



Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
*Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica,
Matematica e Scienze Naturali*
141° (2023), Vol. IV, fasc. 1, pp. 269-275
ISSN 0392-4130 • ISBN 978-88-98075-55-3

La vecchia e la nuova definizione di mole: le ragioni della metrologia vs. quelle della chimica

ELENA GHIBAUDI^{1,3*} – MARCO GHIRARDI^{2,3} – ALBERTO REGIS³

¹ Dip. Chimica, Università di Torino, Via Giuria 7, 10125 Torino (Italia)
E.mail: elena.ghibaudi@unito.it, ORCID: orcid.org/0000-0002-1660-2482

² ITIS Quintino Sella, Via Fratelli Rosselli, 2, 13900 Biella
E.mail: mrc.ghirardi@gmail.com

³ Gruppo di ricerca in didattica delle scienze SENDS, c/o Dip.to Chimica, Università di Torino
E.mail: alberto.regis8@gmail.com

Abstract – In recent years, the definition of mole, the unit of the amount of substance, has been modified in order to express all units of the International System by direct reference to universal constants. The old definition refers explicitly to both mass and elementary units; it suggests the idea that the mole is a bridge between the macroscopic and microscopic registers. On the other hand, the new definition emphasizes the counting aspect, referred to any kind of elementary unit. Paradoxically, this results in the disappearance of substance from the unit of the quantity *amount of substance*. Either positive or negative remarks to this change of definition have been expressed by several authors that highlight its epistemological, disciplinary, lexical and educational implications. We analyze some of these aspects. More in details, we discuss the thesis that the new definition of mole reflects a view of chemistry according to which the microscopic perspective prevails, and this entails the loss of reference to the macroscopic register, which is nevertheless fundamental to the construction of meanings. This could be related to the profound changes undergone by the cognitive practices of chemistry in this last century.

Keywords: Mole; amount of substance; chemical education; epistemology; universal constants; metrology

It is as easy to count atomies as to resolve the propositions of a lover
William Shakespeare, As You Like It

La grandezza *quantità di sostanza* (QS) e la sua unità di misura, la *mole*, sono fondamentali per la chimica in quanto connettono due livelli di realtà: quello macroscopico e quello atomico-molecolare. La grandezza QS è lo strumento concettuale che consente di impostare le trasformazioni chimiche in termini stechiometrici, ossia di *pesare* masse per *contare* particelle microscopiche, grazie alla relazione tra la costante di Avogadro e la massa molare di ciascuna sostanza.

Malgrado la sua lunga storia [5, 20, 24] il ruolo fondamentale della mole per la chimica è stato ufficialmente riconosciuto solo nel 1971, quando la 14^{ma} Conférence Générale de Poids et Mesures (CGPM) decide di includerla nel Sistema Internazionale (SI) [2, 10]. La definizione di mole approvata nel 1971 recita¹:

1. The mole is the *amount of substance of a system* which contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kilogram of carbon 12; its symbol is “mol”.

2. When the mole is used, *the elementary entities must be specified* and may be atoms, molecules, ions, electrons, other particles, or specified groups of such particles. It follows that the molar mass of carbon-12 is exactly 12 grams per mole, $M(^{12}\text{C}) = 12 \text{ g/mol}$.

Nel 1980, il CIPM (Comité international des Poids et Mesures) integra le indicazioni del CCU (Comité Consultatif des Unités) che specifica che questa definizione si riferisce a «unbound atoms of carbon-12, at rest and in their ground state»[3] per evitare di dover tener conto di effetti relativistici sulla massa².

In anni recenti, il SI è stato riformulato su basi concettuali completamente diverse rispetto al passato. Il fondamento del sistema sono sette costanti universali, il cui valore è fissato: da esse vengono fatti derivare i valori delle unità di base [1].

La decisione origina da un problema metrologico collegato alla cosiddetta *mise en pratique*³: la necessità di liberarsi dalla dipendenza da standard di riferimento manufatti (soggetti a inevitabili cambiamenti nel tempo) e di individuare un sistema di riferimento stabile nel tempo e nello spazio (*an inherently stable system of units*) [15]. Il nuovo approccio è dunque più astratto del precedente in quanto consente di *disconnettere la definizione di una unità di misura del SI dalla sua realizzazione pratica*.

