

Considerazioni sul Nuovo Sistema Metrologico Mondiale di misure elettromeccaniche

(Arturo Tagliacozzo)

Dal 20 maggio 2019 viene adottato un nuovo sistema metrologico che sovverte completamente la concezione del precedente.

Il sistema consolidato dagli anni post bellici era basato, come nel lontano passato, sulla realizzazione di manufatti, le barre metalliche per unità di lunghezza, il cilindro di platino/iridio con altezza e diametro di 39 mm per il kilogrammo, ecc. allo scopo di permettere la riproduzione di copie, con l'ovvia difficoltà della leggera ineguaglianza, crescente nel tempo, delle copie prototipo e, soprattutto della difficoltà di realizzare campioni nel caso delle unità elettriche e termiche. Tipico l'ampere. L'ampere è definito come *“la corrente continua che se mantenuta in due conduttori rettilinei paralleli di lunghezza infinita, di sezione circolare trascurabile, posti a una distanza di 1 m nel vuoto, produrrebbe tra i conduttori una forza pari a 2×10^{-7} Newton per metro di lunghezza”*. E' ovvio che parlare di fili di lunghezza infinita nel vuoto introduce un'alea che non è tollerabile nella civiltà tecnologica del terzo millennio.

Analogamente per la definizione del grado in temperatura riferito al punto triplo dell'acqua, dove, dovendo poi specificare di quale acqua si parli, visto che ci sono vari isotopi dell'ossigeno e dell'idrogeno, c'è stato bisogno di aggiungere nel 2005 la dizione: *“La definizione si riferisce all'acqua con composizione isotopica definita esattamente con le seguenti quantità di sostanza:*

0,000 155 76 moli di ^2H per mole di ^1H , 0,000 379 9 moli di ^{17}O per mole di ^{16}O e 0,002 005 2 moli di ^{18}O per mole di ^{16}O ”

(^{16}O , così come ^1H sono gli isotopi più comuni).

Introduco qui l'osservazione dell'Ing. A. Sardi dell'INRIM che ringrazio,

“Interessante era il caso dell'ampere, che, definita a partire da una forza e due misure di lunghezza, era realizzabile con un'incertezza molto superiore a quella con cui si realizzavano ormai da anni il volt e l'ohm. Definendo 7 costanti fondamentali, ci si libera delle definizioni e si apre la possibilità di realizzare le singole grandezze, scegliendo di volta in volta il metodo che offre maggiori garanzie. Nei documenti del BIPM si suggerisce per la messa in pratica dell'ampere, di realizzare il volt e l'ohm e di ottenere l'unità di corrente tramite legge di ohm.”

Un primo stravolgimento si è avuto nella ridefinizione dell'unità di tempo nel 1960. Si è introdotto lo standard basato sul Cesio 133. La cosiddetta “meccanica quantistica” di inizio secolo, entrava nella metrologia. Nel 1913 Bohr propone che un fotone può indurre in un atomo la transizione tra due livelli di energia E_1 e E_2 , se è verificata la condizione $E_2 - E_1 = h \nu$ in cui h è la costante di Planck e ν è la frequenza dell'onda elettromagnetica (nel caso della disuguaglianza es. $E_1 < E_2$ l'onda elettromagnetica sarà assorbita dall'atomo). Quando l'atomo di Cesio viene irradiato con luce monocromatica di frequenza $\nu = 9192631770 \text{ Hz}$ corrispondente ad una lunghezza d'onda di circa 3.26 cm (microonde), si dice che “transisce” al livello di energia più alto, per poi decadere al livello di partenza dopo una piccola frazione di secondo riemettendo il quanto di luce. Anche qui c'è una imprecisione, perché sarebbe bene che l'atomo fosse fermo e nel vuoto, condizioni irrealizzabili. Questo limita la precisione del secondo, ma comunque dieci cifre sono garantite.

La velocità della luce nel vuoto c è stata misurata con metodi di interferometria laser con una precisione di nove cifre. Con la teoria della relatività, Einstein definisce l'assioma che essa è costante in ogni sistema di riferimento inerziale (ovvero, non soggetto a accelerazioni o a campi gravitazionali, il che è la stessa cosa per la teoria della relatività generale). Ormai questo assioma è

accettato e largamente verificato nei viaggi interplanetari e nel GPS. Dunque velocità c e frequenza ν permettono la definizione del *metro* (1983), dal momento che velocità per secondo dà lunghezza.

Ora si estende questo modo di procedere, rovesciando così il punto di vista del passato.

La meccanica quantistica, mal definita che sia, e le relatività einsteiniane hanno ricevuto talmente tante conferme sperimentali che diventano l'asse portante della definizione di unità metrologiche.

