



a cura di  
Alessandro Balsamo  
INRIM

# Il nuovo SI: cambia tutto perché nulla cambi - 2<sup>a</sup> parte

## Sommario

Nella prima parte di questo articolo [1] ho descritto l'impianto concettuale dello SI: la coerenza (le unità derivate si formano componendo quelle di base tutte con coefficiente unitario), la collocazione di qualsiasi unità nel sistema (mediante una settupla di esponenti delle unità di base), la disponibilità di multipli e sottomultipli (a coprire 48 ordini di grandezza), il battesimo di alcune unità derivate con nomi speciali (di solito in onore di un illustre scienziato). Ho anche illustrato la definizione in vigore allora (vecchio SI) delle sette unità di base. Dopo la pubblicazione, è accaduto l'atteso evento: il 20 maggio 2019 è entrato in vigore il nuovo SI. L'impianto concettuale rimane identicamente lo stesso, mentre cambiano le definizioni delle unità di base; più precisamente, cambia il modo stesso in cui sono definite, che fa loro perdere molto del loro primato nel sistema. In questa seconda parte, illustrerò i punti di debolezza del vecchio SI e gli avanzamenti tecnici che hanno permesso di superarli, per arrivare al nuovo SI ora in vigore.

## Limiti del vecchio SI L'ampere e le unità elettriche

Il mondo meccanico ed elettrico hanno un punto di contatto comune, la potenza: quella meccanica, ad esempio per sollevare un carico, deve coincidere con quella elettrica, ad esempio per alimentare il motore che lo solleva. La potenza meccanica è il prodotto di una forza per una velocità e quella elettrica di una tensione per una corrente; occorre garantire l'uguaglianza delle corrispondenti unità, cioè che

$$W = N \text{ m/s} = V A$$

Storicamente, s'è sviluppata prima la meccanica e poi l'elettricità, e quindi le unità meccaniche (secondo,

metro e kilogrammo, e quindi newton) sono precedenti a quelle elettriche (volt e ampere). Queste ultime furono obbligate ad allinearsi a quelle meccaniche per mantenere la coerenza del sistema.

Il valore dell'ampere è stato fissato in modo che ne risultasse un watt elettrico uguale per definizione al watt meccanico.

La definizione dell'ampere era basata su un esperimento ideale: «L'ampere è l'intensità di 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  $2 \times 10^{-7}$  N per metro di lunghezza.».

Impossibile realizzare la definizione: qualunque conduttore non può essere né di lunghezza infinita né di sezione trascurabile.

Il modo pratico era mediante una bilancia: da un lato una massa a generare la forza campione (espressa in newton), dall'altra un avvolgimento in un campo magnetico a produrre una forza proporzionale alla corrente che lo percorre. Il limite a questa realizzazione è che, mentre la costante di proporzionalità fra massa e forza è la gravità locale  $g$  misurabile in modo molto accurato, quella fra corrente e forza è il prodotto fra l'autoinduttanza  $L$  del circuito e l'intensità di flusso magnetico  $B$ , che invece dipende da molti fattori e non si riesce a misurare in modo altrettanto accurato. Ne risultava una realizzazione pratica dell'ampere non molto accurata.

Nella seconda metà del secolo scorso, si affacciarono due scoperte fondamentali della fisica quantistica.

Nel 1962 il fisico britannico Brian David Josephson predisse un fenomeno di supercorrente per effetto tunnel in una barriera, poi realizzato e verificato,

Fenomeno	Relazione fondamentale	Costante di proporzionalità		Valore
Effetto Josephson	$V = \frac{nf}{K_J}$	Costante di Josephson	$K_J = \frac{2e}{h}$	$\sim 478 \text{ THz/V}$
Effetto Hall quantistico	$R_H = \frac{R_K}{i}$	Costante di von Klitzing	$R_K = \frac{h}{e^2}$	$\sim 25,8 \text{ k}\Omega$

Tabella 1 – Fenomeni quantistici d'interesse per la metrologia elettrica.

battezzato con il suo nome e per il quale fu insignito del premio Nobel per la fisica nel 1973 [2].

La sua rilevanza metrologica (vedi tabella 1) è dovuta alla proporzionalità quantizzata (cioè proporzionale ad interi  $n$ ) fra tensione generata  $V$  e frequenza  $f$  della microonda generatrice; la costante di proporzionalità  $K_J$  è chiamata *costante di Josephson* ed è in relazione con la costante di Planck e la carica elementare. Poiché la frequenza si può misurare in modo accuratissimo, l'incertezza di realizzazione di una tensione risulta pari a quella della costante di Josephson (figura 1).

Nel 1980 il fisico polacco Klaus von Klitzing scoprì l'effetto Hall quantistico e per questo vinse il premio Nobel per la fisica nel 1985 [3].

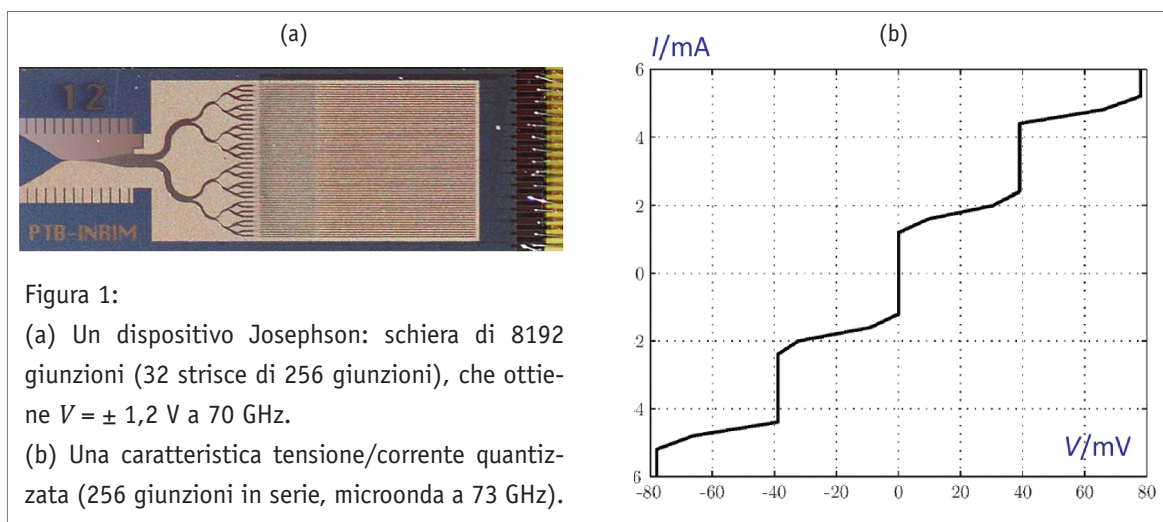
L'effetto Hall classico era stato scoperto da Edwin Hall (1855-1938) nel 1879 e consiste nella formazione di una tensione trasversa ad un flusso di corrente

