

LA REVISIONE DEL SISTEMA INTERNAZIONALE DI UNITÀ DI MISURA

Ing. Angelo Sardi
Dott. Marco Pisani
Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica
INRIM

1. Premessa: la necessità della misura

L'esigenza di misurare le grandezze fisiche si è manifestata molto prima dello sviluppo delle scienze e della nascita del concetto stesso di grandezza fisica. Di certo la misura era già presente nell'economia di baratto e si sviluppò con l'introduzione della moneta.

L'evoluzione della metrologia è stata anche influenzata dalle vicende storiche e politiche: l'alternanza tra imperi e secoli bui, cui corrispondevano globalizzazione e "localizzazione" dei commerci ha portato ad alterne unificazioni e moltiplicazioni delle unità di misura. Si verificavano casi in cui, un'unità di misura aveva valori diversi a seconda della località. In Tabella 1 sono confrontati i valori dell'unità di superficie "tavola" e dei suoi multipli in alcuni capoluoghi di provincia della Pianura Padana¹.

Tabella 1		
Valori della "tavola" in diverse località della pianura padana		
località	[m2]	Multiplo
Bergamo	27,60	pertica = 24 t
Bologna	14,45	tornatura = 144 t
Brescia	32,55	piò = 100 t
Crema	31,50	pertica = 24 t
Cremona	33,67	pertica = 24 t
Ferrara	16,31	tornatura = 144 t
Mantova	31,39	biolca = 100 t
Modena	39,39	biolca = 72 t
Piacenza	31,75	pertica = 24 t

Prendendo in esame i valori di Bologna e Modena, che distano meno di 50 km, una distanza non eccezionale nemmeno in tempi di trasporti a dorso di mulo, si ha una differenza pari al 270 % per la stessa unità, mentre per i multipli la differenza "si riduce" al 136 %. In passato per la stessa grandezza fisica (peso, lunghezza, volume) si potevano avere unità diverse secondo l'ambito in cui si operava la misura². Le necessità di misura condizionavano sia la scelta dell'unità di misura sia la scelta della base numerica³. Una tale babele di valori poteva essere mantenuta solo in assenza di esigenze di confronto tra grandezze omogenee, tipiche della scienza moderna, o, più prosaicamente, fino a che, con la nascita degli stati nazionali, non si ponesse il problema del calcolo delle tasse.

Lo sviluppo dei commerci e la nascita degli stati nazionali hanno dato un primo impulso all'unificazione delle unità di misura in senso moderno. La scienza ha poi operato sia richiedendo l'unificazione delle unità sia fornendo i mezzi per realizzarla. Una trattazione sui sistemi di misura non può che partire dalla storia della loro evoluzione nell'età contemporanea.

¹ I valori della tabella costituiscono un esempio eclatante delle controindicazioni del federalismo.

² L'unità veniva spesso scelta in modo da evitare l'uso di numeri troppo grandi o troppo piccoli.

³ Un esempio è rappresentato dalle uova che, prima della cottura, sono intrinsecamente indivisibili. Ne segue che l'unità di misura deve essere necessariamente l'uovo. Per quanto riguarda la scelta della base numerica, la base dodici (misura a dozzine) ha un innegabile vantaggio: il numero dodici è, infatti, divisibile con quoziente intero per 2, 3, 4 e 6, mentre per un sistema decimale i possibili divisori sono solo 2 e 5.

2. Dal sistema metrico decimale al SI

Il primo passo nello sviluppo dell'attuale Sistema di Unità di Misura può essere fatto risalire alla rivoluzione francese. L'Assemblea Nazionale Costituente francese, su proposta di Charles-Maurice de Talleyrand-Périgord⁴, decise di adottare un sistema unificato di pesi e misure, seguendo la richiesta di "Un roi, une loi; un poids et une mesure".⁵

Longueur de quelques pieds de France.		Suite des Mesures pour les Aunages.	
	centes.		
Besançon, le pied est de	137 10	Toulon.	859 60
Dijon.	139 20	Montpellier.	891 60
Dole.	150 30	Provence.	888 90
Grenoble.	151 20	Toulouse.	807 "
Lorraine.	127 "	Troyes.	351 70
Lyon.	151 50		
Mâcon.	148 20		
Paris.	144 "		
Rouen.	130 "		
Sedan.	123 "		
Strasbourg.	128 27		
Pied de ville.	130 90		
Pied de campagne.	143 "		
Vienne en Dauphiné.			

Mesures pour les Aunages.		Mesures rondes pour les choses sèches.	
Abbeville, l'aune est de	524	Lyon. Ponces cubes	9670
Arras.	309 40	Mâcon.	12893
Bayonne.	391 80	Châlons-sur-Saône.	9283
Boideaux.	528 "	Verdun.	9670
Bretagne.	597 20	Amboise.	552
Caen.	524 "	Aurai.	1934
Cambrai.	317 60	Blois.	387
Dunkerque.	299 80	Bordeaux.	3868
Lille.	303 60	Bourbon-Lancy.	573
Lyon.	520 50	La Charité.	967
Paris. Pour les Soieries.	527 50	Charolles.	1221
Paris. Pour les Lainages.	525 40	Châteauneuf-sous-Loire.	1105
Paris. Pour les Toileries.	523 "	Cosne.	314
Morlaix.	597 20	Dieppe.	5157
Nantes.	526 "	Havre-de-Grace.	1743
Rouen. Pour les Lainages.	516 "	Montfleur.	1976
Rouen. Pour les Toileries.	519 20	Montreuil.	430
Saint-Malo.	597 20	Morlaix.	2670
		Nevers.	967
		Paris.	6142
		Périgueux.	1547
		Roanne.	967
		La Rochelle.	1658
		Rouen.	128
		Tours.	542
		Villeneuve d'Agénois.	4100
		Braine.	703
		Calors.	1469

Figura 1

Tabella con le differenze tra le unità di misura utilizzate in Francia, dalla proposta all'Assemblea Nazionale.

Le commissioni scientifiche istituite per definire le nuove unità di misura, comprendenti tra gli altri da Jean-Charles de Borda, Joseph-Louis Lagrange, Pierre-Simon de Laplace, Antoine Lavoisier e Gaspard Monge, elaborarono le seguenti definizioni:

- Il metro è la decimilionesima parte dell'arco di meridiano terrestre tra il polo boreale e l'equatore;
- Il grammo è il peso assoluto di un volume di acqua pura pari al cubo della centesima parte del metro alla temperatura del ghiaccio fondente⁶.

A seguito delle due definizioni, furono realizzati due campioni materiali, in platino, del metro e del chilogrammo, conservati negli Archives de la République a Parigi⁷.

⁴ Proposition faite à l'Assemblée nationale sur les poids et mesures par M. l'évêque d'Autun, Paris, 1790.

⁵ Cahiers des doléances, 1789

⁶ Décret relatif aux poids et aux mesures 18 germinal an 3 (7/4/1795) «Gramme, le poids absolu d'un volume d'eau pure égal au cube de la centième partie du mètre, et à la température de la glace fondante». Nel decreto erano definite anche le unità di area (Ara=100 m²) di volume di legna da ardere (Stero=1 m³), di volume (Lito=1 dm³) e di moneta (franco).

⁷ Il campione del metro ha sezione rettangolare, a differenza dei campioni successivi, mentre il campione di massa ha una forma cilindrica simile a quella che sarà poi adottata per i campioni in platino/iridio.

Nel 1832 il matematico e fisico Carl Friedrich Gauss realizzò la prima misura del campo magnetico terrestre, utilizzando un sistema decimale basato sull'utilizzo, come unità di misura, del millimetro e del milligrammo, rispettivamente per la lunghezza e la massa, oltre alla definizione del secondo astronomico come unità di misura del tempo. Il secondo era definito partendo dall'osservazione astronomica della rotazione della terra: il giorno solare veniva diviso in due cicli di 12 periodi (le ore), a loro volta divise in 60 periodi (i minuti); ogni minuto era ulteriormente suddiviso in 60 periodi (i secondi). In questo modo il secondo risultava pari a $1/86400$ del giorno⁸. Negli anni seguenti Gauss e Wilhelm Eduard Weber continuarono gli studi sui fenomeni elettromagnetici, contribuendo alla promozione dell'uso del sistema metrico decimale.

Le applicazioni del Sistema metrico nel campo delle misure elettromagnetiche furono ulteriormente sviluppate negli anni '60 del 1800 sotto la direzione di William Thomson (Lord Kelvin) e James Clerk Maxwell, attraverso la British Association for the Advancement of Science (BAAS, oggi British Science Association BSA). I due fisici formularono la richiesta di un sistema di misura coerente basato su poche unità di misura di base, da cui derivare le altre unità. Nel 1874 la BAAS introdusse il sistema di unità CGS, un sistema coerente basato su tre unità di misura meccaniche, il centimetro, il grammo e il secondo, utilizzando prefissi dal micro al mega per indicare i multipli e sottomultipli. La fisica e le scienze sperimentali delle ultime decadi dell'800 sono state sviluppate utilizzando il sistema CGS.

