

“Maestra, cos’è un kilo?”

Luca Mari

Tutto_Misure, 3, 2019

[27.7.19]

Come previsto, il 20 maggio scorso, in coincidenza con la Giornata della Metrologia, è entrato in vigore il nuovo Sistema Internazionale di unità (il cosiddetto “revised SI”). Sul sito del BIPM sono disponibili il testo della Risoluzione 1 della XXVI Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (CGPM) che ha introdotto il nuovo SI (www.bipm.org/utis/common/pdf/CGPM-2018/26th-CGPM-Resolutions.pdf), e la nuova edizione della Brochure SI (www.bipm.org/en/publications/si-brochure), in cui il nuovo SI è presentato ampiamente. Di esso si è scritto ampiamente (anche solo per limitarsi a questa rubrica, nei numeri 2 e 3 del 2015, nel numero 1 del 2016, e nel numero 4 del 2018), anche mettendone in evidenza gli aspetti problematici o controversi, e la sezione “Didattica” del sito web del Gruppo Misure Elettriche ed Elettroniche (www.gmee.org) contiene le slide di alcune presentazioni divulgative sullo stesso tema. Se ne potrebbe concludere che a questo punto non ci sia altro da dire: il SI “basato sulle costanti” è un fatto. Vorrei però offrire qui qualche considerazione su un tema che non ha a che vedere con le basi scientifiche e tecnologiche del SI, e che riguarda invece *il suo ruolo sociale*, e di conseguenza *la sua comunicabilità e comprensibilità sociale*.

Che le unità di misura siano importanti nella società, e non solo nei laboratori di ricerca, è a sua volta un fatto: attraverso la disseminazione di campioni tarati opportunamente, unità di misura accettate universalmente rendono possibile la riferibilità metrologica dei risultati di misura. Per fare un esempio ovvio, se misurando la lunghezza di oggetti diversi in luoghi e momenti diversi si ottengono risultati di misura compatibili (e dunque lo stesso valore misurato, a meno dell’incertezza di misura), siamo garantiti che gli oggetti abbiano lunghezze non distinguibili entro l’incertezza di misura (e dunque idealmente abbiano la stessa lunghezza). Si tratta, evidentemente, di una questione di qualità di informazione acquisita empiricamente, rilevante in molti ambiti della nostra società.

Il sistema metrologico si fonda su un principio di delega di responsabilità, e più il sistema è grande e complesso e maggiore è la delega: coloro che misurano sul campo e coloro che usano i risultati di misura possono non essere esperti di campioni primari e campioni nazionali, di confronti chiave, e così via. Ma anche costoro si riferiscono alle unità di misura quando operano con valori di grandezze. Dunque domande come *cos’è il secondo?*, *cos’è il metro?*, *cos’è il kilogrammo?* vanno oltre le questioni di competenza degli Istituti Metrologici Nazionali, e sono del tutto lecite. In più, in un contesto di “datificazione” (big data, data flood, ...) progressiva, rendere le persone consapevoli del significato dei dati che trattano potrebbe essere considerata una condizione di inclusione sociale, un contributo per evitare l’irrelevanza di cui così incisivamente discute nei suoi libri Yuval Harari (www.ynharari.com). Insomma, se le risposte alle domande interne al sistema rimangono semplici (cosa significa “due metri”? risposta: è un modo per riferirsi alla lunghezza due volte il metro, la stessa lunghezza a cui ci si può riferire per esempio con “duecento centimetri”, e così via), la domanda fondamentale *cos’è l’unità di misura?* (della durata, della lunghezza, della massa, e così via) non ha una risposta così ovvia.

In un più o meno lontano passato, la risposta era semplice: l’unità era la proprietà di un oggetto. Per esempio, fino al 1960 il metro era la lunghezza di una certa barra metallica conservata al BIPM, e fino al 20 maggio 2019 il kilogrammo era la massa del prototipo del kilogrammo (IPK, anch’esso conservato al BIPM). Ciò rendeva i fondamenti della metrologia comprensibili anche ai bambini, a

cui poteva essere raccontata la storia del “museo di Sèvres”. Se i problemi di questa strategia di definizione sono chiari (l’accuratezza sempre maggiore richiesta non era più garantita dalle proprietà di oggetti macroscopici: “*the international Prototype does not define the metre with an accuracy adequate for the present needs of metrology*”, secondo il CGPM nel 1960), e sono stati risolti dalla nuova strategia, in cui le unità sono definite a partire da grandezze considerate universali e costanti in accordo alle teorie disponibili, si deve anche ammettere che la nuova strategia ha reso le unità ben più complesse da comprendere. *E’ possibile spiegare oggi cosa sono le unità?* E, nel caso di risposta positiva, *che tipo di risposta si può dare?*

