

La futura revisione del Sistema Internazionale di unità di misura

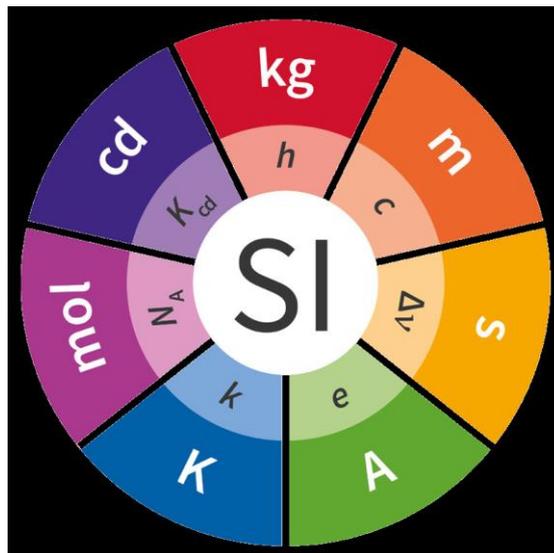
Date importanti

settembre 2017: XXIII° riunione del CCU (Comitato Consultivo sulle Unità), Raccomandazione all'introduzione del nuovo SI ¹

20 maggio 2018: Giornata Mondiale sulla metrologia, lancio della campagna di informazione sulla ridefinizione del SI

novembre 2018: XXVI° riunione della CGPM (Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure). Questa riunione dovrà sancire la ridefinizione del SI

20 maggio 2019: Giornata Mondiale sulla Metrologia: la ridefinizione del SI entra nella pratica. Ogni riferimento all'iter sarà ormai di tipo storico



SI e costanti fondamentali

¹ Il Comitato Consultivo sulle Unità...

- conclude che i valori numerici e le incertezze della costante di Planck, la carica elementare, la costante Boltzmann e la costante di Avogadro fornite dal gruppo di lavoro CODATA sulle costanti fondamentalicostituiscono una base sufficiente a sostenere la ridefinizione, -raccomanda al CIPM (Comitato Internazionale Pesi e Misure) di prendere le misure necessarie per procedere, come previsto, alla ridefinizione del chilogrammo, dell'ampere, del kelvin e della mole alla 26° riunione del CGPM (Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure) nel 2018.

Il SI è attualmente accettato da circa 100 stati e rappresenta, dunque, un successo globale. Ora si è in procinto di ridefinirlo facendo riferimento alle costanti fondamentali. Allo stato presente già il secondo ed il metro, rispettivamente unità di intervallo di tempo e di lunghezza sono definiti con riferimento a due di tali costanti. Il secondo fa riferimento a un determinato numero di oscillazioni (periodi) degli elettroni dell'atomo di cesio, il metro fa riferimento alla velocità di propagazione della luce nel vuoto.

Tutti i cambiamenti nella definizione del SI hanno tenuto conto e tengono conto di un requisito fondamentale: preservare la continuità.

Il vantaggio dell'uso delle costanti fondamentali sta appunto nella loro caratteristica di base di essere costanti. Per contro l'impiego di campioni materiali, il cilindro di platino-iridio o la barra metallica dello stesso materiale, fa sì che i campioni siano soggetti a variazioni nel loro valore a causa delle interazioni con l'ambiente. Tali oggetti possono variare anche di qualche microgrammo o micrometro, mentre nel mondo tecnologico di oggi variazioni molto più piccole (nanometro, nanogrammo) possono rappresentare un ostacolo significativo. Ciò viene superato dal riferimento alle costanti fondamentali e il nuovo SI consentirà di far fronte a tutte le necessità di misura del nostro mondo ad elevata tecnologia.

Nel "Nuovo SI" quattro delle unità base SI, cioè il chilogrammo, l'ampère, il kelvin e la mole, saranno ridefinite in termini di costanti; le nuove definizioni saranno basate su valori numerici fissi della costante di Planck (h), della carica elementare (e), della costante di Boltzmann (k_B) e della costante di Avogadro (N_A) rispettivamente, espresse in unità SI¹. Inoltre, le definizioni di tutte le sette unità di base del SI saranno espresse uniformemente con riferimento ad esplicite costanti e saranno elaborate specifiche regole per la messa in pratica (mise en pratique) delle definizioni di ciascuna delle unità base.