immerso in un campo magnetico<sup>1</sup>; si caratterizza con la *resistenza di Hall* definita come rapporto fra la tensione trasversa generata e la corrente generante.

Cent'anni dopo, von Klitzing scoprì che, in presenza di un forte campo magnetico e di temperature criogeniche, in un semiconduttore opportuno, la conduttanza di Hall (reciproco della resistenza) può assumere solo valori multipli interi  $i$  di un quanto fondamentale di conduttanza  $1/R_K$ .

L'inverso di tale quanto è chiamato *costante di von Klitzing*  $R_K$  ed è anch'essa in relazione con la costante di Planck e la carica elementare (vedi tabella 1).

La rilevanza metrologica di questa scoperta è la realizzazione di un campione quantistico di resistenza elettrica, accurato quanto la costante di von Klitzing (figura 2).



<sup>1</sup> Essa è dovuta alla forza di Lorentz esercitata dal campo magnetico sulle cariche in movimento, che le accumula da un lato del conduttore a formare la tensione trasversa.

## Il nuovo SI: cambia tutto perché nulla cambi - 2ª parte . — continua dalla pagina precedente

a cura di Alessandro Balsamo (INRIM)

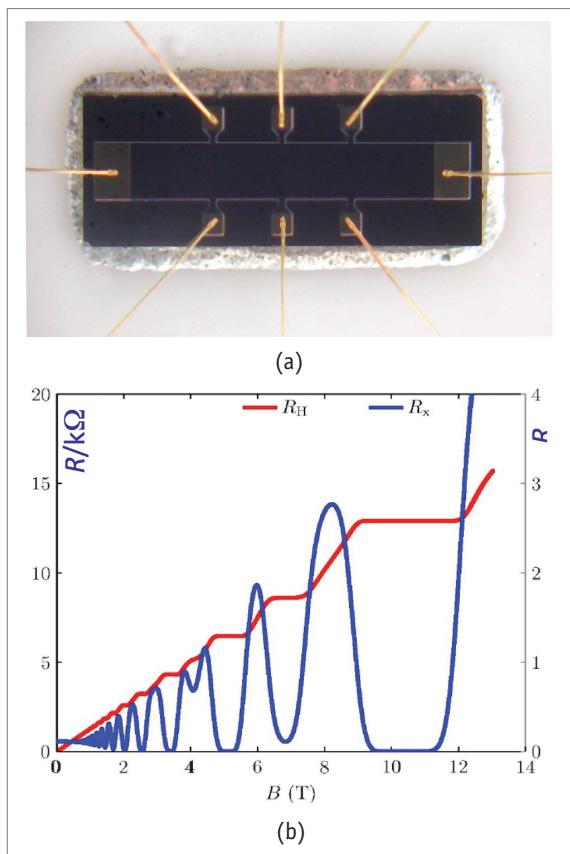


Figura 2: (a) Barra di AlGaAs/GaAs, (1 × 0,4) mm<sup>2</sup> per realizzare l'effetto Hall quantistico.

(b) Andamento della resistenza diretta (curva blu, non d'interesse qui) e trasversa (di Hall, curva rossa) al variare dell'intensità di flusso magnetico. Si notano gli scalini per effetto della quantizzazione.

La riproducibilità di questi due fenomeni è elevatissima; con un campione di tensione (per effetto Josephson) e di resistenza (per effetto Hall quantistico), tutte le quantità elettriche diventavano assai riproducibili. Tuttavia l'ampere continuava a scontare la dipendenza storica dal watt meccanico.

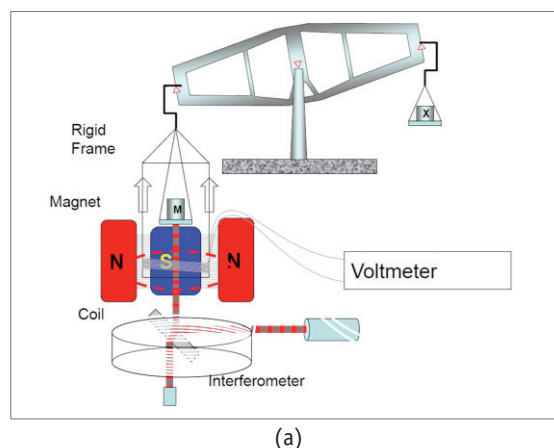
Per questa ragione, nel 1987 la 18ª CGPM diede mandato al CIPM di fissare valori convenzionali per le costanti di Josephson e di von Klitzing [4], che lo attuò nel 1988 [5,6] con entrata in vigore nel 1990. In quanto convenzionali, tali valori erano esatti; ad

essi furono assegnati i simboli  $K_{J-90}$  e  $R_{K-90}$ . Da allora, tutte le tarature di grandezze elettriche erano fatte per riferimento a questi valori. Se da un lato ciò permise di migliorare enormemente la riproducibilità delle misure elettriche, dall'altro le poneva al di fuori dello SI: la riferibilità era a  $K_{J-90}$  e  $R_{K-90}$ , non all'ampere definito nello SI. Le stesse raccomandazioni [5,6] che definivano i valori ne indicavano l'incertezza di collegamento con il resto dello SI, rispettivamente di  $2 \times 10^{-7}$  e di  $4 \times 10^{-7}$ .

