International Society for Bayesian Analysis", all'indirizzo <http://www.bayesian.org/>, Howson, Urban, 1993 e Lad, 1996

² Riportare qui per intero la discussione critica completa della teoria convenzionale, ed i relativi dibattiti, andrebbe oltre l'obiettivo di carattere introduttivo che questo lavoro si pone

Neppure in un laboratorio le cose si mostrano come dovrebbero essere. Si scostano dalla regola in tutte le direzioni, ed è in fondo un'ipocrisia la nostra di attribuire questo fatto ad un errore di esecuzione e riconoscere all'esperimento un valore medio reale.

Robert Musil

Measurement has meaning only if we can transmit the information without ambiguity to others.

Russell Fox

Riassumiamo le nozioni tipiche riportate nel par 6.8 e nel par 6.11.

Propagazione degli errori massimi

$$\Delta y \approx \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots$$

ad esempio

$$y = x_1 \pm x_2 \quad \Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2$$

Propagazione degli errori statistici

$$\sigma^2(y) = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \sigma^2(x_1) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \sigma^2(x_2) + \dots$$

per esempio

$$y = x_1 \pm x_2 \Rightarrow \sigma(y) = \sqrt{\sigma^2(x_1) + \sigma^2(x_2)}$$

Cerchiamo di capire meglio su cosa sono fondate queste tecniche, cominciando dal caso degli errori massimi. Ho ricordato che

$$\Delta y = \sum_i \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \right| \Delta x_i$$

Questa espressione starebbe a significare che

se siamo "praticamente certi" che il valore vero x_{vi} è compreso nell'intervallo dato da $x_i \pm \Delta x_i$, ne segue che siamo "praticamente certi" che il valore vero y_v , è compreso nell'intervallo dato da $y \pm \Delta y$.

Se accettiamo per buona tale espressione di "propagazione lineare degli errori massimi" e i presupposti sui quali essa si basa andiamo incontro però ad incongruenze. Consideriamo due semplici esempi allo scopo di introdurre la problematica.

Misuriamo, con un righello avente divisioni di 1 mm, due spessorini, uno di 1 mm e l'altro di 2 mm (valori "esatti"). Otteniamo $x_1 = 1.0 \pm 0.5$ mm e $x_2 = 2.0 \pm 0.5$ mm, da cui $x_2 - x_1 = 1 \pm 1$ mm. Come si recita in questi casi, le due misure sono "uguali entro gli errori". Ciò nonostante, una qualsiasi ispezione visuale suggerisce che uno spessore è circa il doppio

dell'altro. Nessuno potrà giurare che il rapporto fra i due sia esattamente 2: potrebbe essere 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2, o forse 1.7 o 2.3, ma sicuramente sono esclusi i valori prossimi a 1. Si ottiene quindi un risultato formale, giudicato generalmente *oggettivo*, in netta contraddizione con quanto si crede: *una conclusione paradossale!* (In questo caso il primo problema da evidenziare è quello relativo alla raccomandazione della lettura di $\frac{1}{2}$ divisione. In effetti nella maggioranza dei casi noi siamo in grado di apprezzare più di $\frac{1}{2}$ divisione, e ciò evidentemente potrebbe aiutare ad evitare la precedente conclusione).

Consideriamo un termometro a mercurio, avente divisioni di 0.1°C e di cui sappiamo che potrebbe essere scalibrato al più di 0.6°C . Consideriamo le seguenti letture, lasciando sospese le incertezze e le successive elaborazioni:

$$\begin{aligned} T_1 &= 22.00 \dots \pm \dots ^\circ\text{C} \\ T_2 &= 23.00 \dots \pm \dots ^\circ\text{C} \\ T_2 - T_1 &= \dots \pm \dots ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

La risposta usuale a questo quesito è, che Δ_{T_1} e Δ_{T_2} sono pari a 0.6°C , mentre

$$T_2 - T_1 = 1.0 \pm 1.2 ^\circ\text{C}.$$

Non è difficile convincersi che, mentre incertezze di 0.6°C su ciascuna misura sono ragionevoli, se intese come "errori massimi", quella sulla differenza non è affatto sensata. La calibrazione assoluta non può avere alcun effetto sulla differenza fra valori di temperatura così prossimi. In questo caso voglio evidenziare che per arrivare ad un valore sensato bisognerebbe premettere altre considerazioni e saperne di più sul *termometro*, sulle *condizioni di misura* e su *chi ha eseguito le letture*.

Riassumendo, si può affermare che l'uso della cosiddetta *teoria degli errori massimi* conduce, almeno, a *una tendenza a sovrastimare le incertezze*, e ciò può condurre appunto a paradossi ¹. Qualcuno potrebbe pensare che la sovrastima delle incertezze sia da ritenere comunque un pregio. Ciò non è assolutamente vero.

Il motivo principale per cui vanno evitate le sovrastime delle incertezze è che in questo caso è più facile arrivare a risultati in accordo (artificiosamente) con valori noti o con quelli di altri esperimenti. Questo impedisce di identificare i possibili effetti sistematici che possono distorcere il risultato o di scoprire addirittura una nuova fenomenologia.

Vediamo ora il caso degli errori statistici. Riporto il risultato introdotto al par 6.11:

$$\sigma^2(y) = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \sigma^2(x_1) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \sigma^2(x_2) + \dots$$

Nella sua applicazione anche questa formula presenta alcuni problemi. Il più importante è quello di *interpretazione*. *Questo è un punto cruciale*. Cosa significa $y \pm \sigma(y)$? Come introdotto nel par. 7.5, assunto un modello gaussiano, ciò starebbe ad indicare

$$P [y - \sigma(y) \leq y_v \leq y + \sigma(y)] = 68 \%$$

¹ Ho qui presentato davvero due semplicissimi esempi; ma le precedenti considerazioni sono ancora valide per esperimenti molto complessi. Vedi per esempio D'Agostini, gennaio 1999

Cioè, c'è il 68 % di *probabilità* che il valor vero di y si trovi nell'intervallo $y \pm \sigma(y)$.

Il problema nasce quando ci si chiede *cosa sia la probabilità*. Se utilizziamo le definizioni convenzionali (vedi par 7.2) otteniamo le risposte tipiche ("casi favorevoli su casi possibili" e "limite della frequenza") che *non contemplano affermazioni probabilistiche sui valori veri*, così come sono espresse dalla espressione introdotta. In questo caso perciò potremmo dire che quando forniamo dei numeri relativi al risultato di una misura *non sappiamo di che cosa stiamo parlando*.

9.2 Il concetto di probabilità soggettiva.

If you toss a penny 10,000 times, it will not be heads 5,000 times, but more like 4,950. The heads picture weighs more, so it ends upon the bottom.

Da *The Herald Tribune*

If we were not ignorant there would be no probability, there could only be certainty. But our ignorance cannot be absolute, for then there would be no longer any probability at all. Thus the problems of probability may be classed according to the greater or less depth of our ignorance.

Henri Poincaré

Per provare a costruire una interpretazione filosofica delle incertezze di misura che non soffra del tipo dei problemi mostrati, partiamo da due considerazioni.

Innanzitutto una affermazione sulla quale è difficile non essere d'accordo è quanto detto sin dall'inizio di questo scritto, ovvero che il processo di induzione dalle osservazioni ai valori di grandezze fisiche conduce ad affermazioni che, inevitabilmente, sono affette da un certo grado di incertezza. Il secondo punto da sottolineare è che il concetto *naturale* sviluppato dalla mente umana per quantificare la plausibilità delle affermazioni in situazioni di incertezza è quello di probabilità.

Si tratta quindi di

costruire una teoria probabilistica (*probabilistica* e non, genericamente, "statistica") dell'incertezza di misura. (D'Agostini, gennaio 1999, 27)

Il primo concetto da rimettere in discussione è quindi proprio quello di probabilità.

Prima di introdurre un nuovo concetto, riflettiamo sul fatto che le "definizioni" standard non possono da un punto di vista teorico definire il concetto di probabilità. Prese alla lettera, esse sono infatti definizioni che si prestano a critiche radicali:

(*definizione classica*)

$$p \approx \frac{\text{numero dei casi favorevoli}}{\text{numero dei casi possibili (se ugualmente probabili)}}$$

(*definizione frequentista*)

$$p \approx \frac{\text{numero delle prove favorevoli}}{\text{numero totale delle prove}}$$

quando sono state effettuate un grande numero di prove nelle stesse condizioni.

La definizioni mostrano una evidente problema di coerenza logica, in quanto la prima *assume il concetto di equiprobabilità per definire la probabilità*, e la seconda, che consente di attribuire probabilità *a posteriori*, è applicabile solamente quando sia possibile ripetere *numerose* volte l'esperimento, *ma non è affatto chiaro che cosa debba intendersi per numerose*. Una critica famosa alla nozione di equiprobabilità, così come utilizzata per esempio nella definizione classica, è quella di De Finetti:

Tale giudizio di equiprobabilità[...]rispecchia una situazione di simmetria che viene spesso precisata obiettivamente dicendo che le palline debbono essere uguali, la moneta e il dado perfetti simmetrici fisicamente) ecc.; il criterio rimane tuttavia fundamentalmente soggettivo perché la scelta più o meno vaga di requisiti più o meno oggettivi da includere o no in tale concetto di "uguaglianza" non può che riflettere la distinzione soggettiva di ciascuno tra le circostanze che influiscono o non influiscono sulla sua opinione.(De Finetti, 1970, 235)

Questa critica è alla base dell'atteggiamento dei cosiddetti "soggettivisti":

La valutazione di equiprobabilità di due individui riflette quindi, secondo gli autori [soggettivisti] in esame, la distinzione puramente soggettiva delle circostanze che influiscono o non influiscono sugli eventi considerati. Pertanto se due individui pervengono alla medesima valutazione ciò dipenderebbe da ragioni psicologiche la cui validità è più o meno fortuita e che comunque non possono in alcun modo imporsi a livello razionale. Il fatto è che, sempre secondo gli anzidetti autori, non esisterebbe alcuna ragione, né logica né metafisica, in grado di costringere due individui a considerare allo stesso modo le circostanze e quindi ad arrivare alla medesima valutazione di equiprobabilità.(Costantini, Geymonat,1982, 65)

Inoltre ¹ dal punto di vista storico, le due "definizioni" di probabilità appena incontrate, hanno indotto molti

a confondere il concetto di probabilità con il suo metodo di valutazione, come si può verificare in vari libri di testo e voci di enciclopedia;

ritenere che il valore di probabilità sia oggettivo, cioè che sia insito nella natura delle cose e non dipenda da chi lo valuta;

credere che si possa parlare di probabilità solo in due casi, molto particolari e riduttivi, rispetto alla complessità del mondo reale. Sarebbero quindi esclusi da argomentazioni probabilistiche tutti quegli eventi (la stragrande maggioranza di quelli di interesse pratico e scientifico) per i quali è impossibile eseguire l'inventario dei casi possibili e di quelli favorevoli o per i quali non è possibile ripetere "infinite volte" l'esperimento nelle identiche condizioni.(D'Agostini, ottobre 2001, 23)

Che succede se tutti i risultati possibili non sono ugualmente probabili?

Con alcuni dadi progettati per certi scopi, alcuni risultati sono più probabili di altri: è più probabile, infatti, che un dado truccato cada su di un lato con maggiore frequenza rispetto agli altri.

Supponiamo che, in una coppia di dadi, uno sia truccato - bilanciato, cioè, in modo che un numero esca con maggiore frequenza degli altri. In questo caso le regole di calcolo più semplici non possono essere utilizzare per accertare le probabilità. Immaginiamo, ad esempio, di sapere che un dado è stato truccato in modo che il "sei" esca con maggiore probabilità rispetto agli altri numeri. In tale situazione, se tutti e due i dadi vengono lanciati, sappiamo che un doppio sei uscirà

¹ Si deve notare però che nello stesso volume Costantini e Geymonat affermano che:

E' errato (p. 62) legare la concezione bayesiana (vedi par. 9.3) al soggettivismo.

La concezione soggettivistica è foriera di idealismo (p. 62) e di solipsismo (p. 63).

Il soggettivismo radicale è implausibile (p. 64).

Le critiche alle concezioni oggettivistiche sarebbero smentite dalla storia della scienza e dalla sperimentazione scientifica (p. 70)

probabilmente con maggiore frequenza di 1 su 36, che, invece, è la probabilità corretta con cui dovrebbe uscire lanciando due dadi ben equilibrati. Ma di quanto è più probabile?

Un modo in cui possiamo scoprirlo è lanciare i dadi ripetutamente (moltissime volte), contando il numero di volte in cui otteniamo un doppio sei e esprimendo tale cifra come una proporzione del numero di lanci. Questa è la definizione di probabilità detta *frequenza relativa a long-range*¹. Questa definizione mette in relazione il concetto di probabilità matematica a qualcosa che può essere osservato empiricamente e, pertanto, lo collega alle scienze empiriche.

Con tutti i suoi vantaggi, la definizione di probabilità come frequenza relativa a long-range è applicabile solo alle situazioni che possono, almeno in teoria, essere ripetute molte volte. Tuttavia, esistono anche altre situazioni che, a differenza di quanto avviene nell'esempio appena fatto, si manifestano una volta soltanto, nella misura in cui esse non possono essere ripetute, e alle quali vogliamo comunque applicare la nozione di probabilità. Ad esempio potremmo considerare eventi storici oppure gli eventi come quelli meteorologici che dipendendo da un numero molto ampio di condizioni possono "ripetersi" soltanto in un senso molto. Si tratta di avvenimenti che si verificano una volta soltanto e, pertanto, la definizione di probabilità va modificata proprio al fine di permetterle di abbracciare anche questi eventi.

Introduco ora una nuova definizione, assumendo in sostanza che

il concetto di probabilità sia primitivo, ovvero vicino a quello del senso comune. Per dirlo in un modo scherzoso, il concetto di probabilità è quello che si ha "prima di andare a scuola" e che si seguita ad usare inconsciamente dopo, "nonostante quello che si è appreso". (D'Agostini, gennaio 1999, 28)

Cercherò quindi di mostrare che, come afferma più volte Laplace nel suo *Saggio filosofico sulle probabilità*, "al fondo, la teoria della probabilità non è che buon senso ridotto a calcolo".

Una definizione che vada oltre il concetto intuitivo e che non sia limitata ai casi *limite* degli eventi equiprobabili o delle prove effettuate in condizioni di equiprobabilità può far ricorso al concetto di scommessa, percepibile a livello intuitivo da tutte le persone razionali.

Una formulazione possibile, detta appunto *probabilità soggettiva*, è per esempio la seguente:

la probabilità di un evento A è la misura del grado di fiducia che un individuo coerente attribuisce, secondo le sue informazioni e opinioni, all'avverarsi di A.

Il campo di applicabilità di questa definizione è molto vasto; occorre aggiungere che la "coerenza" significa *la corretta applicazione delle norme di calcolo*. Vediamo meglio che cosa si intende con ciò. Il concetto di probabilità soggettiva sembrerebbe suggerire che ognuno possa assegnare una probabilità qualsiasi a un evento. Non è così. Infatti si introduce la seguente "regola": il soggetto è tenuto ad accettare tutte le scommesse che si riferiscono agli eventi stessi, alle loro negazioni e alle loro composizioni (una scommessa su, cioè, più di un evento); le probabilità associate agli eventi non devono essere modificate di volta in volta se le informazioni in possesso non mutano. Questa "regola" viene detta *assioma di coerenza* e serve a far sì che una persona non cambi la propria probabilità soggettiva per tornaconto personale. In altre parole, possiamo dire che una volta fissate le quote di scommessa pro e contro l'evento (proporzionali alla probabilità dell'evento e del suo opposto), *deve essere indifferente allo scommettitore il verso della scommessa*: se c'è una netta propensione pro, vuol dire che bisogna alzare la quota in favore dell'evento; nel caso opposto bisogna alzare l'altra quota. Il rapporto delle quote, in condizione di indifferenza sul verso da scegliere, è una valutazione del rapporto delle probabilità. Quindi il valore della probabilità è dato dalla quota di scommessa sull'evento divisa per il totale delle quote².

Soggettiva sta ad indicare che la valutazione di probabilità dipende dallo stato di informazione del soggetto che la esegue, e, anche se basata su una credenza specifica, *non è affatto arbitraria*: il

¹ Press, Tanur, 2001

² Per un approfondimento del concetto di probabilità soggettiva e del concetto di coerenza vedi Scozzafava, 2001; Ross, 2000; De Finetti, 1989 e 1995

ruolo normativo della scommessa coerente obbliga a tener conto di tutte le informazioni a disposizione.

The term *subjective* used here implies that this construct is based on a belief specific to an individual. The other definitions of probability given above are special cases of subjective probability. The belief could be that the mathematical probability (an enumerative proportion) is what is called for in a given instance. Or it might be that the long-range relative frequency (the proportion of times some event occurs within many trials) is what is called for in the belief system of the person making the probability statement. Or it could be that neither definition is appropriate, and the subjective probability statement instead implies a belief of the individual based on his or her scientific knowledge and deep understanding of some underlying biological, physical, or social phenomenon. (Press, Tanur, 2001, 202)

Ed inoltre è importante notare che

la conoscenza che altri valutano diversamente la probabilità dello stesso evento è una informazione che andrebbe utilizzata. Ma non tanto per mediare le due stime quanto piuttosto per capire meglio il problema e comportarsi alla fine nel modo più coerente possibile come se veramente si dovesse scommettere del denaro su o contro quell'evento. La così detta "oggettività", come è percepita da chi è al di fuori della ricerca scientifica, viene recuperata quando una comunità di esseri razionali condivide lo stesso stato di informazione. Ma anche in questo caso, si dovrebbe parlare più propriamente di "*intersoggettività*". (D'Agostini, ottobre 2001, 31)

Dunque la definizione di probabilità soggettiva sopra introdotta *non è affatto in contrasto con le due precedenti*, nel senso che le due "pseudo-definizioni" sono prontamente recuperate come regole di *valutazione* della probabilità, qualora colui che effettua la valutazione ritenga che le clausole presupposte dalle definizioni convenzionali siano soddisfatte. Il concetto di probabilità soggettiva dipende, in altre parole, dallo stato di informazione del soggetto che effettua la valutazione. Questa formulazione è oggi anche riconosciuta dalla Guida ISO:

In contrast to this frequency-based point of view of probability an equally valid viewpoint is that probability is a measure of the *degree of belief* that an event will occur. (ISO, 1993, 35)

E in effetti la principale differenza tra questo concetto di probabilità ed una presunta definizione oggettiva è che essa non è una caratteristica intrinseca di un evento, ma dipende dallo stato di informazione disponibile a chi esegue la valutazione (il quale, ovviamente, potrebbe poi rivelarsi "incompleto"). In una affermazione provocatoria De Finetti ¹ afferma: *la probabilità non esiste*.