Le costanti vengono continuamente misurate nei laboratori di fisica ed i loro valori riconsiderati dal CODATA (Comitato sui Dati per la Scienza e la Tecnologia) a livello mondiale. Ciò significa semplicemente che le nostre capacità di misura evolvono e migliorano in continuazione permettendoci di tenere sempre aggiornati i valori delle costanti.

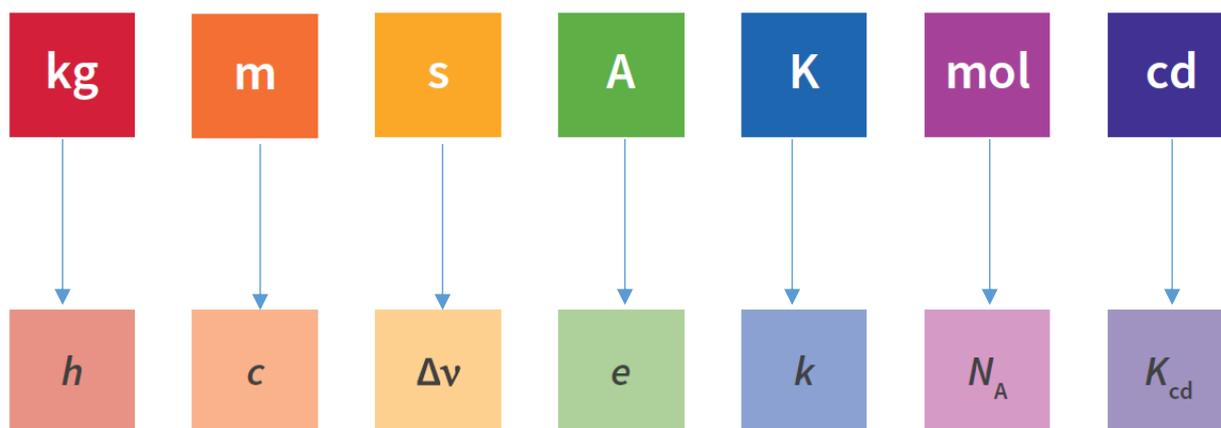
Ridefinizione: il SI sarà il sistema di unità in cui:

- La frequenza di transizione iperfina dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, è 9 192 631 770 hertz (s^{-1})
- La velocità della luce nel vuoto, c , è esattamente 299 792 458 metri al secondo (ms^{-2})
- La costante di Planck, h , è esattamente $6.62607040 \times 10^{-34}$ joule per secondo ($\text{J s}=\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$)
- La carica elementare, e , è esattamente eguale a $1.602 176620 \times 10^{-19}$ coulomb .(A s)
- La costante di Boltzmann, k , è esattamente $1.380 64852 \times 10^{-23}$ joule al kelvin
- La costante di Avogadro, N_A , è esattamente $6.022 140 857 \times 10^{23}$ mole⁻¹ (mol^{-1})
- L'efficienza luminosa, K_{cd} , della radiazione monocromatica di frequenza 540×10^{12} hertz è esattamente 683 lumen per watt

La ultime cifre non sono ancora del tutto definite ma, naturalmente, quando usciranno ufficialmente le definizioni del nuovo SI tutte le costanti saranno date con il numero di cifre e le incertezze fornite dal CODATA, che periodicamente pubblica i valori raccomandati delle costanti fondamentali della fisica. La natura delle costanti che definiscono il SI va dalle costanti fondamentali della natura a costanti tecniche.

² Come per ogni grandezza il valore di una costante fondamentale può essere espresso come il prodotto di un valore numerico {Q} e di una unità [Q]: $Q = \{Q\}[Q]$.

A ogni unità SI e relativa costante si possono abbinare i colori dello spettro elettromagnetico



L'uso di una costante per definire un'unità scollega la definizione dalla realizzazione e questo offre la possibilità di sviluppare realizzazioni pratiche completamente diverse o nuove e superiori in linea con l'evolvere delle tecnologie senza dover cambiare la definizione.

Le convenzioni tecniche e le specifiche tengono conto degli sviluppi storici

L'insieme delle sette costanti è stato scelto in modo da fornire un riferimento fondamentale più stabile possibile e universale, ma anche tale da permettere realizzazioni pratiche con piccoli valori dell'incertezza. Sia la costante di Planck, h , che la velocità della luce nel vuoto, c , sono costanti fondamentali; la carica elementare, e , corrisponde all'intensità di accoppiamento della forza elettromagnetica tramite la costante di struttura fine $\alpha = e^2 / (2c\epsilon_0 h)$ dove ϵ_0 rappresenta la permittività elettrica del vuoto o costante elettrica.