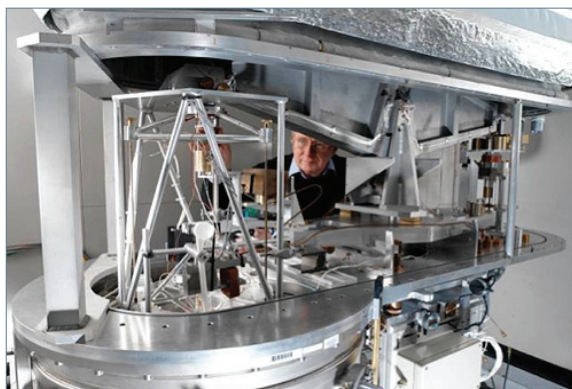
Nel 1976, il fisico inglese Bryan Kibble (1938-2016) propose una soluzione geniale [7] per risolvere la misura del campo magnetico e dell'autoinduttanza nella bilancia del watt (figura 3). Esso sfrutta la nota reversibilità dei dispositivi elettromagnetici (un motore può agire da generatore e viceversa) e alterna una misura dinamica a una statica. Nella prima l'avvolgimento è fatto scorrere a velocità costante, misurata da un interferometro ad alta accuratezza, mentre si misura la tensione prodotta (modalità generatore); nella seconda si regola la corrente che porta all'equilibrio statico fra le forze elettrica e peso (modalità motore, seppur fermo). Poiché il campo magnetico e l'autoinduttanza sono gli stessi nelle due misure, essi possono essere eliminati, arrivando all'elegantissima relazione finale

$$(M-X)gv=VI$$

che immediatamente esprime il confronto fra il watt meccanico ed elettrico.



(a)



(b)

Figura 3: La bilancia di Kibble:

(a) schema di principio e (b) realizzazione pratica.

Ricapitolando, la metrologia elettrica si trovava ad usare unità ripetibili ma al di fuori dello SI, mentre esisteva uno strumento, la bilancia di Kibble, per collegare i mondi meccanico ed elettrico ribaltandone le priorità: non più l'ampere funzione delle unità meccaniche, ma le unità meccaniche, ed in particolare il kilogrammo, in funzione dell'ampere, a sua volta definito in base a costanti quantistiche fondamentali.

### Il kilogrammo, unico campione materiale

Il prototipo del kilogrammo  $\mathcal{K}$  era rimasto l'unico campione materiale d'unità<sup>2</sup>. I campioni materiali sono i più immediati, ma soffrono di numerosi problemi:

- Non possono che essere in un solo luogo al mondo: per garantirne l'uso, sono necessari confronti internazionali periodici mondiali, che richiedono lunghi e pericolosi trasporti di tali delicatissimi oggetti.

- Nell'uso si rischia di danneggiarli, e per questo si conservano in cassaforte; ma se non si usano sono inutili.
- Sul lungo periodo, sono esposti al rischio di danneggiamento (incidenti, terremoti, alluvioni, guerre, ecc.) e di furto.
- Non c'è alcuna garanzia teorica che la quantità realizzata dal campione sia stabile nel tempo. In particolare per  $\mathcal{K}$ , le operazioni di pulizia prima dell'uso e l'adsorbimento/desorbimento superficiale dei gas circostanti ne alterano il valore di massa.
- Il campione fissa senza incertezza un punto sulla scala della grandezza, ad esempio 1 kg per  $\mathcal{K}$ ; per collegare gli altri punti (dai microgrammi alle tonnellate) sono necessari confronti successivi affetti da incertezza progressivamente crescente. Sulla scala della grandezza, l'incertezza di realizzazione ha una forma a farfalla.

Per minimizzare questi inconvenienti,  $\mathcal{K}$  era conservato insieme ad un numero di altri prototipi identici di guardia.

La figura 4 illustra l'andamento storico dei confronti effettuati.

Poiché tutti i campioni di guardia mostrano la stessa tendenza ad appesantirsi, l'ipotesi più probabile è che in realtà si sia alleggerito  $\mathcal{K}$ . Si nota anche che  $\mathcal{K}$ , nei suoi più di cent'anni di vita, è stato misurato solo quattro volte.

<sup>2</sup> Il precedente, il metro, era stato dematerializzato nel 1960 [8]; la ridefinizione era basata su un multiplo della lunghezza d'onda in vuoto di una certa radiazione del cripto 86. La definizione fu poi ulteriormente modificata nel 1983, per legarla definitivamente alla velocità della luce in vuoto.

<sup>3</sup> Per convenzione internazionale, presso il BIPM a Sèvres, vicino a Parigi (FR).

## Il nuovo SI: cambia tutto perché nulla cambi - 2ª parte . — continua dalla pagina precedente

a cura di Alessandro Balsamo (INRIM)

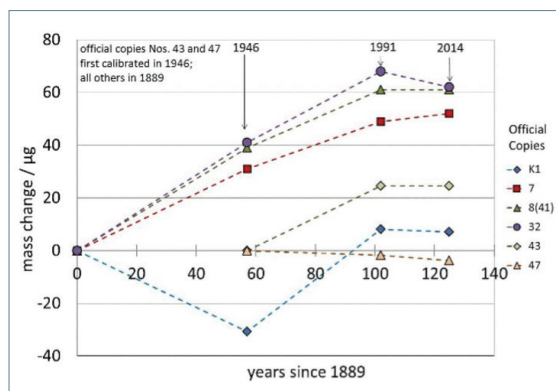


Figura 4: Andamento secolare dei valori di taratura dei campioni di guardia del prototipo del kilogrammo  $\mathcal{K}$ .