The objectivist formulation of probability presumes the existence of a "real" world, which is beyond the pale of our ability to experience it and to measure it directly[...]The subjectivist formulation of probability and statistics is based upon a radical break with this conception of empirical science as yielding approximate results about a real world beyond our experience. We presume that scientific investigation constitute our studies about the world of human experience, not some supposed world outside of experience. Empirical measurements are merely the recording of human activity in the world, conducted according to operationally described procedures. (Lad, 1996, 11)

Il punto di forza di questa interpretazione soggettiva della probabilità è, oltre al recupero del concetto intuitivo, la possibilità di fare affermazioni probabilistiche su qualsiasi evento, indipendentemente dal fatto di avere un problema perfettamente simmetrico ("casi possibili e casi favorevoli") o di poter ripetere l'esperimento un grande numero di volte ("limite della frequenza").

Lo stesso si può dire di un qualsiasi fatto a noi ignoto, come l'altezza della prima persona che stiamo per incontrare per strada o la correttezza di una teoria scientifica ².

Sappiamo con certezza che l'altezza di una qualsiasi persona in cui casualmente ci potremmo imbattere sarà inferiore a 3 metri e superiore a 15 centimetri, poiché siamo consapevoli che non esiste nessun essere umano di tali dimensioni. Pertanto, possiamo dire che la nostra probabilità soggettiva che l'altezza di una persona sia inferiore a 15 centimetri e superiore a 3 metri è pari a zero. Tuttavia, sempre per quanto riguarda la nostra probabilità soggettiva, c'è il 50% di possibilità

¹ De Finetti, 1970

² Vedi Press, Tanur, 2001

che l'altezza di una persona sia compresa tra un metro e cinquanta e i due metri, il 25% che sia inferiore a un metro e sessanta e il 15% di possibilità che superi i 2 metri. Tutte queste probabilità soggettive sono basate su osservazioni, esperienze e conoscenze precedenti sulla crescita e la struttura del corpo umano; di conseguenza, se pensassimo che la prossima persona che incontreremo sia scelta a caso tra la popolazione, potremmo utilizzare tutte le informazioni note sulla distribuzione dell'altezza nella popolazione per calcolare la nostra probabilità soggettiva.

Negli ultimi anni questa interpretazione si sta lentamente imponendo in molti ambienti per la sua pragmaticità (si ispira a metodi che pongono l'accento sulla decisione piuttosto che sulle argomentazioni in base alle quali la decisione stessa è presa) e differenti ragioni:

Una di queste fu l'uso sempre più ampio di nozioni probabilistiche nella gestione delle aziende industriali e la conseguente posizione privilegiata che, almeno nei paesi occidentali, segnatamente in quelli di lingua inglese, vi assumono le decisioni personali. Va ricordato infatti che nonostante i "padri" europei, il moderno soggettivismo prese vigore e si irradiò in modo quasi travolgente dalla nazione guida del mondo capitalistico occidentale. L'altra fu il richiudersi delle concezioni oggettivistiche - e ciò vale in particolar modo per il frequentismo, la concezione più seguita da fisici e statistici - in un dogmatismo sempre più sordo ai progressi scientifici, in particolare ai sempre nuovi usi delle nozioni probabilistiche. (Costantini, Geymonat, 1982, 62)

Il concetto di probabilità soggettiva è, in ultima analisi, basato sull'idea che *la probabilità è legata allo stato di incertezza e non soltanto al risultato di esperimenti ripetuti*.

Questo punto di vista, che corrisponde al significato originale di "probabile", è quello che in effetti singolarmente sostenevano ¹ scienziati e filosofi come Hume, Laplace e Gauss. La stessa *Logica* di Port Royal finisce con una discussione sulle *credenze ragionevoli* e la credibilità, o grado di fiducia (vedi anche par. 7.1).

E' interessante sottolineare che nel punto di vista di Hume sul concetto della probabilità il concetto stesso e le valutazioni sono chiaramente separati:

Though there be no such thing as Chance in the world; our ignorance of the real cause of any event has the same influence on the understanding, and begets a like species of belief or opinion. There is certainly a probability, which arises from a superiority of chances on any side; and according as this superiority increases, and surpasses the opposite chances, the probability receives a proportionable increase, and begets still a higher degree of belief or assent to that side, in which we discover the superiority. If a die were marked with one figure or number of spots on four sides, and with another figure or number of spots on the two remaining sides, it would be more probable, that the former would turn up than the latter; though, if it had a thousand sides marked in the same manner, and only one side different the probability would be much higher, and our belief or expectation of the event more steady and secure. This process of the thought or reasoning may seem trivial and obvious; but to those who consider it more narrowly, it may, perhaps, afford matter for curious speculation. (Hume, cit. in D'Agostini, luglio 1999, 23)

I molteplici sensi in cui si può parlare di probabilità sono stati di fatto riconosciuti da molto tempo:

Carnap said we ought to distinguish a 'probability₁' from a 'probability₂'; later he spoke of inductive and statistical probabilities. Poisson and Cournot said we should use the ready-made French words *chance* and *probabilité* to mark the same distinction. Before that Condorcet suggested *facilité* for the aleatory concept and *motif de croire* for the epistemic one[...] Bertrand Russell uses 'credibility' for the latter[...] There have been many other words. We have had *Zuverlässigkeit*, 'propensity', 'proclivity', as well as a host of adjectival modifiers of the word 'probability', all used to indicate different kinds of probability. (Hacking, 1975, 13)

I diversi approcci, dunque, pur perseguendo degli scopi prettamente scientifici, si sono anche impegnati *nel problema filosofico di delineare una concezione generale di probabilità*. L'indirizzo classico e quello frequentista hanno sostenuto che la probabilità possiede una natura oggettiva; al contrario, l'indirizzo soggettivista ha sostenuto che la probabilità possiede una natura esclusivamente soggettiva.

¹ Vedi per esempio Hacking, 1975 e Stigler, 2000

Queste seppur brevi considerazioni giustificano davvero l'affermazione che *il problema della natura della probabilità, e la relativa scelta tra oggettivismo e soggettivismo, sono genuinamente filosofici.*

9.3 Il teorema di Bayes. Considerazioni epistemologiche.

*An effect may be produced by the cause a or by the cause b
The effect has just been observed. We ask the probability that
it is due to the cause a. This is an à posteriori
probability of cause. But I could not calculate it, if
a convention more or less justified did not tell me in advance
what is the à priori probability for the cause a
to come into play. I mean the probability of this event to
some one who had not observed the effect.*

Henri Poincaré

Our knowledge is the amassed thought and experience of innumerable minds.

Ralph Waldo Emerson

I nuovi sviluppi della teoria “degli errori” sono basati sul concetto di probabilità soggettiva e sul *teorema di Bayes*. Per introdurre quest'ultimo cercherò di evitare il più possibile i formalismi, nondimeno dovremo familiarizzare con un minimo di terminologia sulle variabili casuali (nel linguaggio della probabilità soggettiva).

Una *variabile casuale* è un numero aleatorio rispetto al quale si è in stato di incertezza. Facciamo due esempi nel contesto delle misure.

1. Pongo un chilogrammo campione su una bilancia di laboratorio con indicazione (digitale) dei centesimi. Che valore leggerò (in grammi)? 1000.00, 999.95, 1000.03 ...?
2. Leggo su una bilancia di laboratorio 2.315 g. Quanto vale il valore vero della massa del corpo? 2.311, 2.312, ... 2.315, ... 2.319, ...?

Nel primo caso la variabile è la lettura x (subordinatamente ad un certo valore vero); nel secondo caso la variabile è il valore vero, che ora indicherò con μ (subordinatamente ad un certo valore letto).

Ai possibili valori della grandezza viene associata una funzione $f(x)$ che quantifica il grado di fiducia ad essi assegnato. Quindi scrivere che $f(x_1) > f(x_2)$ sta ad indicare che si crede più a x_1 che a x_2 . A seconda che la variabile x sia *discreta* o *continua*, $f(x)$ ha l'accezione di *funzione di probabilità* o di *funzione densità di probabilità*.

Tutte le proprietà di $f(x)$ apprese nei testi convenzionali rimangono valide nell'approccio soggettivista. In particolare ricordo che la deviazione standard σ fornisce la dispersione di valori che è possibile attendersi dalla variabile.

Tutte le distribuzioni di variabile casuale sono subordinate ad un certo stato di informazione. Utilizzando i due esempi precedenti possiamo perciò scrivere,

$$\begin{aligned} f(x) &\rightarrow f(x|\mu = 1000.00) \\ f(\mu) &\rightarrow f(\mu|x = 2.315), \end{aligned}$$

ove "|" si legge "dato", "subordinatamente a", ecc.

L'intero stato di incertezza sui valori della grandezza di interesse è espresso da $f(\mu)$. Da questa funzione è possibile calcolare la probabilità che la grandezza abbia un valore compreso in un certo intervallo.

Ogni misura è eseguita allo scopo di accrescere la conoscenza di chi la esegue, si tratti di uno scienziato, un ingegnere che deve valutare/collaudare un prodotto o un apparato, un medico che ha prescritto una certa analisi. E' anche chiaro che la necessità stessa di eseguire misure indica che ci si trovava in uno stato di incertezza su qualcosa di interesse. Questo "qualcosa" può essere una costante fisica o una teoria sull'origine dell'universo, l'affidabilità di una apparecchiatura per trasmissione dati, lo stato di salute di un paziente, ecc...

In tutti i casi la misura ha lo scopo di *modificare* un certo stato di conoscenza.

Forse si potrebbe azzardare a dire che la misura serve ad "acquisire" e, non semplicemente, a "modificare", lo stato di conoscenza, se fosse vero che la conoscenza è creata dal nulla nell'atto della misura. Nella maggior parte dei casi, invece, ciò di cui veniamo a conoscenza è soltanto un aggiornamento dei dati noti acquisito mediante fatti nuovi ¹. Poniamo, ad esempio che la temperatura di una stanza misurata con un termometro digitale sia di 21,7°C: anche se avremo una possibilità di errore pari a un decimo di grado, avremo ristretto l'intervallo di temperature ritenute plausibili prima della misura, cioè tutte quelle misure che sono compatibili con la sensazione di "ambiente confortevole". Se il termometro avesse indicato 17,3°C, le nostre sensazioni fisiologiche ci avrebbero portato a dubitare del corretto funzionamento dello strumento, mentre se la temperatura segnata fosse stata di 2,5°C avremmo saputo con certezza che il termometro era guasto. I tre casi sopra citati propongono tre diversi esempi di gradi di aggiornamento della conoscenza, laddove, nell'ultimo caso, non esiste alcun aggiornamento.

Abbiamo già visto, nel cap. 3, la critica di Hume al processo di induzione.

L'approccio probabilistico appena intrapreso sembra essere una via che tiene davvero conto di tale critica e tenta una plausibile via di uscita.

Alcuni infatti affermano che l'unico metodo scientifico valido sia quello della falsificazione. Ma non è sempre così. Come bene viene riassunto da Amsterdamski alla voce *Esperimento* dell'enciclopedia Einaudi:

E' vero che dopo gli esperimenti di Lavoisier gli scienziati decisero di abbandonare la teoria flogistica, ma non è vero che de jure questa fosse l'unica possibilità. Inoltre, non è affatto vero che lo scienziato decida di abbandonare la teoria accettata tutte le volte che ottiene risultati che la contraddicono. Anzi, talvolta preferisce cambiare le assunzioni che ha accettato fino a quel momento, basandosi sulla conoscenza di sfondo di cui dispone. Questo metodo, che consiste nel salvare dalla falsificazione le teorie che si sono controllate, cambiando le assunzioni accettate fino a quel certo momento, è stato chiamato da Popper "stratagemma convenzionalistico", ed è vietato dalla sua metodologia. In sua vece, Popper propone di ammettere che la conoscenza di sfondo sia considerata vera per convenzione e di abbandonare le teorie che si sono controllate soltanto se esse sono contraddette dagli esperimenti. Si può obiettargli che, se si accetta questa sua regola, si ammette che sia possibile pronunziare i verdetti più severi sulla base di semplici prove circostanziali: cioè, che si corre il rischio di abbandonare una teoria vera. E c'è di più: la storia della scienza dimostra che non sempre l'esigenza di Popper è stata accettata dalla pratica effettiva degli scienziati: questi, anzi, talvolta scelgono una soluzione, talaltra un'altra soluzione, e sia l'una sia l'altra possono portare ugualmente al successo o alla sconfitta. Si prenda un esempio notissimo. All'inizio del XIX secolo, Bouvard aveva osservato che l'orbita di Urano non andava d'accordo con la teoria di Newton. Per spiegare l'anomalia osservata esistevano due possibilità: o abbandonare la ben confermata teoria newtoniana, o supporre che esistesse un corpo celeste sconosciuto, che perturbava l'orbita di Urano. La fiducia nella teoria di Newton indusse Bouvard ad avanzare l'ipotesi dell'esistenza di un pianeta sconosciuto. Così la teoria di Newton fu salvata da quello che, *prima facie*, appare come uno « stratagemma convenzionalistico »; cioè avanzando un'ipotesi che cambiava la nostra conoscenza di sfondo sul numero dei pianeti del sistema solare. E questa mossa ebbe successo. Tuttavia la medesima mossa non ebbe affatto successo nel caso di un'anomalia analoga osservata nell'orbita di Mercurio. A dispetto di molti anni di tentativi per spiegarla in base alla teoria newtoniana, essa non poté essere spiegata prima della formulazione, da parte di Einstein, della teoria generale della relatività. In questo caso, la liquidazione dell'anomalia osservata richiedeva la confutazione della teoria.

Altro esempio ben noto d'una scelta di questo genere, tra le possibili interpretazioni dei risultati ottenuti sperimentalmente, è stato fornito dall'indagine sul decadimento β . Sembrò che il decadimento β contraddicesse la legge

¹ Vedi D'Agostini, gennaio 1999

della conservazione dell'energia. Nel 1924 Bohr, Kramers e Slater proposero una teoria nella quale le leggi classiche della conservazione dell'energia venivano rimpiazzate da leggi statistiche. Ciò significa che essi tentarono di liquidare l'anomalia sperimentale cambiando, in maniera radicale, la nostra « conoscenza di sfondo»; infatti la legge della conservazione dell'energia è una delle pietre angolari dell'intera conoscenza scientifica. Ma nel 1932 Wolfgang Pauli avanzò l'ipotesi che il decadimento β produca una particella sconosciuta, che chiamò neutrino, e che, se si tiene conto dell'energia del neutrino, sia possibile salvare la legge della conservazione dell'energia nella sua forma classica. Nel 1933-34, Fermi provò che l'ipotesi di Pauli era quella giusta. (Amsterdamski, 1977, 837-838)

Proprio uno dei più importanti esperimenti compiuti nel secolo scorso, l'esperimento di Michelson-Morley, nel 1904, fu interpretato da Lorentz, e la sua interpretazione soddisfaceva tutte le condizioni fisiche, in modo tale che ogni corpo fosse in movimento rispetto all'etere immobile o allo spazio assoluto, subendo una certa contrazione nella dimensione parallela al moto. L'esperimento di Michelson-Morley, tuttavia, servì, come è noto, come punto di partenza per lo sviluppo della teoria della relatività e fu interpretato da Einstein¹ in senso affatto diverso, opposto all'accettazione dello spazio assoluto. Il punto è che entrambe le interpretazioni danno una spiegazione completa di tutte le osservazioni note all'inizio del ventesimo secolo. Un *experimentum crucis* non avrebbe potuto davvero decidere fra queste due teorie.

D'Agostini fa ancora un'interessante affermazione:

Non ci sono dubbi che, se una teoria non è in grado di descrivere i risultati di un esperimento, essa vada scartata o modificata. Ma poiché non è possibile dimostrare la certezza di una teoria, diventa impossibile decidere fra tutte le (infinite) ipotesi non falsificate. *Il metodo probabilistico permette di fornire una scala di credibilità a tutte le ipotesi considerate* (o rapporti di credibilità fra ogni coppia di ipotesi). Un caso in cui il metodo di falsificazione è completamente inadeguato è quello relativo alle incertezze di misura. Infatti, prendendo alla lettera tale metodo, si sarebbe autorizzati soltanto a verificare se il valore osservato sullo strumento è compatibile o no con un valore vero, niente di più. Si capisce come, con queste premesse, non si possa fare molta strada. (D'Agostini, gennaio 1999, 32) (il corsivo è mio)

In generale, di fronte ad ipotesi probabilistiche (l'area in cui peraltro la metodologia è di maggior importanza per gli scienziati praticanti) il metodo della falsificazione non può essere applicato in modo così rigido ed automatico perché il verificarsi di un certo esito non può smentire in maniera definitiva l'ipotesi formulata:

Many scientific theories are explicitly probabilistic and, for this reason, have no logical consequences of a verifiable character. An example is Mendel's theory of inheritance. This states the probabilities with which certain combinations of genes occur during reproduction; but, strictly speaking, the theory does not categorically rule out, nor predict, any particular genetic configuration. Nevertheless, Mendel obtained impressive confirmation from the results of his plantgrowing trials, results which this theory did not entail but stated to be relatively probable. (Howson, Urbach, 1993, 7)

In altre parole, i principi sui quali si basa Popper sono troppo deboli per restringere sufficientemente il campo di ipotesi alternative, laddove, in pratica, gli scienziati hanno un sistema di classificazione delle ipotesi secondo la loro eleggibilità, *valutata intersoggettivamente*, per una seria considerazione. Tale sistema è stato tradizionalmente caratterizzato come uno spettro di probabilità. Scriveva Poincaré nel 1905 (in *Science and Hypothesis*):

Have we any right, for instance, to enunciate Newton's Law? No doubt numerous observations are in agreement with it, but is not that a simple fact of chance? And how do we know, besides, that this law which has been true for so many generations will not be untrue in the next? To this objection the only answer you can give is: it is very improbable[...] From this point of view all the sciences would only be unconscious applications of the calculus of probabilities. And if this calculus be condemned, then the whole of the sciences must also be condemned. (Poincaré, cit. in Howson, Urbach, 1993, 9)

¹ Per una trattazione di questi aspetti vedi per esempio Bellone, 1988

Per formalizzare il discorso intrapreso, occorre associare variabili casuali sia ai possibili valori delle grandezze fisiche che ai valori osservabili sullo strumento. Fatto ciò, si tratterà di imparare come inferire la distribuzione di probabilità del valore vero, ossia come valutare, per ogni possibile valore della grandezza, un corrispondente grado di fiducia.

Come detto,

$$f(x|\mu)$$

sta per la funzione densità di probabilità (x è una variabile continua, dal punto di vista pratico) di osservare un certo valore x , dato un determinato valore vero μ . In un certo senso tutti i possibili valori di μ possono essere visti come le infinite “cause” responsabili del valore x osservato (il loro “effetto”).