Le unità coerenti del sistema CGS nel campo dell'elettricità e del magnetismo si rivelarono non molto comode per l'utilizzo pratico⁹. Per questo motivo, negli anni 80 dell'800, la BAAS e il Congresso Elettrotecnico Internazionale, precursore della International Electrotechnical Commission – IEC, approvarono l'utilizzo di un sistema coerente di unità pratiche, tra cui l'ohm per la resistenza elettrica, il volt per la forza elettromotrice e l'ampere per la corrente.

Dopo la firma della Convenzione del Metro, il 20 maggio 1875, che creò l'Ufficio Internazionale dei Pesi e delle Misure (BIPM), istituì la Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (CGPM) e il Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure (CIPM), iniziarono le attività volte alla realizzazione dei nuovi prototipi internazionali del metro e del chilogrammo. Nel 1899 la prima Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure definì i prototipi per il metro e il chilogrammo¹⁰, insieme al secondo astronomico come unità di tempo. Le tre unità così definite costituirono un sistema meccanico simile al CGS, ma con le unità di base metro, chilogrammo e secondo, il sistema MKS.

Fu l'ingegnere e fisico italiano Giovanni Giorgi (1871-1950) a dimostrare, nel 1901¹¹, la possibilità di combinare le tre grandezze meccaniche di base del sistema MKS con le unità

⁸ Va notato come la misura del tempo non sia basata solo su un sistema decimale, ma su due altre basi numeriche (60 e 24).

⁹ L'unità di carica elettrostatica esu equivale a $3,3356 \times 10^{-10}$ C, l'unità di potenziale elettrico statvolt corrisponde a 299,792458 volt, la capacità è misurata in cm con $1 \text{ cm} = 1,113 \times 10^{-12}$ F.

¹⁰ Resolution 1 of the 1st CGPM, 24-28 September 1889

¹¹ G. Giorgi "Unità razionali di elettromagnetismo" Atti dell'Associazione elettrotecnica italiana, V (1902), pp. 402-418

pratiche utilizzate per l'elettromagnetismo, per formare un unico sistema coerente di unità basato su 4 grandezze di base: Il sistema si basava sulle 3 unità del sistema MKS, a cui si univa una quarta unità elettrotecnica, l'ampere o l'ohm. Si potevano quindi riscrivere le equazioni fondamentali dell'elettromagnetismo nella cosiddetta forma razionale. La proposta di Giorgi, figura di scienziato poco nota in Italia, aprì la strada ai successivi sviluppi.

Dopo la revisione della convenzione del metro nella sesta CGPM del 1921, che ampliò gli obiettivi e le responsabilità del BIPM in altri campi della fisica, e l'istituzione del Consultative Committee for Electricity CCE, oggi Consultative Committee for Electricity and Magnetism CCEM, durante la settima CGPM del 1927 la proposta di Giorgi fu analizzata in ogni sua parte dalla IEC, dalla International Union of Pure and Applied Physics - IUPAP e da altre organizzazioni internazionali. I risultati dell'analisi portarono il CCE a proporre, nel 1939, l'adozione di un sistema con 4 unità di base: metro, chilogrammo, secondo e ampere, il Sistema MKSA. La proposta del CCE fu approvata dal CIPM nel 1946. La settima CGPM elaborò anche la seguente definizione del metro¹²:

The unit of length is the metre, defined by the distance, at 0°, between the axes of the two central lines marked on the bar of platinum-iridium kept at the Bureau International des Poids et Mesures and declared Prototype of the metre by the 1st Conférence Générale des Poids et Mesures, this bar being subject to standard atmospheric pressure and supported on two cylinders of at least one centimeter diameter, symmetrically placed in the same horizontal plane at a distance of 571 mm from each other.

Nel 1948 il BIPM promosse un'inchiesta internazionale, a seguito della quale la decima CGPM, nel 1954, approvò l'introduzione, come unità di base per la corrente elettrica, la temperatura termodinamica e l'intensità luminosa, rispettivamente l'ampere, il kelvin e la candela. La denominazione Sistema Internazionale di Unità, con l'abbreviazione SI, è stato assegnato al sistema dall'undicesima CGPM nel 1960. La CGPM del 1960 sancì la nuova definizione del metro attraverso la lunghezza d'onda del Krypton, mandando in pensione la barra di platino/iridio. Il metro è la prima unità di base che è stata definita attraverso una costante fisica.

La quattordicesima CGPM del 1971, dopo un lungo confronto tra fisici e chimici, ha introdotto la mole come unità di base per la quantità di sostanza, completando l'attuale versione del SI, portando il numero totale di unità di base a sette.

¹² In realtà la definizione, come tutti i documenti della CGPM è stata redatta in francese, lingua ufficiale della metrologia. In questo documento la definizione è riportata nella traduzione inglese dal sito del BIPM.

3. L'attuale struttura del SI

Come illustrato nel paragrafo precedente, l'attuale Sistema Internazionale di Unità di misura si basa su 7 unità (le unità di base) per le seguenti grandezze fisiche:

- Lunghezza;
- Massa;
- Tempo;
- Corrente Elettrica;
- Temperatura Termodinamica;
- Quantità di Sostanza;
- Intensità luminosa.

Le rispettive unità di misura sono state introdotte in tempi diversi, seguendo lo sviluppo della scienza e della tecnica (Figura 2). Lo stesso sviluppo delle conoscenze scientifiche ha comportato un'evoluzione delle definizioni, finalizzata ad aumentare la stabilità e la ripetibilità delle realizzazioni delle unità.



Figura 2
Rappresentazione grafica delle unità di misura del SI

Le prime definizioni delle unità erano basate sulla realizzazione di manufatti (i cosiddetti "Campioni Materiali", come barre e cilindri metallici) e sulla definizione di unità di misura di una grandezza come il valore della grandezza del manufatto. Questa procedura non era dissimile da quella utilizzata fin dal rinascimento, quando i campioni di lunghezza e di peso erano conservati presso le porte delle città per la misura delle merci e il calcolo dei dazi¹³.

¹³ Nella loggia della torre dell'orologio di Berna (Zytglogge), antica porta occidentale della città sono visibili ancora oggi le unità di misura di lunghezza (cubito e bracciata), realizzate con barre metalliche.

I problemi legati alla stabilità nel tempo dei campioni materiali erano noti prima ancora dell'approvazione della convenzione del metro. J. C. Maxwell, in occasione della riunione della British Association for the Advancement of Science del 1870, dichiarò:

"If we wish to obtain standards of length, time and mass which shall be absolutely permanent, we must seek them not in the dimensions or the motion, or the mass of our planet, but in the wavelength, the period of vibration, and the absolute mass of these imperishable and unalterable and perfectly similar molecules."

"Se si vogliono ottenere campioni di lunghezza, tempo e massa che siano assolutamente permanenti, dobbiamo cercarli non nelle dimensioni o nel movimento, o nella massa del nostro pianeta, ma nella lunghezza d'onda, nel periodo di vibrazione e nella massa assoluta, imperituri, inalterabili e perfettamente simili delle molecole".

È quindi opportuno ripercorrere l'evoluzione delle definizioni delle unità di misura SI dalla prima definizione all'attuale struttura.

3.1 Unità di misura della lunghezza (metro - m)

La prima definizione del metro come distanza tra due tacche della barra di platino/iridio conservata presso il BIPM è stata sostituita dall'undicesima CGPM del 1960 con una definizione basata sulla lunghezza d'onda della radiazione del Krypton 86:

"Il metro è la lunghezza pari a 1 650 763,73 lunghezze d'onda nel vuoto della radiazione corrispondente alla transizione fra i livelli 2p₁₀ e 5d₅ dell'atomo di kripton-86"

In questo modo era possibile realizzare campioni di lunghezza utilizzando un interferometro e un microscopio per il conteggio delle frange d'interferenza.

La definizione basata sulla lunghezza d'onda del Krypton fu a sua volta sostituita nel 1983 dalla 17[°] CGPM¹⁴ legando la definizione del metro alla velocità della luce nel vuoto:

"Il metro è la lunghezza del percorso computo da un raggio di luce nel vuoto in un intervallo di tempo pari a 1/299 792 458 s".

