

CnS La Chimica nella Scuola, vol.5, pp. 13-20, 2019

Il nuovo Sistema Internazionale di Unità di Misura (SI)
La nuova definizione della quantità di sostanza e della mole

Giuliano Moretti e Ida Pettiti
Dipartimento di Chimica, Sapienza Università di Roma,
piazzale A. Moro 5, 00185 Roma

e-mail: giuliano.moretti@uniroma1.it
ida.pettiti@uniroma1.it

Riassunto

Il 20 maggio 2019 è entrato in vigore il nuovo Sistema Internazionale di Unità di Misura (SI) nel quale le sette unità di misura fondamentali sono definite per mezzo di sette costanti di natura, con valore numerico fissato. Da un punto di vista pratico le grandezze fisiche fondamentali e le unità di misura sono rimaste le stesse del precedente SI, ma con il *nuovo SI* è stato realizzato un sistema completamente libero da quantità fisiche basate su artefatti. L'unità di massa, il kilogrammo, non è più basato su un lingotto di una lega platino-iridio conservato presso il *Bureau International de Poids et Mesures (BIPM)* a Sèvres (Francia).

In questa nota riportiamo le definizioni delle sette unità di misura fondamentali e il valore delle costanti di natura che le caratterizzano, con particolare attenzione alla quantità di sostanza (quantità chimica) e alla sua unità di misura, la mole, che sono di importanza fondamentale per la Chimica, alla stesso livello della Tavola Periodica degli elementi.

Abstract

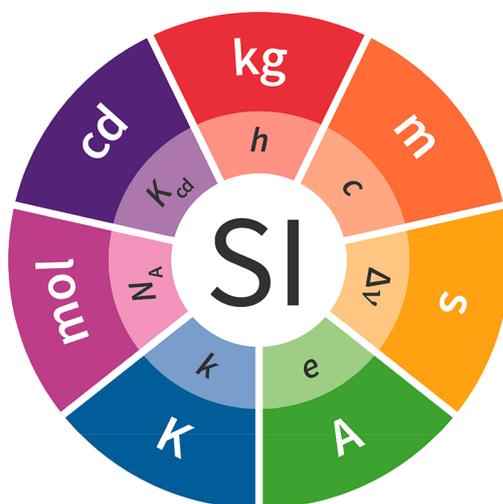
Starting from May 20th, 2019 the new International System of Units (SI) should be in use in all the Nations. In this *new SI* the seven base quantities are defined by means of seven constants of nature with fixed numerical values. From a practical point of view the base quantities and the base units are the same of the previous SI but in the *new SI* it is realized a system free from physical units based on artifacts. The mass unit, the kilogram, is no more based on a platinum-iridium ingot maintained at the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) in Sèvres (France). In the present contribution we report the definitions of the seven base units and the numerical value of the seven constants of nature by which they are characterized. We devote particular attention to the amount of substance (chemical amount) and to its base unit, the mole, which are of fundamental importance for Chemistry, as well as the Periodic Table of the elements.

Il nuovo Sistema Internazionale di Unità di Misura (SI), entrato in vigore il 20 maggio 2019, si basa sulle solite sette grandezze fisiche fondamentali ma la definizione delle relative unità di misura ora è data in funzione di costanti di natura, con valore numerico fissato. La decisione di adottare questo nuovo SI è stata

deliberata nel corso del 26° incontro della General Conference on Weights and Measures (13-16 novembre 2018) [1]. Il logo elaborato dall'International Bureau of Weights and Measures (BIPM) per illustrare il nuovo SI è riportato qui di seguito insieme a una tabella con i nomi delle grandezze fisiche di base, le relative unità di misura e le costanti di natura per mezzo delle quali le unità di base sono state definite. (Il logo appartiene al BIPM, <https://www.bipm.org/en/>, ed è qui riprodotto al solo scopo didattico.)

Da un punto di vista pratico nulla cambia rispetto al precedente SI, ma con il *nuovo SI* è stato realizzato un sistema completamente libero da quantità fisiche basate su artefatti. L'unità di massa, il kilogrammo, non è più rappresentata da un lingotto di una lega platino-iridio depositato presso il *BIPM* a Sèvres (Francia).

Questa nota rappresenta un necessario complemento a un precedente contributo pubblicato in questa rivista dal titolo "The amount of substance and the mole: a historical approach to their teaching and learning" [2].