In conseguenza di questa revisione del SI, la mole ha dovuto essere ridefinita in relazione alla costante di Avogadro, il cui valore è ora fissato. La nuova definizione, approvata nel 2019, recita:

¹ Qui e altrove abbiamo scelto di riportare il testo inglese tratto dalla SI Brochure, per evitare di affrontare questioni lessicali sulla quantità di sostanza. Per queste ultime rimandiamo a [7].

² Ne segue che 0.012 kg di ¹²C in forma di grafite a temperatura ambiente non corrispondono esattamente a 1 mol, a causa dello stato fisico [19].

³ “To be of any practical use, these units not only have to be defined, but they also have to be *realized physically for dissemination*” [1].

The mole, symbol mol, is the SI unit of amount of substance. One mole contains *exactly* $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ elementary entities. This number is the *fixed numerical value of the Avogadro constant*, N_A , when expressed in the unit mol^{-1} and is called the Avogadro number. The *amount of substance*, symbol n , of a system is a measure of the number of specified elementary entities. *An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles* [1].

Questa definizione è accompagnata da ulteriori specifiche: «This definition *implies the exact relation* $N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Inverting this relation gives an exact expression for the mole in terms of the defining constant N_A : $1 \text{ mol} = (6.022\,140\,76 \times 10^{23}/N_A)$ ». Un'immediata conseguenza è che la massa molare del ¹²C non è più fissata e deve essere determinata sperimentalmente, dunque è soggetta a variazioni [21].

Un primo confronto tra le definizioni di mole del 1971 e del 2019 evidenzia gli aspetti riassunti nella Tabella 1.

Le ragioni della metrologia

Sin dagli anni della loro introduzione nel SI, la QS e la mole sono state fortemente dibattute dai metrologi, in quanto percepite come sostanzialmente differenti dalle altre grandezze e unità del SI. Le vere o presunte anomalie attribuite alla QS e alla mole come unità di base concernono: i) il carattere continuo o discontinuo della QS; ii) il fatto che la definizione dell'unità di misura (mole) precede quella della grandezza (QS); iii) il rapporto con la grandezza *massa*; iv) la coesistenza di aspetti quantitativi e qualitativi nella mole e nella QS.

Riguardo al primo aspetto, Johansson [16, 17] sostiene che includere la quantità di sostanza nel SI, assimilandola a grandezze continue come la lunghezza, la massa, ecc., implicherebbe un improprio mescolamento dei caratteri continuo e discreto: «Atoms and molecules are naturally discrete entities, but in the SI system the dimension (or kind-of-quantity) *amount of substance* has nonetheless been forced to conform to a structure that fits only naturally continuous kinds-of-quantity, i.e., quantities such as length, mass, time duration, and so on. This is a mistake, even though an explainable one. *In the SI system, unhappily, the mole is regarded as a unit of the same kind as the metre, the kilogram, and the second*». Il problema nasce dal fatto che le grandezze continue hanno una propria unità di misura, mentre le grandezze discrete (*counting quantities*) sono adimensionali, in quanto la lo-

Tabella 1 – Analogie e differenze tra le definizioni di mole del 1971 e del 2019

Definizione 1971	Definizione 2019
<ul style="list-style-type: none"> • Fa esplicito riferimento sia alle masse che alle unità elementari; • Definisce l'unità di misura, non la grandezza • Nessuna menzione esplicita della costante di Avogadro e del suo valore • Necessità di specificare le entità elementari alle quali ci si riferisce • La massa molare del carbonio-12 è definita esattamente 	<ul style="list-style-type: none"> • Perdita di riferimento esplicito alla massa. La QS viene identificata con una mera conta di entità elementari di qualsiasi tipo (<i>a measure of the number of specified elementary entities</i>) • Definisce sia l'unità di misura sia la grandezza • Menziona esplicitamente il valore della costante di Avogadro, che è fissato • Necessità di specificare le entità elementari alle quali ci si riferisce • La massa molare del ^{12}C non è più fissata e va determinata sperimentalmente
La mole come <i>ponte tra il registro macroscopico e il microscopico</i>	La mole come <i>conta di particelle</i>

ro unità di base è 1. È chiaro che Johansson concepisce la QS in termini puramente microscopici, trascurando completamente la sua relazione con la massa. Sul piano opposto, il metrologo Güttler [15] rivendica la bontà della nuova definizione di mole in quanto consentirebbe di formalizzare la dimensione della grandezza QS (mol^{-1}), distinguendola da un numero puro.