Da cui segue che la velocità della luce nel vuoto vale esattamente 299 792 458 m/s. Il prototipo internazionale del metro, in platino/iridio, definito dalla 1[°] CGPM del 1889, è comunque conservato presso il BIPM, nelle condizioni definite nel 1889.

3.2 Unità di massa (chilogrammo - kg)

Il chilogrammo è definito tramite un manufatto (Cilindro di platino/iridio con altezza e diametro di 39 mm), noto come il Prototipo Internazionale, conservato presso il BIPM. L'unico intervento nella definizione del campione di massa si è verificato nella 3[°] CGPM del 1901, con una dichiarazione tesa a eliminare l'ambiguità tra massa e peso:

***Il chilogrammo è l'unità di massa;
è uguale alla massa del Prototipo Internazionale del chilogrammo.***

¹⁴ 17th CGPM 1983, Resolution 1, CR, 97, and Metrologia, 1984, 20, 25;

Conseguenza diretta della definizione è che la massa del prototipo è esattamente pari a 1 kg. Tuttavia, a causa dell'inevitabile accumulo di contaminanti sulla superficie, il Prototipo Internazionale è soggetto a una contaminazione reversibile, pari a circa 1 µg per anno. Per questo motivo la CIPM ha stabilito che, in attesa di ulteriori ricerche, la massa del Prototipo Internazionale è quella ottenuta dopo una specifica pulizia e uno specifico lavaggio¹⁵. La massa così definita è utilizzata per il confronto con i campioni nazionali, anch'essi realizzati in platino/iridio¹⁶.

3.3 Unità di tempo (secondo - s)

L'unità di tempo, il secondo, è stata inizialmente definita come 1/86 400 del giorno solare medio. La definizione del giorno medio fu lasciata agli astronomi.

Misurazioni successive mostrarono irregolarità nel moto di rotazione terrestre, rendendo la definizione non più soddisfacente. Per definire un'unità di tempo più precisa l'11° CGPM del 1960 adottò una definizione fornita dall'unione Astronomica Internazionale, basata sull'anno 1900¹⁷.

Molti studi dimostrarono poi che il Tempo Standard Atomico, basato su una transizione tra due livelli energetici, può essere realizzato e riprodotto con minore incertezza. La necessità, manifestata dalla scienza e dalla tecnologia, di una definizione dell'unità di tempo sempre più precisa ha portato all'attuale definizione, approvata dalla 13° CGPM del 1968:

Il secondo è la durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra due livelli iperfini dello stato di base dell'atomo di Cesio 133

Ne segue che la frequenza associata alla transizione tra i due livelli del Cesio 133 è esattamente 9,192631770 GHz. Nella riunione del CIPM del 1997 si è inoltre precisato che:

La definizione fa riferimento all'atomo di Cesio a riposo, a una temperatura di 0 K¹⁸.

La nota del CIPM intendeva chiarire che la definizione SI del secondo è basata su di un atomo di Cesio non perturbato dalla radiazione del corpo nero, condizione che si ottiene alla temperatura di 0 K (Pari a -273,15 °C). Le frequenze ottenute dagli orologi a temperatura ambiente dovrebbero quindi essere corrette per lo scostamento indotto dal rumore elettromagnetico di fondo¹⁹, come ribadito nella riunione del Comitato Consultivo per il Tempo e la Frequenza del 1999.

¹⁵ PV, 1989, 57, 104-105 and PV, 1990, 58, 95-97

¹⁶ Metrologia, 1994, 31, 317- 336

¹⁷ Resolution 9; CR, 86

¹⁸ Il famoso "Zero Assoluto"

¹⁹ Ogni corpo la cui temperatura sia al di sopra dei 0 K emette energia per irraggiamento.

3.4 Unità di corrente elettrica (ampere - A)

Le unità elettriche per la corrente e la resistenza sono state introdotte nel Congresso Internazionale di Elettività di Chicago del 1893 (Figura 3); le definizioni di “ampere internazionale” e di “ohm internazionale” sono state confermate nella Conferenza Internazionale di Londra del 1908:

L'ohm internazionale è la resistenza in corrente continua di una colonna di mercurio di sezione costante, lungo 106,3 cm e con massa di 14,4521 g alla temperatura del ghiaccio fondente²⁰;

L'ampere internazionale è uguale alla corrente continua che depositerebbe 0,001 118 000 grammi di argento al secondo da una soluzione di nitrato d'argento in acqua²¹.



Figura 3

Congresso di Chicago del 1893, foto dei partecipanti; all'estrema sinistra Galileo Ferraris

Le unità definite in questo modo presentavano notevoli problemi di realizzazione. Già in occasione dell'8° CGPM del 1933 si era registrato un unanime consenso sulla necessità di sostituire le unità definite sopra con le cosiddette “Unità Assolute”, coerenti con le unità MKS. La decisione finale fu presa solo nella 9° CGPM del 1948. Si scelse quindi come unità della corrente elettrica l'ampere, secondo la definizione proposta da CIPM del 1946²²:

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 2×10^{-7} newton²³ per metro di lunghezza.

Ne segue che la permeabilità magnetica del vuoto μ_0 è esattamente $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

²⁰ L'ohm così definito corrisponde a circa 0,00049 Ω nel SI.

²¹ L'ampere così definito corrisponde a circa 0,99985 A nel SI.

²² Resolution 2; PV, 20, 129-137

²³ Nella prima stesura della definizione del 1946 il newton era indicato come “unità di forza MKS. Il nome newton fu introdotto nella 9° CGPM del 1948.

3.5 Unità di misura della temperatura termodinamica (kelvin - K)

La definizione dell'unità di misura della temperatura termodinamica è stata deliberata dalla 10° CGPM del 1954, che ha scelto il punto triplo²⁴ dell'acqua come punto fisso fondamentale e gli ha assegnato il valore di 273,16 K. La 13° CGPM del 1967/68 adottò il nome kelvin, simbolo K al posto del precedente "Grado Kelvin" con simbolo "°K". Da definizione dell'unità è quindi:

Il kelvin, unità di temperatura termodinamica è la frazione 1/273,16 della temperatura del punto triplo dell'acqua.

Un'ulteriore precisazione sulla definizione del kelvin è stata fatta nella riunione del CIPM del 2005:

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 .

Per la misura della temperatura rimane ancora in uso la scala in gradi Celsius (simbolo °C). I gradi Celsius hanno la stessa ampiezza dei kelvin. Una differenza di temperatura ha quindi lo stesso valore numerico sia se espressa in kelvin sia se espressa in gradi Celsius.

3.6 Unità di quantità di sostanza (mole - mol)

Seguendo l'evoluzione della conoscenza delle leggi della chimica furono introdotte unità di misura per la quantità di sostanza quali il grammo-atomo e la grammo-molecola, con la definizione:

Grammo-atomo è la massa di un elemento il cui valore in grammi è uguale al peso atomico dell'elemento stesso.

Grammo-molecola è la massa di una molecola il cui valore in grammi è uguale alla somma dei pesi atomici degli elementi.

Le due unità di quantità di sostanza avevano un legame diretto con il concetto di peso atomico (in realtà si tratta di massa e non di peso). Il peso atomico era in origine riferito al peso atomico dell'ossigeno, fissato a 16. Su questa definizione nacque un'ambiguità tra le misure in fisica, dove il valore 16 era assegnato all'isotopo ^{16}O , e le misure in chimica, dove lo stesso valore veniva assegnato a una mistura di isotopi ^{16}O , ^{17}O e ^{18}O , corrispondente alla composizione naturale dell'ossigeno. Un accordo tra l'International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) e l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) fu raggiunto nel 1959/60. Chimici e fisici si accordarono per assegnare il valore 12 alla massa atomica dell'isotopo di carbonio con numero di massa 12 (con 6 protoni e 6 neutroni nel nucleo).

In seguito alla proposta dell'IUPAC, dell'IUPAP e dell'ISO, il CIPM elaborò la definizione della mole nel 1967 e la confermò nel 1969. Questa definizione fu adottata dalla 14° CGPM del 1971:

La mole è la quantità di sostanza di un sistema che contiene tante entità elementari quanti sono gli atomi in 0,012 kg di carbonio 12.

Le entità elementari devono essere specificate e possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni, ecc. ovvero gruppi specificati di tali particelle.

Nel 1980 il CIPM approvò il rapporto del Consultative Committee for Units CCU che chiariva come la definizione si riferisse ad atomi non legati di carbonio 12, a riposo e nel

²⁴ Punto, in un diagramma di stato pressione-temperatura, che corrisponde allo stato in cui le tre fasi (solida, liquida e aeriforme) di una determinata sostanza coesistono in condizioni di equilibrio.

loro stato fondamentale. La definizione della mole determina anche il valore della costante di Avogadro.

