

Cosa accadrà alle unità di base nel nuovo SI?

Luca Mari

Tutto_Misure, 4, 2018

[9.9.18]

Dopo un lavoro di anni, è in approvazione la nuova versione del Sistema Internazionale di Unità (SI), prevista per metà novembre 2018, nel corso della 26a Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (CGPM) (nel futuro per chi sta scrivendo, nel passato per chi legge...). Del nuovo SI si è già scritto anche su Tutto_Misure, in particolare nei numeri 2 e 3/2015, 1/2016, e 1/2018, e si è chiarita la nuova struttura delle definizioni delle unità, che le rende esplicitamente dipendenti da grandezze che in accordo alle migliori teorie disponibili si suppone siano costanti di natura (la velocità della luce nel vuoto, la costante di Planck, e così via). Il nuovo SI è presentato ufficialmente nella cosiddetta “Brochure SI”, al momento in bozza nella sua 9a edizione (www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si).

La transizione verso la nuova struttura, che è sofisticata e complessa, ha generato varie controversie, testimoniate tra l'altro dal recente dialogo fra Luca Callegaro e Franco Pavese proprio su T_M (si veda www.tuttomisure.it/Telematico.aspx?num=6&art=204). Più modestamente, propongo qui qualche considerazione sulle conseguenze che il nuovo SI potrà avere sulla distinzione tra unità di base e unità derivate, e tra grandezze di base e grandezze derivate nel Sistema internazionale di grandezze (ISQ). Per introdurre autorevolmente il tema cito Ian Mills, ex-presidente del Comitato Consultivo per le Unità (CCU) del BIPM, che, insieme con non meno importanti colleghi metrologi, scrisse nel 2006 che l'elenco delle nuove definizioni, “together with the same system of quantities and laws of physics upon which the present SI rests, establishes the entire system *without the introduction of base units and derived units – all units are on an equal footing*”. E per maggiore chiarezza considero che “a major advantage of the proposed new approach is that *it does away entirely with the need to specify base units and derived units and hence the confusion that this requirement has long been recognized to engender, not the least of which is the arbitrariness of the distinction between base units and derived units.*” (corsivi miei) (I.M. Mills, P.J. Mohr, T.J. Quinn, B.N. Taylor, E.R. Williams, Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005), *Metrologia*, 43, 227–246, 2006; p.236). Più recentemente David Newell, presidente del CODATA, ha confermato: “gone are the base units and their definitions” (D.B. Newell, A more fundamental International System of Units, *Physics Today* 67(7), 35-41, 2014; p.36). Un importante beneficio del nuovo SI sarebbe dunque che elimina la necessità di distinguere tra unità di base e unità derivate, una distinzione considerata confusa e arbitraria. Ma è proprio così? Perché allora il nuovo SI è invece generalmente presentato proprio come una “ridefinizione delle unità di base del SI”? Per esempio, una delle “four particular priorities” che il Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure (CIPM) “considered during the development of the Strategic Plan (2018)” è “to review the technical work needed at the BIPM in physical metrology following the expected decision *to redefine the base units of the SI at the 26th CGPM (2018)*” (corsivi miei) (CIPM, Proceedings of the 106th meeting, 2017, www.bipm.org/utis/en/pdf/CIPM/CIPM2017-EN.pdf; p.128). Insomma, cosa accadrà alle unità di base nel nuovo SI?

La semplice analisi che segue può essere intesa come un contributo a una migliore comprensione di questo problema e, nello stesso tempo e più in generale, della struttura concettuale dei sistemi di grandezze e dei sistemi di unità.

Il nostro punto di partenza è il concetto di *sistema di grandezze*: è un fatto empirico che alcune grandezze fisiche sono in relazione reciproca, e quindi costituiscono appunto un sistema di grandezze, cioè un “insieme di grandezze associato a un insieme di equazioni non contraddittorie tra le grandezze medesime”, per come definito dal *Vocabolario Internazionale di Metrologia* (VIM, def. 1.3) (www.ceinorme.it/en/normazione-en) (si noti che qui con “grandezze” si intendono grandezze in senso generale, dunque lunghezza, massa, ecc, e non grandezze individuali, come una certa lunghezza, una certa massa, ecc). L’esistenza di tali relazioni ci consente di ricavare alcune grandezze da altre grandezze, così che, per esempio, la forza può essere derivata dalla massa e dall’accelerazione tramite l’equazione $F=ma$, e l’accelerazione può essere derivata dalla lunghezza e dalla durata (mi permetto: si è soliti dire “dal tempo”, ma ovviamente si tratta di un errore: il tempo, come lo spazio, non è una grandezza, mentre lo è la durata, come la lunghezza) tramite l’equazione $a=d^2p(t)/dt^2$. Sistemizzando questa struttura di derivazione, si scelgono alcune grandezze, chiamate “grandezze di base”, da cui si possono derivare tutte le altre, dove una grandezza di base è dunque una “grandezza appartenente a un sottoinsieme convenzionalmente selezionato di un sistema di grandezze, nel quale nessuna delle grandezze del sottoinsieme può essere espressa come combinazione delle altre” (VIM, def. 1.4).