Il fatto che la definizione originaria del kilogrammo del 1889 [9] non si fosse mai modificata<sup>4</sup> indica che questa era imbattibile, pur con i suoi difetti.

Come definire un'unità di massa meglio che con una massa fisica? Per quarant'anni la metrologia primaria ha lavorato ai confini della fisica e della tecnologia per vincere questa sfida.

Ho già illustrato la via "elettrica" fornita dalla bilancia di Kibble, in cui il kilogrammo è confrontato con la potenza elettrica, a sua volta confrontata con costanti quantistiche: la tensione è prodotta per effetto Josephson e la corrente con tale tensione e con la resistenza prodotta per effetto Hall quantistico. Si ottiene (vedi tabella 1):

$$VI = V \frac{V_H}{R_H} = \frac{nf n_H f_H}{K_J} \frac{i}{K_J} \frac{1}{R_K} = \frac{nif f_H}{K_J^2 R_K}; \quad K_J^2 R_K = \left(\frac{2e}{h}\right)^2 \frac{h}{e^2} = \frac{4}{h}$$

La potenza elettrica è dunque proporzionale alla costante di Planck. Definire quest'ultima definirebbe la potenza elettrica (grazie agli effetti Josephson e Hall quantistico), pari a quella meccanica (grazie alla bi-

lancia di Kibble), che definirebbe il kilogrammo.

È disponibile anche una via "meccanica", legata alla costante di Avogadro. Quest'ultima misura la quantità di particelle elementari presenti in una mole, cioè in un numero di grammi uguale al peso atomico; ad esempio, in 12 g di carbonio 12, come recitava la definizione della mole. Se il valore della costante di Avogadro fosse definita anziché misurata, allora basterebbe avere una quantità di sostanza pari al suo peso atomico, o comunque nota, per avere un campione di massa.

La misura della costante di Avogadro è stata realizzata mediante una collaborazione internazionale nella quale l'Italia ha avuto un ruolo da protagonista.<sup>5</sup> Sono ben quattro le misure fondamentali necessarie, di un prototipo il cui materiale ha il reticolo atomico meglio noto e più puro disponibile, il silicio monocristallino, foggiate nella forma che si sa realizzare con il minor errore, la sfera<sup>6</sup> (figura 3):

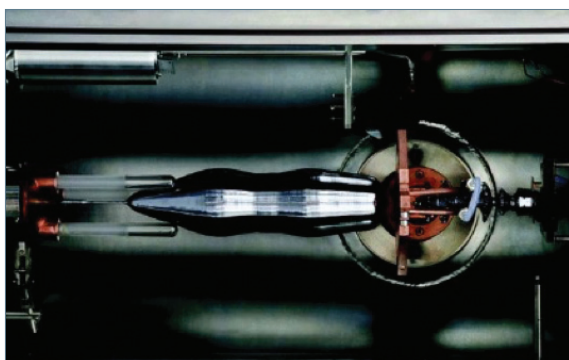
1. Si misura la costante reticolare del silicio, cioè la distanza fra piani atomici. Ciò è fatto mediante interferometria ai raggi X, utilizzando due porzioni del medesimo reticolo: quando sufficientemente allineate e investite da raggi X, muovendo finemente l'una rispetto all'altra il fascio X che li attraversa entrambe risulta modulato con periodicità pari al passo del reticolo, similmente alla rilevazione dei tratti di un encoder lineare. Lo spostamento è misurato con un interferometro ottico che dà il riferimento al metro. Poiché la configurazione cristallografica del silicio è nota, dalla costante reticolare si può ricavare il volume di una cella del reticolo, cioè il volume di un atomo.

<sup>4</sup> Nel 1901 la 3ª CGPM introdusse nella definizione che il kilogrammo è l'unità di massa e non di peso; inessenziale qui.

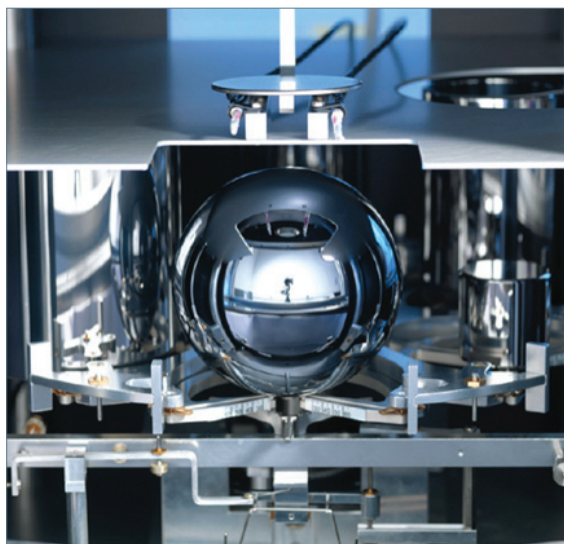
<sup>5</sup> Prima il CNR IMGC e poi l'INRIM.

2. Si misura il volume della sfera, mediante quella di numerosi diametri in varie direzioni. Ciò è fatto ponendo la sfera in un interferometro ottico apposito a simmetria sferica, e misurando la differenza del segnale con e senza sfera inserita. Dividendo il volume della sfera per quello dell'atomo, si ottiene il numero di atomi nella sfera.
3. Il carbonio si trova in natura in isotopi diversi, ognuno con il suo peso atomico. La sfera è fatta principalmente di silicio 28, ma sono inevitabilmente presenti tracce di altri isotopi. Si misura dunque la composizione isotopica della sfera. Per raggiungere un'accuratezza sufficiente, è necessario che gli altri isotopi siano in tracce minime; ciò rende necessario l'arricchimento del lingotto di silicio da cui è ricavata la sfera. Si conosce dunque il peso atomico medio degli atomi della sfera.
4. Si pesa la sfera, per confronto con il kilogrammo.<sup>7</sup> Dividendo la massa per il peso atomico medio, s'ottiene il numero di moli di silicio nella sfera.