La funzione $f(x|\mu)$ ci dà la verosimiglianza che rispetto al valore vero μ l'esito di una misura possa dare come risultato x e per questo è chiamata semplicemente *verosimiglianza*. Essa va stimata dalla conoscenza del comportamento dello strumento e, più in generale, dell'insieme di tutte le procedure di misura. Molto spesso si utilizza per la verosimiglianza un modello gaussiano, giustificato dalle aspettative teoriche basate sul teorema del limite centrale (vedi par 7.5).

Una volta fissata la funzione di verosimiglianza e un valore osservato x , si tratta di costruire la $f(\mu|x)$. Per arrivare in modo euristico alla formula generale, consideriamo soltanto due possibili valori di μ . Se, in base alle nostre conoscenze, riteniamo i due valori ugualmente probabili, ci sembrerà naturale protendere per il valore per il quale la verosimiglianza di osservare x è maggiore. Ad esempio, se $\mu_1 = -1$, $\mu_2 = 10$ e $x = 2$, si è tentati a credere che l'osservazione sia dovuta più verosimilmente alla causa μ_1 che alla causa μ_2 . Se però la grandezza di interesse è definita positiva, la causa μ_1 crolla da causa più probabile a causa impossibile. Ci sono poi casi intermedi in cui, *per motivi legati all'esperienza precedente*, si tende a credere *a priori* più ad una causa che all'altra. Ne segue che il grado di fiducia risultante di un certo valore di μ sarà proporzionale sia alla verosimiglianza che esso produca il valore osservato che al grado di fiducia che si attribuiva a μ prima dell'osservazione:

$$f(\mu|x) \propto f(x|\mu) \cdot f_0(\mu)$$

Questo è uno dei modi di scrivere il teorema di Bayes, che ha un ruolo centrale in tutte le inferenze probabilistiche ¹. Il teorema prende il nome da un ministro della chiesa Presbiteriana Riformista ² che nel 1763 pubblicò un documento (*Essay toward solving a Problem in the Doctrine of Chances*) nei *Philosophical Transactions of the Royal Society* in cui ci si serve di un metodo atto ad elaborare operazioni statistiche basandosi su una prima comprensione di un fenomeno e combinando formalmente quella prima visione con dati misurati al momento in modo da aggiornare l'opinione scientifica di colui che conduce l'esperimento. Il punto centrale del saggio è un teorema che identifica come le prove miste di una sequenza di esperimenti possano essere utilizzate per derivare le probabilità circa il risultato del prossimo esperimento, dettagliando precisamente come le prove di 100 osservazioni possano essere riconosciute come diverse dalla prova di una singola di esse.

Questo tipo di approccio all'inferenza probabilistica ha quindi una storia lunga, e cominciò ad essere messo in discussione solo con l'avvento della cultura positivista; per essere infine messo in disparte all'inizio del XX secolo:

¹ Per approfondimenti vedi per esempio Box, 1992

² Thomas Bayes era pastore presbiteriano. Per i suoi contributi matematici divenne *fellow* della Royal Society nel 1742. La sua memoria postuma (Bayes morì nel 1761) fondamentale fu comunicata e presentata da Richard Price, anch'egli pastore presbiteriano e futuro *fellow* della Royal Society, nonché scrittore radicale, economista, filosofo e uno dei fondatori della scienza attuariale inglese

A large international school of scientists preceded, supported, expanded, and developed Bayesian thinking about science. These included such famous scientists as James Bernoulli in 1713 (even before the paper by Bayes was published), Pierre Simon de Laplace in 1774, and many twentieth century scientists such as Bruno de Finetti, Harold Jeffreys, L.J. Savage, Dennis V. Lindley, and Arnold Zellner. Bayesian methodology was the method of statistical inference generally used from the time of Bayes until the early part of the twentieth century, when Sir Ronald A. Fisher and others introduced the *frequentist approach* to statistical inference. (Press, Tanur, 2001, 204)

Ed è facile notare che l'affermarsi dell'"approccio frequentista", sull'onda dell'affermazione della cultura neopositivista, rappresentò, in questo campo, uno sviluppo originale di quella ricerca di "precisione" e razionalità iniziata con la società moderna e sulla quale a lungo mi sono soffermato nella prima parte di questo scritto. Anche questo, a mio avviso, è un esempio chiaro del ruolo importante che possono svolgere i presupposti culturali nel successo di una teoria (o anche semplicemente di una procedura) scientifica.

Uno dei primi fisici del XX secolo a riflettere sull'approccio bayesiano alle misure fu Enrico Fermi. Ricorda un suo allievo alla University of Chicago nel 1947:

I have one more personal example of how Fermi left his mark on the entire international physics community[...]most physicist were not very knowledgeable about statistical inference. In my thesis I had to find the best 3-parameter fit to my data and the errors of those parameters in order to get the 3 phase shifts and their errors. Fermi showed me a simple analytical method. At the same time other physicists were using and publishing other cumbersome methods. Also Fermi taught me a general method, which he called Bayes Theorem, where one could easily derive the best-fit parameters and their errors as a special case of the maximum-likelihood method. I remember asking Fermi how and where he learned this. I expected him to answer R.A. Fisher or some textbook on mathematical statistics. Instead he said «perhaps it was Gauss.»[...]Frank Solmitz, a fellow grad student, and I felt we should get down on paper what we were learning from Fermi. So with help from Fermi and Frank Solmitz I pulled all this together a few years later in a 1958 UCRL report called «Notes on Statistics for Physicists».(Orear, 2001, 32-33)

Dal teorema di Bayes nasce la statistica bayesiana, *basata appunto sull'idea intuitiva che la probabilità quantifica il grado di fiducia nell'occorrenza di un evento*. E la statistica diventa allora *uno strumento logico* per aggiornare la probabilità *alla luce di tutti i diversi tipi di informazione*. Forse è utile mostrare un ragionamento intuitivo, suggeritomi da D'Agostini, che aiuta a capire meglio il contributo delle probabilità a priori nelle inferenze.

Consideriamo un cacciatore che si aggira in un bosco con il suo cane sempre in continuo movimento intorno a lui. Supponiamo che la probabilità che il cane si trovi entro un raggio di 100 m dal cacciatore sia del 50 %. Osserviamo il cane in una certa posizione: cosa possiamo dire sulla posizione dove si trova il cacciatore? Nessuno esiterà a dire che, al 50 %, si troverà entro 100 m dal cane. Chiaramente il cacciatore sta per μ e il cane per l'osservazione x . Ma non è difficile convincersi che per arrivare in modo intuitivo a questo risultato, si sta tacitamente assumendo che il cacciatore possa essere, a priori, in ogni punto del bosco. Le cose cambiano se il cane sta costeggiando un fiume, se corre in una certa direzione con la preda in bocca o se è dentro un terreno recintato (ad esempio a oltre 100 metri dal filo spinato) in cui lui può entrare e il cacciatore no. Detto più chiaramente, si sta assumendo una *distribuzione iniziale uniforme* (del cacciatore nella foresta) e una verosimiglianza simmetrica. Ogni variazione da questo modello porta a conclusioni differenti. Spesso, in semplici misure di routine il modello cacciatore \rightarrow cane e cane \rightarrow cacciatore funziona secondo l'inversione intuitiva che abbiamo descritto. Ci sono però casi (specialmente in fisica) in cui questo è tutt'altro che vero.

Molti possono rimanere perplessi al pensiero che le conclusioni scientifiche possano dipendere dal "pregiudizio" sulla grandezza fisica. Ma anche se pregiudizio ha nel linguaggio corrente un significato prevalentemente negativo, in realtà significa semplicemente un giudizio basato su una esperienza acquisita in precedenza ¹. Secondo il punto di vista bayesiano, *il ragionamento scientifico, e almeno in parte quello quotidiano, vengono condotti in termini probabilistici*. (Come

¹ Sottolineo che secondo alcuni (per esempio Giannoli, comunicazione personale) si può anche dire che il moderno calcolo combinatorio *impone* le sue regole ai gradi di credenza che ogni individuo (idealmente) razionale dovrebbe avere

ho cercato di mostrare agli inizi del cap. 6 ciò è ora considerato “accettabile” dalla comunità scientifica all’interno di un nuovo paradigma che rinuncia a concetti idealizzati di oggettività e precisione). In altre parole, quando una persona valuta un’affermazione incerta, lo fa calcolando la probabilità dell’ipotesi alla luce delle informazioni conosciute.

Come *i pregiudizi siano sempre presenti nelle nostre valutazioni*, è ben esemplificato anche dal fatto che la stessa esperienza visiva che l’osservatore ha quando guarda un oggetto dipende dalla sua esperienza passata, dallo stato delle sue conoscenze e dalle sue aspettative.

Ecco due esempi che illustrano bene questo punto:

In un esperimento molto noto, a dei soggetti venivano mostrate in rapida successione delle carte da gioco e veniva loro chiesto di identificarle. Finché si utilizzava un normale mazzo di carte, tali individui erano capaci di soddisfare questa richiesta. Non appena, però, venivano introdotte carte irregolari, ad esempio un asso di picche rosso, allora sulle prime quasi tutti i soggetti identificavano da principio quelle carte irregolari come carte normali: vedevano così un asso di picche rosso come se fosse un normale asso di quadri o un normale asso di picche. Le impressioni soggettive esperite dagli osservatori erano influenzate dalle loro attese. Quando, dopo un periodo di confusione, i soggetti cominciarono a rendersi conto oppure venivano avvisati della presenza nel mazzo di carte anomale, allora non avevano più alcuna difficoltà a identificare correttamente tutte le carte che venivano loro mostrate, sia che fossero anomale sia che non lo fossero. Un mutamento nelle loro cognizioni e nelle loro aspettative era accompagnato da un mutamento in ciò che vedevano, benché guardassero sempre gli stessi oggetti fisici.

Un altro esempio è fornito da un gioco infantile che consiste nel trovare i caratteri di un volto umano confusi tra il fogliame nel disegno di un albero. In questo caso ciò che si vede, vale a dire l’impressione soggettiva esperita da una persona che osserva il disegno, corrisponde sulle prime a un albero con relativi fusto, foglie e rami. Ma tutto questo cambia non appena viene rintracciato il volto. Ciò che prima veniva visto come fogliame e parti di rami è visto adesso come volto umano. Ancora una volta, lo stesso oggetto fisico è stato osservato prima e dopo la soluzione dell’indovinello ed è presumibile che l’immagine sulla retina dell’osservatore non cambi quando si è trovata la soluzione e il volto è stato scoperto. Inoltre, se la figura viene guardata dopo qualche tempo, un osservatore che abbia già sciolto una volta l’indovinello riconoscerà di nuovo il volto facilmente. In questo esempio, quel che uno spettatore vede è condizionato dallo stato delle sue conoscenze e dalla sua esperienza. (Chalmers, 1977, trad. it. 34)

Non sarebbe difficile produrre esempi tratti dalla pratica scientifica e dalla storia della scienza che mettono in chiaro questo stesso punto, vale a dire che ciò che gli osservatori vedono, le esperienze soggettive che hanno quando osservano un oggetto o una scena, non è determinato soltanto dalle immagini sulle loro retine, ma dipende anche dall’esperienza, dalle cognizioni, dalle attese e dallo stato interiore complessivo di chi osserva:

Un ricercatore che sperava di sapere qualcosa circa l’opinione degli scienziati a proposito della natura della teoria atomica, chiese a un famoso fisico e a un eminente chimico se un singolo atomo di elio fosse una molecola o no. Entrambi risposero senza esitare, ma le loro risposte non furono identiche. Per il chimico l’atomo di elio era una molecola, perché si comportava come tale rispetto alla teoria cinetica dei gas. Per il fisico, d’altra parte, l’atomo di elio non era una molecola, perché non presentava nessuno spettro molecolare. Presumibilmente entrambi parlavano della stessa particella, ma essi la consideravano secondo le differenti prospettive delle loro rispettive formazioni ed attività di ricerca. Le loro esperienze nel risolvere problemi avevano insegnato loro che cosa doveva essere una molecola. Senza dubbio le loro esperienze avevano avuto molti punti in comune, ma in questo caso, portavano i due specialisti a conclusioni diverse. (Kuhn, 1962, 73-74)

Ci volle più di un secolo e mezzo dopo la scoperta degli spermatozoi perché si arrivasse a capirne il ruolo nella fecondazione, e dovettero passare duecento anni dalla scoperta dei gameti maschili e femminili perché il concetto di fecondazione venisse formulato correttamente. Si vede qui bene quale parte giocassero le rappresentazioni mentali dei vari studiosi nell’interpretazione delle loro osservazioni, *cioè, in ultima analisi, nell’edificazione del sapere scientifico*.

[...] pure observation does not create, or increase, knowledge without personal inputs which are needed to elaborate the information. In fact, there is nothing really objective in physics, if by objective we mean that something follows necessarily from observation, like the proof of a theorem. There are, instead, beliefs everywhere. Nevertheless, physics is objective, or at least that part of it that is at present well established, if we mean by 'objective', that a rational individual cannot avoid believing it. This is the reason why we can talk in a relaxed way about beliefs in physics

without even remotely thinking that it is at the same level as the stock exchange, betting on football scores, or... New Age. (D'Agostini, luglio 1999, 124)

La validità delle basi sperimentali e la coerenza logica della conoscenza che proviene dall'indagine scientifica - secondo la concezione tradizionale - devono essere assicurate da regole metodologiche rigorose, al fine di assicurare che fattori soggettivi, come pregiudizi personali, coinvolgimenti emotivi o interessi privati, vengano totalmente rimossi. La storia della scienza dimostra invece che gli scienziati più famosi hanno condizionato le loro metodologie di ricerca con le loro credenze, le loro opinioni e le loro intuizioni personali in diversi modi, spesso anche senza rendersene conto o senza darne esplicita e formale comunicazione. Tale soggettività comprendeva idee, intuizioni, credenze forti, interpretazioni scientifiche di principi di base, che essi avevano elaborato e acquisito durante i propri studi o su cui avevano ricevuto adeguate informazioni: si fondavano, cioè, su osservazioni precedentemente elaborate da loro stessi o da altri.

Le conclusioni scientifiche sono, pertanto, *il risultato della fusione delle credenze e delle interpretazioni presenti prima di effettuare esperimenti con l'analisi di dati sperimentali.*

E' necessario imparare a guardare con occhio esperto nel telescopio o al microscopio: i raggruppamenti non strutturati di macchie scure e luminose che vede il principiante sono altra cosa dalle forme e spettacoli minuziosi che l'osservatore competente è in grado di discernere. Qualcosa di simile deve essere accaduto quando Galileo per primo introdusse il telescopio come strumento utile all'esplorazione dei cieli. Le riserve avanzate dai rivali di Galileo nell'accettare fenomeni quali le lune di Giove da lui scoperte devono essere attribuite in parte non a pregiudizi, ma a positive difficoltà nel vedere attraverso quello che, dopo tutto, era un telescopio alquanto rudimentale. (Chalmers, 1977, trad. it. 35)

La scelta stessa della strumentazione di laboratorio è ovviamente influenzata dalle nostre aspettative:

In breve, la decisione di usare una particolare apparecchiatura e di usarla in un particolare modo indica che si dà per scontato in forma più o meno cosciente che si dovranno verificare solo circostanze di un certo tipo. Vi sono, oltre alle aspettative teoriche, anche quelle strumentali, e queste hanno spesso svolto un ruolo decisivo nello sviluppo scientifico. (Kuhn, 1962, trad. it. 83)

Per dirla con una espressione di Koyré¹, gli strumenti sono davvero "*incarnazioni*" della teoria. Con ciò ovviamente non si vuole affermare che la scienza debba abbandonare la strumentazione convenzionale, ma mettere in luce che le relative scelte inevitabilmente restringono il campo dei fenomeni accessibili all'indagine scientifica (vedi anche par 1.2).

Nel nuovo approccio alla determinazione delle incertezze di misura si vuole tener conto delle credenze pregresse *in maniera coerente*. Il relativo formalismo parte proprio dal teorema di Bayes e da alcune conseguenze teoriche che da esso scaturiscono. Come è naturale anche il concetto di "precisione" perde, in questo contesto, il valore "oggettivo" che a lungo si è cercato di attribuirgli. Questo nuovo approccio è parte di un nuovo paradigma che non cerca rifugio in un concetto ideale di "oggettività", ma cerca di fare i conti con il modo concreto con cui scienziati o ricercatori operano o possono operare al meglio nel valutare i risultati dei loro esperimenti e delle loro osservazioni. Lo studio della metodologia della misura assume in questo contesto, di nuovo, un valore esemplare. Le scienze fisiche hanno fatto delle misure un procedimento estremamente efficace per l'accesso alla conoscenza della natura. Governando il rapporto tra teoria ed esperienza e la comparazione tra le varie teorie, le misure hanno plasmato le nozioni di "oggettività" e di "scientificità". Come sottolinea Ancarani, citando anche Bachelard,

L'attività di misura occupa una posizione centrale perché da sola è sembrata in grado di contornare tutta una epistemologia. Essa infatti è apparsa così connessa ai valori razionali della scienza *da aver costituito il segno più sicuro della oggettività scientifica*; la comparazione quantitativa è diventata così la solida e positiva soglia della conoscenza razionale in grado da sola di dar luogo ad un consenso generalizzato.

¹ Vedi per esempio Koyré, 1950

Osserva Bachelard che "alla base della fisica moderna si potrebbe porre questo duplice postulato metafisico: ciò che si misura esiste e lo si conosce nella proporzione in cui la misura è precisa". Se a tutta una metodologia, legata alla tradizione positivista, la positività della misura è apparsa così decisiva da far dimenticare i postulati tacitamente accettati in ragione del privilegio che le veniva accordato, era perché *l'ideale della precisione metrica*, come criterio di rigore conoscitivo, *si attagliava perfettamente allo schema di lento e continuo accumulo in senso estensivo ed intensivo che costituiva la base della visione positivista della scienza.*

Gli incrementi verso il limite di una precisione metrica assoluta corrispondevano all'individuazione di variabili perturbanti la cui progressiva messa in luce avrebbe dovuto contribuire a quell'ideale di assoluto isolamento del fenomeno e di completa definizione degli elementi interagenti, che rappresentava il fondamento ontologico dell'oggettività positivista. In questo contesto "è attraverso la misura precisa che l'oggetto può rivelarsi come permanente e fisso, vale a dire può essere veramente riconosciuto come oggetto". In conclusione: "tutte le relazioni del mondo sensibile dovrebbero tradursi, per essere comprese in una maniera sufficiente, in questa tematica abbastanza povera che si adatta alla misura. La misura appare come l'epistemologia fondamentale, come la base dell'aritmizzazione dell'esperienza. (Ancarani, 1981, 54-55)(i corsivi sono miei)

Le considerazioni fino ad ora avanzate aprono diversi interrogativi. Leggiamo come bene riassume il tutto Cini:

A questo punto ci si può domandare se la conoscenza acquisita dalla scienza moderna non sia altro che una forma specifica di apprendimento sociale, sviluppatasi nei paesi europei a partire dal diciassettesimo secolo, non qualitativamente diversa, dal punto di vista delle modalità generali di valutazione dell'efficacia rispetto alle aspettative, dalle altre forme di apprendimento sociale elaborate in altre epoche e in altre civiltà, intese a controllare la natura e a intervenire su di essa per fini determinati socialmente condivisi.