Secondo Wolff [26] il carattere ambiguo della mole è confermato dal fatto che la definizione di QS è parte integrante della definizione di mole e, addirittura, la segue invece di precederla. A questo proposito, Güttler [15] parla di «awkward historical relationship» tra la mole e la grandezza corrispondente, in quanto storicamente il concetto di mole ha preceduto quello di QS: «Unlike in physical metrology, where we first conceive of a quantity and then of its unit, *this happened in reverse for chemistry*»⁴.

Riguardo al rapporto tra mole e massa, le ragioni della metrologia sono chiare: va evitato. Le unità di misura del SI devono essere le une indipendenti dalle altre. Inoltre, come già sottolineato, occorre evitare il ricorso a campioni standard di riferimento potenzialmente variabili: «The present (*N.B. 1971*) definition of the mole is linked to the mass of the International Prototype of the Kilogram (IPK) but *m_{IPK} is not a perfectly stable quantity*» [18]. Sul piano metrologico, l'indipendenza da manufatti assegna alle unità un carattere più universale⁵;

⁴ Per una disamina storica sull'origine dei due concetti, cfr. [5, 20, 24, 25].

⁵ Questo punto di vista non è condiviso da tutta la comunità dei metrologi: alcuni lo considerano illusorio o fondato su presupposti

nel caso della mole, la svincola dalle proprietà di uno specifico materiale (un campione di uno specifico isotopo del Carbonio), costituito da atomi in un particolare stato (atomi isolati di ^{12}C a riposo e nello stato fondamentale) [15, 19]. Inoltre esplicita la relazione tra la mole e un numero fisso di particelle, espresso dalla costante di Avogadro. Due problemi legati a questa mossa sono: i) la dematerializzazione della mole, che non corrisponde più ad una massa, ma ad un numero che serve a contare qualsiasi entità microscopica; ii) la non esplicitazione dell'origine di quel numero: «the definition gives no particular indication of where that number comes from» [26].

L'ultimo aspetto problematico della mole, sul piano metrologico, è la compresenza di aspetti numerabili e non numerabili. La mole è infatti definita mediante due clausole: la prima è quantitativa, la seconda è qualitativa: «Unlike the other base units, the mole was, and still is, defined by two clauses. The first one defines a number of elementary entities. The second one requires the *identification of the elementary entities*» [15]. Questa coesistenza di quantità e qualità è inevitabile per la chimica, che si confronta con enti dal carattere individuale come

erronei sul piano epistemologico: «When unit definitions are anchored in theories instead of in obviously existing macroscopic magnitudes such as prototypes, meridians, and solar days, then a quite special metrological possibility arises. Since theories are not only about what actually exists and can exist, but also about counterfactual situations that may never exist and may not even possibly exist, *the constancy magnitude that grounds a unit definition can be placed in a non-existing or impossibly existing magnitude*» [17].

le sostanze, e segna una distanza dall'universo mentale della fisica, che punta a teorie più generali e necessita di un maggior grado di idealizzazione: «The real difference between amount of substance and these other quantities is that amount of substance is different for different substances» [26].

Le ragioni della chimica

La rilevanza dei concetti di mole e di QS per la chimica deriva dal fatto che essi sono indissolubilmente legati alla reattività delle sostanze e ai rapporti stechiometrici. Il chimico percepisce «cambiamenti di colore, la formazione di un precipitato, lo sviluppo di un gas, ecc. » e, in modo per nulla ovvio, interpreta tali processi come «risultato di eventi che coinvolgono particelle invisibili» [8, 13]. La chimica ha dunque necessità di fare appello a due livelli di realtà: quello macroscopico e quello microscopico. La ragion d'essere del concetto di mole risiede proprio nella sua possibilità di agire da ponte tra di essi, consentendo di pensare i processi chimici in termini di (ri)combinazione di particelle e non semplicemente di relazioni tra masse di sostanze: «The mole is important in chemistry because it recognizes that atoms and molecules react together on an amount of substance basis and not on a mass basis» [15].