3.7 Unità di intensità luminosa (candela - cd)

Le unità di intensità luminosa basate su campioni di fiamma o incandescenza in uso in vari paesi prima del 1948 furono inizialmente sostituite dalla "nuova candela" basata sulla luminanza di un radiatore Planck (un corpo nero) alla temperatura di solidificazione del platino.

La modifica era stata preparata dall'International Commission on Illumination (CIE) e dal CIPM prima del 1937. La decisione fu promulgata dal CIPM nel 1946. Fu poi ratificata nel 1948 dalla 9° CGPM che adottò un nuovo nome internazionale per questo unità, la candela, simbolo cd. La 13° CGPM del 1967 ha dato una versione modificata di questa definizione.

A causa delle difficoltà tecnologiche nella realizzazione di un radiatore Planck alle alte temperature, e considerando le possibilità offerte dalla radiometria, la 16a CGPM del 1979 ha adottato una nuova definizione della candela:

La candela è l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza 540×10^{12} hertz e la cui intensità energetica in quella direzione è $1/683$ watt per steradiano.

3.8 Le unità derivate

Dalle 7 unità di base sono derivate tutte le altre unità di misura. Ciascuna unità è ottenuta come il prodotto di più unità di base, ciascuna elevate a una determinata potenza. In un Sistema coerente di unità di misura non vengono utilizzati fattori moltiplicativi diversi da 1. In Tabella 2 alcuni esempi:

Tabella 2			
Grandezza derivata		Unità coerente SI derivata	
Nome	Simbolo	Nome	Simbolo
Area	A	metro quadro	m^2
Velocità	v	metro al secondo	m/s
Accelerazione	a	metro al secondo quadrato	m/s^2
Densità	ρ	chilogrammo al metro cubo	kg/m^3
Densità di corrente	j	ampere per metro quadro	A/m^2
Intensità di campo magnetico	H	ampere per metro	A/m

3.9 Unità derivate a cui sono stati assegnati nomi propri

Per comodità, ad alcune unità derivate sono stati assegnati nomi propri e propri simboli²⁵. Si tratta di 22 unità, elencate nella Tabella 3.

Tabella 3			
Unità derivata	Nome	Simbolo	Espressione in termini di unità di base
Angolo piano	radiante	rad	m/m
Angolo solido	steradiane	sr	m ² /m ²
Frequenza	hertz	Hz	s ⁻¹
Forza	newton	N	m kg s ⁻²
Pressione	pascal	Pa	m ⁻¹ kg s ⁻²
Energia/ lavoro/quantità di calore	joule	J	m ² kg s ⁻²
Potenza/ flusso radiante	watt	W	m ² kg s ⁻³
Carica elettrica	coulomb	C	s A
Differenza di potenziale elettrico/ forza elettromotrice	volt	V	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
Capacità elettrica	farad	F	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
Resistenza elettrica	ohm	Ω	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
Conducibilità elettrica	siemens	S	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
Flusso magnetico	weber	Wb	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
Densità di flusso magnetico	tesla	T	kg s ⁻² A ⁻¹
Induttanza	henry	H	m ² kg s ⁻² A ⁻²
Temperatura celsius	grado celsius	°C	K
Flusso luminoso	lumen	lm	cd
Illuminamento	lux	lx	m ⁻² cd
Radioattività	becquerel	Bq	s ⁻¹
Dose assorbita	gray	Gy	m ² s ⁻²
Dose equivalente	sievert	Sv	m ² s ⁻²
Attività catalitica	katal	kat	s ⁻¹ mol

I nomi e i simboli di queste unità possono a loro volta essere utilizzati per definire altre unità derivate (es. 1 Pa = 1 m⁻¹ kg s⁻² = 1 N/ m⁻²).

²⁵ Unità derivate con un proprio nome erano presenti anche nel sistema CGS, dove l'unità di densità di flusso magnetico era in gauss (simbolo G) che è ancora molto utilizzato nelle misure magnetiche. Il gauss è pari a 1/10⁴ T. L'uso del gauss è vantaggioso per due motivi: per chi non è dotato di un cervello particolarmente "matematico" ragionare in termini di centinaia di gauss è più agevole che maneggiare decine di microtesla; la misura delle sezioni dei nuclei magnetici in cm² è anch'essa più agevole che imbarcarsi in una misura in decimillesimi di m².

3.10 Multipli e sottomultipli decimali delle unità SI

Anche la definizione dei prefissi, per formare i multipli e i sottomultipli decimali delle unità SI, ricade tra i compiti delle CGPM. In particolare l'11° CGPM²⁶ ha adottato prefissi per i multipli da 10^{-12} a 10^{12} . In seguito la 12° CGPM²⁷ ha aggiunto i prefissi per 10^{-15} e 10^{-18} , la 15° CGPM²⁸ quelli per 10^{15} e 10^{18} e la 19° CGPM²⁹ quelli per 10^{21} , 10^{24} , 10^{-21} e 10^{-24} . I prefissi e i simboli adottati sono elencati in Tabella 4.

Tabella 4		
Multipli e sottomultipli delle unità SI		
Fattore	Nome	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	Hector	H
10^1	Deca	de
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

Tra le unità di base del SI, il chilogrammo è l'unico il cui simbolo, per ragioni storiche, include un prefisso. I nomi e i simboli dell'unità di massa sono ottenuti unendo un prefisso al nome "grammo" e al simbolo "g"³⁰ (10^{-6} kg = 1 mg, la notazione 1 μ kg (microchilogrammo) è errata).

²⁶ 11th CGPM (1960, Resolution 12; CR, 87)

²⁷ 12th CGPM (1964, Resolution 8; CR, 94)

²⁸ 15th CGPM (1975, Resolution 10; CR, 106 and Metrologia, 1975, 11, 180-181)

²⁹ 19th CGPM (1991, Resolution 4; CR, 185 and Metrologia, 1992, 29, 3)

³⁰ CIPM 1967, Recommendation 2; PV, 35, 29 and Metrologia, 1968, 4, 45

4. La continua revisione del SI e la 26[°]CGPM

Come visto nei paragrafi precedenti, le definizioni delle unità di misura di base del SI sono state aggiornate man mano che l'evoluzione della scienza e della tecnologia hanno messo a disposizione dei metrologi nuove tecniche per la realizzazione dei campioni. Il fine ultimo dei continui aggiornamenti è di ottenere realizzazioni delle unità di misura con sempre minore incertezza e sempre maggiore stabilità.

Una volta definita un'unità di misura la sua "realizzazione" può essere ottenuta con tre differenti procedimenti:

- Il primo prevede la realizzazione fisica dell'unità di misura a partire dalla sua definizione (realizzazione in senso stretto, per esempio l'orologio atomico al cesio che realizza l'unità di tempo);
- Il secondo, definito "riproduzione", consiste nella realizzazione dell'unità di misura non a partire dalla definizione, ma dalla predisposizione di un campione di misura altamente riproducibile basato su un fenomeno fisico (per esempio l'impiego dei laser stabilizzati in frequenza per la realizzazione di campioni di misura per il metro, dell'effetto Josephson per il volt o dell'effetto Hall quantistico per l'ohm);
- Il terzo procedimento consiste nell'adottare un campione materiale come campione di misura (per esempio il campione del chilogrammo).

La scelta del procedimento dipende strettamente dalla definizione dell'unità di misura.

L'evoluzione delle definizioni non ha, però, interessato nella stessa maniera tutte le grandezze di base. Confrontando le due unità di base più antiche, il metro e il chilogrammo, si nota come, mentre per il metro si è passati da un campione materiale, la famosa barra di platino/iridio, a una definizione basata sulla lunghezza d'onda di una radiazione elettromagnetica e, in seguito, a una definizione basata sulla velocità della luce, per il chilogrammo è ancora utilizzato il prototipo depositato al BIPM, risalente al 1889.

La differente evoluzione è dovuta al fatto che, mentre per il metro si sono rese disponibili tecniche di realizzazione via via più raffinate, fino ad oggi non è stato possibile trovare una soluzione per la realizzazione del chilogrammo migliore (più stabile e/o facile da realizzare e riprodurre) del cilindro di platino/iridio con diametro e altezza di 39 mm. Il principale svantaggio dell'attuale definizione del chilogrammo è che si riferisce alla massa del manufatto che, per sua stessa natura, sappiamo che non può essere assolutamente stabile. A riprova di ciò in Figura 4 sono mostrati i risultati dei confronti tra alcune copie ufficiali e il prototipo internazionale. Dai primi confronti, risalenti a oltre 100 anni fa si hanno variazioni di circa 5 parti in 10^{-8} , equivalenti a 50 μg . Il grafico mostra solo i cambiamenti relativi dalla massa del prototipo internazionale (corrispondente al valore zero dell'asse y). La deriva nella massa del prototipo internazionale dal 1889 non può essere determinata, ma deve certamente essere presente.