Se si accetta la concezione standard della scienza, secondo la quale essa fornisce l'unica conoscenza oggettiva e razionale possibile di un mondo esterno dotato di proprietà che sono conseguenza necessaria di leggi universali e immutabili della natura, si deve rispondere negativamente. Il momento della convalida sociale dei contributi alla sua crescita è infatti in questo caso sostanzialmente irrilevante. La comunità si limita a prendere atto della corrispondenza fra il procedimento seguito dal singolo ricercatore per ottenere un determinato risultato e il "Metodo scientifico" che ne garantisce l'oggettività e la razionalità. Ciò che conta è soltanto il rapporto diretto fra il singolo scienziato e la Natura. L'unica garanzia della verità raggiunta è la conformità delle sue azioni rispetto alle norme che il Metodo prescrive.

Le cose tuttavia cambiano radicalmente se si riconosce che il metodo universale per raggiungere la verità non esiste. In questo caso il massimo di 'oggettività' raggiungibile è assicurato soltanto dall'intersoggettività del giudizio di validità della conoscenza espresso dalla comunità dei depositari del sapere. Diventa allora essenziale distinguere il momento, tipicamente individuale, della formulazione da parte di un singolo scienziato di una proposta di innovazione nella lettura dei fatti, nel modo di generalizzarli, di collegarli ad altri, dal momento, tipicamente sociale, della valutazione di questa proposta da parte della comunità competente, al fine di accettarla o respingerla. (Cini, 1994, 185-186)

Anche lo studio della storia della metrologia, ed in particolare il recente affermarsi di un nuovo approccio alla determinazione delle incertezze di misura (par. 9.5), dimostrano come le conoscenze pregresse e le relative aspettative solo apparentemente non hanno una parte rilevante nel comporre ed analizzare un esperimento. Questo tipo di informazioni interferisce con i procedimenti osservativi, quando si deve decidere se gli enunciati teorici nei quali sono stati tradotti i risultati forniti dagli esperimenti sono compatibili o incompatibili con le ipotesi teoriche che costituiscono le possibili risposte al problema che si deve risolvere. Quando si osservano certe tracce su una lastra fotografica e le si interpretano come tracce di certe particelle cosmiche dotate di un'energia ben definita, si deve, per esempio, valutare se quest'interpretazione concorda con le ipotesi riguardanti l'origine di queste particelle che si vogliono controllare. E la valutazione è basata, ovviamente, sulle diverse teorie fisiche, astronomiche e cosmologiche, accettate in precedenza.

Anche i cosiddetti "dati grezzi" sono per loro natura interpretati. E per quanto riguarda la successiva valutazione di questi dati, anche se spesso tacitamente si suppone che le appropriate procedure siano neutrali rispetto alla teoria, ciò *non è evidentemente vero*. Nella complessa valutazione delle prove esse sono applicate sensatamente solo da coloro che comprendono tutti i dettagli dell'esperimento. Afferma un fisico e filosofo della fisica contemporaneo:

Experiments begin and end in a matrix of beliefs[...]belief in instrument type, in programs of experiment enquiry, in the trained, individual judgments about every local behavior of pieces of apparatus. (Galison, 1987, 277)

Ritengo che, come anche Cini sottolinea, uno dei filosofi della scienza italiani che abbia contribuito a chiarire *alcune* conseguenze di tutto ciò sia Marcello Pera. Nel criticare il *modello metodologico tradizionale*, cercando di evitare contemporaneamente l'adesione ad ogni modello *contrometodologico*, Pera propone il modello della *retorica*. In quale modo? Scrive Pera:

Il modello metodologico concepisce la scienza come una partita a due giocatori: il ricercatore propone e la natura, con un sì e un no forti e netti, dispone. Nel modello contrometodologico la situazione è la stessa, con la sola differenza che qui la voce della natura è tanto flebile che è sovrastata da quella dell'interlocutore fino al punto che è questi a mettere in bocca alla natura le risposte desiderate. Il modello retorico prevede invece tre giocatori, tutti ugualmente protagonisti: c'è un proponente che avanza una tesi, la natura che dà risposte e una comunità di interlocutori che, attraverso un dibattito regimentato da fattori di vario tipo, forma il consenso su una risposta, la quale, a partire da quel momento, diventa la voce ufficiale della natura.

In questo modello la natura non parla da sola, parla nel dibattito e *tramite* il dibattito. (Pera, 1991, 16)

Ciò non significa certo sostenere che gli scienziati potrebbero aver deciso di accettare indifferentemente qualsiasi “fatto” o teoria. Significa, o può significare, che per produrre un “fatto” o una teoria adeguata della conoscenza scientifica bisogna prendere sul serio i processi scientifici, riferirsi cioè al *come* in realtà gli scienziati, nel labirinto di teorie ed esperienze, giungono a scelte consensuali *intersoggettive, non arbitrarie*, che fanno avanzare le conoscenze. Il punto centrale è che “la conoscenza” deve essere riconosciuta come valida da un soggetto collettivo che può essere l'intera comunità scientifica della disciplina in questione o anche un gruppo socialmente investito a realizzare questo compito ¹.

Anche Bachelard arriva a considerazioni analoghe, come ci ricorda Ancarani nel saggio citato:

La nozione di 'città scientifica', con la quale Bachelard indica non solo quella che oggi chiameremmo la comunità scientifica, ma altresì il complesso degli apparati teorico-sperimentali che presiedono alla sua prassi, fa emergere in primo piano nell'epistemologia bachelardiana il carattere *intersoggettivo* della scienza. Al di là del soggetto e dell'oggetto i costrutti teorico-operativi delle nuove scienze si presentano come emergenze socialmente costituite. Da un lato, infatti, gli 'objets scientifiques' sono per Bachelard risultati di una organizzazione concettuale e dotati di un tipo di esistenza specifico che dà luogo ad una sorta di 'seconda natura' (opposta alla natura naturale). D'altro canto, attraverso la nozione costruttiva degli oggetti scientifici, la scienza si lega inscindibilmente al contesto di una pratica e di una attività umana materializzata in quella particolare sfera di esistenza sociale che è la 'città scientifica'. Non si dà prassi sperimentale senza che l'atto epistemologico di strutturazione degli oggetti scientifici presupponga la costituzione intersoggettiva ed istituzionale della scienza.

Gli oggetti delle scienze mature sono dunque interpretati come oggetti culturali incorporati ad una storicità che li ha canalizzati in forme razionali determinate ed intersoggettive, estranee al solipsismo del soggetto e dell'oggetto e restituiti solo attraverso le vicende della loro interna genealogia. Allo scenario 'robinsoniano' della gnoseologia classica che isola soggetto-oggetto in una dimensione falsamente costitutiva del momento conoscitivo, Bachelard contrappone l'organizzazione razionale del sapere scientifico attraverso il suo carattere eminentemente sociale. (Ancarani, 1981, 106-107)

E così, potremmo dire, sono *l'universalismo e l'oggettivismo ingenui a rilevarsi una finzione che può diventare mistificante*. Come spesso sottolinea Cini nei suoi scritti critici, anche nella scienza, come nella vita, non esiste una sola verità: ne possono esistere tante quante sono i sistemi di valori contrapposti che stanno alla base delle affermazioni sulla natura ammesse al dibattito all'interno delle comunità disciplinari competenti. E ciò si applica partendo già dai processi di misurazione. Nel laboratorio nulla è semplicemente dato. *Le misure sono prese, non date. La scienza senza credenze pregresse non ha senso.*

Come affermavo nell'Introduzione, queste constatazioni possono certo aprire un importante dibattito etico, che comunque è al di fuori degli scopi di questo lavoro. Voglio solo accennare, in

¹ Come ho cercato di mostrare nei capitoli precedenti con riferimento specifico alla storia della metrologia, i risultati delle decisioni collettive delle comunità scientifiche scaturiscono anche da valutazioni di carattere “metateorico” (Cini, 1994), che si riferiscono alla utilità pratica di tali risultati, alla loro coerenza rispetto alle tradizioni culturali, alla loro adeguatezza rispetto alle aspettative sociali ecc..., e che esprimono le spinte che sulle comunità scientifiche vengono esercitate dal tessuto sociale

conclusione di questo paragrafo al fatto che ¹ dovrà sicuramente passare altro tempo prima che la scienza, come istituzione sociale, raggiunga pienamente la consapevolezza del fatto che non è vero che è benefica per l'umanità, né che è pericolosa, e neppure che è moralmente neutrale. La scienza e il suo metodo, come quasi tutte le specie di attività umane, sono moralmente e socialmente ambivalenti. E l'ambivalenza non è neutralità.

9.4 Possibili campi di applicazione della formula di Bayes

[...]much qualitative research, both empirical and theoretical, is normally prerequisite to fruitful quantification of a given research field. In the absence of such prior work, the methodological directive, "go ye forth and measure," may well prove only an invitation to waste time.

Thomas S. Kuhn

Statistical thinking will one day be as necessary for efficient citizenship as the ability to read and write.

Herbert George Wells

I possibili campi di applicazione dell'inferenza bayesiana sono molteplici, nelle scienze come in tutti i processi decisionali ².

L'allocazione di immense quantità di denaro pubblico americano dipende ora da stime bayesiane sulle caratteristiche della popolazione ³ (per esempio il tasso di povertà), in differenti aree geografiche. La *Federal and Drug Administration* non solo permette ma incoraggia le progettazioni, basate su analisi di tipo bayesiano, di applicazioni che richiedono l'approvazione per nuovi strumenti medicali (per esempio pacemaker), un'area dove esperimenti clinici significativi sono difficili da condurre ma è spesso disponibile una rilevante informazione storica. Microsoft Windows Office Assistant è basato su un algoritmo di intelligenza artificiale di tipo bayesiano, e sempre in America grandi catene di negozi che affittano film offrono un sistema esperto di tipo bayesiano in rete per aiutare i clienti a scegliere quale film affittare, basandosi sulle preferenze specifiche di carattere generale e i nomi di altri film visti precedentemente.

La statistica bayesiana si può di fatto applicare ogniqualvolta si voglia valutare la probabilità (grado di fiducia) che un particolare evento possa avverarsi quando questo evento è generato da un meccanismo casuale (*random*). Il *frequentista* valuta le procedure basandosi sulla raccolta (teorica) ripetuta di campioni da un particolare modello che definisce la distribuzione della probabilità dei dati osservati condizionata da parametri sconosciuti. La statistica bayesiana richiede un modello e, in più, una distribuzione "a priori" di tutte le quantità sconosciute nel modello (parametri e dati mancanti). Il modello e la distribuzione vengono utilizzati per calcolare la distribuzione degli elementi sconosciuti utilizzando anche i dati osservati (la distribuzione *posteriore*).

Una formula di utilità pratica che si può utilizzare per esprimere il teorema di Bayes (la formula scaturisce direttamente da considerazioni del tipo di quelle fatte nel precedente paragrafo e dalla applicazione delle tecniche del calcolo delle probabilità) e che per essere compresa non richiede particolari conoscenze tecniche specifiche, può essere introdotta come segue. La statistica bayesiana dipende fondamentalmente da una relazione che ci permette di convertire la probabilità che un evento A possa accadere, *in maniera condizionata dal fatto di avere informazioni circa un evento B*, nella probabilità che l'evento B possa accadere una volta che l'evento A sia già accaduto. La formula generale è così esprimibile:

¹ Come viene autorevolmente affermato da Amsterdamski nella voce *Esperimento* dell'Enciclopedia Einaudi

² Per avere una interessante panoramica di differenti esempi si può senz'altro vedere Press, Tanur, 2001; Bernardo, Smith, 2000 e Bradley, Thomas 2000

³ Vedi Bradley, Thomas, 2000

$$P(B/A) = \frac{P(A/B) \times P(B)}{P(A/B) \times P(B) + P(A/\text{non}B) \times P(\text{non}B)}$$

In questa formula $P(A|B)$ è generalmente definito il modello e dipende dai dati osservati. $P(B)$ è la cosiddetta probabilità a priori (dato che questa probabilità dipende solo dall'informazione conosciuta prima di osservare i dati). $P(B|A)$ è la cosiddetta probabilità a posteriori (o *aggiornata*) di B dato che è condizionata dall'aver informazioni circa l'evento A ¹.

Credo sia utile vedere subito un semplice esempio ². Un rivelatore di particelle ha un'efficienza di identificazione della particella μ (muone) del, diciamo, 95%, e una probabilità di identificare un π (pione) come fosse un muone del 2%. Se una particella è identificata come muone, il rivelatore scatta ed esegue una "rivelazione" (R). Conoscendo che il fascio di particelle che attraversa il rivelatore è composto dal 90% da pion e dal 10% da muoni, qual è la probabilità che una rivelazione sia effettivamente dovuta a un muone? Utilizzando la formula precedente abbiamo subito:

$$P(\mu/R) = \frac{P(R/\mu) \times P(\mu)}{P(R/\mu) \times P(\mu) + P(R/\pi) \times P(\pi)} = \frac{0.95 \times 0.1}{0.95 \times 0.1 + 0.02 \times 0.9} = 0.84$$

In questo caso il significato dei termini e dei valori, a differenza di ciò che accadrebbe con la teoria convenzionale, è chiaro e non ambiguo.

Per la particolare importanza pratica che la formula di Bayes rappresenta sottolineo che negli anni recenti risultati davvero incoraggianti sono stati ottenuti nelle *decisioni in campo medico* ³.

Ciò che segue è un esempio semplice ma appropriato in questo campo ⁴, e che può aiutare a capire ancora meglio la formula di Bayes. Viene scelto un cittadino italiano da sottoporre al test dell'AIDS. Supponiamo che l'analisi usata per riscontrare l'infezione da HIV possa dichiarare "positive" persone sane con una probabilità dello 0,2%. Assumiamo che l'analisi dichiari la persona "positiva". Possiamo dire che, visto che la probabilità di un errore d'analisi è solo dello 0,2%, la probabilità che la persona sia veramente infettata è davvero del 99,8%? Certamente no se si calcola sulla base di una stima di 100.000 persone infette su una popolazione di 60 milioni (*informazioni conosciute prima di osservare i dati*). L'applicazione della formula di Bayes appena presentata, dimostra che la probabilità che la persona sia sana è circa del 55%! Si vede subito infatti che la probabilità che la persona sia davvero infetta una volta che sia stata riscontrata positiva è uguale a $(0.998 \times 0.0016666) / (0.998 \times 0.0016666 + 0.02 \times 0.9983333)$ che è circa 0.45. Si può notare che una maniera semplice per arrivare subito a tale risultato è d'immaginare di sottoporre al test l'intera popolazione. In tal caso, il numero di persone dichiarate positive sarà uguale a quello di tutte le persone infette più lo 0,2% della popolazione restante. Il totale sarebbe di 100.000 persone infette e 120.000 persone sane ($120.000/220.000 = 0.55$). Quest'ultimo modo di individuare il risultato corretto si basa sull'utilizzo delle "frequenze naturali" ⁵. In questa rappresentazione calcolare la

¹ Nonostante il teorema di Bayes sia stato formulato in varie maniere diverse durante gli anni, una delle prime formulazioni, presentate da Laplace all'inizio della sua memoria del 1774 citata al par. 7.1 (*Mémoire sur la probabilité des causes par les événements*) è molto simile a quella contemporanea che ho appena presentato:

If an event can be produced by a number n of different causes, then the probabilities of these causes given the event are to each other as the probabilities of the event given the causes, and the probability of the existence of each of these is equal to the probability of the event given that cause, divided by the sum of all the probabilities of the event given each of these causes. (Laplace, cit. in Stigler, 2000, 102)

² Ulteriori e più complessi casi riguardanti la fisica delle alte energie si possono trovare in particolare in D'Agostini, luglio 1999

³ Vedi per numerosi esempi Parmigiani, 2002

⁴ Preso da D'Agostini, 2003 dove si trovano la presentazione e discussione dettagliate

⁵ Gigerenzer, 2002

probabilità di una malattia dato un esame positivo è immediata $p = \frac{a}{a + b}$, dove a è il numero di soggetti con un esame positivo e la malattia e b quello dei soggetti con un esame positivo ma senza la malattia, il tutto valutato alla luce di tutte le informazioni a disposizione. La formula standard sarebbe ovviamente:

$$p(\text{malattia/positivo}) = \frac{p(\text{malattia})p(\text{positivo/malattia})}{p(\text{malattia})p(\text{positivo/malattia}) + p(\text{non malattia})p(\text{positivo/non malattia})}$$

Le due regole evidentemente sono equivalenti: entrambe ci dicono qual'è la proporzione degli esiti positivi corretti (al numeratore) sulla totalità degli esiti positivi (al denominatore). Ciò permette di mettere in luce di nuovo come la regola di Bayes (quale che sia la rappresentazione scelta) ci dice, in sostanza, come dobbiamo cambiare ed aggiornare le nostre credenze e assegnazioni di probabilità alla luce del risultato di un test e, in generale, di nuove informazioni. In un suo recente ed interessante libro ¹ lo scienziato cognitivo Gerd Gigerenzer mostra che attraverso le ricerche del suo gruppo (Istituto Max Planck di Berlino) si è potuto evidenziare senza alcun dubbio che la stragrande maggioranza dei medici non utilizza affatto un approccio corretto alla stima delle probabilità e, non tenendo conto di importanti informazioni a priori, arriva a fare delle diagnosi sbagliate. (In altri casi, almeno secondo questo studio, i medici non sono neppure capaci di un ragionamento probabilistico qualsiasi). Per fare un esempio riprendo dal libro citato un test cui è stato sottoposto un campione scientificamente significativo di medici tedeschi:

Per facilitare la diagnosi precoce del cancro al seno le donne, da una certa età in poi, vengono incoraggiate a sottoporsi a intervalli regolari a controlli sistematici, anche se non hanno alcun sintomo conclamato. Lei immagini di condurre, in una certa regione del paese, uno screening mammografico del cancro al seno, e supponga che riguardo alle donne fra i 40 e i 50 anni di questa regione, asintomatiche, che si sottopongono a una mammografia regolare si sappiano le seguenti cose:

La probabilità che una di loro abbia il cancro al seno è dello 0,8%. Se una donna ha il cancro al seno, la probabilità che il suo mammogramma risulti positivo è del 90%; se non ha il cancro al seno, c'è comunque una probabilità del 7% che il suo mammogramma sia positivo. Immaginiamo, dunque, una donna con un mammogramma positivo: quanto è probabile che abbia effettivamente il cancro? (Gigerenzer, 2002, trad. it. 51)

Un terzo del gruppo giunse alla conclusione che la probabilità di un cancro al seno, dato un mammogramma positivo era del 90%; un altro terzo stimò che questa probabilità fosse tra il 50 e l'80%; solo alcuni ritennero che fosse meno del 10%; la stima media fu comunque del 70%. L'approccio bayesiano, utilizzando per esempio la rappresentazione suggerita da Gigerenzer delle frequenze naturali porta al seguente ragionamento:

Ogni 1000 donne, 8 hanno il cancro al seno. Fra queste 8 donne col cancro 7 avranno un mammogramma positivo. Fra le 992 restanti, che il cancro non l'hanno, circa 70 avranno ugualmente un mammogramma positivo. Immaginiamo un campione casuale di donne che dopo un controllo presentano un mammogramma positivo: quante di loro hanno veramente il cancro al seno? (ivi, 52)

La risposta è semplice. Fra le 77 (70+7) donne con un mammogramma positivo solo 7 hanno un cancro al seno, vale a dire 1 su 11, ovvero il 9%! Aggiunge ancora Gigerenzer:

Il pensiero annebbiato è una particolarità dei medici tedeschi studiati da noi? Non sembra proprio. David Eddy, che è stato consulente dell'amministrazione Clinton per la riforma del sistema sanitario, ha chiesto a vari medici americani di

¹ Gigerenzer, 2002

valutare la probabilità che una donna con un mammogramma positivo abbia il cancro al seno. Sostanzialmente aveva fornito le stesse informazioni che avevamo fornito noi[...]Ebbene, 95 medici su 100 stimarono che la probabilità di cancro al seno fosse di circa il 75%, cioè dieci volte maggiore di una valutazione realistica.(ivi, 55)

Ovviamente nei differenti campi di applicazione il ragionamento ed il formalismo matematico dell'approccio bayesiano raggiungono livelli di una certa complicazione, sui quali non è certo il caso di soffermarci ora da un punto di vista strettamente tecnico. Un campo nuovo ed importante in cui questo approccio sembra utile è quello dei sistemi complessi. Negli ultimi decenni dalla ricerca condotta nel campo della chimica, della fisica, della biologia, dell'informatica e, di recente, delle scienze sociali è emerso un nuovo paradigma scientifico, che ha alla base la nozione di complessità (par. 1.2).