La stessa rappresentazione simbolica delle trasformazioni chimiche può essere letta su questi due livelli. Ce lo ricorda Wolff [26] quando afferma che la grandezza QS si configura come «*mediator between macroscopic measurements and microscopic measurements* describing these chemical and thermodynamic phenomena in terms of molecular interactions» dove il livello macroscopico è quello della descrizione in termini di grandezze continue come la massa, il volume, ecc. mentre il livello microscopico è quello dell'interpretazione: «An *explanation* of the macroscopic relations is offered in terms of microscopic entities (atoms, molecules), which are typically too small and too numerous to count». Sulla stessa linea di pensiero, Marquardt [18] osserva che le trasformazioni chimiche sono soggette a una interpretazione sia macroscopica sia microscopica, grazie alla introduzione della QS «which reflects both views».

Riguardo alla grandezza QS, è Gorin [14] a ricordare che essa si determina – per le varie sostanze – proprio facendole reagire fra loro: «chemical amount is determined from the stoichiometry of chemical reactions. The relative number of atoms involved in the reaction may be deduced from such measurements, but one cannot proceed in the opposite sense, because [...] there is no

direct experimental procedure by which atoms can be enumerated». Infatti, prima del concetto di mole viene quello di equivalenza tra moli di diverse sostanze [5]. Questa equivalenza sottostà a qualunque ragionamento stechiometrico e alla indagine quantitativa della reattività delle sostanze, che è un *obiettivo fondativo* della chimica: «La quantità di sostanza esprime la reattività della materia indicando in modo libero la stechiometria del sistema fisico a cui si riferisce» [24]. Ed è ancora Marquardt [18] a ricordare che «The amount of substance allows a quantitative formulation of the law of multiple proportions due to Dalton and Avogadro»⁶.

Un interessante argomento contro la riduzione della QS e della mole ad una conta numerica è espresso da Brown [4]. Egli fa notare che in entrambe le definizioni di mole la grandezza *amount of substance* è riferita ad un sistema (*of a system*). Ma ciò implica una qualche forma di relazione tra le particelle che lo costituiscono: «it implies the elementary entities considered are located in close enough vicinity such that they could, in theory, react or interact with each other stoichiometrically». Sulla base di questa argomentazione, la comparazione tra mole e dozzina, assai popolare in ambito didattico, è certamente da rigettare.

Il carattere peculiare della QS è ben espresso da Wolff [26], quando rileva che essa è caratterizzata da una intrinseca *tensione* tra la sua relazione con la massa, da una parte, e quella con il numero di entità elementari, dall'altra: è proprio questa bivalenza che rende la grandezza QS *chimicamente significativa*.

Due discipline in conflitto?

In sostanza, sulla mole pendono due fraintendimenti: c'è chi la identifica con una massa e chi la identifica con una conta di particelle, ossia un numero. In entrambi i casi, l'operazione comporta un appiattimento su un singolo livello di realtà. Al contrario, i chimici attuano nel mondo materiale «quella *operazione di corrispondenza biunivoca* fra i componenti microscopici di sistemi macroscopici indicata dalla definizione di mole» [24]: dun-

⁶ Un autorevole commento sull'interpretazione del comportamento chimico delle sostanze proviene nientemeno che da Planck: «The physical forces, gravity, electric and magnetic attractions or repulsions, cohesion, act in continuous way; *the chemical forces, on the contrary, by quanta*. This law would be connected with that which allows masses in physics to act each one on the other in whatever quantity, *while in chemistry they can act only in sharply defined proportions, variable in discontinuous manner*» [22].

que, la QS e la mole esprimono un *tratto essenziale dell'epistemologia dei chimici*, il riferimento continuo e contestuale a due diversi livelli di realtà. Ma, se ciò è vero, diventa immediatamente evidente una contraddizione: Il riferimento al livello macro (ossia alla massa) – che è problematico per la metrologia – diventa invece *essenziale e costitutivo* per la chimica, in quanto disciplina indagatrice della reattività delle sostanze.