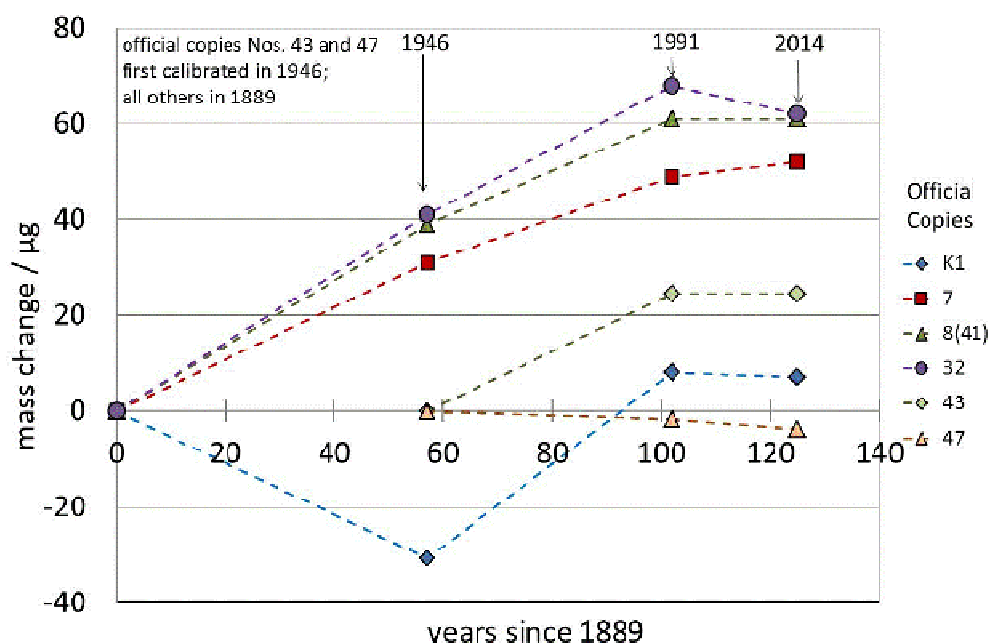


Figura 4

Risultati dei confronti tra il prototipo del chilogrammo e le copie ufficiali

Una variazione incognita dell'unità di massa influenza anche la definizione delle unità delle grandezze elettriche, poiché la definizione di ampere è in relazione con il chilogrammo. In modo analogo le unità mole e candela dipendono dal chilogrammo.

Al di là della singolarità rappresentata dal campione di massa, si può individuare un andamento generale nell'evoluzione delle definizioni, da campioni materiali (oggetti costruiti dall'uomo) si è cercato di passare a definizioni legate a costanti fondamentali (per esempio la velocità della luce, la frequenza di una radiazione).

Le nuove definizioni che saranno adottate nella 26° CGPM del 13-16/11/2018 sembrerebbero non costituire, quindi, un'assoluta novità per il mondo della metrologia. In realtà il processo che si concluderà con questa CGPM rappresenta una completa revisione del SI.

Nella nuova organizzazione del SI vengono abrogate le definizioni delle unità di base³¹ e si definiscono i valori esatti di sette costanti fisiche fondamentali. I valori delle costanti (fissi ed esatti per definizione) potranno essere utilizzati per la realizzazione delle unità SI, sia unità di base sia unità derivate. La distinzione tra unità di base e unità derivate perderà, quindi, di significato. La struttura attuale sarà comunque mantenuta per assicurare la continuità con il sistema attuale, ormai ben consolidato. Un altro motivo per mantenere la struttura attuale è la necessità di mantenere la coerenza con il Sistema Internazionale di Quantità (ISQ), definita dalla serie di norme ISO/IEC 80000, che è organizzato in grandezze di base e grandezze derivate.

Per alcune unità (secondo, metro) la realizzazione non subirà variazioni, dato che i metodi attualmente utilizzati si basano già su due delle costanti del nuovo SI (frequenza di

³¹ Si veda L'appendice 1 del "Draft resolution A – 26th meeting of the CGPM (13-16 November 2018)" su www.bipm.org

oscillazione del cesio per il secondo e velocità della luce per il metro). Per le unità chilogrammo, kelvin e mole i concetti fisici alla base delle loro definizioni subiranno cambiamenti sostanziali, da cui deriveranno cambiamenti nelle tecniche di realizzazione.

5. Il nuovo SI

Il nuovo SI, che sarà introdotto in occasione della 26° CGPM, non sarà più basato sulla definizione di 7 unità di base, ma sui valori numerici fissi di un insieme di 7 costanti fondamentali. Secondo la nuova definizione il SI sarà un sistema di misura coerente in cui:

- La frequenza di transizione iperfine dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, è 9 192 631 770 Hz (hertz).
- La velocità della luce nel vuoto, c , è 299 792 458 m/s (metri al secondo).
- La costante di Planck, h , è $6,62607040 \times 10^{-34}$ J*s (joule secondo=kg m² s⁻¹).
- La carica elementare, e , è eguale a $1,602 176 620 \times 10^{-19}$ coulomb (A s).
- La costante di Boltzman, k , è $1,380 64852 \times 10^{-23}$ J/K (joule al kelvin).
- La costante di Avogadro, N_A , è $6,022 140 857 \times 10^{23}$ mol⁻¹ (mole⁻¹).
- L'efficienza luminosa, K_{cd} , della radiazione monocromatica di frequenza 540×10^{12} Hz è 683 lm/W (lumen per watt).

dove hertz, joule, coulomb, lumen e watt, con simboli rispettivamente Hz, J, C, lm e W, sono relativi alle unità secondo, metro, chilogrammo, ampere, kelvin, mole e candela (s, m, kg, A, K, mol e cd) con le relazioni:

- $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$;
- $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$;
- $\text{C} = \text{A s}$;
- $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$;
- $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$

Una rappresentazione della transizione tra il vecchio e il nuovo SI è mostrata in Figura 5. La transizione non costituisce un semplice cambio delle unità di base. In tutti i sistemi di misura coerenti definiti in precedenza (CGS, MKS, SI), Le unità di base erano “definite”³²: per ognuna di esse veniva scelta una definizione che era più o meno legata alla tecnologia per la sua realizzazione. In sede di realizzazione, presso il BIPM e gli istituti metrologici nazionali, e attraverso i confronti tra le varie realizzazioni si poteva definire un'incertezza sulla definizione dell'unità. Per esempio, la tecnica di realizzazione del metro con metodi interferometrici, partendo dall'attuale definizione, consente di realizzare il campione di lunghezza con un'incertezza dell'ordine di 1×10^{-11} . Le unità derivate dal metro (es la velocità in m/s) non possono, di conseguenza, essere realizzate con incertezza minore.

³² Si veda il § 3

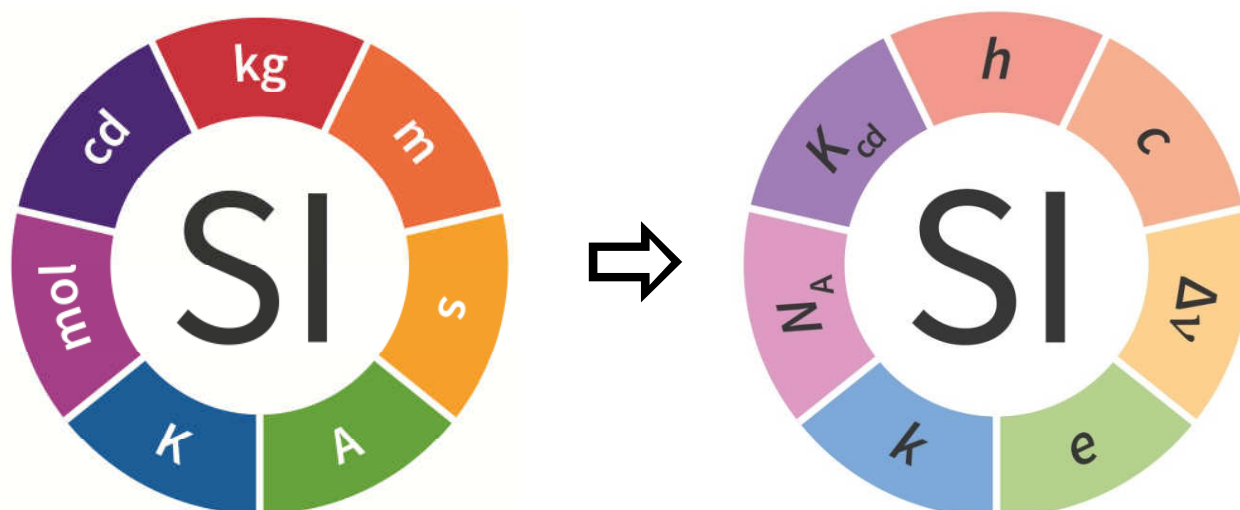


Figura 5

Rappresentazione grafica delle unità di base del SI: dalla situazione attuale alle costanti fondamentali. I simboli e i colori sono codificati³³

Nel nuovo SI i valori numerici delle sette costanti non hanno incertezza. L'uso delle costanti per la definizione delle unità permette di separare la definizione dalla realizzazione. I laboratori metrologici nazionali e il BIPM continueranno le attività di sviluppo di metodi per la realizzazione delle unità. Con il nuovo SI si avrà la possibilità di sviluppare nuove o differenti tecniche di realizzazione pratica delle unità senza avere, come in passato, la necessità di cambiare le definizioni. Non si esclude la possibilità di realizzare quelle che nell'attuale SI sono grandezze derivate direttamente dalle costanti fondamentali, ottenendo incertezze sulla realizzazione inferiori a quelle ottenibili con le grandezze di base³⁴.