I fenomeni complessi sono caratterizzati da una serie di entità che interagiscono l'una con l'altra:

In seguito a queste interazioni, alcune proprietà di un'entità possono cambiare, compresa la sua posizione nella struttura reticolare e le modalità di interazione. Se le interazioni sono locali, gli oggetti di interesse nei fenomeni complessi sono però in genere globali, funzione di un modello di eventi interattivi che rimane relativamente stabile su una scala temporale molto più ampia rispetto a quella degli eventi stessi dell'interazione. Di frequente questi modelli meta-stabili di interazione si auto-organizzano, e le strutture e persino la funzionalità che ne risultano possono spesso essere descritte in un linguaggio che non contiene riferimenti alle entità sottostanti e alle loro interazioni. In quel caso i modelli vengono definiti *emergenti*, e lo studio dell'auto-organizzazione e dell'emergenza costituisce l'obiettivo primario della ricerca sulla complessità.(Lane, 2002, 14-15)

Questi modelli sono in parte simili ai modelli statistici. In particolare, entrambi i tipi sono costituite da famiglie parametrizzate di modelli di probabilità, ed entrambe mirano a estrapolare deduzioni sui fenomeni del mondo reale:

[...]negli ultimi dieci anni, i teorici della complessità hanno dimostrato quanti interessanti problemi di biologia, chimica, fisica e scienze sociali presupponga proprio questo tipo di dinamica. Le teorie e i metodi della deduzione sarebbero di grande aiuto nell'affrontare tali problemi[...]i metodi data-analitici e deduttivi per studiare i fenomeni emergenti sono difficili da individuare. Le tecniche statistiche disponibili non sono adatte allo scopo e la misurazione delle strutture emergenti e la correlazione di queste misure a descrizioni adeguate degli eventi di interazione a livello locale sottostanti rappresentano problemi di difficile soluzione. Attualmente quasi tutti i ricercatori della complessità si trovano ad agire d'istinto, ed è difficile intuire in quale direzione si muovano e riconoscere quando arrivano a destinazione. Credo ci sia la reale possibilità che giovani scienziati di impostazione statistica offrano contributi reali e importanti ai gruppi di ricerca della complessità[...](ivi, 37)

Un campo, per esempio, strettamente correlato è quello della genetica statistica:

One of the most important challenges to data analysis in modern statistical genetics and molecular biology is the problem of how to analyze gene expression data in which the number of variables or dimensions, "p", greatly exceeds the number of replicates, "n" (that is, we have p much greater than n). Such data frequently are generated by a piece of equipment called a microarrayer. The data analysis problem is opposite to the usual problem in statistical data analysis in which typically p is much less than n. In the microarrayer context, we might have $p = 10,000$, for example, while $n = 10$. In such contexts, to reduce the problem to one where ordinary statistical methods can be applied, it is necessary either to increase the number of replicates (sample size) or to reduce the number of dimensions, or both. The Bayesian approach may offer the best solution to such problems since in Bayesian analysis, as is easy to show, bringing prior information to bear on a model is equivalent to adding more replicates, or increasing the effective sample size.(Press, Tanur, 2001, 212-213).

Inoltre, come anticipato, si sta tentando di arrivare ad una nuova teoria della valutazione delle incertezze nel campo strettamente fisico (vedi prossimo paragrafo). L'atteggiamento di fondo è ben riassumibile come segue:

As far as physics applications are concerned, the importance of the subjectivist approach stems from the fact that it is the only approach which allows us to speak in the most general way about the probability of hypotheses and true values, concepts which correspond to the natural reasoning of physicists. As a consequence, it is possible to build a consistent inferential framework in which the language remains that of probability. This framework is called Bayesian statistics,

because of the crucial role of Bayes' theorem in updating probabilities in the light of new experimental facts using the rules of logics. Subjective ingredients of the inference, unavoidable because researchers do not share the same status of information, are not hidden with the hope of obtaining objective inferences, but are optimally incorporated in the inferential framework. Hence, the prior dependence of the inference should not be seen as a weak point of the theory. On the contrary, it obliges practitioners to consider and state clearly the hypotheses which enter the inference and take personal responsibility for the result. In any case, prior information and evidence provided by the data are properly balanced by Bayes' theorem, and the result is in qualitative agreement with what we would expect rationally. Priors dominate if the data is missing or of poor quality or if the hypotheses favored by the data alone is difficult to believe. They become uninfluential for routine high accuracy measurements, or when the evidence provided by the data in favor of a new hypotheses is so strong that physicists are obliged to remove deeply rooted ideas. (D'agostini, dicembre 1999, 11-12)

Talvolta è assolutamente legittimo credere più ai propri pregiudizi che ai dati empirici. Quando ad esempio si usa uno strumento che sappiamo potrebbe non essere totalmente affidabile, o quando si fanno per la prima volta misure in un nuovo campo o in un nuovo range di possibili valori di una specifica grandezza e così via. Per esempio è ovvio che è più facile credere che uno studente abbia fatto un banale errore piuttosto che credere che abbia fatto una nuova scoperta! Oppure, se si mette un termometro in acqua bollente, e il termometro indica 0 gradi, si è propensi a concludere che lo strumento non funziona, non già ad accettare questa osservazione. La seguente riflessione di Poincaré (del 1905) può essere esemplificativa al riguardo:

The impossibility of squaring the circle was shown in 1885, but before that date all geometers considered this impossibility as so 'probable' that the Académie des Sciences rejected without examination the, alas! too numerous memoirs on this subject that a few unhappy madmen sent in every year. Was the Académie wrong? Evidently not, and it knew perfectly well that by acting in this manner it did not run the least risk of stifling a discovery of moment. The Académie could not have proved that it was right, but it knew quite well that its instinct did not deceive it. If you had asked the Academicians, they would have answered: 'We have compared the probability that an unknown scientist should have found out what has been vainly sought for so long, with the probability that there is one madman the more on the earth, and the latter has appeared to us the greater' (Poincaré, cit. in D'Agostini, luglio 1999, 30)

Le conclusioni hanno, a mio avviso, il pregio di essere chiare e coraggiose:

In conclusion[...]I prefer to state explicitly the naturalness and necessity of subjective priors[...]If rational people (e.g. physicists), under the guidance of coherency (i.e. they are honest), but each with unavoidable personal experience, have priors which are so different that they reach divergent conclusions, it just means that the data are still not sufficiently solid to allow a high degree of intersubjectivity (i.e. the subject is still in the area of active research rather than in that of consolidated scientific culture). On the other hand, the step from abstract objective rules to dogmatism is very short [...]

(D'Agostini, luglio 1999, 30)

Ovviamente tutte queste considerazioni possono essere discusse criticamente, e infatti sono state legittimamente contrastate da tutti color che *credono* in un ideale “oggettivista”.

In poche parole, tutti coloro che contestano il metodo bayesiano si appellano ad un certo concetto filosofico di “razionalità” per confermare la necessità e la possibilità di “oggettività”. Ciò è per esempio caratteristico della scuola popperiana:

The cognitive value of a theory has nothing to do with its psychological influence on people's mind. Belief, commitment, understanding are states of the human mind. But the objective, scientific values of a theory is independent of the human mind which creates it or understands it, its scientific value depends only on what objective support these conjecture have in facts. (Lakatos, 1978 ,1)

Nel cercare difetti nell'approccio bayesiano, alcuni avanzano altre obiezioni (una, per esempio, si basa sulla *necessità della probabilità soggettiva a priori*¹). Data la natura introduttiva di questo lavoro, non discuterò qui queste obiezioni².

Nel prossimo paragrafo cercherò, almeno brevemente, di introdurre come il concetto di probabilità inteso come grado di fiducia dell'occorrenza di un evento *porti a ridefinire il problema della valutazione delle incertezze* e permetta tra l'altro di trattare allo stesso modo i diversi tipi di errori precedentemente discussi.

Prima di concludere questo paragrafo vorrei accennare al fatto che per alcuni³ l'approccio bayesiano deve essere visto solo come la prima tappa di una vera e propria "rivoluzione probabilistica", rivoluzione che dovrà infine sostituire

all'immagine di una mente onnisciente - simile a quella del celebre demone di Laplace -, capace di eseguire i complessi calcoli richiesti dalla teoria di massimizzazione dell'utilità prevista o dalla regola di Bayes, l'immagine più realistica di una mente limitata, che possa però attingere a una "cassetta degli attrezzi" dotata di euristiche "*fast and frugal*", "rapide ed economiche", come lui le chiama, che ci mettano in grado di far fronte efficacemente alle situazioni di incertezza. Gigerenzer parla di una "razionalità ecologica", che combini la struttura dell'ambiente e dell'informazione con la nozione di "razionalità limitata" a suo tempo proposta da Herbert Simon. In questa nuova prospettiva, che sembra richiamarsi alla psicologia evolutivista, un'euristica è "ecologicamente razionale" se si adatta alla struttura dell'ambiente. In parole povere: se funziona presto e bene. (Morini, 2003, XIV)

Come sottolinea Morini, vi è però in questa proposta un aspetto filosofico importante di cui bisogna essere consapevoli. La rivoluzione auspicata si propone di enfatizzare sì il concetto di *incertezza*, abbandonando però allo stesso tempo la centralità della teoria della probabilità come descrizione del comportamento razionale:

Mentre finora si è pensato che per ovviare ad alcune "irrazionalità" fosse necessario rieducare la mente - insegnare, in qualche modo, a ragionare in modo corretto -, l'analisi di Gigerenzer suggerisce appunto "euristiche rapide e frugali", riformulazioni dei dati più "adatte" a noi. A questo scopo ha anche elaborato un metodo - e un software - che insegna in un'ora ad applicare correttamente la regola di Bayes. (ivi, XVI)

I presupposti teorici di questo metodo, sottolinea Morini, sono però molto dibattuti. In particolare non pare evidente come una semplificazione nel calcolo di una regola della probabilità, il teorema di Bayes, possa in qualche modo influire sul ruolo centrale che questo stesso teorema, e quindi la probabilità in genere, ha nei processi di decisione in condizioni di incertezza.

Conclude Morini con un commento che credo meriti futuri approfondimenti e riflessioni, al di là degli scopi di questo lavoro:

Non ho personalmente nulla contro la buona psicologia. Le ricerche psicologiche hanno avuto il grande merito, negli ultimi anni, di denunciare la distanza esistente tra i modelli teorici e le loro applicazioni pratiche, suggerendo interessanti vie d'uscita al problema. E tuttavia, condivido ancora alcune delle ragioni per cui si è preferito passare alla logica agli inizi del Novecento. Mi sembra più prudente evitare di spingersi nelle secche delle domande sulla "natura umana", sui meccanismi dell'evoluzione o su quel che è più "naturale". In alcuni casi rischiano di generare nuove "illusioni di certezza" e nel passato si sono spesso rivelate difficili e scivolose - talvolta pericolose. (ivi, XVII)

Vorrei solo aggiungere che anche se i programmi di ricerca che tendono a privilegiare una concezione delle mente come entità "biologica" meritano la massima attenzione, come del resto

¹ Mi limito ad elencare che le principali critiche sono incentrate sull'idea che:

- a. gli individui abbiano davvero un preciso grado di credenza esprimibile numericamente;
- b. i gradi di credenza (ammesso che esistano) si conformino davvero al calcolo della probabilità;
- c. esista un metodo effettivo per valutare il grado di conferma di un'ipotesi H, data l'evidenza E (perché il numero delle evidenze è sempre finito mentre il numero dei casi previsti dall'ipotesi H è sempre infinito); di fatto questa è una critica all'induttivismo

² Per una analisi delle ragioni di chi contesta l'approccio bayesiano vedi per esempio, Moore, 1997, Mayo, 1996 ed Efron, 1986. Per risposte dettagliate vedi Howson, Urbach, 1993, in particolare l'ultimo capitolo

³ Per esempio Gigerenzer, 2002, come bene mette in luce Simona Morini nella prefazione all'edizione italiana del libro

stanno ottenendo in diversi settori e discipline scientifiche ¹, la vera sfida per i problemi specifici che abbiamo sin qui discussi rimane quella di costituire uno strumento flessibile che però non ci allontani dai ragionamenti anche quantitativi, che ci permetta cioè di convivere razionalmente con le innumerevoli situazioni di incertezza interpretando e valutando criticamente i numeri con cui abbiamo a che fare.

Concludo queste considerazioni con una citazione di Feynman che mi ha fatto riflettere per prima sui temi generali qui affrontati, del 1967 (in *The Character of The Physical Law*):

Some years ago I had a conversation with a layman about flying saucers- because I am scientific I know all about flying saucers! I said "I don't think there are flying saucers". So my antagonist said, "Is it impossible that there are flying saucers? Can you prove that it's impossible?" "No", I said, "I can't prove it's impossible. It's just very unlikely". At that he said, "You are very unscientific. If you can't prove it impossible then how can you say that it's unlikely?" *But this is the way that is scientific.* It is scientific only to say what is more likely and what less likely, and not to be proving all the time the possible and the impossible. To define what I mean, I might have said to him, "Listen, I mean that *from my knowledge* of the world that I see around me, I think that it is much more likely that the reports of flying saucers are the results of the known irrational characteristics of terrestrial intelligence than of the unknown rational efforts of extra-terrestrial intelligence". *It is just more likely.* That is all.(Feynman, cit. in D'Agostini, luglio 1999, 125)

9.5 Nuova impostazione nel determinare l'incertezza di misura

*In almost all circumstances, and at all times,
we find ourselves in a state of uncertainty.*

Uncertainty in every sense.

Uncertainty about actual situations, past and present ...

Uncertainty in foresight: this would not be eliminated or diminished even if we accepted, in its most absolute form, the principle of determinism; in any case, this is no longer in fashion.

Uncertainty in the face of decisions: more than ever in this case...

Even in the field of tautology (i.e of what is true or false by mere definition, independently of any contingent circumstances) we always find ourselves in a state of uncertainty... (for instance, of what is the seventh, or billionth, decimal place of π ...) ...

Bruno de Finetti

Our assent ought to be regulated by the grounds of probability

John Locke

Si può riassumere l'atteggiamento alla base della nuova impostazione per la determinazione dell'incertezza di misura dicendo che *il centro del problema si è spostato dall'analisi del valor vero, limite privilegiato a cui tende il processo di misurazione, all'analisi del complesso di informazioni disponibili* ².

L'impostazione convenzionale descrive il risultato di una misurazione mediante i concetti di valore misurato e di valore vero, considerando il secondo non conoscibile e tuttavia rappresentativo dello stato della grandezza ed il primo una sua valutazione errata. Viene quindi introdotto il concetto di indeterminazione quale differenza (incalcolabile) tra i valori misurato e vero. Il valore vero risulta così collocato in una posizione indeterminata ed indeterminabile entro l'intervallo, intorno al valore misurato, definito dall'indeterminazione. E' chiaro che la definizione di valore vero, che implica una serie indefinita di misure con strumenti ideali, dà l'illusione che il valore vero sia unico. La nuova definizione di misura, invece, prende esplicitamente in considerazione il fatto che le misure

¹ Vedi per esempio, come introduzione, Parisi, 1999

² Su tutti gli aspetti descritti in questo paragrafo si può vedere l'ottima trattazione fatta nella Guida ISO e in Mana, 1994

sono compiute in condizioni reali e possono essere accompagnate da tutte le componenti di incertezza (ognuna pesata con il suo “grado di fiducia”, come vedremo subito):

[L'impostazione nuova]abbandona questa[tradizionale]via in favore di una definizione di misura che include esplicitamente l'incertezza. Con ciò si intende che nessuna misurazione può portare ad una valutazione dello stato di una grandezza più definita di quella affermando che ogni sua ulteriore misurazione produrrà valori compresi nell'intervallo (più precisamente avrà una certa probabilità di produrre) del quale il valore e l'incertezza sono gli elementi rappresentativi. Risulta pertanto preferibile definire la misura come l'insieme dei valori possibili. Va sottolineato che il numero assunto come valore non è più vero di ogni altro elemento dell'insieme, è soltanto il più conveniente.(Mana, 1994, 3)

Ad individuare l'incertezza di una misura contribuiscono certo diverse cause:

Concorrono a formare l'incertezza le differenze tra le caratteristiche del sistema e dell'apparato per la misurazione ed i modelli scelti per descrivere i medesimi e la loro interazione, lo stato non perfettamente definito (o non perfettamente definibile) dei due sistemi al momento della misurazione e le loro interazioni con l'ambiente. Un ruolo determinante ha l'incertezza con cui è realizzata l'unità di misura locale (la classe di precisione dello strumento) che costituisce il limite inferiore per l'incertezza della misura.(*ibidem*)

Sembra ragionevole affermare che l'incertezza di una misura dovrebbe essere:

- consistente: derivabile dalle componenti che vi contribuiscono indipendente da come queste sono raggruppate o decomposte;
- trasferibile: utilizzabile per valutare l'incertezza di una di un'altra misura per ottenere la quale è usata la prima.