A questo punto, il rapporto fra il numero di atomi e di moli della sfera è il valore cercato della costante di Avogadro.



(a)



(a)

Figura 3: La sfera di silicio usata per la misura della costante di Avogadro: (a) il lingotto di silicio 28 arricchito; (b) insieme al kilogrammo.

Se erano disponibili due vie per la ridefinizione del kilogrammo, elettrica e meccanica, come si confrontavano fra di loro?

Il prodotto  $hN_A$  della costante di Planck, chiave per la via elettrica, per quella di Avogadro, chiave per quella meccanica, è noto come *costante molare di Planck*, misurabile indipendentemente in modo molto più accurato di ciascuna delle due: la conoscenza di una implica quella dell'altra con la stessa incertezza relativa.

Questo permette di confrontare le due vie per la ridefinizione del kilogrammo (figura 4).

<sup>6</sup> La sfera è soggetta anche ad un requisito stringente di sfericità: se invece che di 94 mm di diametro essa fosse grande quanto la Terra, la differenza di quota fra l'Everest e la Fossa delle Marianne sarebbe di soli 5 m! I requisiti di purezza e forma rendono le sfere molto costose (ordine di alcuni milioni di euro l'una).

<sup>7</sup> La dimensione scelta per la sfera è quella che porta ad una massa la più prossima ad 1 kg, in modo che la pesata sia a minima incertezza.

# Il nuovo SI: cambia tutto perché nulla cambi - 2ª parte . — continua dalla pagina precedente

a cura di Alessandro Balsamo (INRIM)

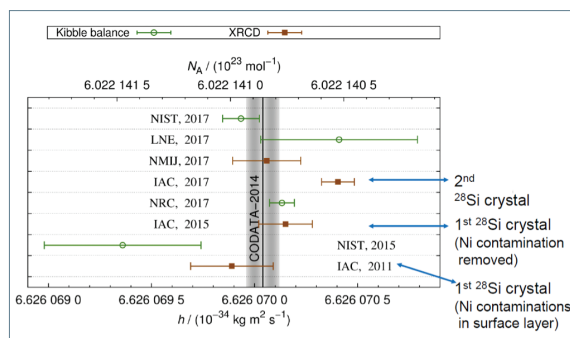


Figura 4: Confronto dei valori misurati della costante di Planck  $h$  (scala in basso, dati in verde) e di quella di Avogadro (scala in alto, dati in marrone).

Le barre indicano l'incertezza tipo.

Il valore e la banda (d'incertezza) centrali sono quelli indicati dal CODATA nel 2014, frutto di un aggiustamento dei valori precedentemente disponibili.

## Il nuovo SI

L'idea che sottostà al nuovo SI è di rinunciare alla definizione delle unità di base in favore di quella dei valori di altrettante costanti fondamentali. Ciò già avveniva nel vecchio SI per alcune unità, ad esempio per il metro: data la definizione della velocità della luce in vuoto  $c = 299\,792\,458$  m/s, risulta definita l'unità metro al secondo come una frazione di  $c$ ,  $m/s = c/(299\,792\,458)$ . Con il nuovo SI, questo schema è elevato a sistema. Ne risulta la definizione complessiva dell'intero sistema in modo assai compatto (tabella 2).

Questa impostazione non è nuova. Nel 1870 J.C. Maxwell proponeva [10]:

*Se vogliamo ottenere campioni di lunghezza, tempo e massa, che siano assolutamente permanenti, li dobbiamo cercare non nella dimensione o nel moto o nella massa del nostro pianeta, ma nella lunghezza d'onda, nel periodo di vibrazione e nella massa assoluta di queste imperiture ed inalterabili e perfettamente simili molecole.*

Medesimo concetto riprendeva qualche anno dopo M. Planck [11]:

*... mediante le costanti universali abbiamo la possibilità di fissare unità di lunghezza, tempo, massa e temperatura, che mantengano necessariamente il loro significato per tutte le culture, persino quelle extraterrestri e non umane.*

Dopo 120 anni, quelle proposte visionarie sono diventate realtà.



Figura 5: Logo del nuovo SI, che evidenzia la dipendenza dalle sette costanti fondamentali.

Il Sistema Internazionale delle unità, lo SI, è il sistema di unità in cui:

- la frequenza di transizione iperfine dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133  $\Delta\nu_{Cs}$  è  $9\,192\,631\,770$  Hz,
- la velocità della luce in vuoto  $c$  è  $299\,792\,458$  m/s,
- la costante di Planck  $h$  è  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$  J s,
- la carica elementare  $e$  è eguale a  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$  C,
- la costante di Boltzmann  $k$  è  $1,380\,649 \times 10^{-23}$  J/K,
- la costante di Avogadro  $N_A$  è  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
- l'efficienza luminosa della radiazione monocromatica di frequenza  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , è  $683$  lm/W,

dove hertz, joule, coulomb, lumen e watt, con simboli rispettivamente Hz, J, C, lm e W, sono collegati alle unità secondo, metro, kilogrammo, ampere, kelvin, mole e candela, con simboli rispettivamente s, m, kg, A, K, mol e cd, mediante le relazioni:  $Hz = s^{-1}$ ;  $J = kg\ m^2\ s^{-2}$ ;  $C = A\ s$ ;  $lm = cd\ m^2\ m^{-2} = cd\ sr$ ;  $W = kg\ m^2\ s^{-3}$ .

Tabella 2 – Le definizioni dello SI in vigore dal 20 maggio 2019.