La costante di Boltzmann, k , corrisponde a un fattore di conversione tra le grandezze temperatura (con unità kelvin) e l'energia (con unità joule) per cui il valore numerico è ottenuto da specifiche storiche della scala di temperatura. Nella fisica statistica la costante di Boltzmann collega l'entropia, S , al numero di stati, Ω , accessibili quanto-meccanicamente $S = k \ln \Omega$.

La frequenza del cesio 133 $\Delta\nu_{cs}$ ha il carattere di un parametro atomico, che può essere influenzato dall'ambiente, ad esempio dai campi elettromagnetici. Tuttavia, la transizione di base è ben compresa, è stabile ed è anche una buona scelta come transizione di riferimento sotto il profilo pratico.

La costante di Avogadro N_A , corrisponde a un fattore di conversione tra la quantità di sostanza (unità mole) e il numero di entità (con l'unità 1, simbolo 1). Quindi ha il carattere di una costante di proporzionalità simile alla costante di Boltzmann. L'efficienza luminosa K_{cd} , è una costante tecnica collegata alla risposta spettrale convenzionale dell'occhio umano.

I nomi ed i simboli rimangono gli stessi come si può vedere dalla tabella seguente

Grandezza nome	Grandezze e unità di base		
	simbolo	Unità nome	simbolo
Tempo	<i>t</i>	secondo	s
Lunghezza	<i>l</i>	metro	m
Massa	m	kilogrammo	kg
Corrente elettrica	<i>I, i</i>	ampere	A
Temperatura termodinamica	<i>T</i>	kelvin	K
Quantità di sostanza	<i>n</i>	mole	mol
Intensità luminosa	<i>I_v</i>	candela	cd

Definizioni nel nuovo SI

- Il **secondo**, simbolo s, è l'unità SI di tempo. Esso è definito considerando fisso il valore numerico della frequenza della transizione iperfine, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, dello stato fondamentale imperturbato dell'atomo di Cesio 133 (^{133}Cs) e pari a 9 192 631 770 quando espresso in unità SI, Hz (s^{-1}).

Questo implica

$$1 \text{ Hz} = \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}}}{9\,192\,631\,770} \quad \text{oppure} \quad 1 \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

L'effetto di questa definizione è che il secondo è uguale alla durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra due livelli iperfini dell'atomo di ^{133}Cs nello stato fondamentale imperturbato.

- Il **metro**, simbolo m, è l'unità SI di lunghezza. Esso è definito tenendo fisso il valore numerico della velocità della luce in vuoto e pari a 299 792 458 quando espresso in unità SI m s^{-1} , in cui il secondo è definito in termini di frequenza del cesio, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Questa definizione implica l'esatta relazione $c = 299\,792\,456 \text{ ms}^{-1}$. Invertendo la relazione si ha l'esatta espressione per il metro in termini delle costanti c e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1 \text{ m} = \left\{ \frac{c}{299\,792\,458} \right\} \text{m}^{-2} \text{s} = 1.475\,521\dots \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c}$$

L'effetto di questa definizione è che il metro è il cammino percorso dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo della durata di 1/99 792 458 secondi.

- Il **kilogrammo**, simbolo kg, è l'unità SI di massa. Esso è definito tenendo fisso il valore numerico della costante di Planck, h , eguale a $6\,626\,070\,040 \times 10^{-34}$ quando espressa in unità SI J·s, che è eguale a $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, in cui il metro e il secondo sono definiti in termini di c $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Questa definizione implica l'esatta relazione $h = 6.626070040 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ e fornisce il kilogrammo in termini delle tre costanti: h , $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ e c:

$$1 \text{ kg} = \frac{h}{6.626070040 \times 10^{-34}} m^{-2} s = 1.475521 \dots \times 10^{40} \frac{h \Delta \nu_{Cs}}{c^2}$$

La precedente definizione del chilogrammo fissava il valore della massa m del prototipo internazionale del chilogrammo, K pari a 1 kg, con un'incertezza relativa di 2×10^{-8} che è anche il valore dell'incertezza attribuita alla costante di Planck al momento dell'adozione della definizione.

Si noti che con la presente definizione la realizzazione primaria può, in linea di principio, situarsi in ogni punto della scala di massa.