Inoltre appare necessario fornire un intervallo intorno al risultato di una misurazione che racchiuda una "significativa" frazione della distribuzione di valori attribuita alla grandezza oggetto di misurazione. Così la valutazione dell'incertezza dovrebbe fornire tale intervallo con un livello di confidenza corrispondente a quanto richiesto dalle specifiche applicazioni.

Questa valutazione dell'incertezza contrasta alcuni criteri diffusi nella pratica e basati su due presupposti infondati. Il primo è che l'incertezza debba essere "sicura" o "conservativa", significando che essa non dovrebbe essere errata per difetto: se la valutazione dell'incertezza è difficile, essa dovrebbe essere sovrastimata (ho già discusso criticamente questo presupposto nel par. 9.1; voglio qui notare che la sovrastima dell'incertezza ha ulteriori effetti negativi: può incoraggiare per esempio l'acquisto di strumenti più costosi di quanto necessario o scoraggiare le calibrazioni). Il secondo è che le cause di incertezza siano classificabili in casuali o sistematiche a seconda della loro natura ¹ e che i contributi associati a ciascuna causa debbano essere analizzati e riportati separatamente. Va anche considerato che spesso occorre incorporare nell'analisi del risultato altre misure ciascuna delle quali ha la sua incertezza. Per valutare l'incertezza del risultato *è necessaria la miglior stima delle incertezze delle misure incorporate, non un valore "sicuro"*. Inoltre è necessario un metodo semplice per combinare queste incertezze ed ottenere l'incertezza finale. *Per queste ragioni sembra opportuno considerare i contributi casuali e sistematici allo stesso modo.* La chiave è una nuova interpretazione dell'incertezza, oltre ovviamente l'uso delle regole della statistica per la "propagazione degli errori" (che rimangono di norma valide).

Per spiegare questo punto meglio pensiamo, come suggerisce la Guida ISO, innanzi tutto di raggruppare le componenti dell'incertezza secondo il modo in cui il loro valore numerico è stimato:

¹ Come mostrato nei capitoli precedenti, seguendo l'impostazione della teoria della misura basata sul valore vero si usa distinguere tra le cause di errore quelle di natura casuale da quelle di natura sistematica. Ricordo ancora che la distinzione tra i due tipi di errore è la seguente: si intendono casuali quelli i cui effetti sul valore sono attenuati ripetendo la misurazione e mediando i valori ottenuti e sistematici quelli i cui effetti si riproducono invariati ad ogni ripetizione

- A- quelle valutate secondo metodi statistici,
- B - quelle valutate diversamente,

senza con ciò stabilire una corrispondenza con la usuale classificazione in casuale e sistematico.

Quindi tutte le incertezze possono essere trattate probabilisticamente. La distinzione fra tipo A e tipo B potrebbe essere fuorviante per chi pensasse che "metodo statistico" sia sinonimo di "metodo probabilistico", perché allora sembrerebbe che le incertezze di tipo B non siano probabilistiche. In realtà, qui "statistico" è legato a "dati statistici", ovvero a osservazioni ottenute ripetendo l'esperimento. Possiamo dire che, a grandi linee e per molte applicazioni, le incertezze di tipo A siano quelle dovute ad errori casuali e quelle di tipo B ad errori sistematici. *Ma questo non è sempre vero.*

La Guida ISO, in relazione a questo punto, afferma:

there is not always a simple correspondence between the classification into categories A or B and the previously used classification into "random" and "systematic" uncertainties. The term "systematic uncertainty" can be misleading and should be avoided. (ISO, 1993, VIII)

Su questi argomenti, la raccomandazione generale dell'ISO può essere riassunta con la seguente citazione dalla Guida:

This Guide presents a widely applicable method for evaluating and expressing uncertainty in measurement. It provides a realistic rather than a 'safe' value of uncertainty based on the concept that there is no inherent difference between an uncertainty component arising from a random effect and one arising from a correction for a systematic effect. The method stands, therefore, in contrast to certain older methods that have the following two ideas in common:

- The first idea is that the uncertainty reported should be 'safe' or 'conservative'[...] In fact, because the evaluation of the uncertainty of a measurement result is problematic, it was often made deliberately large.
- The second idea is that the influences that give rise to uncertainty were always recognizable as either 'random' or 'systematic' with the two being of different nature[...] In fact, the method of combining uncertainty was often designed to satisfy the safety requirement. (ivi, 43)

Nella valutazione dell'incertezza occorre elencare, in questo contesto, tutte le componenti e specificare quale metodo è stato usato nella stima del loro valore numerico. Le componenti della classe A sono caratterizzate dalla deviazione standard ottenuta con metodi statistici, quelle della classe B da valutazioni approssimate delle corrispondenti deviazioni standard, la cui esistenza viene postulata. *L'incertezza totale è ottenuta applicando le regole statistiche per la combinazione delle deviazioni standard ed è interpretata quale deviazione standard del risultato*¹.

Nel caso più semplice sono disponibili N osservazioni indipendenti della grandezza di ingresso x, effettuate nelle stesse condizioni. La miglior stima di tale grandezza in questo caso è la media aritmetica. Le cosiddette "stesse condizioni" andrebbero più propriamente denominate *condizioni di ripetitività* e comprendono:

- stesso procedimento di misura;
- stesso osservatore;
- stessi strumenti, utilizzati nelle stesse condizioni;
- stesso luogo;
- ripetizione delle misure in un breve periodo di tempo.

¹ Per esempi, di diversa complessità, si può vedere il citato Mana, 1994 e D'Agostini, 2003

La bontà dell'accordo fra risultati di misure successive effettuate in queste condizioni è indice della *ripetitività* dei risultati. In questo caso le letture seguono una distribuzione pressoché gaussiana.

Ciò significa che i possibili valori dell'osservabile x hanno una distribuzione di probabilità gaussiana intorno alla media, con il 68% di probabilità di distare entro una deviazione standard ecc...

Potremmo essere indotti a credere che, ogni volta che si deve determinare il valore di una certa grandezza fisica, si debba necessariamente ripetere la misura tante volte, o avere effettuato nel passato una lunga serie di misure di quel misurando in quelle condizioni:

In realtà, questo non è assolutamente necessario, come ben sanno anche meccanici, falegnami e muratori. Ognuno di loro, nel suo ambito e con i propri strumenti, è perfettamente cosciente di quanto credere al valore misurato. In effetti è veramente raro il caso in cui un professionista faccia delle misure senza avere nessuna idea dell'errore (o dell'errore percentuale) che può commettere e, quindi, della corrispondente incertezza sul valore della grandezza di interesse. (D'Agostini, gennaio 1999, 43)

L'esperienza acquisita su misure *analoghe* permette di valutare la deviazione standard anche nei casi in cui si sia eseguita una sola misura. Questo valore può essere quindi utilizzato nella stima delle incertezze, come è stato sempre fatto, più o meno coscientemente, dagli sperimentatori e come raccomandato anche dalla Guida ISO.

In questi casi non banali, l'*extrema ratio* è una valutazione puramente soggettiva, alla luce della regola normativa della coerenza, eseguita rispondendo a domande del tipo: "quanto credo - io - nel numero che ho ottenuto?"; "quanto è ampio l'intervallo di valori tale da essere in stato di indifferenza rispetto all'eventualità che il valore vero vi sia compreso o no?" (Questo definisce un intervallo al 50% di probabilità.). Ci si rende conto allora che in realtà, molto spesso, si sa molto di più di quello che si pensava. Se la grandezza di ingresso non è ottenuta attraverso osservazioni ripetute (in generale attraverso l'analisi statistica di osservazioni ripetute) *la sua deviazione standard viene quindi stimata sulla base delle informazioni disponibili*: misurazioni precedenti, conoscenza del comportamento del materiale o dello strumento, specificazioni del costruttore, certificati di taratura eccetera (si consideri inoltre che solo un laboratorio senza limiti di tempo e risorse potrebbe condurre un'indagine statistica esaustiva di ogni possibile causa di incertezza, usando differenti tipi e fabbricazioni di strumenti, differenti metodi di misura, differenti applicazioni dello stesso metodo, e differenti approssimazioni nei suoi modelli teorici della misura!).

Detto nel linguaggio probabilistico adottato, si cerca di modellizzare, in base alla migliore conoscenza del problema, la distribuzione dei gradi di fiducia (considerando, ad esempio, gli estremi dell'intervallo di valori possibili, se ci sono valori più credibili di altri, e così via) e successivamente se ne ricava la deviazione standard. Le incertezze di tipo B sono indubbiamente quelle più critiche da valutare, ma ciò non significa che siano meno "oggettive". Vediamo cosa scrive la Guida ISO:

When the standard uncertainty of an input quantity cannot be evaluated by analysis of the results of an adequate number of repeated observations, a probability distribution must be adopted[...]That does not, however, make the distribution invalid or unreal; like all probability distributions it is an expression of what knowledge exists. (ISO, 1993, 48)

E' chiaro quindi che deve qui essere adottato il punto di vista che considera la probabilità una misura del grado di fiducia di un evento (concetto appunto di probabilità soggettiva). In tal senso una distribuzione di probabilità basata su modelli teorici è postulata anche per le componenti di tipo B consentendo di utilizzare, come detto, il concetto di deviazione standard. In questo caso si può far uso del teorema di Bayes per fare un'inferenza sulla distribuzione dei valori e stimare le incertezze; fortunatamente se vi sono molti contributi alle incertezze, come di solito accade, il teorema del limite centrale fa sì che il risultato dipenda solo dal valore aspettato e dalla deviazione standard. (Così, per esempio, una volta postulata una distribuzione gaussiana per una certa variabile e valutato, in base alle nostre conoscenze e alla formula Bayes, un valore aspettato e un particolare

intervallo intorno a questo valore con il 95% di probabilità di trovare un valore plausibile della variabile, la deviazione standard sarà = $1/1.96$, circa 0.51, vedi par. 7.5).

Il nuovo approccio consente di incorporare l'incertezza di un risultato nell'incertezza di un altro risultato, di utilizzare l'incertezza per valutare l'intervallo corrispondente ad un prestabilito grado di confidenza e di evitare confusioni con conseguenti ambigue classificazioni delle cause di errore.

Un semplice esempio infine (ripreso tra quelli suggeriti nel lavoro citato di Mana) può a mio avviso aiutare a chiarire quanto detto.

Consideriamo la misura y funzione delle grandezze a , b e x secondo il modello

$$y = a + bx,$$

dove per esempio a è una polarizzazione comune a tutte le osservazioni, b un fattore di scala ed x una variabile casuale di cui sono disponibili N estrazioni indipendenti. Per concretezza possiamo pensare x la lettura di un termometro alla quale debba essere applicata la correzione appena espressa, per una indeterminazione relativa allo zero e a un fattore di scala. La polarizzazione ed il fattore di scala sono in questo caso anche loro delle quantità variabili, caratterizzate da una distribuzione di probabilità a priori, essendo \bar{a} e \bar{b} le migliori stime dei valori medi e σ_a e σ_b le rispettive incertezze (deviazioni standard). La miglior stima di x è la media aritmetica \bar{x} dei campioni disponibili la cui incertezza è la deviazione standard σ_x . Quindi il valore della misura cercata è $\bar{y} = \bar{a} + \bar{b}\bar{x}$. Ricordando i risultati relativi all'applicazione di considerazioni statistiche per la propagazione delle indeterminazioni di una funzione di più variabili riportati nel par. 6.11, per valutarne l'incertezza calcoliamo i cosiddetti coefficienti di sensibilità

$$\frac{\partial f}{\partial a} = 1, \frac{\partial f}{\partial b} = \bar{x}, \frac{\partial f}{\partial x} = \bar{b}$$

Quindi

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_a^2 + \bar{x}^2 \sigma_b^2 + \bar{b}^2 \sigma_x^2}$$

è l'espressione cercata. In questo caso, a differenza della situazione discussa nel par. 6.11 e nel par. 9.1 relativa alla propagazione degli errori statistici su funzioni di grandezze, l'interpretazione della formula è *chiara e non ambigua*. Sottolineo inoltre che *secondo la terminologia convenzionale* il terzo termine della espressione precedente è un errore casuale in quanto il suo contributo decresce con il numero di campioni, mentre i primi due termini sarebbero detti sistematici perché una volta fissati, sulla base di precedenti misure, non diminuiscono con l'aumentare delle misure effettuate su y . *La teoria convenzionale, come visto, non sarebbe capace di trattare formalmente insieme questi tipi di contributi all'incertezza di misura*, categorizzati in maniera differente. Come afferma la stessa Guida ISO, non categorizzare, come avviene nel nuovo approccio, le differenti componenti all'incertezza in casuali o sistematiche è altamente vantaggioso

because such categorization is frequently a source of confusion; an uncertainty component is not either “random” or “systematic”. Its nature is conditioned by the use made of the corresponding quantity, or more formally, by the context in which the quantity appears in the mathematical model that describes the measurement. Thus, when its corresponding quantity is used in a different context, a random component may become a systematic component, and vice versa.(ivi, 48)

Voglio finire questo paragrafo con una ulteriore citazione dalla Guida ISO, che bene riassume l'obiettivo ultimo di una misura:

When the value of a measurand is reported, the best estimate of its value and the best estimate of the uncertainty of that estimate must be given, for if the uncertainty is to err, it is not normally possible to decide in which direction it should

err safe. An understatement of uncertainties might cause too much trust to be placed in the values reported, with sometimes embarrassing and even disastrous consequences. A deliberate overstatement of uncertainty could also have undesirable repercussions. (ivi, 45)

9.6 Conclusioni

A questo mondo non c'è niente di certo, a parte la morte e le tasse
Benjamin Franklin

Del doman non v'è certezza...
Lorenzo de' Medici

In questo lavoro ho più volte sottolineato come sviluppi significativi e risultati consolidati nella teoria degli errori di misura siano uno dei prodotti originali di quella ricerca di razionalità e precisione che ha caratterizzato la nascita della società moderna, e come ormai un nuovo paradigma scientifico stia proponendo un nuovo approccio alla determinazione dell'incertezza di misura. Cercherò qui di riassumere alcuni dei temi emersi, iniziando dalla teoria convenzionale.

- Anche in assenza di errori sistematici il valore di una misura è sempre caratterizzato da una più o meno grande indeterminazione rappresentata dall'errore casuale.
- Nel caso degli errori casuali questi si propagano da quelli delle misure dirette a quelli delle misure indirette, ed anche se probabilmente con le tecniche usuali questi ultimi sono talvolta sovrastimati, nella propagazione la tendenza è quella di aumentare gli errori.
- Per condurre correttamente una qualsiasi operazione di misura è necessario conoscere bene le caratteristiche dell'apparato usato, che comunque influirà sul risultato finale.
- Non si può mai essere certi dell'assenza degli errori sistematici, i quali, per loro natura, hanno effetto di togliere validità all'informazione ottenuta con la misura.

Nella scienza, forse più che negli altri comportamenti umani, *l'errore appare inevitabile*. Ho cercato di chiarirlo con un certo dettaglio nel caso della fisica, e la conclusione può apparire curiosa in una disciplina che tradizionalmente viene ritenuta appartenere alle cosiddette "*scienze esatte*". Per quanto possa apparire strano, solo in tempi recenti si è iniziato a discutere la portata ed il significato della precedente osservazione con riferimento al mondo macroscopico: si pensi per esempio, come accennato in precedenza, agli studi sui *processi caotici*. Al contrario andrebbe invece sottolineato¹ che mentre in meccanica classica l'errore si propaga in modo esponenziale, in meccanica quantistica si propaga solo linearmente. In questo senso la meccanica quantistica sembra essere più predicibile di quella classica (questa proprietà della meccanica quantistica può avere profonde implicazioni teoriche ed essere alla base di grandi applicazioni tecnologiche del futuro, quali la ipotizzata possibilità di costruire calcolatori basati sulla logica quantistica).

Si deve riflettere di nuovo sul fatto che, come ricordavo nei primi paragrafi di questo scritto, anche se il futuro di un sistema fosse determinato in modo univoco (mi riferisco al caso di sistemi macroscopici) dal suo stato presente, ciò non significa che noi siamo effettivamente in grado di determinarlo:

¹ Vedi Casati, 2001

Può stupire qualcuno il fatto che non sappiamo nemmeno risolvere il problema di tre corpi in interazione tra loro. Può apparire quasi scandaloso che, a distanza di tre secoli dalla formulazione delle equazioni di Newton, non sappiamo ancora se il nostro sistema solare è stabile e se la Terra continuerà a girare attorno al Sole oppure andrà a cadervi sopra, o altro. Siamo - è vero - in grado di prevedere in modo approssimato l'orbita di un satellite e di seguirne la posizione istante per istante grazie ai moderni calcolatori elettronici, ma non siamo in grado di ottenere la soluzione esatta e quindi fare previsioni per tempi arbitrariamente lunghi. (Casati, 2001, 55)

Maxwell, nel 1873, con una intuizione davvero anticipatrice ne aveva colto l'essenza:

E' una dottrina metafisica che dagli *stessi* antecedenti seguono le *stesse* conseguenze. Nessuno può dubitare di questo. Ma ciò non è di molta utilità in un mondo come il nostro in cui gli stessi antecedenti non si verificano mai e nulla capita due volte... L'assioma fisico che ha un contenuto simile afferma che da antecedenti *simili* seguono conseguenze *simili*. Ma qui siamo passati dalla uguaglianza alla somiglianza, dalla precisione assoluta alla approssimazione più o meno buona. Esistono alcune classi di fenomeni nei quali un errore piccolo nei dati produce solo un errore piccolo nei risultati. Il corso degli eventi in questi casi è stabile. Esistono altre classi di fenomeni, più complessi, nei quali possono nascere casi di instabilità; il numero di tali casi aumenta in modo estremamente rapido con l'aumentare del numero delle variabili. (Maxwell, cit. in Casati, 2001, 54)

La scoperta dell'instabilità dinamica mette in crisi la certezza nella capacità previsionali della leggi matematiche che regolano per esempio il moto di ogni massa materiale. La caoticità intrinseca del comportamento di ogni sistema sottoposto all'azione di forze non lineari diventa perciò la norma, mentre la regolarità dei moti dei corpi celesti, fondamento concettuale della dinamica newtoniana, si rivela un'eccezione dovuta alla possibilità di trascurare *in prima approssimazione* le forze di attrazione fra i pianeti rispetto a quella preponderante fra ognuno di essi e il Sole.

Questi fatti consentono innanzi tutto di specificare in maniera del tutto particolare il concetto di scienze esatte, ammesso che si voglia comunque utilizzare questo termine:

una scienza può definirsi esatta non perché basata su informazioni esatte, ma perché la sua metodologia consente di conoscere statisticamente il valore dell'indeterminazione associata ad esse, ovvero di conoscere il limite del contenuto di informazione che esse portano.

Prendendo ampiamente atto della precedente conclusione, abbiamo poi visto che nuovi sviluppi sono in atto in questi ultimi anni per migliorare l'approccio che è alla base della teoria degli errori di misura.