Osservando la definizione del nuovo SI, ci si potrebbe domandare dove siano finite le unità di base, scomparse dalla definizione. In effetti, qualunque unità, di base o derivata, risulta riferita allo SI se compatibile (cioè discendente) da quelle costanti. Prendendo ad esempio ancora la definizione di  $c$ , si potrebbe ben dire che l'unità che ne risulta direttamente definita sia il metro al secondo, non il metro; vuol dire che ora è il metro al secondo l'unità di base?

Semplicemente, il concetto di unità di base perde la sua valenza: tutte le unità, di base e derivate,

sono ugualmente degne di fronte al sistema, purché compatibili con le sette costanti. Se le unità di base non scompaiono proprio è per continuare a collocare qualsiasi unità del sistema mediante la settupla di esponenti, che richiede una selezione di sette unità alla base. In altre parole, l'importanza delle unità di base rimane solo per la loro *dimensione*, mentre è persa per la loro *definizione*. È comunque possibile derivare le definizioni delle unità di base da quella generale del sistema (vedi tabella 3). Tali definizioni sono riportate in appendice nella definizione ufficiale dello SI per continuità storica<sup>8</sup>.

Tabella 3 – Le definizioni delle unità di base SI in vigore dal 20 maggio 2019, derivate dalla definizione generale dello SI.

secondo	Il secondo, simbolo $s$ , è l'unità SI di tempo. È definito prendendo per la frequenza di transizione iperfine dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133 $\Delta\nu_{Cs}$ il valore numerico prefissato di 9 192 631 770 quando espresso nell'unità Hz, che è uguale a $s^{-1}$ .
metro	Il metro, simbolo $m$ , è l'unità SI di lunghezza. È definito prendendo per la velocità della luce in vuoto $c$ il valore numerico prefissato di 299 792 458 quando espresso nell'unità $m/s$ , dove il secondo è definito rispetto a $\Delta\nu_{Cs}$ .
kilogrammo	Il kilogrammo, simbolo $kg$ , è l'unità SI di massa. È definito prendendo per la costante di Planck $h$ il valore numerico prefissato di $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ quando espresso nell'unità $J\ s$ , che è uguale a $kg\ m^2\ s^{-1}$ , dove il metro e il secondo sono definiti rispetto a $c$ e a $\Delta\nu_{Cs}$ .
ampere	L'ampere, simbolo $A$ , è l'unità SI d'intensità di corrente. È definito prendendo per la carica elementare $e$ il valore numerico prefissato di $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ quando espresso nell'unità $C$ , che è uguale a $A\ s$ , dove il secondo è definito rispetto a $\Delta\nu_{Cs}$ .
kelvin	Il kelvin, simbolo $K$ , è unità SI di temperatura termodinamica. È definito prendendo per la costante di Boltzmann $k$ il valore numerico prefissato di $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ quando espresso nell'unità $J\ K^{-1}$ , che è uguale a $kg\ m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$ , dove il kilogrammo, il metro e il secondo sono definiti rispetto a $h$ , $c$ e a $\Delta\nu_{Cs}$ .
mole	La mole, simbolo $mol$ , è l'unità SI di quantità di sostanza. Una mole contiene esattamente $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ entità elementari. Questo numero è il valore numerico prefissato della costante di Avogadro $N_A$ quando espresso nell'unità $mol^{-1}$ ed è chiamato il numero di Avogadro. La quantità di sostanza, simbolo $n$ , di un sistema è la misura del numero di entità elementari specificate. Le entità elementari possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni, qualsiasi altra particella ovvero gruppi specificati di particelle.
candela	La candela, simbolo $cd$ , è l'unità SI d'intensità luminosa in una data direzione. È definita prendendo per l'efficienza luminosa della radiazione monocromatica di frequenza $540 \times 10^{12}$ Hz, $K_{cd}$ , il valore numerico prefissato di 683 quando espresso nell'unità $lm\ W^{-1}$ , che è uguale a $cd\ sr\ W^{-1}$ , ovvero $cd\ sr\ kg^{-1}\ m^{-2}\ s^3$ , dove il kilogrammo, il metro e il secondo sono definiti rispetto a $h$ , $c$ e a $\Delta\nu_{Cs}$ .

<sup>8</sup> Analogamente, sarebbe possibile definire qualsiasi unità derivata.



## Il nuovo SI: cambia tutto perché nulla cambi - 2ª parte . — continua dalla pagina precedente

a cura di Alessandro Balsamo (INRIM)

Invertendo le definizioni delle costanti fondamentali, è possibile ricavare quelle delle unità di base.

Ad esempio, invertendo quella della costante di Avogadro,  $N_A=6,022\ 140\ 76\times 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$ , si ottiene  $\text{mol}=6,022\ 140\ 76\times 10^{23}\ N_A^{-1}$ . L'estensione di questa inversione a tutte le unità di base è riportato in tabella 4.

Essa risponde anche alla seguente domanda: se le definizioni di tutte le unità SI discendono da quel-

le delle sette costanti, perché c'è ancora bisogno di unità distinte dalle costanti, e non si potrebbe invece misurare, ad esempio, le velocità in  $c$  e le correnti elettriche in  $\Delta v_{Cs}$  e?

La risposta è nella colonna dell'approssimazione numerica: si potrebbe in linea di principio, ma lo stravolgimento sarebbe tale, con cambi tali delle taglie di tutte le unità di misura, da essere assolutamente improponibile nella pratica.

Tabella 4 – Le definizioni delle unità di base rispetto alle costanti fondamentali. Il simbolo  $\{x\}$  indica il valore numerico della costante riportato nella definizione dello SI.