A questo proposito, il chimico McGlashan – membro del CCU che alla fine degli anni '60 discusse sull'opportunità di introdurre la mole nel SI – osservava che la mole non può essere sostituita da un numero o da una massa. E aggiungeva che «It would be *particularly nefarious* to lead back to a pure number the quantity to which the mole corresponds. Indeed, for more than a century, chemists have treated the mole as an *independent unit*» [9].

Singolarmente, la definizione di mole approvata nel 2019 sembra operare proprio questa riduzione: «The mole, symbol mol, is the SI unit of amount of substance. One mole contains *exactly* $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ elementary entities [...] The *amount of substance*, symbol n, of a system is a *measure of the number of specified elementary entities*». La nuova definizione enfatizza l'aspetto del contare, riferito a qualsiasi entità elementare, e *de facto*, riduce la QS ad una conta (*a measure of the number of specified elementary entities*). Questa sembra essere la diretta conseguenza della mancanza di riferimento alla massa, che era stata espressamente evitata per ragioni metrologiche. Ma così, ciò che appare auspicabile e benefico a livello metrologico, diventa paradossale a livello chimico, in quanto segna - di fatto - la scomparsa della *sostanza* dalla stessa unità di misura della *quantità di sostanza*. Una sostanza non è un ammasso di particelle, ma un'entità tangibile, che si può pesare, conservare in un contenitore, che mostra varie proprietà macroscopiche che ci permettono di identificarla e anche (ma non esclusivamente) descriverla in termini microscopici.

Dunque, la transizione dalla vecchia alla nuova definizione di mole evidenzia una situazione di *conflitto epistemico tra due discipline*: l'assenza di riferimento alla massa costituisce la principale ragione metrologica per ridefinire la mole. Tuttavia, la perdita di tale riferimento *svuota la mole e la quantità di sostanza del loro più profondo significato chimico*, che è quello di agire da mediatori tra i livelli di realtà macroscopico e microscopico.

Questo conflitto non emergeva nella definizione del 1971, dove l'aspetto del contare (particelle) appariva strettamente correlato alla misura di una quantità macroscopica (la massa, per sostanza atomiche o molecolari; la carica, per gli elettroni, ecc...). Dal punto di vista

chimico, la mole è un concetto bifronte che collega due livelli di realtà: perderne (o rinunciare a) uno dei due, significa alterare il significato di questo concetto, trascurarne lo sviluppo storico e non tenere conto delle modalità di ragionamento tipiche della chimica.

Un ulteriore motivo di conflitto tra metrologia e chimica riguarda la necessità di specificare la natura della sostanza (e/o delle entità elementari) che si vuole quantificare: «The determination of a quantity of substance is made specifically *relative to a [particular] entity*» [12]. Per essere significativa, la QS e la mole richiedono una specificazione: una mole *di cosa*? Ciò le distingue da tutte le altre grandezze del SI ed è la manifestazione di quella «dialettica tra quantità e qualità» [24] che risulta problematica per la metrologia, ma rappresenta il cuore della epistemologia chimica.

Evoluzione del pensiero chimico e tendenze riduzioniste

Un'obiezione possibile alla tesi secondo la quale la nuova definizione di mole elide il concetto di sostanza è che da molto tempo i chimici usano il concetto di mole anche per 'quantificare' enti microscopici non collegati ad alcuna sostanza: «there is neither a conventional "electron substance" nor a "hydronium substance"» [23]. La QS pare dunque essersi 'sganciata' dal concetto di sostanza e molti chimici sottoscriverebbero senza problemi la posizione di Schmidt-Rohr [23] secondo il quale «*amount of substance is equal to the number of molecules*». L'estensione di significato della QS è senza dubbio legata alla evoluzione delle pratiche conoscitive della chimica e del pensiero chimico avvenuta nei decenni, che ha inevitabilmente portato ad una esplorazione sempre più introspettiva del mondo microscopico al quale la chimica fa riferimento. La pratica ermeneutica della chimica consente di ragionare in termini di doppietti elettronici condivisi, molecole isolate, traslocazioni di protoni, ecc. ossia eventi (reali o supposti) che coinvolgono enti e stati microscopici. Il potere interpretativo della chimica risiede proprio in questa sempre crescente capacità di spiegare i fenomeni mediante modelli microscopici via via più avanzati. Quindi la necessità di applicare un ragionamento stechiometrico anche a queste entità è reale. Tuttavia, ci pare che occorra prestare attenzione a che l'estensione del concetto di QS non si traduca in una *riduzione ontologica* che rischierebbe di far perdere alla grandezza QS la sua utilità concettuale.