La scelta delle sette costanti è stata fatta in modo che, complessivamente, le loro unità di misura coprano le unità di misura SI. In generale non vi è una corrispondenza biunivoca tra le sette unità di base dell'attuale SI e le sette costanti del nuovo SI, ad eccezione della frequenza del cesio con il secondo e del numero di Avogadro con la mole.

Come nell'attuale SI, ogni unità di misura è ottenibile come prodotto di una o più costanti, elevate a opportune potenze, con fattori adimensionali. Vediamo ora le definizioni delle sette grandezze di base e le relazioni matematiche che le esprimono in termini di costanti fondamentali.

5.1 Il secondo

Il secondo, simbolo s, è l'unità di misura SI del tempo. È definito a partire dal valore numerico fisso della frequenza di transizione iperfine dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, pari a 9 192 631 770, espressa nell'unità Hz (s^{-1}).

$$\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$$

³³ Si veda <https://www.bipm.org/utls/common/pdf/SI-Illustration-Guidelines.pdf>

³⁴ È il caso del volt e dell'ohm, che possono essere ricavati con l'effetto Josephson e l'effetto Hall quantistico.

da cui

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

L'equazione scritta sopra equivale a definire il secondo come la durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra due livelli iperfini dello stato di base dell'atomo di Cesium 133, che coincide alla precedente definizione del secondo.

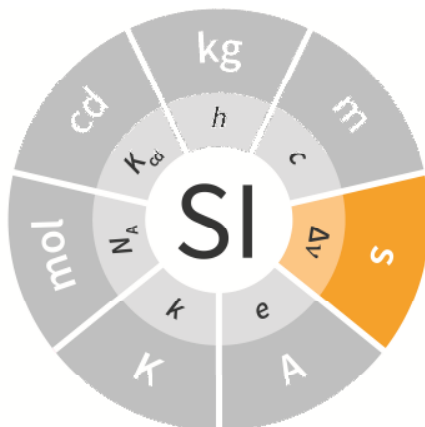


Figura 6

Rappresentazione grafica della relazione tra il secondo e le costanti fondamentali del nuovo SI

5.2 Il metro

Il metro, simbolo m, è l'unità di misura SI della lunghezza. È definito a partire dal valore numerico fisso della velocità della luce nel vuoto, c , pari a 299 792 458, quando espressa in m s^{-1} , dove il secondo è definito a partire dalla frequenza del cesio $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Il metro può quindi essere espresso in termini di frequenza del cesio e di velocità della luce:

$$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30,663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

Anche in questo caso l'equazione, affermando che metro è la lunghezza del percorso computo da un raggio di luce nel vuoto in un intervallo di tempo pari a $1/299\,792\,458 \text{ s}$, rimanda alla definizione dell'attuale SI.

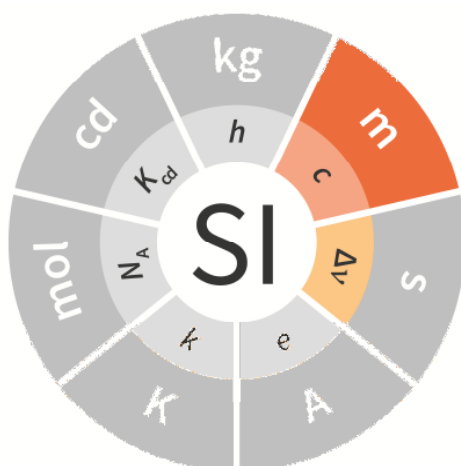


Figura 7

Rappresentazione grafica della relazione tra il metro e le costanti fondamentali del nuovo SI

5.3 Il chilogrammo

Il chilogrammo, simbolo kg, è l'unità di misura SI della massa. È definito a partire dal valore numerico fisso della costante di Planck h , pari a $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ quando espressa nell'unità J s, che corrisponde a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, dove il metro e il secondo sono definiti a partire da c e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

$$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6,626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{m}^{-2} \text{s}$$

$$1 \text{ kg} = \frac{(299\,792\,458)^2}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \approx 1,475\,521\,4 \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}$$

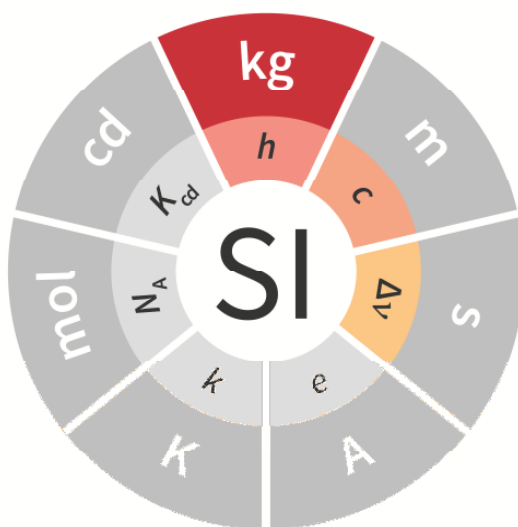


Figura 8

Rappresentazione grafica della relazione tra il chilogrammo e le costanti fondamentali del nuovo SI

La definizione del kg nell'attuale SI fissa la massa del prototipo internazionale del kg $m(\mathcal{K})$ al valore esatto di 1 kg. Con questa nuova definizione la massa del kg sarà realizzata tramite esperimenti. Con la nuova definizione la realizzazione dell'unità può essere realizzata in un qualsiasi punto della scala. Si potrebbe scegliere di realizzare campioni primari da 1 g, ponendo fine alla singolarità del kg, unica unità espressa in termini di fattore moltiplicativo³⁵.

5.4 L'ampere

L'ampere, simbolo A, è l'unità di misura SI della corrente elettrica. È definito a partire dal valore numerico fisso della carica elementare e , pari a $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ quando espressa nell'unità C, che corrisponde ad As, dove il secondo è definito a partire da $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

La definizione implica che la carica elementare valga esattamente:

$$e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ A s}$$

Invertendo tale relazione si ottiene l'espressione dell'ampere a partire da e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1 \text{ A} = \left(\frac{e}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19}} \right) \text{ s}^{-1}$$

che equivale a scrivere:

$$1 \text{ A} = \frac{1}{(9\,192\,631\,770)(1,602\,176\,634 \times 10^{-19})} e \Delta\nu_{\text{Cs}} \approx 6,789\,687 \times 10^8 \Delta\nu_{\text{Cs}} e$$

La precedente definizione dell'ampere si basava sulla forza tra due conduttori percorsi da corrente e aveva l'effetto di fissare il valore della permeabilità magnetica del vuoto μ_0 a:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}.$$

Il valore di μ_0 non è più noto e dovrà essere determinato per via sperimentale.