Queste teorie si basano su delle scale di graduazione delle grandezze che caratterizzano il nostro universo. Le scale sono fissate da valori detti "costanti fisiche". Si assume (con qualche evidenza) che le costanti fisiche non siano cambiate in gran parte della vita dell'universo, e in particolare nel nostro tempo.

Un famoso romanzo di Isaac Asimov "Neanche gli dei" è costruito sull'ipotesi di due mondi che entrano in contatto con leggi fisiche simili ma caratterizzate da costanti fisiche diverse. Ebbene, i valori che prendono le nostre costanti fisiche definiscono le proprietà del nostro universo ed è giusto che ne definiscano anche il sistema metrologico.

E' importante notare che questo è potuto accadere perché nei laboratori si entra sempre più in contatto, soprattutto sperimentando nel mondo microscopico, con queste costanti fondamentali e con la quantizzazione di grandezze misurate in unità di queste costanti.

A partire dalla teoria di Brian Josephson del 1962, si è verificato che se si irradia con luce alla frequenza ν (nell'ambito delle microonde) una giunzione micrometrica tra metalli nello stato superconduttore, ai capi della giunzione si misura un voltaggio pari a $2eV/h = \nu$. C'è un salto tra assenza di radiazione che dà $V=0$ e questo valore di voltaggio quando si accende la radiazione alla frequenza ν . h è, di nuovo, la costante di Planck ed e è la carica dell'elettrone. Nel 1980 K. von Klitzing ha mostrato che è possibile costruire un microdispositivo a semiconduttori in cui la cosiddetta conducibilità elettrica di Hall σ aumenta per gradini che sono alti e^2/h , fino alla decima cifra decimale. Ancora, in anelli superconduttivi massicci si verifica che si può intrappolare un flusso del campo magnetico $\Phi(B)$ solo di multipli di $hc/2e$.

E' importante insistere sulla "universalità" di questi fenomeni: i dispositivi che li producono non dipendono largamente da dettagli costruttivi, materiale puro o con impurezze, forma geometrica. Si può mostrare che, in ultima analisi dipendono solo da simmetrie generalissime della natura, in particolare la cosiddetta "invarianza di gauge". Già notata da Maxwell e Lorenz nell'elettrodinamica classica alla metà dell'Ottocento e riconosciuta come proprietà generale della natura da Weyl, essa è alla base anche delle attuali teorie per le interazioni elettrodeboli e forti delle particelle elementari ed altrettanto invarianti sono le equazioni relativistiche. Inoltre, la funzione d'onda quantistica esplicita queste simmetrie nell'equazioni di Schrödinger e Dirac in modo evidente.

Unità basate su queste costanti garantiscono la totale riproducibilità dei campioni nel nostro mondo globalizzato. E' questo il senso di fissarne il valore a dieci cifre ed imporle come metro di misura.

L'aspetto interessante è che, mentre nel passato le unità fondamentali 'certe' erano soprattutto quelle 'meccaniche', in questa epoca sono le misure elettriche quelle più certe e di base per quelle 'meccaniche'. Abbiamo detto del *metro* $\approx c/\nu$. Altrettanto la definizione di kilogrammo massa, $kg \approx h \nu / c^2$, introduce in modo definitivo l'equivalenza massa-energia $E = m c^2$ nella quotidianità del nostro mondo. Intanto ben definiti sono il voltaggio $2eV/h \approx \nu$, la resistenza (l'Ohm), h/e^2 , perché anche la carica elettrica, da misure incrociate, Hall e Josephson, è 'certa'. E, di

conseguenza la corrente $I \simeq e v$. E' importante sottolineare che ognuna di queste relazioni è pane quotidiano dei laboratori moderni. Abbiamo detto questo per le misure Hall e Josephson. Anche la corrente come *carica dell'elettrone che passa nell'unità di tempo* è ora sperimentata con grande facilità nelle nanostrutture. Il cosiddetto Punto Quantico (Quantum Dot) è una zona confinata (tramite campi elettrici controllati da porte) del diametro di nanometri, in un semiconduttore, una strozzatura attraverso la quale è possibile far passare *un elettrone alla volta* e misurare il suo passaggio.