La prima considerazione di carattere generale scaturita da tali studi è che dobbiamo imparare a convivere, anche in linea di principio, con l'incertezza, perfino in un campo, considerato da tempo governato dall'"oggettività", come quello delle misure fisiche. Afferma la Guida ISO:

Uncertainty of measurement is thus an expression of the fact that, for a given measurand and a given result of measurement of it, there is not one value but infinite number of values dispersed about the result that are consistent with all of the observations and data and one's knowledge of the physical world, and that with varying degrees of credibility can be attributed to the measurand. (ISO, 1993, 41-42)

Certo, accettare come inevitabile anche in linea di principio l'incertezza è un compito davvero rivoluzionario, tanto per l'individuo quanto per la società, come sottolinea Gigerenzer (Gigerenzer, 2002) ricordando il monito di Kant "l'Illuminismo è l'uscita dell'uomo dallo stato di minorità che egli deve imputare a se stesso":

il fatto è che uscire di minorità può significare scoprire dei punti deboli in storie, fatti, valori nei quali si è sempre creduto, e molto spesso mettere in dubbio delle certezze vuol dire mettere in dubbio l'autorità sociale[...]Gran parte della storia del genere umano è stata fatta da persone assolutamente certe che la loro stirpe, o la loro razza, o la loro religione fosse la preferita da Dio, o dal destino, e che di conseguenza si attribuivano il diritto di sbarazzarsi delle idee in contrasto con le loro, nonché dei corpi di chi ne era stato contaminato. Le società odierne sono molto più tolleranti verso l'incertezza e la diversità; tuttavia, siamo ancora lontani dal diventare quei cittadini coraggiosi e bene informati

che aveva in mente Kant. È un traguardo che può essere descritto con due parole latine, *sapere aude*, o con altrettante parole italiane: "Osate conoscere!".(Gigerenzer, 2002, trad. it. 30)

Riformuliamo ora il ragionamento presentato per quanto riguarda il nuovo approccio alla determinazione delle incertezze delle misure:

la qualità della conoscenza di una grandezza fisica, dopo aver effettuato delle osservazioni sperimentali, dipende dalla verosimiglianza che un valore della grandezza possa aver prodotto le osservazioni e da quanto si sapeva sulla grandezza fisica (prima delle nuove osservazioni).

La verosimiglianza descrive lo stato di conoscenza su:

- strumentazione;
- condizione ambientali e fattori di influenza;
- contributo dello sperimentatore;
- ecc. ecc.

La conoscenza sui possibili valori della grandezza fisica implica una buona conoscenza della fenomenologia sulla quale si sta investigando.

Quindi l'insegnamento di fondo di questo approccio si riconduce a quello che in effetti tutti i fisici, per esempio, già sanno:

per ottenere risultati scientifici di qualità è necessario avere familiarità con tutti gli aspetti sperimentali della misura e una approfondita conoscenza della fisica.

E' soltanto il bilanciamento fra questi due contributi che permette di accettare un risultato, confrontarlo con altri, ripetere le misure, calibrare la strumentazione, ecc..., e, in conclusione, produrre risultati utili per la comunità scientifica.

Utilizzare questo nuovo approccio significa quindi sì utilizzare nuove tecniche, come visto in qualche dettaglio, ma anche un atteggiamento *che viene da lontano*.

Quanto detto credo sia davvero ben riassunto nella Guida ISO:

Although this Guide provides a framework for assessing uncertainty, it cannot substitute for critical thinking, intellectual honesty, and professional skill. The evaluation of uncertainty is neither a routine task nor a purely mathematical one; it depends on detailed knowledge of the nature of the measurand and of the measurement. The quality and utility of the uncertainty quoted for the result of a measurement therefore ultimately depend on the understanding, critical analysis, and integrity of those who contribute to the assignment of its value.(ivi, 8)

Come sottolineato in precedenza, l'affermazione del filosofo greco Protagora "*l'uomo è misura di tutte le cose*" è ancora e forse sarà per sempre del tutto attuale.

BIBLIOGRAFIA

Abruzzese A., Borrelli D., *L'industria culturale*, Roma, Carocci, 2000

Agnoli P., Bosco F., Canavesio F., Spinelli M., Vecchione M., *Studio comparativo di apparati per servizi Audiotex, Rapporto tecnico 93170*, Torino, Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni, 1993

Agnoli P., Di Nicola P., *Why Did the Chicken Cross the Road?*, Roma, Armando Editore, 2001

Alder K., *The Measure of All Things*, 2002; (trad. it. *La misura di tutte le cose*, Milano, Rizzoli, 2002)

Amsterdamski S., *Esperimento*, in *Enciclopedia*, vol. V, a cura di Romano R., Torino, Giulio Einaudi Editore, 1977, pp 826-854

Ancarani V., *Struttura e mutamenti nelle scienze. L'epistemologia storica di G. Bachelard*, Milano, F. Angeli, 1981

Andolfo M., *Atomisti antichi. Testimonianze e frammenti*, Santarcangelo di Romagna, Rusconi Libri, 1999

Arecchi F. T., *Introduzione*, in *Determinismo e complessità*, a cura di F. T. Arecchi, Roma, Armando Editore, 2000, pp. 9-11

Aristotele, *Fisica*, Milano, Rusconi, 1995

Baldi A., *Calcolo delle Probabilità e Statistica*, Milano, McGraw-Hill Libri Italia, 1998

Baldini M., a cura di, *Filosofia e Scienza*, Roma, Armando Editore, 2000 A

Baldini M., *Le osservazioni e gli esperimenti degli scienziati del Seicento*, in *Filosofia e Scienza*, a cura di Baldini M., Roma, Armando Editore, 2000 B, pp. 33-43

Barrow J.D., Tipler F.J., *The Anthropic Principle*, Clarendon Press, Oxford, 1986

Bell J., *Against "measurement"*, in the proceedings of *62 Years of Uncertainty*, New York, Plenum Publishing, August 1989, pp.70-79

Bellone E., *Albert Einstein*, in *Storia della scienza moderna e contemporanea – Il secolo ventesimo I*, a cura di Paolo Rossi, Milano, Utet, 1988, pp 355-408

Bernardini G., *Fisica Generale Parte I*, Roma, Veschi, 1974

Bernardo J. M., Smith A. F. M., *Bayesian Theory*, New York, John Wiley & Sons INC, 2000

Bevington P.R., Robinson D.K., *Data reduction and error analysis for the physical sciences*, London, Mc Graw Hill Int. Ed., 1994

- Birnbaum A., *Theory of errors*, in *Encyclopedia Americana*, a cura di Cayne B.S., Danbury, Grolier, 1983 A, vol.10, p. 560
- Birnbaum A., *Least squares*, in *Encyclopedia Americana*, a cura di B. S. Cayne, Danbury, Grolier, 1983 B vol. 17, pp123-124
- Boniolo G., Dorato M., *Dalla relatività galileiana alla relatività generale*, in AA.VV., *Filosofia della fisica*, a cura di Boniolo G., Milano, 1997, pp. 5-168
- Bouchareine P., *Misura*, in *Enciclopedia*, vol. IX, Torino, Giulio Einaudi Editore, 1977, pp 332-347
- Box G. E. P., *Bayesian Inference in Statistical Analysis*, New York, John Wiley & Sons INC, 1992
- Boyer C. B., *A History of Mathematics*, 1968; (trad. it., *Storia della Matematica*, Milano, Mondadori, 1990)
- Bradley P., Thomas A. L., *Bayes and Empirical Bayes Methods for Data Analysis*, Boca Raton, CRC Press, 2000
- Brown C., *Bruegel: Paintings, Drawings and Prints*, Londra, Phaidon Press, 1975
- Burattini T. L., *Misura Universale*, Stamperia dei padri francescani, 1675
- Calorio D., Imbasciati A., *Il protomentale: psicanalisi dello sviluppo cognitivo del primo anno del bambino*, Torino, Boringhieri, 1999
- Campbell N. R., *Foundations of Science*, New York, Dover, 1957
- Canguilhem G., *Idéologie et rationalité dans dans l'histoire des science de la vie*, Parigi, Vrin, 1988
- Caporaloni M., Caporaloni S., Ambrosiani R., *La misura e la valutazione della sua incertezza nella fisica sperimentale*, Bologna, Zanichelli, 1987.
- Carter B., *Large Number Coincidences and the Antropic Principle*, in: *Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data*, Symposium of the Int.Astr.Union N.63, Ed. Longair M.S., Dordrecht, 1974
- Carver G.P., *The Metric Path to Global Markets and New Jobs: A Question and Answer and Thematic Discussion*, Washington, NIST IR 5463, 1994
- Casati G., *L'errore: caos o determinismo?*, in: Kos n. 187, Milano, aprile 2001, pp.54-59
- Castellani V., *L'uomo antico e il cielo: archeoastronomia e astroarcheologia*, in *L'uomo antico e il cosmo*, atti del convegno internazionale del 15-16 maggio 2000, Roma, Accademia dei Lincei, 2001, pp. 9-18
- Chalmers A.F., *What Is This Thing Called Science? An Assessment of the Nature and Status of Science and Its Methods*, 1977; (trad. it. *Che cos'è questa scienza?*, Milano, Est Mondadori, 1987)
- Cini M., *Un paradiso perduto, Dall'universo delle leggi naturali al mondo dei processi evolutivi*, Milano, Feltrinelli, 1994

- Cioffi F., Luppi G., Vigorelli A., Zanette E., *Profilo di storia della filosofia (II volume)*, Milano, ed. scolastiche Bruno Mondadori, 1998
- Connor R. D., *The Weights and Measures of England*, London, HMSO, 1987
- Continenza B., Gagliasso E., *Giochi aperti in Biologia*, Milano, Franco Angeli, 1996
- Copernico N., *Opere*, a cura di Barone F., Torino, UTET, 1979
- Cori M., Ostermann G., *Geografia generale e geologia*, Bologna, Cappelli editore, 1971
- Costantini A., *Stonehenge*, in *I segreti dell'archeologia*, a cura di Della Fina G. M., Vol. 1, Novara, Istituto Geografico De Agostini, 2001
- Costantini D., Geymonat L., *Filosofia della probabilità*, Milano, Feltrinelli, 1982
- Cromer A., *Uncommon Sense*, 1993; (trad. it. *L'eresia della scienza*, Milano, Cortina, 1996)
- Crosby A. W., *The Measure of Reality*, 1997; (trad. it. *La misura della realtà*, Bari, Dedalo, 1998)
- Crump T., *The Antropology of Numbers*, 1990; (trad. it. *L'antropologia dei numeri*, Firenze, Le Lettere, 1996)
- D'Addio M., *Storia delle dottrine politiche*, Genova, E.C.I.G., 1980
- D'Agostini G., *Bayesian Reasoning in High-Energy Physics: Principles and Applications*, Geneve, CERN, luglio 1999
- D'Agostini G., *Errori e incertezze di misura – rassegna critica e proposte per l'insegnamento -*, Roma, Università La Sapienza Dipartimento di Fisica, gennaio 1999
- D'Agostini G., *Probabilità e Incertezza di misura (parte I)*, Roma, Università La Sapienza Dipartimento di Fisica, ottobre 2001
- D'Agostini G., *Teaching Statistics in the Physics Curriculum: Unifying and Clarifying Role of Subjective Probability*, in *American Journal of Physics Special Theme Issue on Thermodynamics, Statistical Mechanics, and Statistical Physics*, Gould and Tobochnik eds, December 1999
- D'Agostini G., *Bayesian Reasoning in Data Analysis. A Critical Introduction*, Singapore, World Scientific, 2003
- Daumas M., *Introduzione*, in *Storia della scienza*, a cura di Daumas M., Bari, Laterza, 1969
- Davies P., *About Time. Einstein's Unfinished Revolution*, 1996; (trad. it. *I misteri del tempo*, Milano, Mondadori, 1996)
- De Finetti B., *Filosofia della probabilità*, Milano, Il Saggiatore, 1995
- De Finetti B., *La logica dell'incerto*, Milano, Il Saggiatore, 1989
- De Finetti B., *Teoria delle probabilità*, Milano, Il Saggiatore, 1970

- De Laet S.J., *Dagli inizi della produzione del cibo ai primi stati : quadro generale*, in *History of Humanity*, a cura di Dumont G.H., 1994; (trad. it. *La Storia dell'umanità*, a cura di Dumont G.H., Novara, Gedeo/Unesco, 2002, Vol. 2, pp. 377-386)
- D'Errico F., *Le prime informazioni registrate*, in *Dal segno alla scrittura*, a cura di Giannini A., *Le Scienze Dossier* n.12, Milano, Le Scienze Spa, Estate 2002, p.4-9
- Delambre J.B.J., *Méthodes analytiques pour la détermination d'un arc du méridien*, Parigi, 1798-1799
- Delambre J. B. J., *Base du Système métrique decimal*, 3 voll., Parigi, 1806-1810
- Deléage, J. P., *Histoire de l'écologie*, 1991 ; (trad. it. *La storia dell'ecologia*, Napoli, CUEN, 1994)
- Di Donna V., *Elementi di cartografia*, Napoli, Liguori, 2000
- Dilke O.A.W., *Reading the past. Mathematics and measurement*, London, British Museum Press, 1993
- Dirac P.A.M., *The Cosmological Constants*, *Nature* 139, 323, 1937
- Dorato M., *Il software dell'universo – Saggio sulle leggi di natura*, Milano, Bruno Mondadori, 2000
- Dresner S., *Units of Measurement*, Aylesbury, Harvey Miller, 1971
- Dyson G. B., *Darwin Among the Machines*, 1997; (trad. it. *L'evoluzione delle macchine*, Milano, Raffaello Cortina Editore, 2000)
- Efron B., "Why isn't everyone a Bayesian?", *Am. Stat.* 40, 1986
- Egidi C., *Introduzione alla Metrologia*, Milano, Garzanti, 1982
- Einstein A., *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie (gemeinverständlich)*, 1916; (trad. it. *Relatività: esposizione divulgativa*, Torino, Boringhieri, 1967)
- Einstein A., *Preface*, in Jammer M., *Concepts of Space. The History of Theories of Space in Physics*, 1954; (trad. it. *Premessa*, in Jammer A., *Storia del concetto di spazio. Con una premessa di Albert Einstein*, Milano, Feltrinelli, 1966, pp 8-15)
- Einstein A. Infeld L., *The Evolution of Physics, The Growth of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quanta*, 1938; (trad. it. *L'evoluzione della fisica*, Torino, Boringhieri, 1965)
- Einstein A., *Considerations Concerning the Fundamentals of Theoretical Physics*, 1940; (trad. it. *Considerazioni sui fondamenti della fisica teorica*, in *Opere scelte*, a cura di Bellone E., Torino, Bollati Boringhieri, 1988)
- Erto P., *Probabilità e statistica*, Milano, McGraw – Hill Libri Italia, 1999
- Favereau Olivier, *Marchés internes, marchés externes*, *Revue Economique*, vol. 40, n°2, 1989.

- Fazio M., *SI, MKSA, CGS & CO. Dizionario e manuale delle unità di misura*, Bologna, Zanichelli, 1995
- Ferraro A., *Dizionario di metrologia generale*, Bologna, Zanichelli, 1965
- Feldman T.S., *Fisica e Chimica esatte*, in *Storia della Scienza*, Vol. VI, a cura di Petruccioli S., Roma, Istituto della Enciclopedia Italiana fondato da Giovanni Treccani, Roma, 2001, pp. 178-186
- Feynman R., *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 1, 1965; (trad. it., *La fisica di Feynman*, vol. 1, Bologna, Zanichelli, 2001)
- Foucault M., *Surveiller et punir. Naissance de la prison*, 1975 ; (trad. it. *Sorvegliare e punire. Nascita della prigione*, Torino, Einaudi Tascabili, 1976)
- Foucault M., *Why Study Power: The Question of the Subject*, in Dreyfus H., Rabinow P., *Michel Foucault. Beyond Structuralism and Hermeneutics*, 1983; (trad. it. *Perché studiare il potere: la questione del soggetto*, in Foucault M., *Poteri e strategie*, a cura di Dalla Vigna P., Milano, Mimesis, 1994)
- Fornasini P., *Dispense di sperimentazione fisica*, Trento, Università - Dipartimento di Fisica, 2001
- Fox Keller E., *Refiguring Life*, 1995; (trad. it. *Vita, Scienza e Ciberscienza*, Milano, Garzanti, 1996)
- Gagliasso E., *Verso una epistemologia del mondo vivente*, Milano, Edizioni Guerini, 2001
- Galimberti U., *Psiche e techne. L'uomo nell'età della tecnica*, Milano, Feltrinelli, 1999
- Galison, P.L., *How experiments end*, Chicago, Chicago University Press, 1987
- Gembillo G., *Il ruolo di Heisemberg nei trent'anni che sconvolsero la fisica*, in *Effetto Heisemberg*, a cura di Ludovico A., Roma, Armando Editore, 2001, pp. 185-203
- Giannini A., *La civiltà della scrittura*, in *Dal segno alla scrittura*, a cura di Giannini A., *Le Scienze Dossier* n.12, Milano, Le Scienze Spa, Estate 2002, p.1
- Giannoli G. I., *Il tempo fisico: misura e verso del tempo*, in *Il senso del tempo. Categorie della temporalità nelle scienze storico-sociali e naturali*, "Quaderni della fondazione S. Carlo", Mucchi Editore, 1989, pp.87-117
- Giannoli G.I., Giaquinto A., *Introduzione alle metodologie della scienza*, Roma, Bagatto Libri, 1992
- Giardina A., Sabbatucci G., Vidotto V., *Manuale di storia: l'età contemporanea*, Roma-Bari, Laterza, 2000
- Gigerenzer G., *Calculated Risks*, 2002; (trad. it. *Quando i numeri ingannano. Imparare a vivere con l'incertezza*, Milano, Raffaello Cortina Editore, 2003)
- Gillispie C.C., *The Edge of Objectivity. An Essay in the History of Scientific Ideas*, 1960; (trad. it. *Il criterio dell'oggettività. Un'interpretazione della storia del pensiero scientifico*, Bologna, Il Mulino, 1981)