Il nuovo SI mantiene esplicitamente questa posizione, come è chiaro nella bozza della prossima edizione della Brochure SI: “Physical quantities can be organized in a system of dimensions, where the system used is decided by convention. Each of the seven base quantities used in the SI is regarded as having its own dimension. [...] All other quantities, with the exception of counts, are derived quantities, which may be written in terms of base quantities according to the equations of physics. The dimensions of the derived quantities are written as products of powers of the dimensions of the base quantities using the equations that relate the derived quantities to the base quantities.” (p.19).

La distinzione, in un sistema di grandezze, tra grandezze di base e grandezze derivate è dunque finalizzata a standardizzare l’analisi dimensionale, quello che la Brochure SI chiama un “sistema di dimensioni”. Senza spiegare le ragioni di questa scelta, il nuovo SI mantiene il suo fondamento nel Sistema Internazionale di grandezze (ISQ), che è il “sistema di grandezze, basato sulle sette grandezze di base: lunghezza, massa, tempo, corrente elettrica, temperatura termodinamica, quantità di sostanza, e intensità luminosa” (VIM, def. 1.6; si veda anche la tabella 3 a pag.19 della bozza della prossima edizione della Brochure SI). Benché la scelta sia dichiaratamente “per convenzione”, ha senso chiedersi perché proprio queste sette. E’ una domanda che si pose anche Percy Bridgman, uno dei fondatori dell’analisi dimensionale: “what kinds of quantity should we choose as the fundamentals in terms of which to measure the others?”. La sua risposta è che “these are the quantities which, according to the particular set of rules of operation by which we assign numbers characteristic of the phenomenon, are regarded as fundamental and of *an irreducible simplicity*” (corsivo mio) (P.W. Bridgman, *Dimensional analysis*, Yale University Press, 1922, 1963; p.16 e 18). Pare sia perciò, con buone ragioni, la semplicità il criterio per cui per esempio assumiamo come grandezza di base la lunghezza, così che $\dim \text{lunghezza} = L$ e perciò $\dim \text{accelerazione} = LT^{-2}$, invece di scegliere l’accelerazione come grandezza di base, per cui sarebbe invece $\dim \text{accelerazione} = A$ e $\dim \text{lunghezza} = AT^2$ (a proposito di questa notazione si veda il VIM def.1.7).

D’altra parte, questo criterio non è stato adottato nel caso della grandezza elettrica di base: Giovanni Giorgi notò che “besides [L], [M], [T], a fourth fundamental dimension is introduced; this may be any one of the electric and magnetic magnitudes, for instance, the quantity of electricity [Q]” (G. Giorgi, *Memorandum on the M.K.S. system of practical units*, published by the Central Office of the IEC, 1934; p.6 – da allora la notazione “[L]” è stata cambiata in “L”), ma poi data l’equazione $I=dQ(t)/dt$ si

è scelta come grandezza di base l'intensità della corrente elettrica I e non la quantità di carica elettrica Q .

Il quadro, piuttosto confuso dunque, si completa introducendo finalmente le unità di base (se le grandezze di base sono grandezze in senso generale, le unità di base sono grandezze individuali: ogni unità, di base o derivata, è perciò istanza di una grandezza generale: il metro è una lunghezza, il chilogrammo è una massa, e così via). La Brochure SI, né nella versione attuale né nella bozza della prossima edizione, non definisce cosa sia un'unità di base, e solo nota che “historically, SI units have been presented in terms of a set of – most recently seven – base units. All other units, described as derived units, are constructed as products of powers of the base units.” (p.8). La relazione tra unità di base e unità derivate è strutturalmente identica alla relazione tra grandezze di base e grandezze derivate: non stupisce perciò la definizione che dà il VIM, secondo cui un'unità di base è una “unità di misura adottata convenzionalmente per una grandezza di base” (def.1.10). La sintesi parrebbe semplice e non controversa:

1. un sistema di unità è definito in riferimento a un sistema di grandezze, e
2. ogni unità di base in un sistema di unità è definita come istanza di una grandezza di base del sistema di grandezze corrispondente; perciò
3. fintanto che il SI è definito in riferimento all'ISQ,
4. le unità di base del SI sono le unità scelte per le grandezze di base dell'ISQ.