Secondo Schmidt-Rohr [23] la vecchia definizione di mole si fonda su «an *outdated continuum view of matter*», in quanto ormai pensiamo la materia in termini par-

ticellari: «In the accepted atomistic worldview, it is unnecessary to make a distinction between the amount of a substance and the number of atoms or molecules that compose it». A nostro avviso, questa posizione (riduzionista) comporta il duplice rischio di reificare il mondo microscopico (trattandolo come se avesse le stesse prerogative del mondo macroscopico ed esperienziale) e di perdere di vista il fatto che la descrizione microscopica della realtà trova la sua *raison d'être* nel mondo fenomenico. Se questo aspetto viene trascurato, le descrizioni microscopiche assumono una autonomia impropria che può portare a conclusioni inappropriate. Si prenda come esempio Johansson [17], quando afferma che «In the connection rule introduced, $n \text{ mole}(X) = (A_N N)(X)$, the right hand side is *ontologically more basic* than the left hand side, *since it is discrete entities or samples of such that are what modern chemistry is about*». Senza dubbio, molte spiegazioni chimiche fanno ricorso a enti discreti; ciò nonostante, percepiamo con disagio l'assegnazione di un *peso ontologico* maggiore al mondo microscopico rispetto al macroscopico. Ci pare che lo scopo della chimica resti quello di offrire interpretazioni del mondo materiale che è oggetto della nostra esperienza: solo in questa prospettiva, è possibile giustificare il ricorso ad un mondo particellare che è necessariamente modellistico. Questa relazione dialettica tra mondo fenomenico e microscopico della chimica è particolarmente rilevante in ambito didattico: quando la si nega o la si trascura, ne derivano serie concezioni difformi.

In conclusione, è facile constatare che il cambio di definizione della mole porta con sé numerose questioni pertinenti l'epistemologia della disciplina chimica. Sorprendentemente, il dibattito che ha accompagnato tale cambiamento ha coinvolto in prevalenza i metrologi ed è passato largamente inosservato nella comunità chimica, malgrado il carattere fondante dei concetti disciplinari dibattuti. Ci pare una vicenda paradigmatica della insufficiente attenzione prestata dai chimici alla riflessione epistemologica sui fondamenti della propria disciplina che - facciamo nostre le parole di Turco e Cerruti [25] - «dovrebbe riportare i chimici alle loro responsabilità culturali».