<i>Grandezza fisica</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Costante di natura su cui si basa la definizione dell'unità di misura</i>
massa	m	kilogrammo	kg	h , costante di Planck
lunghezza	ℓ	metro	m	c , velocità della luce nel vuoto
tempo	t	secondo	s	$\Delta\nu_{Cs}$, frequenza della transizione iperfine del ^{133}Cs nello stato fondamentale non perturbato
intensità di corrente	i	ampere	A	e , carica elettrica elementare
temperatura	T	kelvin	K	k , costante di Boltzmann*
quantità di sostanza	n	mole	mol	N_A , costante di Avogadro
intensità luminosa	I	candela	cd	K_{cd} , potenza luminosa di una radiazione monocromatica di frequenza $540 \times 10^{12} s^{-1}$

*) Seguendo l'indicazione data per la costante di Avogadro, N_A , il simbolo per la costante di Boltzmann dovrebbe essere k_B , ma come si vede dal logo il simbolo da utilizzare è k [1].

I progressi realizzati in metrologia hanno ridotto di molto le incertezze dei valori numerici delle costanti di natura. A partire dal 20 maggio 2019 i valori delle unità di misura delle grandezze fisiche fondamentali sono definiti rispetto alle relative costanti di natura con valore fissato esattamente e non più considerate quantità sperimentali. Nella tabella seguente riportiamo i valori numerici e le unità di misura delle costanti di natura su cui si basa il nuovo SI [1].

<i>Costante di natura</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Valore numerico</i>	<i>Unità*</i>
Costante di Planck	h	$6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$	J s
Velocità della luce nel vuoto	c	299 792 458	m s^{-1}
Frequenza della transizione iperfine del ^{133}Cs nello stato fondamentale non perturbato	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
Carica elettrica elementare	e	$1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$	C
Costante di Boltzmann	k_{B}	$1,380\ 649 \times 10^{-23}$	J K^{-1}
Costante di Avogadro	N_{A}	$6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$	mol^{-1}
Potenza luminosa di una radiazione monocromatica di frequenza $540 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$	K_{cd}	683	$\ell\text{m W}^{-1}$

*) Tutte le unità si possono esprimere con le unità di base: J $\equiv \text{kg m}^2\text{s}^{-2}$; Hz (hertz) $\equiv \text{s}^{-1}$; C (coulomb) $\equiv \text{A s}$; ℓm (ℓ umen) $\equiv \text{cd m}^2 \text{ m}^{-2} = \text{cd sr}$; W (watt) $\equiv \text{J s}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-3}$. Il simbolo sr indica la grandezza di base supplementare “angolo solido”.

A seguire riportiamo una tabella con le definizioni delle unità di misura delle grandezze fisiche fondamentali [1] da cui si evince con maggior chiarezza la filosofia del nuovo SI.

Unità di misura di base **Definizione**

kilogrammo	Il kilogrammo, simbolo kg, è l’unità SI della massa. E’ definito prendendo il valore numerico fissato della costante di Planck h di $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ espresso in unità J s che equivalgono a $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, con le unità metro e secondo definite tramite le costanti c e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
metro	Il metro, simbolo m, è l’unità SI della lunghezza. E’ definito prendendo il valore numerico fissato della velocità della luce nel vuoto c di 299 792 458 espresso in unità m s^{-1} , con l’unità secondo definita tramite la costante $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
secondo	Il secondo, simbolo s, è l’unità SI del tempo. E’ definito prendendo il valore numerico fissato della frequenza della transizione iperfine nello stato fondamentale non perturbato, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, dell’atomo di cesio-133 di 9 192 631 770 espressa in unità Hz (s^{-1}).
ampere	L’ampere, simbolo A, è l’unità SI della corrente elettrica. E’ definito prendendo il valore numerico fissato della carica elettrica elementare e di $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ espressa in unità C che equivale a A s, con l’unità

kelvin	<p>secondo definita tramite la costante $\Delta\nu_{Cs}$.</p> <p>Il kelvin, simbolo K, è l'unità SI della temperatura termodinamica. E' definito prendendo il valore numerico fissato della costante di Boltzmann k di $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ espressa in unità $J\ K^{-1}$ che equivalgono a $kg\ m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$, con il kilogrammo, il metro e il secondo definiti con tramite le costanti h, c e $\Delta\nu_{Cs}$.</p>
mole	<p>La mole, simbolo mol, è l'unità SI della quantità di sostanza. Una mole contiene esattamente $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ entità elementari. Questo numero è il valore numerico fissato per la costante di Avogadro, N_A, espressa in mol^{-1} ed è chiamato numero di Avogadro.</p> <p>La quantità di sostanza, simbolo n, di un sistema rappresenta il numero di specificate entità elementari. Un'entità elementare può essere un atomo, una molecola, uno ione, un elettrone, ogni altra particella o specificato gruppo di particelle.</p>
candela	<p>La candela, simbolo cd, è l'unità SI dell'intensità luminosa in una data direzione. E' definita prendendo il valore numerico fissato della potenza luminosa di una radiazione monocromatica di frequenza 540×10^{12} Hz, K_{cd} di 683 espressa in unità $lm\ W^{-1}$ che equivalgono a $cd\ sr\ W^{-1}$ oppure $cd\ sr\ kg^{-1}\ m^{-2}\ s^3$, con il kilogrammo, il metro e il secondo definiti tramite le costanti h, c e $\Delta\nu_{Cs}$.</p>