Queste domande sono poi rese più concrete e delicate a proposito delle norme tecniche, che si rivolgono a un pubblico vasto e quindi dovrebbero essere il più comprensibili possibile, e che riportano per ora le definizioni precedenti alla recente riforma. Per esempio, in questo momento la norma IEC 60050 – cioè il Vocabolario Internazionale di Elettrotecnica (IEV), chiamato anche “Electropedia” nella sua versione online – definisce tuttora il kilogrammo come “*SI unit of mass, equal to the mass of the object called the “international prototype of the kilogram” kept at the International Bureau of Weights and Measures (BIPM)*” (www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=112-02-06). Come dovrebbe essere riscritta questa ormai obsoleta definizione?

Per esplorare il problema, è utile analizzare la struttura delle nuove definizioni, per identificarne le ragioni di complessità. La situazione più semplice è quella del secondo. Confrontiamo la definizione precedente con l’attuale (entrambe prese dalla Brochure SI, ottava e nona – l’attuale – edizione rispettivamente):

<i>definizione fino al 20 maggio 2019</i>	<i>definizione dal 20 maggio 2019</i>
The second is the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the caesium 133 atom.	[<i>prima definizione</i>] The unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom $\Delta\nu_{Cs}$ is 9 192 631 770 Hz. [<i>seconda definizione</i>] The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{Cs}$, the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1} .

La struttura delle due definizioni è questa:

Il secondo è la durata del multiplo n della durata costante ϑ_a del fenomeno a (cioè $s =_{\text{def}} n\vartheta_a$).	[<i>definizione primaria, della costante</i>] Il valore numerico in hertz della frequenza costante ν_a del fenomeno a è n (cioè $\nu_a/\text{Hz} =_{\text{def}} n$). [<i>definizione derivata, dell’unità</i>] Il secondo è la durata tale che il valore numerico in $\text{Hz} =_{\text{def}} s^{-1}$ della frequenza costante ν_a del fenomeno a è n (cioè $s =_{\text{def}} n/\nu_a$).
---	--

Poiché né il fenomeno a né il multiplo n sono cambiati, il contenuto empirico delle due definizioni è lo stesso. Nondimeno, la nuova definizione è strutturalmente più complessa della precedente.

La situazione più semplice sarebbe stata quella in cui fosse stato possibile scegliere costanti uguali alle unità. Se fosse noto un fenomeno x di durata costante ϑ_x esattamente pari al secondo, e tale per cui la definizione tradizionale sarebbe stata perciò $s =_{\text{def}} \vartheta_x$, anche la definizione a costanti esplicite sarebbe non così più complessa:

[*definizione primaria, della costante*] Il valore numerico in secondi della durata costante ϑ_x del fenomeno x è 1 (cioè $\vartheta_x/s =_{\text{def}} 1$).

[*definizione derivata, dell'unità*] Il secondo è la durata tale che il valore numerico in secondi della durata costante ϑ_x del fenomeno x è 1 (cioè $s =_{\text{def}} \vartheta_x$).

A partire da questa versione (inapplicabile perché non conosciamo un fenomeno x con queste caratteristiche), ricostruiamo una per una le cause di complessità nelle definizioni delle tre unità meccaniche nel SI (secondo, metro, e kilogrammo, considerando che sarebbe particolarmente auspicabile che le loro definizioni fossero comprensibili), e vediamo come le si potrebbe gestire.

1. *L'unità può essere definita come un multiplo n diverso da 1 della costante.*

Questo non pare un problema: è semplice comprendere, per esempio, che l'unità di durata sia non la durata di un certo fenomeno ma n volte quella durata, per un certo n dato.

2. *L'unità può essere definita da una costante di una specie diversa.*

Nel caso del secondo, definito da una frequenza invece che da una durata, e del metro, definito da una velocità (la velocità della luce nel vuoto) invece che da una lunghezza, ricostruire la specie dell'unità a partire dalla specie della costante non è così complesso, e può essere una buona ragione per introdurre qualche equazione intuitiva tra grandezze, come $\text{durata} = \text{frequenza}^{-1}$ e $\text{lunghezza} = \text{velocità} \times \text{durata}$. Ma nel caso del kilogrammo, definito da un'azione (la costante di Planck), le cose diventano più complesse, dovendo spiegare cos'è un'azione e che $\text{massa} = \text{azione} \times \text{durata} \times \text{lunghezza}^{-2}$. Non è chiaro come rendere comprensibile ciò a chi non abbia qualche base di fisica.