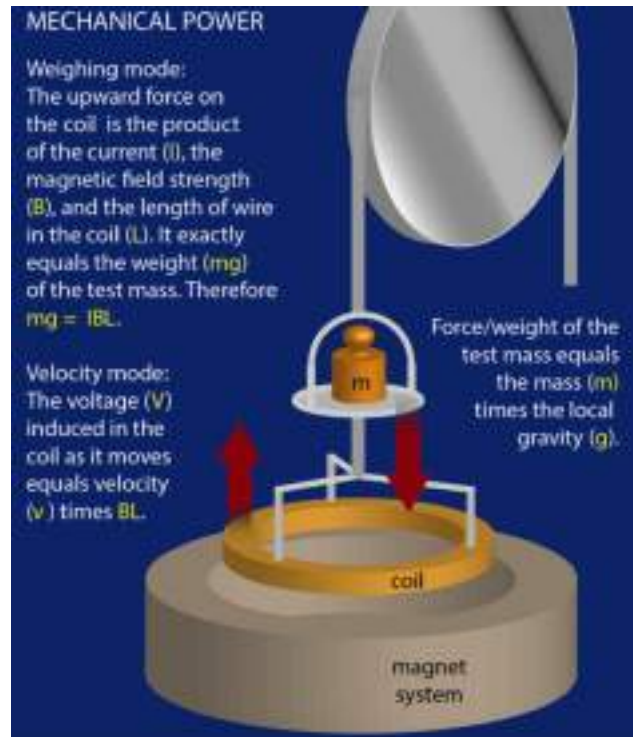
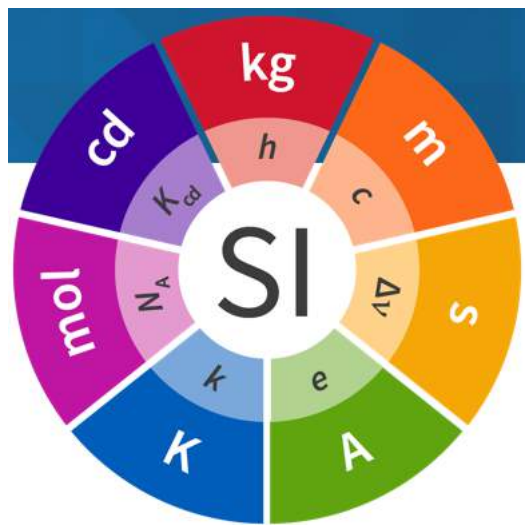


Fig. 1 – Il Sistema Internazionale di Unità di Misura (dal sito Web del NIST)

Fig. 2 – La Bilancia di Kibble (dal sito Web del NIST)

E allora, come misurare una massa? Innanzitutto è il trionfo del principio di *equivalenza tra massa gravitazionale e massa inerziale* fissato da Einstein alla base della relatività generale. Poi, l'assunto, non banale è che forze generate elettricamente siano equivalenti alle forze meccaniche. Ed è allora possibile costruire una bilancia nella quale una *forza generata elettricamente* viene paragonata ad una *forza peso*. E' questo il principio della bilancia di Watt (detta anche di Kibble da Brian Kibble del *National Physical Laboratory (UK)* che l'ha idealizzata nel 1975).

La misura avviene in due fasi:

- a) *fase di pesatura*: Una corrente I in una bobina (un filo elettrico) di lunghezza L , immerso in un campo magnetico B opportunamente orientato, genera una forza che compensa la forza peso della massa da misurare: $I L B = m g$. (g è l'accelerazione di gravità locale).
- b) *fase di velocità*: Nello stesso campo magnetico si fa muovere la bobina con velocità v controllata con alta precisione. Si genera nella bobina una forza elettromotrice indotta, ovvero un potenziale elettrico $V = B L v$.

Questo processo a due stadi serve per escludere la misura delle grandezze B ed L che sono difficilmente determinabili. Infatti $B L = V / v$, (fase b) mentre, nella fase a si aveva $B L = m g / I$. Dunque, uguagliando si ha: $m g v = I V$, e quindi $m = I V / g v$.

Il punto debole della catena è proprio l'accelerazione di gravità locale g che era misurata storicamente con scarsa precisione. Nel corso della Tavola Aperta, il Prof. G. Tino dell'Università di Firenze racconterà come è possibile migliorare la sua misura portandola a precisioni più grandi.

Un problema sorge con la costante dell'elettrodinamica: *la costante di struttura fine*, $\alpha = 2 \pi e^2 / h c$, per la quale l'elettrodinamica quantistica (QED) introduce correzioni, ma questo sarà un problema fra almeno trent'anni e lo lasciamo da parte.

In questo schema di costanti base, vanno aggiunte la costante di Boltzmann k_B , che serve a determinare l'unità di temperatura: *il grado Kelvin* $= h \nu / k_B$, ed il Numero di Avogadro N_A Definito come nuova unità, al posto della *mole*.

Per concludere guardando al futuro, ci sono due scale che possono essere costruite con le costanti dette e con *la costante di gravitazione universale* G , e che non entrano in questo discorso

- *il tempo di Planck* $t_P = \sqrt{\frac{G h}{2\pi c^5}} \sim 0.5 \cdot 10^{-43} \text{ sec},$

- *l'entropia per unità di area-dell'orizzonte-degli-eventi in un buco nero, detta "radiazione di Hawking"* $\frac{S}{A} = 2\pi \frac{k_B c^3}{4 G h},$

ma queste entreranno nella nostra vita sul pianeta Terra solo quando si sarà riusciti a costruire una teoria unificata della relatività e della meccanica quantistica e a frequentare i buchi neri.