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il progetto CH4.0 del programma MUR «Dipartimenti di Eccellenza 2023-2027» (CUP: D13C22003520001) per il supporto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Brochure of The International System of Units - 9th ed., Sèvres (France) 2019 (updated v2.01 – December 2022).
- [2] Brochure of The International System of Units - Appendix 4. Historical notes on the development of the International System of Units and its base units – 9th ed., Sèvres (France) 2019 (updated v2.01 – December 2022).
- [3] Brochure of The International System of Units – 8th ed., Sèvres (France) 2006.
- [4] BROWN Richard 2023. *Counting and why it is different from amount of substance*, CCU/CCQM Workshop on “The metrology of quantities which can be counted”, URL: <https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccu/wg/ccu-ccqm-ws/2023-03-28> (ultimo accesso novembre 2023).
- [5] CERRUTI Luigi 1984. *La mole. Uno studio sulla epistemologia regionale dei chimici*. Monografia n.17, Istituto di Metrologia “G. Colonnetti” del CNR, Torino.
- [6] CERRUTI Luigi 1994. *The mole, Amedeo Avogadro and others*. *Metrologia* 31, pp. 159-166.
- [7] CERRUTI Luigi 2003. *Osservazioni sulla quantità di sostanza e sulla mole. Semantica delle lingue naturali*. *La Chimica nella Scuola* anno XXV, n°1, pp. 3-10.
- [8] CERRUTI Luigi 2019. *The best science book ever written. Storia ed epistemologia della chimica nel Sistema periodico di Primo Levi in Cucire parole, cucire molecole. Primo Levi e Il sistema periodico*, a cura di A. Piazza e F. Levi, I Quaderni dell'Accademia, Accademia delle scienze di Torino, vol. 32, pp. 93-118.
- [9] Comité Consultatif des Unités (CCU) 1969. *Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 37, pp. 180-109.
- [10] *Comptes rendus des Séances de la 14^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures* (CGPM), Resolution 3, Paris 1971, p. 78.
- [11] DE BIÈVRE Paul 2015. *Clarity about the base quantity “amount of substance” is required before (re)definition of the associated base unit mole is meaningful*. *Accred. Qual. Assur.* 20, pp. 441-443.
- [12] DE BIÈVRE Paul et al. 1995. *Metrology and the Role of Reference Materials in Validation and Calibration for Traceability of Chemical Measurements*. *Proceedings of the National Conference of Standards Laboratories Workshop and Symposium (NCS)*, Dallas (USA).
- [13] GHIBAUDI Elena 2022. *Carbonio in Il sistema periodico di Primo Levi - Lettere* (F. Magro, M. Sambì eds.), Padova University Press, pp. 323-334.
- [14] GORIN George 1994. *Mole and Chemical Amount*. *J. Chem. Educ.* 72, pp. 114-116.
- [15] GÜTLER Bernd et al. 2019. *Amount of substance and the mole in the SI*. *Metrologia* 56, 044002, DOI: 10.1088/1681-7575/ab1fae
- [16] JOHANSSON Ingvar 2011. *The mole is not an ordinary measurement unit*. *Accred. Qual. Assur.* 16, pp. 467-470.
- [17] JOHANSSON Ingvar 2014. *Constancy and Circularity in the SI*, URL: <http://www.metrologybytes.net/> (ultimo accesso novembre 2023)
- [18] MARQUARDT Roberto et al. 2017. *A critical review of the proposed definitions of fundamental chemical quantities and their impact on chemical communities (IUPAC Technical Report)*. *Pure Appl. Chem.* 89(7), pp. 951-981.

- [19] MARQUARDT Roberto et al. 2018. *Definition of the mole (IUPAC Recommendation 2017)*. Pure Appl. Chem. 90(1), pp. 175-180.
- [20] MORETTI Giuliano, 2016. *The amount of substance and the mole: a historical approach to their teaching and learning*. La Chimica nella Scuola 5, pp.13-27.
- [21] MORETTI Giuliano e Ida Pettiti, 2019. *Il nuovo Sistema Internazionale di Unità di Misura (SI) La nuova definizione della quantità di sostanza e della mole*. La Chimica nella Scuola 5, pp.13-20.
- [22] PLANCK Max 1912. *Rapport sur la loi du rayonnement noir et l'hypothèse des quantités élémentaires d'action*, in *La theorie du rayonnement et les quanta* (P. Langevin, M. de Broglie eds.), Paris, Gauthier-Villars.
- [23] SCHMIDT-ROHR Klaus 2020. *Analysis of Two Definitions of the Mole That Are in Simultaneous Use, and Their Surprising Consequences*. J. Chem. Educ. 97, pp. 597-602.
- [24] TURCO Francesca e Luigi CERRUTI 2002. *Osservazioni sulla quantità di sostanza e sulla mole. Concetti metrici e significato metrologico della quantità di sostanza*. La Chimica nella Scuola anno XXIV, n°4, pp. 111-119.
- [25] TURCO, Francesca e Luigi CERRUTI 2002. *Osservazioni sul concetto di quantità di sostanza e sulla mole. II parte*. La Chimica nella Scuola anno XXIV, n°5, pp. 147-156.
- [26] WOLFF Jo 2018. *Heaps of moles? Mediating macroscopic and microscopic measurement of chemical substances*. Studies in History and Philosophy of Science 80, pp. 19-27.