

## La nuova definizione di kilogrammo

La massa è la terza grandezza fondamentale del Sistema Internazionale di unità di misura (SI) e la sua unità di misura è il kilogrammo. Fino al 20 maggio 2019, l'unità standard è definita internazionalmente come il kilogrammo campione, un cilindretto di Platino-iridio, conservato presso il Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) di Sèvres (Parigi). Si tratta dell'ultimo standard di una grandezza fondamentale costituito da un campione artificiale, la cui origine concettuale si deve al periodo 1791-1799, prossimo alla rivoluzione francese, quando si decise che il kilogrammo campione fosse pari alla massa di un litro di acqua ( $1 \text{ dm}^3$ ) alla pressione di 1 atm e alla sua massima densità (ad una temperatura di  $T = 3,98^\circ \text{C}$ ). Nel corso del tempo, questa definizione ha posto diversi problemi pratici. È noto infatti che i migliori standard di unità di misura devono soddisfare diversi criteri, tra cui: a) essere stabili nel tempo, b) essere precisi, c) essere facilmente riproducibili in ogni parte del mondo. Il kilogrammo campione, costituito da un cilindretto di materiale conservato in una teca, non soddisfa il criterio c) in quanto la sua riproducibilità è tutt'altro che facile, ma non è risultato nemmeno stabile nel tempo. Si è osservata sperimentalmente una variabilità nel tempo delle misure di massa delle copie del kilogrammo campione fatte con il kilogrammo campione stesso. Tale variabilità, a livello di decine di  $\mu\text{g}$ , è stata attribuita a fenomeni di cristallizzazione, degassamento e cambiamenti nella struttura reticolare dei vari campioni di massa, incluso quello di riferimento principale.

Per migliorare significativamente la precisione delle misure di massa nel 2018 si è quindi deciso di ridefinire l'unità di misura della massa secondo una definizione moderna che non facesse uso di prodotti costruiti dall'uomo. Poiché dall'unità di massa dipendono i valori di diverse costanti fisiche universali, è stato sufficiente elevare una di queste a costante nota senza incertezza per derivare implicitamente una nuova definizione del kilogrammo campione. La grandezza scelta è stata la costante di Planck  $h$ , che caratterizza i fenomeni del mondo microscopico. Diverse misure di precisione hanno contribuito a determinarne il migliore valore, che nel 2018 era pari a  $h = 6.626\,070\,150(\pm 69) \cdot 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s}$ , con una incertezza relativa di  $\epsilon_r = 1.0 \cdot 10^{-8}$ . Come già avvenuto con un'altra costante della natura, la velocità della luce, che nel 1983 è stata definita pari a  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ , senza incertezze, ed è stata usata per la definizione moderna di metro (il metro è quella distanza percorsa dalla luce in  $1/299\,792\,458$  secondi), così la nuova valutazione di  $h$  permette di ridefinire il kilogrammo campione. Poiché nelle dimensioni di  $h$  compaiono sia le lunghezze che i tempi, il nuovo standard di massa dipende sia dalla definizione di metro sia dalla definizione di secondo, che è dato in termini di uno *standard naturale*. Il secondo è infatti definito sulla base della frequenza  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  della radiazione emessa da un atomo di Cesio-133 quando effettua una transizione iperfine dal primo stato eccitato allo stato fondamentale. La costante  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , il cui valore è definito per convenzione pari a  $9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$ , senza incertezze, permette di definire il secondo come  $1 \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$ , cioè pari al tempo di  $9\,192\,631\,770$  oscillazioni della radiazione emessa da quel particolare stato iperfine di Cesio-133.

Nel Sistema Internazionale di unità di misura, in vigore dal 20 maggio 2019, la costante di Planck ha il valore  $h = 6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s}$ , senza

alcuna incertezza. Ne consegue, sulla base della definizione di secondo e di metro, che è possibile combinare queste due unità di misura con la costante universale  $h$  per avere la nuova definizione di kilogrammo campione:

**Il kilogrammo, simbolo kg, è l'unità di massa del SI. È definito tenendo fisso il valore numerico della costante di Planck, pari a  $h = 6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ , quando espresso in unità J s, pari a  $\text{kg m}^2 \text{s}$ , dove il metro e il secondo sono definiti in termini di  $c$  e di  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .**

Ne consegue che si può derivare come definizione esplicita del kilogrammo la quantità:

$$1 \text{ kg} = \left( \frac{h}{6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34}} \right) \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \approx 1.475\,521\,4 \cdot 10^{40} \frac{h\Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}$$

In questo modo il kilogrammo campione è agganciato a due costanti della natura  $h$  e  $c$  e ad un processo naturale facilmente riproducibile in ogni parte del mondo caratterizzato da una costante nota senza incertezze ( $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ).

Dal punto di vista pratico, per l'uso quotidiano, la nuova definizione è del tutto equivalente alla precedente, il kilogrammo ha sempre lo stesso valore effettivo. È solo per le misure di precisione, dove l'incertezza relativa può essere sensibilmente inferiore a  $10^{-7}$ , che il nuovo standard mostra la sua forza: non dobbiamo più temere possibili variazioni del campione di riferimento. Anzi questo è ora collegato a costanti universali o standard naturali, facilmente misurabili e riproducibili in ogni parte del mondo, in accordo con quei principi di universalità, già espressi ai tempi della Rivoluzione Francese, alla base del Sistema Internazionale.