In conclusione di questa nota riportiamo alcune osservazioni relative alle definizioni delle grandezze fisiche di base massa e quantità di sostanza, di interesse primario per la chimica.

Per quanto riguarda la definizione dell'unità di base della massa risulta chiaro che ci si è liberati di artefatti, il lingotto di platino-iridio di 1 kg conservato insieme ad alcune copie ufficiali presso il *BIPM* a Sèvres (Francia), e di tutte le altre copie conservate negli istituti di metrologia della diverse nazioni. La massa delle copie tende a variare con il tempo rispetto al campione originale del 1889, per diverse decine di μg , per ragioni ancora oggi non chiarite [3]. La nuova definizione dell'unità di base della massa non è semplice come la vecchia. Essenzialmente la massa di un campione può essere determinata attraverso relazioni in cui entra la costante di Planck, in modo da poter definire il kilogrammo per mezzo del valore numerico fissato di tale costante. Ad esempio, mediante tecniche di interferometria ottica e di interferometria di raggi X si possono contare gli atomi di un cristallo di silicio, N , di opportuna forma e dimensione e la massa, m , di tale cristallo può essere scritta come

$$m = h N A_r(\text{Si}) (m_u/h)$$

dove h è la costante di Planck, $A_r(\text{Si})$ è il peso atomico relativo del silicio utilizzato (dipende dalla composizione isotopica), e la costante fisica (m_u/h) con unità $m^{-2}\ s$, definita dall'unità di massa atomica, $m_u = m_a(^{12}\text{C})/12$, e dalla costante di Planck, h , può essere misurata con accuratezza in due diversi esperimenti di fisica atomica [4]. La massa di un campione si può anche ottenere con la cosiddetta "Kibble watt balance" in cui essenzialmente si confrontano la potenza meccanica e la potenza elettrica in presenza di un campo magnetico [4]. Nella definizione della potenza

elettrica intervengono l'effetto Hall quantistico (resistenza Hall $R_H = (h/e^2)/i$, dove i rappresenta un numero intero) e l'effetto Josephson (tensione $U_n = n f (h/2e)$, dove f rappresenta la frequenza di microonde che irradiano l'elemento di circuito elettrico contenente due semiconduttori debolmente accoppiati ed n è un numero intero). Si dimostra che la massa di un campione può essere scritta come

$$m = h (nn'i/4)(ff'/gv)$$

dove entra nuovamente la costante di Planck, dei numeri interi, $(nn'i/4)$, due frequenze, una velocità e l'accelerazione di gravità, (ff'/gv) .

Chiaramente non possiamo spiegare queste misure ai nostri studenti della scuola secondaria superiore o del primo anno di università e quindi, dal punto di vista della chiarezza della definizione, il passaggio dal lingotto di platino-iridio alla costante di Planck non è favorevole. Comunque dobbiamo ricordare che il Sistema Internazionale di Unità di Misura ha come principale scopo l'accuratezza della misure e non la chiarezza e la semplicità delle definizioni.

La nuova definizione dell'unità di base della quantità di sostanza, al contrario di quanto riportato per la massa, è più diretta e semplice della precedente.

Come prima cosa osserviamo che, in alternativa al nome quantità di sostanza, può essere usato il termine forse più appropriato di *quantità chimica*, suggerito per primo da G. Gorin per evitare confusione con la quantità di materia (la massa) e ora accettato dall'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) [2].

La nuova definizione fissa la costante di Avogadro e i miglioramenti ottenuti risultano evidenti se ricordiamo la precedente definizione della mole [5,6]; in particolare si ponga attenzione ai punti 1 e 3:

- 1) La mole (simbolo mol) è la quantità di sostanza (simbolo n) che contiene tante entità elementari quanti sono gli atomi in 0,012 kg di carbonio-12.
- 2) Le entità elementari devono essere specificate e possono includere atomi, molecole, ioni, elettroni e altre particelle o gruppi specificati di tali particelle.
- 3) E' inteso che gli atomi di carbonio-12 devono essere non coinvolti in legami chimici, a riposo e nello stato fondamentale sia nucleare che elettronico.