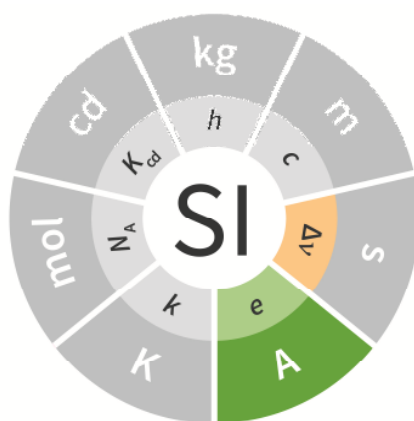


Figura 9

Rappresentazione grafica della relazione tra l'ampere e le costanti fondamentali del nuovo SI

³⁵ Si veda §3.10

5.5 Il kelvin

Il kelvin, simbolo K, è l'unità di misura SI della temperatura. È definito a partire dal valore numerico fisso della costante di Boltzmann k , pari a $1,380\,649 \times 10^{-23}$ quando espressa nelle unità J K^{-1} , che corrisponde a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, dove il chilogrammo, il metro e il secondo sono definiti a partire da h , c e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

La relazione che lega il kelvin alle costanti fondamentali è la seguente:

$$1 \text{ K} = \left(\frac{1,380\,649}{k} \right) \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-2}$$

da cui

$$1 \text{ K} = \frac{1,380\,649 \times 10^{-23}}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k} \approx 2,266\,665\,3 \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k}$$

La precedente definizione del kelvin fissava la temperatura del punto triplo dell'acqua T_{TPW} a 273,16 K; con la nuova definizione la temperatura del punto triplo dell'acqua sarà determinato sperimentalmente. Anche in questo caso la realizzazione del kelvin può essere fatta in qualunque punto della scala delle temperature.

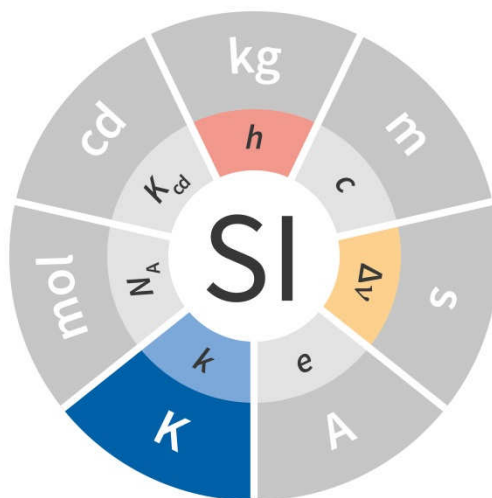


Figura 10

Rappresentazione grafica della relazione tra il kelvin e le costanti fondamentali del nuovo SI

5.6 La mole

La mole, simbolo mol, è l'unità di misura SI della quantità di sostanza. Una mole contiene esattamente $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ entità elementari. Tale numero è il valore fissato per la costante di Avogadro N_A quando espressa nell'unità mol^{-1} , ed è detto numero di Avogadro.

La quantità di sostanza, simbolo n , di un sistema è la misura del numero di specifiche entità elementari. Un'entità elementare può essere un atomo, una molecola, uno ione, un elettrone, ogni altra particella o gruppi di particelle.

La definizione implica che la costante di Avogadro vale:

$$N_A = 6,022140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

da cui si ricava:

$$1 \text{ mol} = \left(\frac{6,022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A} \right)$$

La precedente definizione della mole fissava il valore della massa molare del carbonio 12, $M_{(12\text{C})}$, al valore di 0,012 kg/mol. Con la nuova definizione il valore di $M_{(12\text{C})}$ non è più noto e deve essere ricavato sperimentalmente.

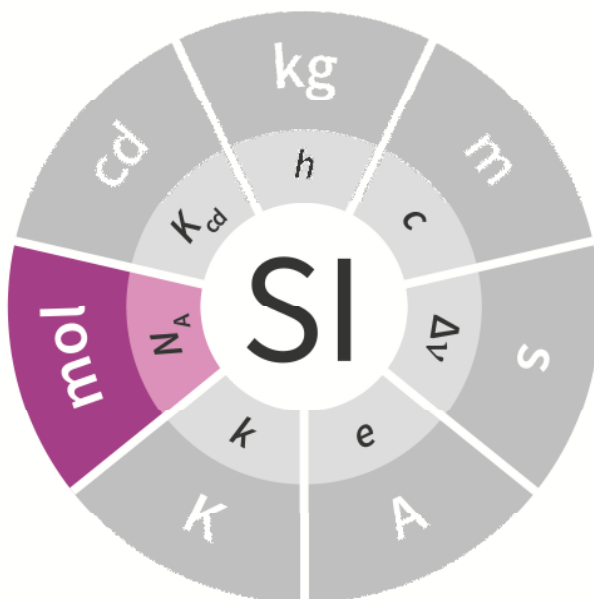


Figura 11

Rappresentazione grafica della relazione tra la mole e le costanti fondamentali del nuovo SI

5.7 La candela

La candela, simbolo cd, è l'unità di misura SI dell'intensità luminosa. È definita a partire dal valore numerico fisso dell'efficienza luminosa, K_{cd} , della radiazione monocromatica di frequenza 540×10^{12} Hz, pari a 683 (lumen per watt) quando espressa nelle unità lm/W, che corrisponde a cd sr W^{-1} o $\text{cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$ dove il chilogrammo, il metro e il secondo sono definiti a partire da h , c e $\Delta\nu_{Cs}$.

La definizione porta a esprimere la candela in funzione delle costanti fondamentali, partendo dalla formula:

$$1 \text{ cd} = \left(\frac{K_{cd}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$$

Sostituendo le espressioni per il chilogrammo, il metro, il secondo e lo steradiante si ottiene:

$$1 \text{ cd} = \frac{1}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)683} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd} \approx$$

$$\approx 2,614\,830 \times 10^{10} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd}$$

Dalla relazione discende che una candela è l'intensità luminosa, in una data direzione, da una sorgente che emette una radiazione monocromatica con frequenza 540×10^{12} Hz e ha un'intensità di radiazione in quella direzione di $(1/683) \text{ W/sr}$.

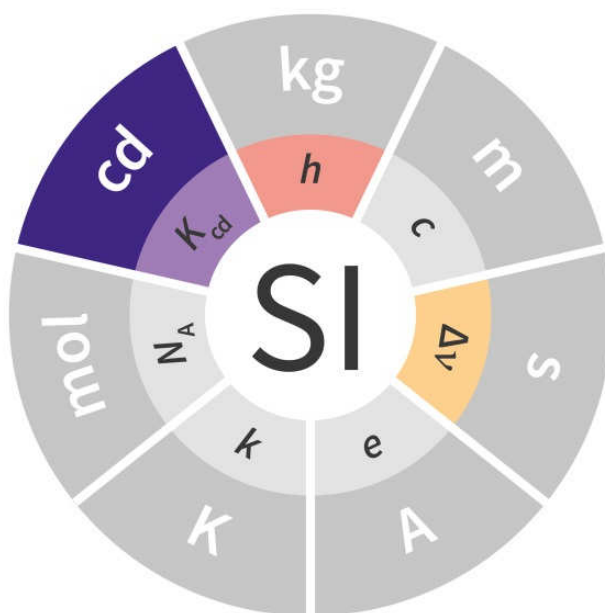


Figura 12

Rappresentazione grafica della relazione tra la candela e le costanti fondamentali del nuovo SI

5.8 *La realizzazione pratica delle unità*

I metodi sperimentali per la realizzazione delle unità di misura a partire dalle equazioni della fisica sono detti metodi primari e i campioni ottenuti sono detti campioni primari³⁶. Un metodo primario è una procedura impiegata per ottenere un risultato di misura senza eseguire un confronto con un campione di misura di una grandezza della stessa specie.

Con la nuova formulazione del SI, la variazione delle definizioni di alcune grandezze imporrà lo sviluppo di nuovi metodi di realizzazione. Rispetto alle vecchie definizioni, che venivano sviluppate a partire dalle tecnologie disponibili per la realizzazione delle unità di base, nel nuovo SI gli istituti metrologici potranno scegliere qualsiasi equazione fisica che colleghi le costanti definite alla quantità che si intende misurare.

Quest'approccio è molto più generale della vecchia definizione delle unità di misura di base, non essendo limitato dalla scienza o dalla tecnologia odierna. Gli sviluppi futuri possono portare a diversi modi di realizzare unità con maggiore precisione. Non vi è, in linea di principio, alcun limite alla precisione con cui un'unità può essere realizzata. L'eccezione rimane la definizione del secondo, in cui la transizione originale a microonde del cesio deve rimanere, per ora, la base della definizione.

Il BIPM sta sviluppando linee guida per la “mise en pratique” delle unità di misura. Con la formula mise en pratique si intende un insieme di istruzioni che consente di realizzare la definizione di un'unità, nella pratica, al più alto livello. Per le grandezze elettriche il CCEM ha già preparato una mise en pratique per l'ampere e altre unità elettriche, e il CCM, CCQM e CCT stanno lavorando al progetto di mise en pratique per il chilogrammo, la mole e il kelvin.

Che cosa cambia per le nostre vite e il nostro lavoro?

Dato che questa dispensa fa parte di una raccolta dedicata ai laboratori di prova, sembra opportuno affrontare l'impatto che il cambio del SI avrà sull'attività dei laboratori.