Unità di base	Definizione	Approssimazione numerica	Conseguenza
secondo	$\frac{\{\Delta v_{Cs}\}}{\Delta v_{Cs}}$	$9\ 192\ 631\ 770\ \Delta v_{Cs}^{-1}$	Il secondo è la durata di $\{\Delta v_{Cs}\}$ periodi della radiazione corrispondente alla transizione iperfine dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133
metro	$\frac{\{\Delta v_{Cs}\}}{\{c\}} \frac{c}{\Delta v_{Cs}}$	$30,663\ 319\ c/\Delta v_{Cs}$	Il metro è la lunghezza percorsa dalla luce in vuoto in $1/\{c\}$ s.
kilogrammo	$\frac{\{c\}^2}{\{\Delta v_{Cs}\}\{h\}} \frac{\Delta v_{Cs}h}{c^2}$	$1,475\ 521\ 4\times 10^{40}\ \Delta v_{Cs}\ h/c^2$	Non immediata
ampere	$\frac{\Delta v_{Cs}e}{\{\Delta v_{Cs}\}\{e\}}$	$6,789\ 687\times 10^8\ \Delta v_{Cs}\ e$	L'ampere è l'intensità di corrente corrispondente ad un flusso di $1/\{e\}$ cariche elementari al secondo.
kelvin	$\frac{\{k\}}{\{\Delta v_{Cs}\}\{h\}} \frac{\Delta v_{Cs}h}{k}$	$2,266\ 665\ 3\ \Delta v_{Cs}\ h/k$	Il kelvin è l'incremento di temperatura termodinamica che corrisponde ad un incremento di energia termica $kT$ di $\{k\}$ J.
mole	$\frac{\{N_A\}}{N_A}$	$6,022\ 140\ 76\times 10^{23}\ N_A^{-1}$	La mole è la quantità di sostanza di un sistema che contiene $\{N_A\}$ entità elementari specificate.
candela	$\frac{\Delta v_{Cs}^2 h K_{cd}}{\{\Delta v_{Cs}\}^2 \{h\} \{K_{cd}\}}$	$2,614\ 830\times 10^{10}\ \Delta v_{Cs}^2\ h\ K_{cd}$	La candela è l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette radiazione monocromatica di frequenza $540 \times 10^{12}$ Hz e ha un'intensità radiante in tale direzione di $1/\{K_{cd}\}$ W/sr.

La ridefinizione dello SI porta anche alla conseguenza che costanti che erano definite in modo esatto diventano grandezze fisiche misurabili, e viceversa.

Ad esempio, la permeabilità magnetica del vuoto  $\mu_0$  risultava definita dall'ampere; ora che questo è definito invece rispetto alla costante di Planck, il valore di  $\mu_0$  non è più esatto, ma soggetto ad incertezza di misura.

Analogamente per la massa del prototipo del kilogrammo  $m(\mathcal{K})$ : il prototipo ora altro non è che un

pezzo di metallo<sup>9</sup>. Per contro, costanti prima incerte ora risultano esatte. Fra queste, forse le più importanti sono quelle di Josephson e di von Klitzing: essendo entrambe in relazione esatta con la costante di Planck e con la carica elementare (vedi tabella 1), definite dallo SI, risultano definite anch'esse in modo esatto.

La tabella 5 riassume la situazione per alcune grandezze notevoli.

Tabella 5 – Incertezza di grandezze notevoli nella transizione dal vecchio al nuovo SI.

Grandezza	Simbolo	Valore	Incertezza standard relativa, $\frac{u(x)}{x}$	
			Vecchio SI	Nuovo SI
Frequenza di transizione iperfine dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133	$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770 Hz	Esatta	Esatta
Velocità della luce in vuoto	$c$	299 792 458 m/s	Esatta	Esatta
Massa del prototipo del kilogrammo $\mathcal{K}$	$m(\mathcal{K})$	1 kg	Esatta	$1 \times 10^{-8}$
Permeabilità magnetica del vuoto	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m	Esatta	$2,3 \times 10^{-10}$
Permittività elettrica del vuoto	$\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	$8,854 187 82 \times 10^{-12}$ F/m	Esatta	$2,3 \times 10^{-10}$
Punto triplo dell'acqua	$T_{TPW}$	273,16 K = 0,01 °C	Esatta	$3,7 \times 10^{-7}$
Massa molare del carbonio 12	$M(^{12}\text{C})$	12 g/mol	Esatta	$4,5 \times 10^{-10}$
Efficienza luminosa della radiazione monocromatica di frequenza $540 \times 10^{12}$ Hz	$K_{cd}$	683 lm/W	Esatta	Esatta
Costante di Planck	$h$	$6,626 070 15 \times 10^{-34}$ J s	$1 \times 10^{-8}$	Esatta
Carica elementare	$e$	$1,602 176 634 \times 10^{-19}$ C	$6,1 \times 10^{-9}$	Esatta
Costante di Boltzmann	$k$	$1,380 649 \times 10^{-23}$ J/K	$3,7 \times 10^{-7}$	Esatta
Costante di Avogadro	$N_A$	$6,022 140 76 \times 10^{23}$ mol <sup>-1</sup>	$1,2 \times 10^{-8}$	Esatta
Costante di Josephson	$K_J = 2e/h$	483 597,848 GHz/V	$4 \times 10^{-7}$	Esatta
Costante di von Klitzing	$R_K = h/e^2$	25 812,807 46 $\Omega$	$2 \times 10^{-7}$	Esatta

<sup>9</sup> Valore storico e venale (il metallo è platino) a parte, s'intende!