La definizione data nel 2013 in un primo documento di presentazione del nuovo SI aggiungeva informazioni sulla grandezza della mole [7]:

- 4) La grandezza della mole è fissata dal valore numerico della costante di Avogadro $N_A = 6,022\ 140\ 857 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ (oggi definitivamente $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).

Risulta chiaro che non dobbiamo più passare attraverso l'unità di massa atomica, $m_u = m_a(^{12}\text{C})/12$, con la specifica che gli atomi di carbonio-12 devono essere allo stato libero, a riposo e nello stato fondamentale sia nucleare che elettronico. Inoltre, secondo il nuovo SI, la relazione $N_A = 12/m_a(^{12}\text{C})$ (cioè $N_A m_a(^{12}\text{C})/12 = N_A m_u =$ unità di massa molare $= M_u = 1 \text{ g mol}^{-1}$, e quindi $12 M_u = M(^{12}\text{C})$) non è più rigorosamente valida in quanto il rapporto $12/m_a(^{12}\text{C})$ deve risultare esattamente pari a $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$.

Quindi a 1 mol di carbonio-12 corrisponde una massa di carbonio-12 che può cambiare man mano che si ottengono misure sempre più accurate della massa assoluta dell'atomo di carbonio-12. In pratica nulla cambia essendo tali variazioni entro livelli di parti per 10^{10} [8].

Concludiamo sottolineando che, sulla base della definizione della mole sia nel nuovo che nel vecchio SI, la quantità chimica di una sostanza X si calcola con la seguenti equazioni

$$n(X) = N(X) / N_A \text{ mol}$$

$$n(X) = N(X) m_f(X) / (N_A m_f(X)) \text{ mol}$$

$$n(X) = m / M(X) \text{ mol}$$

$$M(X) = N_A m_f(X) \text{ g mol}^{-1}$$

dove con $m_f(X)$ abbiamo indicato la massa assoluta dell'entità elementare che costituisce la sostanza X (atomi, ioni, molecole), con m la massa della sostanza (in g) e con $M(X)$ la massa molare.

La *massa molare relativa* della sostanza X (adimensionale) è per definizione

$$M_r(X) = m_f(X) / m_u$$

$$\text{con } m_u = m_a(^{12}\text{C}) / 12$$

Con evidenti passaggi possiamo scrivere

$$M_r(X) m_u = m_f(X)$$

$$N_A M_r(X) m_u = N_A m_f(X)$$

$$N_A M_r(X) m_u = M(X)$$

e quindi considerando la relazione

$$N_A m_a(^{12}\text{C}) / 12 = N_A m_u = \text{unità di massa molare} = M_u = 1 \text{ g mol}^{-1}$$

vediamo la massa molare e la massa molare relativa hanno lo stesso valore numerico

$$M(X) / (1 \text{ g mol}^{-1}) = M_r(X).$$

Riferimenti bibliografici

[1] Risoluzione della General Conference on Weights and Measures del 16 novembre 2018, <https://www.bipm.org/utls/en/pdf/CGPM/Draft-Resolution-A-EN.pdf>

- [2] Moretti G., “The amount of substance and the mole: a historical approach to their teaching and learning”, *CnS La Chimica nella Scuola* **5**,13-27 (2016).
- [3] Stock M., “The revision of the SI-towards an international system of units based on defining constants”, *Measurement Techniques* **60**, 1169-1177 (2018).
- [4] Marquardt R., Meija J., Mester Z., Towns M., Weir R., Davis R., Stohner J., “A critical review of the proposed definitions of fundamental chemical quantities and their impact on chemical communities (IUPAC Technical Report)”, *Pure Appl. Chem.* **89**, 951-981 (2017).
- [5] Petley B.W., “The mole and the unified atomic mass unit”, *Metrologia* **33**, 261-264 (1996).
- [6] Cohen E.R., Cvitaš T., Frey J.G., Holstro, B. (eds.), IUPAC definition in “Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry” (IUPAC Green Book), 3rd ed. Royal Chemical Society of Chemistry, Cambridge (2007).
- [7] Fischer J., Ullrich J., “The new system of units”, *Nature Physics* **12**, 4-7 (2016).
- [8] Davis R.S., Milton J.T., “ The assumption of the conservation of mass and its implications for present and future definitions of the kilogram and the mole”, *Metrologia* **5**, 169-173 (2014).