- Gillispie C.C., *Science and Polity in France at the End of the Old Regime*, 1980; (trad. it. *Scienza e potere in Francia alla fine dell'ancien régime*, Bologna, Il Mulino, 1983)
- Giolanella G., *Analisi dei dati e complementi di meccanica e termodinamica*, Torino, UTET, 2001
- Gleick J., *Caos*, Milano, Rizzoli, 1989
- Golinski J., *Esperimenti, strumenti e luoghi di lavoro*, in *Storia della Scienza*, Vol. VI, a cura di Petruccioli S., Roma, Istituto della Enciclopedia Italiana fondato da Giovanni Treccani, Roma, 2001, pp. 57-69
- Grant E., *La scienza del Medioevo*, Bologna, Il Mulino, 1983
- Grasshoff G., *The History of Ptolemy's Star Catalogue (Studies in the History of Mathematics and Physical Sciences, 14)*, New York, Springer Verlag, 1990
- Guedj D., *La Méridienne*, 1997 ; (trad. it. *Il Meridiano*, Milano, Longanesi, 2001)
- Hacking I., *The Emergence of Probability*, Cambridge, Cambridge University Press, 1975
- Hacking I., *L'autogiustificazione delle scienze di laboratorio*, in *Science as Practice and Culture*, a cura di Pickering A., 1992; (trad. it. *La scienza come pratica e cultura*, a cura di Pickering A., Torino, Edizioni di comunità, 2001, pp 33-75)
- Howson C., Urbach P., *Scientific Reasoning. The Bayesian Approach*, Chicago, Open Court, 1993
- Hume D., *Ricerche sull'intelletto umano e sui principi della morale*, a cura di Dal Pra M., Bari, 1957
- International Organization for Standardization, *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, Genève, 1993
- Jackson J.D., *Classic Electrodynamics*, 1978; (trad. it. *Elettrodinamica classica*, Bologna, Zanichelli, 1984)
- Jammer M., *Concepts of Space. The History of Theories of Space in Physics*, 1954; (trad. it. *Storia del concetto di spazio. Con una premessa di Albert Einstein*, Milano, Feltrinelli, 1966)
- Jammer M., *Concepts of Force. A study in the Foundations of Dynamics*, 1957; trad. it., *Storia del concetto di forza. Studio sulle fondazioni della dinamica*, Milano, Feltrinelli, 1971)
- Jammer M., *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*, 1961; (trad. it., *Storia del concetto di massa, nella fisica classica e moderna*, Milano, Feltrinelli, 1974)
- Kanizsa G., *Grammatica del vedere*, Bologna, Il Mulino, 1980
- Kant I., *Prolegomeni ad ogni futura metafisica*, Bari, Laterza, 1996
- Kempthorne O, Folks L., *Probability, statistics and data analysis*, London, Ames, 1971
- Klein H.A., *Graphic Worlds of Pieter Bruegel the Elder*, New York, Dover Publications, 1963

Klein H.A., *The science of measurement*, New York, Dover Publications, 1988

Klein H.A., Klein M.C., *Pieter Bruegel the Elder, Artist*, New York, MacMillan, 1968

Klima B., *Il periodo di homo sapiens sapiens fino agli inizi della produzione del cibo: quadro generale*, in *History of Humanity*, a cura di Dumont G.H., 1994; (trad. it. *La Storia dell'umanità*, a cura di Dumont G.H., Novara, Gedeo/Unesco, 2002, Vol. 1, pp. 193-203

Koyré A., *Sull'influenza delle concezioni filosofiche sull'evoluzione delle teorie scientifiche* (conferenza tenuta a Boston nel 1954), pubblicata in Koyré A., *Etudes d'histoire de la pensée philosophique*, Parigi, Gallimard, 1971

Koyré A., *Apport scientifique de la Renaissance*, in *Revue de Synthèse*, XLVII, 1950

Koyré A., *Les philosophes et la machine*, in *Etudes d'histoire de la pensée philosophique*, 1961 A; (trad. it., *I filosofi e la macchina*, in *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, Torino, Einaudi, 2000)

Koyré A., *Du monde de l'à-peu-près à l'univers de la précision*, in *Etudes d'histoire de la pensée philosophique*, 1961 B; (trad. it., *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, in *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, Torino, Einaudi, 2000)

Koyré A., *Filosofia e storia delle scienze*, Milano, Mimesis, 2003

Kramer B., Sasseti M., *The Measurement of The Planck Constant*, in *Atti del Convegno Internazionale Max Planck: l'inizio della nuova Fisica del 6 dicembre 2000*, Roma, Accademia dei Lincei, 2001, pp. 43-58

Kristina T.H., *The production of management standards*, in *Normalisation et organisation de l'industrie*, *Revue d'Economie Industrielle*, n°75, 1er trimestre 1996.

Kuhn T.S., *The Structure of Scientific Revolutions*, 1962; (trad. it. *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Torino, Einaudi, 1969)

Kuhn T.S., *The Function of Measurement in Modern Physical Science*, *Isis* v52, part z, No 168, June 1961, pp.161-193

Kula W., *Miary i ludzie*, 1970; (trad. it. *Le misure e gli uomini dall'antichità ad oggi*, Bari, Laterza, 1987)

Lad F., *Operational Subjective Statistical Methods. A Mathematical, Philosophical, and Historical Introduction*, New York, John Wiley & Son INC., 1996

Lakatos I., *Philosophical Papers*, vol. 1, Cambridge, Cambridge University Press, 1978

Lane D. A., *Complessità: modelli e inferenza*, in *Complessità e biologia*, a cura di Biava P.M., Milano, Bruno Mondatori, 2002, pp. 13-41

Leach E. R., *Computo primitivo del tempo*, in *A History of Technology*, a cura di Singer C., Holmyard E. J., Hall A. R., Williams T. I., 1954; (trad. it. *Storia della tecnologia*, a cura di Singer C., Holmyard E. J., Hall A. R., Williams T. I., Torino, Bollati Boringhieri, 1992, Vol. 1, pp.110-127)

- Legendre A.M., *Méthode pour déterminer la longueur exacte du quart du Méridien, d'après les observations faites pour la mesure de l'arc compris entre Dunkerque et Barcelonne*, in Delambre J.B.J., *Méthodes analytiques pour la détermination d'un arc du méridien*, Parigi, 1798-1799, pp 1-11
- Lugujjo E., *Conoscenza e pratica*, in *History of Humanity*, a cura di Dumont G.H., 1994; (trad. it. *La Storia dell'umanità*, a cura di Dumont G.H., Novara, Gedeo/Unesco, 2002, Vol. 13, pp 217-220)
- Macey S.L., *Clocks and the Cosmos*, Hamden, Shoe String Press, 1980
- Mach E., *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, 1883; (trad. it. *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, Torino, Boringhieri, 1977)
- Mana G., *Metrologia: l'arte della misurazione*, Dispense del corso di *Scienza dei materiali*, Torino, Università di Torino, 1994
- Mandel J., *The Statistical Analysis of Experimental Data*, Dover, New York, 1964
- Markowits W., *Measurement and Determination of Time*, in, *Encyclopedia Americana*, a cura di Cayne B.S., Danbury, Grolier, 1983, vol. 26, pp 752-758
- Mayo D. G., *Error and the Growth of Experimental Knowledge. Science and its Conceptual Foundation*, Chicago, Chicago University Press, 1996
- Mayr E., *The Growth of Biological Thought. Diversity, Evolution, and Inheritance*, 1982; (trad. it. *Storia del pensiero biologico*, Torino, Bollati Boringhieri, 1999)
- McCoubrey A. O., *Measures and measuring systems*, in *Encyclopedia Americana*, a cura di Cayne B.S., Danbury, Grolier, 1983, Vol.18, pp 584-597
- Mella F. A., *La misura del tempo nel tempo. Dall'obelisco al cesio*, Milano, Hoepli, 1990
- Menninger K., *Number Words and Number Symbols*, Boston, MIT Press, 1969
- Mertz F., *Normalisation de l'environnement, droit et capitalisme*, Paris, PeterLang Ed., 2002
- Mohen J.P., *La preistoria in cammino. Gli sviluppi delle ricerche negli ultimi dodici anni(1988-2000)*, in *History of Humanity*, a cura di Dumont G.H., 1994; trad. it. *La Storia dell'umanità*, a cura di Dumont G.H., Novara, Gedeo/Unesco, 2002, Vol. 1, pp. 10-24)
- Mondini A., *Il sistema metrico*, in *Storia della tecnica*, Vol. III, a cura di Mondini A., Torino, Utet, 1977, pp. 332-336
- Moore D. S., *"Bayes for beginners? Some reasons to hesitate"*, Am. Stat. **51**, 1997
- Mouton G., *Observationes Diametrorum Solis et Lunae Apparentium*, Lione, Ex Typografia Matthei Liberal, 1670
- Moreau H., *Le Système Métrique*, Paris, Chiron, 1975

- Morini M., *Nascita ed evoluzione del simbolismo numerale nell'Asia Occidentale*, in *Lo sviluppo storico della matematica*, a cura di B. D'Amore, F. Speranza, Roma, Armando Editore, 1981, pp. 11-17
- Morini S., *Prefazione*, in Gigerenzer G., *Quando i numeri ingannano. Imparare a vivere con l'incertezza*, Milano, Raffaello Cortina Editore, 2003, pp. IX-XVIII
- Nelson R.A., *Foundations of the International System of Units (SI)*, London, The Physics Teacher, December 1981
- Neugebauer O., *Matematica e Astronomia antica*, in *A History of Technology*, a cura di Singer C., Holmyard E. J., Hall A. R., Williams T. I., 1954; (trad. it. *Storia della tecnologia*, a cura di Singer C., Holmyard E. J., Hall A. R., Williams T. I., Torino, Bollati Boringhieri, 1992, Vol. 3, pp. 796-814)
- Newton I., *Principi matematici della filosofia naturale*, a cura di Pala A., Torino, UTET, 1965
- Oliva P., *I maestri d'abaco*, in *Lo sviluppo storico della matematica*, a cura di B. D'Amore, F. Speranza, Roma, Armando Editore, 1981, pp. 133-143
- Olshan Mark O., *Standards making organizations and the rationalization of American life*, The Sociological Quarterly, volume 34, number 2, 1993
- Orear J., *Enrico Fermi, The Man*, in Nuovo Saggiatore vol.17 anno 2001 no 5-6, pp. 30-38
- Palmieri E.L., Parotto M., *Il globo terrestre e la sua evoluzione*, Bologna, Zanichelli, 2000
- Pancini E., *Misure ed apparecchi di fisica*, Roma, Veschi, 1965.
- Parmigiani G., *Modeling in Medical Decision Making. A Bayesian Approach*, New York, John Wiley & Sons INC, 2002
- Parisi D., *Mente. I nuovi modelli della Vita Artificiale*, Bologna, Il Mulino, 1999
- Paruolo P., *Elementi di Statistica*, Roma, Carocci, 1999
- Pauri M., *La descrizione fisica del mondo e la questione del divenire temporale*, in *Filosofia della fisica*, a cura di Boniolo G., Milano, 1997, pp. 245-334
- Pera M., *Scienza e retorica*, Bari, Laterza, 1991
- Petley B.W., *New definition of the metre*, Nature vol. 303, June 1983, pp. 373-376
- Piaget J., *La construction du réel chez l'enfant*, Parigi, 1937; (trad. it *La costruzione del reale nel fanciullo*, Firenze, La Nuova Italia, 1973)
- Piaget J., *Le développement de la notion du temps chez l'enfant*, Parigi, PUF, 1946; (trad. it *Lo sviluppo della nozione di tempo nel bambino*, Firenze, La Nuova Italia, 1979)
- Piaget J., *L'équilibration de structures cognitives: problème centrale du développement*, 1975 ; (trad. it. *L'equilibratura delle strutture cognitive: problema centrale dello sviluppo*, Torino, Boringhieri, 1981)

Piattelli Palmarini M., *L'illusione di sapere – che cosa si nasconde dietro i nostri errori*, Milano, Mondadori, 1995

Poincaré H., *Science and Hypothesis*, London, Dover Publications, 1952

Popper K., *The Logic of Scientific Discovery*, 1934; (trad. it. *La logica della scoperta scientifica*, Torino, Einaudi, 1970)

Price D. J., *La costruzione degli strumenti scientifici dal 1500 al 1700 circa*, in *A History of Technology*, a cura di Singer C., Holmyard E. J., Hall A. R., Williams T. I., 1954; (trad. it. *Storia della tecnologia*, a cura di Singer C., Holmyard E. J., Hall A. R., Williams T. I., Torino, Bollati Boringhieri, 1992, Vol. 6, pp. 628-654)

Press S. J., Tanur J.M., *The Subjectivity of Scientists and the Bayesian Approach*, New York, John Wiley & Sons, INC, 2001

Preti G., *Storia del pensiero scientifico*, Milano, Mondadori, 1975

Reineke W., *Dalla conoscenza empirica agli inizi del pensiero scientifico*, in *History of Humanity*, a cura di Dumont G.H., 1994; (trad. it. *La Storia dell'umanità*, Novara, Gedeo/Unesco, 2002, Vol. 3, pp. 57-62)

Rifkin J., *The Biotech Century*, 1998; (trad. it. *Il secolo Biotech*, Milano, Baldini & Castoldi, 1998)

Roche J. J., *The Mathematics of Measurement. A Critical History*, The Athlone Press, London, 1998

Ross S., *Introduction to Probability Models*, London, Academic Press, 2000

Rossi P., *I meccanici, gli ingegneri, l'idea di progresso*, in *Storia della Scienza Moderna e Contemporanea*, a cura di Rossi P., Milano, TEA, 1998, pp. 85-106

Russo L., *La rivoluzione dimenticata. Il pensiero scientifico greco e la scienza moderna*, Milano, Feltrinelli, 2001

Ruggles C.L.N., *Astronomy in Prehistoric Britain and Ireland*, New Haven, Yale University Press, 1999

Ruggles C. L. N., *L'uso dell'archeoastronomia nell'esplorazione della cosmologia antica : problemi di teoria e metodo*, in *L'uomo antico e il cosmo*, atti del convegno internazionale del 15-16 maggio 2000, Roma, Accademia dei Lincei, 2001, pp. 19-30

Sais G., Tavanini M., *Il calcolo delle probabilità*, in *Lo sviluppo storico della matematica*, Vol. 2, a cura di B. D'Amore, F. Speranza, Roma, Armando Editore, 1981, pp. 9-20

Schmand-Besserat, *Dal contabile allo scrittore*, in *Dal segno alla scrittura*, a cura di Giannini A., *Le Scienze Dossier* n.12, Milano, Le Scienze Spa, Estate 2002, p. 16-20

Scozzafava R., *Incertezza e Probabilità*, Bologna, Zanichelli, 2001

Severi M., *Introduzione all'esperimentazione fisica*, Bologna, Zanichelli, 1986

Sheynin O., *Lo sviluppo della teoria della probabilità e della statistica*, in *Storia della Scienza*, Vol. VI, a cura di Petruccioli S., Roma, Istituto della Enciclopedia Italiana fondato da Giovanni Treccani, Roma, 2001, pp. 529-541

Skinner F. G., *Pesi e misure*, in AA.VV., *A History of Technology*, a cura di Singer C., Holmyard E. J., Hall A. R., Williams T. I., 1954; (trad. it. *Storia della tecnologia*, a cura di Singer C., Holmyard E. J., Hall A. R., Williams T. I., Torino, Bollati Boringhieri, 1992, Vol. 3, pp. 786-795)

Stanford J.L., Vardeman S.B., a cura di, *Statistical Methods for Physical Science* - vol. 28 della collana *Methods of Experimental Physics*, London, Academic Press, 1994

Stewart I., *Nature's Numbers*, London, Phoenix, 1995

Stigler S. M., *The History of Statistics. The Measurement of Uncertainty before 1900*, Cambridge, The Belknap Press of Harvard University, 2000

Sydenham P. H., *Measuring Instruments: Tools of Knowledge and Control*, London, The Science Museum, 1979

Taylor B.N., Cohen E.R., *The Fundamental Physical Constants*, in *Physics Today*, agosto 1993, pp. 9-13

Taylor J.R., *An Introduction to Error Analysis. The study of Uncertainties in Physical Measurements*, 1982; (trad. it. *Introduzione all'analisi degli errori*, Bologna, Zanichelli, 1986)

Tenner E.C., *Why Things Bite Back: Technology and the Revenge of Unintended Consequences*, Knopf, New York, 1996

Toulmin S., *The Philosophy of Science, An Introduction*, Harper, New York, 1960

US Dept. Of Commerce- National Bureau of Standards Special Publication 345, *A Metric America. A decision whose time has come*, a cura di De Simone D.V., Washington, NBS, 1971

US Dept. Of Commerce- National Bureau of Standards Special Publication 447, *Weights and Measures Standards of the United States. A brief history*, a cura di Judson L.V., Washington, NBS, originally issued October 1963, updated March 1976

Vallese G., a cura di, *Vizi, Virtù e Follia nell'opera grafica di Bruegel il Vecchio*, Milano, Gabriele Mazzotta editore, 1979

Van Bastelaer, *Les estampes de Pieter Bruegel l'Ancien*, Bruxelles, Van Oest, 1908

Vineis P., *Nel crepuscolo della probabilità. La medicina tra scienza e etica*, Torino, Einaudi, 1999

Westfall R.S., *Measurement of the velocity of light*, in *Encyclopedia Americana*, a cura di B.S. Cayne, Danbury, Grolier, 1983, Vol 17, pp. 451-455

Whitrow G.J., *Time*, in *Encyclopedia Americana*, a cura di B.S. Cayne, Danbury, Grolier, 1983, vol. 26, pp 750-752

Williams D. C., *Space*, in *Encyclopedia Americana*, a cura di B.S. Cayne, Danbury, Grolier, 1983, vol. 25, p.353

Worthing A.G., Geffner J., *Treatment of Experimental Data*, 1964; trad. it. *Elaborazione dei dati sperimentali*, Milano, Ambrosiana, 1965

Young H. D., *Statistical Treatment of Experimental Data*, 1968, (trad. it. *Elaborazione statistica dei dati sperimentali*, Roma, Veschi, 1970)

Zambelli P., *Introduzione*, in Koyré A., *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, Torino, Einaudi, 2000

Zellini P., *Gnomon. Un'indagine sul numero*, Milano, Adelphi, 1999

WEBBIBLIOGRAFIA

URL

<http://scienzapertutti.lnf.infn.it/scaffali.html><http://zeual1.roma1.infn.it/~agostini/prob+stat.html>
www.iso.ch<http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/HistTopics/Measurement.html#s25><http://www.cofc.edu/~frysingj/background.htm><http://www.bipm.fr>http://www.bipm.fr/enus/5_Scientific/c_time/time.html<http://hpiers.obspm.fr>http://www.dallas.com/editorial/13418_EDIT.htmlhttp://ourworld.computerserve.com/homepages/Gene_Nygaard/t_jeff.htm<http://www.melegnano.net/pagina004tx.htm><http://www.industrie.gouv.fr/metro/aquoisert/metre.htm>www.pbs.org/newshour/gergen/lipset.htmlwww.metricsucks.com<http://lamar.colostate.edu/>http://ts.nist.gov/ts/htdocs/200/202/mpo_fact.htmwww.motherjones.com/mother_jones/JF99/zengerle.htmlwww.science.unitn.it/~labdid/sisint/si.html<http://physics.nist.gov/cuu/Units/index.html><http://physics.nist.gov/cuu/Constants/introduction.html>www.transaction.net/science/seven/constant.htmlwww.shaldrake.com<http://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/international2.html><http://www.iac.es/project/galileo/neo/escpth1si3barra.html>

www.bayesian.org/

<http://www.utm.edu/research/hume/wri/1enq/1enq-6.htm>