3. *L'unità può essere definita mediante altre unità.*

Mentre il secondo è definito solo da una costante (la frequenza del cesio), il metro è definito da una costante (la velocità della luce nel vuoto) e da un'altra unità, predefinita (il secondo), e il kilogrammo è definito da una costante (la costante di Planck) e da due altre unità, predefinite (il secondo e il metro). Analogamente a quanto commentato nel punto precedente, può essere una buona ragione per introdurre il concetto di sistema di unità (che non è infatti una collezione di unità tra loro indipendenti).

4. *L'unità può essere definita da una costante che non è la proprietà di alcun fenomeno.*

Il secondo e il metro sono definiti da costanti che sono proprietà di fenomeni (una certa transizione del cesio, il moto della luce nel vuoto) e questo, a meno delle cause di complessità presentate nei punti precedenti, le mantiene nella linea delle definizioni tradizionali delle unità. Anche a questo proposito, la comprensibilità della definizione del kilogrammo è più problematica, dato che interpretare la costante di Planck come la proprietà di un fenomeno non è ovvio (e infatti la Brochure SI scrive che, come effetto delle definizioni, “il secondo è uguale alla durata di...” e “il metro è uguale alla lunghezza di...”, ma a questo proposito non menziona il kilogrammo). Certo, per esempio attraverso l'equazione $E=hf=mc^2$, e quindi $m=hf/c^2$, e avendo fissato i valori della costante di Planck h e della velocità della luce nel vuoto c , sarebbe consistente con la definizione concludere che il kilogrammo è la massa equivalente di un fotone a una data frequenza, ma, anche al di là della

complessità del significato di ciò, questa sarebbe comunque una conseguenza della definizione, non la definizione.

5. La definizione dell'unità è derivata dalla definizione di un insieme di costanti.

Questa è la differenza più evidente rispetto alle definizioni precedenti, e quella che ha forse generato le maggiori incomprensioni, anche data la formulazione formalmente circolare delle nuove definizioni (il secondo è definito in termini del secondo – si veda la definizione riportata nella prima tabella: la definizione del secondo contiene un riferimento a “s⁻¹” –, e così via).

Per concludere. Sarei contento di sbagliarmi, ma questa analisi pare non lasciare alternative: senza un po' di basi di fisica, le unità di misura del SI non sono comprensibili. Non è implausibile che in particolare nei testi per la scuola primaria si continuerà a fare riferimento alle unità come fossero proprietà di oggetti, sostituendo così le definizioni delle unità con possibili realizzazioni delle definizioni, e perciò perdendo in correttezza per guadagnare in comprensibilità.

Più controversa è invece la questione di come introdurre nelle norme tecniche delle definizioni che siano (i) conformi alla Risoluzione del CGPM, (ii) corrette in senso terminologico (e quindi in particolare formalmente non circolari), e (iii) comprensibili a un pubblico vasto. Possiamo ipotizzare due opzioni, entrambe terminologicamente corrette. La prima è più fedele alla Risoluzione del CGPM, ma porta a definizioni meno comprensibili:

- secondo: durata tale che il valore numerico della frequenza del cesio è ... assumendo come unità questa durata;
- metro: lunghezza tale che il valore numerico della velocità della luce nel vuoto è ... assumendo come unità questa lunghezza divisa per il secondo;
- kilogrammo: massa tale che il valore numerico della costante di Planck è ... assumendo come unità questa massa moltiplicata per il metro al quadrato e divisa per il secondo.

La seconda opzione è opposta, e privilegia la comprensibilità al prezzo di nascondere la struttura a costanti esplicite:

- secondo: durata di ... periodi del cesio;
- metro: lunghezza percorsa in ... secondi dalla luce nel vuoto.

Per le ragioni presentate sopra, non è però chiaro come si potrebbe definire il kilogrammo in accordo a questa struttura: significa dunque che la sfida della comprensibilità delle definizioni del nuovo SI non si può vincere?

Grazie in anticipo ai lettori che vorranno proporre i loro commenti su questo tema.