Certo, il criterio di scelta delle grandezze di base dell'ISQ non sembra essere stato mantenuto in modo consistente (di nuovo: pare più semplice una grandezza come la quantità di carica elettrica che non una come l'intensità di corrente elettrica), ma questo è un tema per l'ISQ, non per il SI. Perché allora si sostiene che con il nuovo SI la distinzione tra unità di base e unità derivate (che non pare avere alcunché di confuso o di arbitrario, come invece dichiarato da Mills) potrebbe essere eliminata?

Non conosco alcuna “risposta ufficiale” a questa domanda, ma trovo un indizio in una peculiare ammissione nella bozza della prossima edizione della Brochure SI: “Prior to the definitions adopted in 2018, the SI was defined through seven base units from which the derived units were constructed as products of powers of the base units. Defining the SI by fixing the numerical values of seven defining constants has the effect that this distinction is, in principle, not needed, since all units, base as well as derived units, may be constructed directly from the defining constants. Nevertheless, the concept of base and derived units is maintained, not only because it is useful and historically well established, but also because it is necessary to maintain consistency with the International System of Quantities (ISQ) defined by the ISO/IEC 80000 series of Standards, which specify base and derived quantities to which the SI base and derived units necessarily correspond.” (p.12).

Il lettore avrà già notato che, nell'elenco delle definizioni che abbiamo introdotto e discusso finora, ne manca una, che in effetti è quella centrale per il nostro discorso: *cos'è un sistema di unità?* Ancora una volta ricorriamo al VIM: è un “insieme di unità di base e di unità derivate, congiuntamente ai loro multipli e sottomultipli, definito in conformità a determinate regole, per un sistema di grandezze” (def.1.13). Si noti che in questa definizione non si sostiene che in un sistema di unità le unità di base siano, in qualche senso, “primitive” e che il sistema debba essere costruito a partire dalle unità di base. In questo il VIM è semplice e consistente, dato che definisce – lo ripeto – ‘unità di base’ come “unità di misura adottata convenzionalmente per una grandezza di base” (def.1.10): nulla delle modalità di costruzione del sistema di unità o della struttura delle definizioni delle unità ha a che vedere con la distinzione tra unità di base e unità derivate.

L'interpretazione che propongo è a questo punto ovvia: l'idea secondo cui il nuovo SI supera la distinzione tra unità di base e unità derivate è fondata su un assunto implicito: come unità di base del SI sono state considerate non solo (o non tanto) le unità delle grandezze di base dell'ISQ, ma anche (o soprattutto) le unità su cui si è scelto di costruire il sistema. Il sistema complessivo è perciò stato basato su due criteri indipendenti: un qualche concetto di "semplicità", per scegliere le grandezze di base dell'ISQ, e un qualche concetto di "primitività", per scegliere le unità di base del SI. Se finora si era riusciti a soddisfare contemporaneamente i due criteri in modo sufficientemente credibile, la struttura rivoluzionaria del nuovo SI rivela che questo, finora implicito, aggiustamento non è più possibile.

E una situazione rivoluzionaria giustifica qualche cambiamento. A un estremo, la posizione più rivoluzionaria mi pare quella di Newell, che sostiene non solo che le unità di base "are gone", ma anche che il nuovo SI richiede in effetti un nuovo ISQ, in cui le grandezze di base sono "frequency, velocity, action, electric charge, heat capacity, amount of substance, and luminous intensity" (p.36), cioè le grandezze generali di cui le costanti alla base del nuovo SI sono istanze. Evidentemente il criterio di scelta qui non è più la semplicità, à la Bridgman (solo per esempio, l'azione non è esattamente una grandezza semplice da comprendere senza una buona base di fisica), e si inverte anzi la priorità, rendendo l'ISQ dipendente dal SI. La versione più conservativa assume invece di mantenere le definizioni, semplici e consistenti, del VIM, rinunciando all'implicita assunzione che le unità di base siano definite in modo primitivo. Benché in modo meno chiaro di quello che avrebbe potuto, questa pare essere la posizione adottata dal CIPM.