## Il nuovo SI: cambia tutto perché nulla cambi - 2<sup>a</sup> parte . — continua dalla pagina precedente

a cura di Alessandro Balsamo (INRIM)

I valori risultanti delle costanti di Josephson e di von Klitzing purtroppo non coincidono con quelli convenzionali  $K_{J-90}$  e  $R_{K-90}$  prima utilizzati per la riferibilità elettrica:

$$\frac{K_J - K_{J-90}}{K_{J-90}} = -1,067 \times 10^{-7}, \quad \frac{R_K - R_{K-90}}{R_{K-90}} = +1,779 \times 10^{-8},$$

Dunque, il 20 maggio 2019 le unità elettriche hanno subito una discontinuità: la taglia di quelle legate alla tensione è cresciuta di  $1,067 \times 10^{-7}$ , di quelle legate alla resistenza di  $1,779 \times 10^{-8}$ . Di conseguenza, tutte le grandezze elettriche hanno subito una diminuzione di altrettanto del loro valore numerico. Un piccolo prezzo da pagare per riammettere appieno le unità elettriche nel sistema SI.

### Conclusioni

Il nuovo SI entrato in vigore il 20 maggio 2019 rifonda completamente l'impalcatura concettuale del sistema, non più basato su definizioni indipendenti di sette unità di base, ma su quelle dei valori di sette costanti fondamentali della natura, ritenute immutabili ed eterne. Finalmente si smaterializza il prototipo del kilogrammo: oltre a risolvere numerosi problemi pratici e di stabilità secolare, la metrologia

della massa non avrà più il problema di estendere la realizzazione dei campioni lungo la scala a partire dal valore privilegiato di 1 kg; si potrà, ad esempio, realizzare un campione primario di 1 mg mediante una piccola bilancia di Kibble. Le unità elettriche sono finalmente riammesse nella famiglia SI, seppur al prezzo di una piccola discontinuità. Il kelvin si smarca da una materia specifica, l'acqua, superando le definizioni ausiliarie di composizione isotopica (che alterano la temperatura del punto triplo). La mole si smarca dal kilogrammo e rimane legata soltanto al conteggio di particelle. Secondo, metro e candela rimangono inalterati, seppur il testo della loro definizione si modifica per ragioni di uniformità stilistica. Per ottenere tutto questo ci sono voluti due premi Nobel e quarant'anni di dedizione nel misurare le costanti definite dallo SI in modo sufficientemente accurato, in particolare le costanti di Planck, di Avogadro e di Boltzmann. In questo modo, la taglia delle nuove unità risulta non discontinua rispetto alla precedente (con l'eccezione di piccola entità delle unità elettriche).

Missione compiuta: tutto cambia perché nulla cambi, nella taglia e nei secoli.

### Riferimenti

1. A. Balsamo, 2019, Il nuovo SI: cambia tutto perché nulla cambi - 1<sup>a</sup> parte, *Probing* 25:8-12.
2. B.D. Josephson, Premio Nobel per la fisica 1973, [www.nobelprize.org/prizes/physics/1973/josephson/facts/](http://www.nobelprize.org/prizes/physics/1973/josephson/facts/)
3. K. von Klitzing, Premio Nobel per la fisica 1985, [www.nobelprize.org/prizes/physics/1985/klitzing/facts/](http://www.nobelprize.org/prizes/physics/1985/klitzing/facts/)
4. 18<sup>e</sup> Conférence Générale des Poids et Mesures, 1987, *Comptes Rendus, Résolution 6* (pagina 100), [www.bipm.org/utls/common/pdf/CGPM/CGPM18.pdf#page=100](http://www.bipm.org/utls/common/pdf/CGPM/CGPM18.pdf#page=100)
5. Comité International des Poids et Mesures, 1988, *Procès-verbaux de la 77<sup>e</sup> session, Tome 56, Recommendation 1* (pagina 44), [www.bipm.org/utls/common/pdf/CIPM-PV-OCR/CIPM1988.pdf#page=58](http://www.bipm.org/utls/common/pdf/CIPM-PV-OCR/CIPM1988.pdf#page=58)
6. Comité International des Poids et Mesures, 1988, *Procès-verbaux de la 77<sup>e</sup> session, Tome 56, Recommendation 2* (pagina 45), [www.bipm.org/utls/common/pdf/CIPM-PV-OCR/CIPM1988.pdf#page=59](http://www.bipm.org/utls/common/pdf/CIPM-PV-OCR/CIPM1988.pdf#page=59)

7. B.P. Kibble, 1976, A Measurement of the Gyromagnetic Ratio of the Proton by the Strong Field Method. In: J.H. Sanders, A.H. Wapstra (Eds.) Atomic Masses and Fundamental Constants, vol. 5. Springer, Boston, MA 545–551. doi:10.1007/978-1-4684-2682-3\_80
8. 11<sup>e</sup> Conférence Générale des Poids et Mesures, 1960, Comptes Rendus, Résolution 6 (pagina 85), [www.bipm.org/utis/common/pdf/CGPM/CGPM11.pdf#page=85](http://www.bipm.org/utis/common/pdf/CGPM/CGPM11.pdf#page=85)
9. 1<sup>e</sup> Conférence Générale des Poids et Mesures, 1889, Comptes Rendus des séances, Projet de formule de sanction des prototypes (pagina 85) [www.bipm.org/utis/common/pdf/CGPM/CGPM1.pdf#page=34](http://www.bipm.org/utis/common/pdf/CGPM/CGPM1.pdf#page=34)
10. J.C. Maxwell, 1870, Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association, Liverpool, September 15, 1870. British Association Report Vol. XL.
11. M. Planck, 1900, Über irreversible Strahlungsvorgänge. Annalen der Physik 306(1):69–122. doi:10.1002/andp.19003060105
12. H. Bosse, H. Kunzmann, J.R. Pratt, S. Schlamminger, I. Robinson, M. de Podesta, P. Shore, A. Balsamo, P. Morantz, 2017, Contributions of precision engineering to the revision of the SI, CIRP Annals Manufacturing Technology 66 (2017) 827–850, doi:dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.003



Versailles (FR), 2018-11-16, 26<sup>a</sup> CGPM (Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure): si approva all'unanimità il nuovo SI (in vigore dal 2019-05-20). Nella foto, la votazione italiana espressa dal capodelegazione dott. Giuseppe Capuano, nominato dal MISE.