In realtà il nuovo SI avrà un impatto pressoché nullo sulle attività di prova: non sarà necessario cambiare la strumentazione delle nostre postazioni di prova, poiché le esigenze di incertezza, richieste per la verifica delle caratteristiche delle apparecchiature elettriche, sono di molti ordini di grandezza superiori alle riduzioni delle incertezze che si otterranno con le nuove realizzazioni delle unità di misura.

Le costanti di Josephson K_J e di Von Klitzing R_K , che sono utilizzate dal 1990 per la realizzazione dei campioni di tensione e di resistenza diventano:

$$K_J = 2e/h = 483\,597,848\,416\,984\text{ GHz/V}$$

$$R_K = h/e^2 = 25\,812,807\,459\,3045\ \Omega$$

³⁶ Si veda VIM - Vocabolario Internazionale Metrologia 5.4.

Le unità di tensione e di resistenza elettrica sono quindi definite in termini di costanti fondamentali come:

$$1 \text{ V} = \frac{k}{2e} 483\,597,848\,416\,984 \times 10^9 \text{ Hz} = \frac{483\,597,848\,416\,984 \times 10^9}{9\,192\,631\,770} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} k}{2e}$$

$$1 \text{ V} \approx 52607,1163 \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} k}{2e}$$

$$1 \Omega = \left(\frac{R_k}{25\,812,807\,459\,3045} \right) = \left(\frac{1}{25\,812,807\,459\,3045} \right) \frac{h}{e^2}$$

Il volt e l'ohm ottenuti con le due equazioni scritte sopra risultano più piccoli di quelli definiti dal CIPM nel 1990 rispettivamente di $1,067 \times 10^{-7}$ e di $1,779 \times 10^{-8}$.

Apparentemente lo stesso discorso vale anche per la vita di tutti i giorni. In realtà molti oggetti tecnologici (smartphone, PC, navigatori) basano il proprio funzionamento sulla disponibilità di misure particolarmente accurate. Spesso quando un tecnico discute con la gente comune, si vede porre la domanda su quale sia l'utilità di misurare il tempo con incertezza dell'ordine di qualche unità in 10^{-16} (1 s ogni 317 milioni di anni). Chi volesse rispondere in maniera elegante potrebbe utilizzare un semplice esempio.

Se lo scopo fosse di arrivare puntuale a un appuntamento e si disponesse di un orologio che accumula un ritardo/anticipo di 1 s l'anno (pari a uno scostamento relativo di circa 3×10^{-8}) la mancanza di puntualità, anche in caso di longevità lavorativa eccezionale, potrebbe essere imputata solo alla trascuratezza della persona.

Se però, per raggiungere il luogo dell'appuntamento dovessimo utilizzare un navigatore satellitare, uno scostamento di 3×10^{-8} per gli orologi a bordo dei satelliti (pari a 3 millisecondi al giorno), dopo un solo giorno produrrebbe un errore nella posizione pari a:

$$3 \text{ ms} \times c \cong 3 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^8 = 10 = 10^6 \text{ m} = \underline{1000 \text{ km}}$$

Fissato l'appuntamento alle 8,00 del 02/01/2019 presso la sede dell'INRiM, in C.so Massimo d'Azeglio, 42 a Torino, fidandosi ciecamente del nostro orologio e del nostro navigatore, se il sistema GPS avesse riallineato i propri orologi alle 8.00 del giorno prima, ci si potrebbe trovare a parcheggiare alle 7,55 alla periferia nord di Berlino! Il tutto sperando che il navigatore non ci guidi verso sud, costringendoci a prendere un traghetto per Tunisi o Algeri. A questo punto sarebbe molto difficile con le attuali tecnologie di trasporto, raggiungere il luogo dell'appuntamento in tempo.

6. *Curiosità: grandezze adimensionate e grandezze non SI*

Vi sono quantità la cui definizione è tale per cui tutti gli esponenti delle dimensioni sono zero. Questo vale in particolare per ogni quantità definita come rapporto tra due quantità dello stesso tipo. Come esempio si può citare la permeabilità magnetica relativa di un materiale μ_r , data dal rapporto tra la permeabilità magnetica del materiale e quella del vuoto. Queste quantità sono essenzialmente numeri, la cui unità di misura è l'unità uno, simbolo 1, spesso non precisata. Ci sono anche quantità che non possono essere descritte in termini delle sette unità base del SI, ma hanno la natura di un conteggio. Esempi sono un numero di molecole, di cellule. Le quantità associate a un conteggio sono anch'esse le quantità la cui unità di misura è 1. L'unità uno è automaticamente l'elemento neutro di qualsiasi sistema di unità. Non è necessario introdurlo formalmente come le altre unità.

Gli angoli piano e solido, quando espressi rispettivamente in radianti e in steradiani, sono, in effetti, trattati anche all'interno del SI come quantità con l'unità 1. I simboli rad e sr sono scritti esplicitamente, al fine di sottolineare che, per i radianti o gli steradiani, la quantità da considerare è, o riguarda rispettivamente l'angolo piano o l'angolo solido. Per ragioni storiche, il radiante e lo steradiano sono trattati come unità derivate.

È particolarmente importante avere una chiara descrizione con l'unità 1 di qualsiasi quantità che viene espressa come un rapporto di quantità dello stesso tipo (ad esempio rapporti di lunghezza o frazioni di quantità) o come conteggio (ad esempio numero di fotoni o decadimenti).

Il principale vantaggio del SI è dato dal fatto che fornisce il riferimento per la definizione di tutte le altre unità. Le unità coerenti del SI hanno il vantaggio di non richiedere fattori di conversione tra le unità di base e quelle derivate. Tuttavia, alcune unità non SI sono ampiamente utilizzate e si prevede che continueranno a essere utilizzate per molti anni. Pertanto, il CIPM ha accettato alcune unità non SI da utilizzare con il SI. Le unità non SI sono elencate nella Tabella 5.

Nella tabella sono elencate le unità del rapporto logaritmico, il neper, il bel e il decibel. Il neper, Np, è usato per esprimere i valori delle grandezze i cui valori numerici si basano sull'uso del logaritmo neperiano (o naturale), $\ln = \log_e$. Il bel e il decibel, B e dB, dove:

$$1 \text{ dB} = (1/10) \text{ B},$$

sono usati per esprimere i valori delle grandezze del rapporto logaritmico i cui valori numerici sono basati sul logaritmo decadico, $\lg = \log_{10}$. Le unità neper, bel e decibel sono state accettate dal CIPM per l'uso con il Sistema Internazionale, ma non sono unità SI.

Tabella 5			
Unità non SI accettate per l'uso con le unità SI			
Quantità	Nome dell'unità	Simbolo dell'unità	Valore in unità SI
Tempo	minuto ora giorno	min h d	1 min = 60 s 1 h = 60 min = 3600 s 1 d = 24 h = 86 400 s
Lunghezza	unità astronomica	au	1 au = 149 597 870 700 m
Angolo piano e fase	grado minuto secondo	° ' "	1° = (π /180) rad 1' = (1/60)° = (π /10 800) rad 1" = (1/60)' = (π /648 000) rad
area	ettaro	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
Volume	litro	l, L	1 l = 1 L = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³
Massa	tonnellata dalton	t Da	1 t = 10 ³ kg 1 Da = 1.660 538 86 (28) × 10 ⁻²⁷ kg
Energia	elettronvolt	eV	1 eV = 1.602 176 634 × 10 ⁻¹⁹ J
logaritmica	neper	Np	Vedi nel testo
Rapporti	bel decibel	B dB	

Altre unità non-SI, di interesse storico, ancora presenti in campi specifici (per esempio, il barile di petrolio o il carato) o in particolari paesi (il pollice, il piede e la iarda), sono tuttora utilizzate. Il loro utilizzo nell'ambito tecnico e scientifico non è opportuno, anche se ne rimarrà traccia, per molti anni, in molti ambiti³⁷. L'utilizzo delle unità non SI priva di alcuni vantaggi quali la coerenza e l'assenza di coefficienti di conversione. Non è però pensabile di eliminarli dall'uso quotidiano. L'uso, per alcune di queste unità, dei prefissi SI è ammesso, ma non, ad esempio, con le unità di tempo non-SI.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare

- L'ing Saverio Manganaro di ACAE per aver proposto l'argomento di questa monografia;
- La dott.ssa Patrizia Tavella, direttrice del Time Department del BIPM, per le informazioni sulla misura del tempo;
- La dott.ssa Cristina Cassiago dell'INRiM per gli spunti di riflessione.

³⁷ Nel campo dell'unificazione elettrotecnica non è raro trovare flange con interassi tra i fori che richiamano le misure anglosassoni (es 127 mm $\Leftrightarrow$ 5 pollici – 203 mm $\Leftrightarrow$ 8 pollici)