- L'**ampere**, simbolo A, è l'unità SI della corrente elettrica. Essa è definita tenendo fisso il valore numerico della carica elementare pari a $1.602\ 176\ 620\ 8 \times 10^{-19}$ quando espressa in unità Coulomb, che è eguale a $A \cdot s$, dove il secondo è definito in termini di $\Delta \nu_{Cs}$.

Questa definizione implica l'esatta relazione $e = 1.602\ 176\ 620\ 8 \times 10^{-19} \text{ A s}$. E invertendo

$$1 \text{ A} = \frac{e}{1.602\ 176\ 620\ 8 \times 10^{-19}} \text{ s}^{-1} = 6.789\ 687 \dots \times 10^8 \Delta \nu_{Cs} e$$

Da questa definizione segue che un ampere è la corrente elettrica corrispondente ad un flusso di $1/1.602\ 176\ 620\ 8 \times 10^{-19}$ cariche elementari per secondo.

- Il **kelvin**, simbolo K, è l'unità SI di temperature termodinamica: Esso è definito tenendo fisso il valore numerico della costante di Boltzmann pari a $1.380\ 648\ 52 \times 10^{-23}$ quando espressa in unità SI $J \cdot K^{-1}$ che è eguale a $kg \ m^2 \ s^{-2} K^{-1}$, in cui il chilogrammo, il metro ed il secondo sono definiti in termini di h , c and $\Delta \nu_{Cs}$.

Questa definizione implica l'esatta relazione $k = 1.380\ 648\ 52 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ K}^{-1}$. Invertendo questa relazione si ha per il kelvin un'esatta relazione in termini delle costanti k , h e $\Delta \nu_{Cs}$:

$$1 \text{ K} = \left(\frac{1.380\ 648\ 52}{k} \right) 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} = 2.266\ 665 \dots \frac{\Delta \nu_{Cs} h}{k}$$

Per effetto di questa definizione un kelvin è eguale al cambiamento della temperatura termodinamica che produce un cambiamento di energia termica kT di $1\ 380\ 648\ 52 \times 10^{-23} \text{ J}$.

- La **mole**, simbolo mol, è l'unità SI della quantità di sostanza di entità elementare, che può essere atomo, molecola, ione, elettrone o qualsiasi altra particella o gruppo definito di tali particelle. Essa è definita tenendo fisso il valore della costante di Avogadro N_A pari a $6.022\ 140\ 857 \times 10^{23}$ quando espressa in unità mol^{-1} .

Questa definizione implica l'esatta relazione $N_A = 6.022\ 140\ 857 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Invertendo questa relazione si ha per la mole l'esatta espressione in termini di N_A :

$$1 \text{ mol} = \left(\frac{6.022\,140\,857 \times 10^{23}}{N_A} \right) .$$

L'effetto di questa definizione è che la mole è la quantità di sostanza di un sistema che contiene $6.022\,140\,857 \times 10^{23}$ specificate entità elementari.

- La **candela**, simbolo cd, è l'unità di intensità luminosa in una determinata direzione. Essa è definita mantenendo fisso il valore numerico dell'efficienza luminosa di una radiazione elettromagnetica monocromatica di frequenza 540×10^{12} Hz, K_{cd} , pari a 683 quando espressa in unità $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ che è eguale a cd sr W^{-1} , o $\text{cd sr kg}^1 \text{m}^{-2} \text{s}^3$, in cui il kilogrammo, il metro e il secondo sono definiti in termini di h, c and $\Delta\nu_{Cs}$.

Questa definizione implica l'esatta relazione $K_{cd} = 683 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3 \text{ cd sr}$ per una radiazione monocromatica di frequenza $\nu = 654 \times 10^{12}$ Hz. Invertendo questa relazione si ha per la candela si ha un'espressione esatta in termini delle costanti K_{cd} , h e $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1 \text{ cd} = (K_{cd} / 682) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1} = 2.614830 \dots \times 10^{10} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd}$$

Riferimenti

<https://www.bipm.org/utils/common/pdf/SI-Illustration-Guidelines.pdf>

<https://www.bipm.org/utils/common/pdf/SI-Brand-Book.pdf>

<https://www.bipm.org/en/si-download-area/graphics-files.html>

<https://www.bipm.org/en/si-download-area/videos.html>

<https://www.bipm.org/en/news/full-stories/2017-09-ccu-workshop.html>