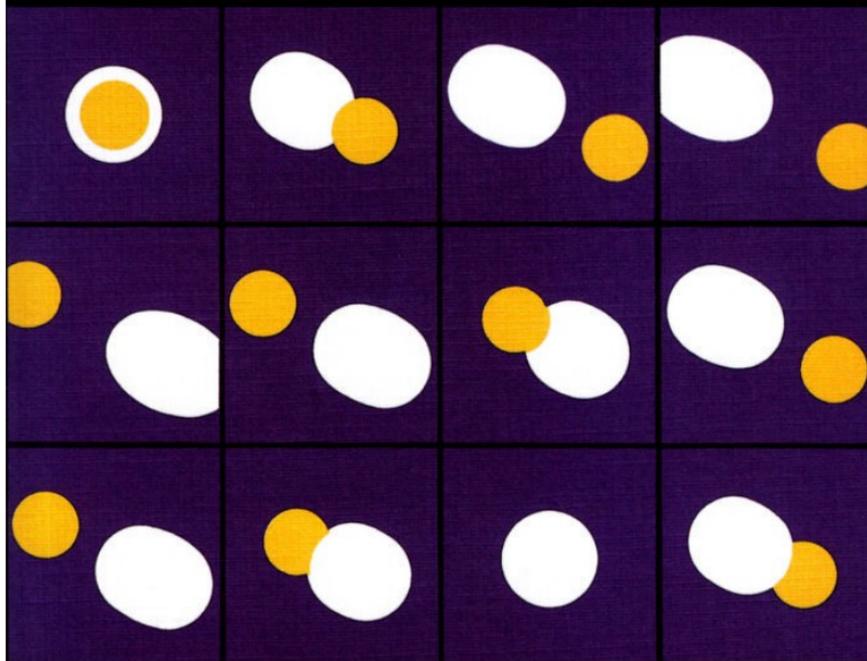


Richard Feynman

# LA LEGGE FISICA



Universale Bollati Boringhieri

leggi di conservazione possano essere usate per indovinare nuove leggi.

Sono state proposte altre leggi dello stesso tipo di quelle di conservazione additive. Per esempio i chimici una volta credevano che, qualsiasi cosa accadesse, il numero degli atomi di sodio restasse invariato. Invece gli atomi di sodio non sono permanenti. È possibile trasmutare gli atomi da un elemento a un altro in modo che l'elemento originario sparisca totalmente. Un'altra legge che per un po' si credette vera era quella che la massa totale di un oggetto rimanesse la stessa. Questo dipende da come si definisce la massa e se si coinvolge l'energia. Le legge di conservazione della massa è contenuta nella prossima legge che discuterò, la legge di conservazione dell'energia. Di tutte le leggi di conservazione, quella che si riferisce all'energia è la più difficile e astratta, eppure è la più utile. È più difficile da capire di quelle che ho descritto finora, perché nel caso della carica e negli altri casi, il meccanismo è chiaro, cioè è più o meno la conservazione di oggetti. Non è proprio così, per il fatto che otteniamo cose nuove da quelle vecchie, ma in ultima analisi è solo questione di contare.

La conservazione dell'energia è un po' più difficile, perché questa volta abbiamo un numero che non cambia col tempo, ma questo numero non rappresenta nessuna cosa particolare. Vorrei portare un paragone terra-terra per cercare di rendere la cosa più chiara.

Immaginatevi una madre che lascia un bambino solo in una camera con 28 cubi assolutamente indistruttibili. Il bambino gioca con i suoi cubi tutto il giorno, e, quando la madre ritorna, trova che ci sono

effettivamente 28 cubi; essa controlla sempre la conservazione dei cubi! Questo va avanti per qualche giorno fino a che una volta, quando entra, scopre che ce ne sono solo 27. Tuttavia ne trova uno fuori della finestra, il bambino l'ha gettato fuori. La prima cosa che dovete osservare a proposito delle leggi di conservazione è che bisogna fare attenzione che la roba che si vuole controllare non esca fuori attraverso il muro. La stessa cosa potrebbe accadere, in senso inverso, se un amico venisse a giocare con il bambino portando con sé dei cubi. Ovviamente queste sono cose che vanno controllate quando si parla delle leggi di conservazione. Supponiamo che un giorno la madre venga a contare i cubi e trovi che ce ne sono solo più 25, ma che sospetti che il bambino abbia nascosto i rimanenti tre in una scatola vuota. E così dice: “Adesso apro la scatola.” “No — risponde il bambino — non la puoi aprire.” Essendo una madre molto astuta ella dirà: “So che quando la scatola è vuota pesa 480 grammi, e che ogni cubo pesa 90 grammi, così adesso peserò la scatola.” Così, facendo il totale del numero dei cubi, otterrebbe

$$\text{N. dei cubi visti} + \frac{\text{Peso della scatola} - 480\text{g}}{90\text{g}}$$

e questo dà 28. Questo funziona per un po', ma poi un giorno il conto non torna più. Tuttavia nota che l'acqua sporca nel lavandino ha cambiato livello. Sa che l'acqua è profonda 12 centimetri quando non c'è nessun cubo, e che se ci fosse un cubo salirebbe di mezzo centimetro, così aggiunge un altro termine e ottiene

$$\begin{aligned} & \text{N. dei cubi visti} + \frac{\text{Peso della scatola} - 480 \text{ g}}{90 \text{ g}} + \\ & + \frac{\text{Altezza dell'acqua} - 12 \text{ cm}}{0,5 \text{ cm}}, \end{aligned}$$

e questo da di nuovo 28. A mano a mano che il bambino diventa più ingegnoso anche la madre diventa ugualmente ingegnosa, e così nel conto deve aggiungere sempre più termini che rappresentano i cubi, ma che, da un punto di vista matematico, sono calcoli astratti, perché i cubi non si vedono.

Ora vorrei dirvi quello che c'è in comune tra questa mia analogia e la legge della conservazione dell'energia, e quello che c'è invece di diverso. Prima supponiamo che in tutta la vicenda non si siano mai visti i cubi. Il termine "N. dei cubi visti" non è mai incluso. Allora la madre dovrebbe sempre calcolare un sacco di termini come "cubi nella scatola", "cubi nell'acqua" e così via. Per l'energia c'è questa differenza, che non ci sono cubi, almeno per quello che ne sappiamo. E, a differenza del caso dei cubi, per l'energia i numeri che vengono fuori non sono interi. Forse alla povera madre, quando sta calcolando un termine, potrebbe venir fuori 6 e 1/8 cubi, e quando ne calcola un altro 7/8 di cubo, e il resto 21, in modo che il totale restasse 28. Con l'energia le cose vanno pressappoco così.

Quello che abbiamo scoperto per l'energia è che abbiamo uno schema con un insieme di leggi. Per ogni insieme diverso possiamo calcolare un numero per i vari tipi di energia. Quando sommiamo insieme tutti questi numeri per tutte le forme di energia, otteniamo

sempre lo stesso totale. Ma per quanto ne sappiamo, non c'è nessuna unità reale, nessuna pallina unitaria. È una cosa astratta, puramente matematica, che ci sia un numero tale che ogni volta che lo si calcola non cambia mai. Non riesco a spiegarvelo meglio di così.

Questa energia ha ogni sorta di forme, analoghe ai blocchi nella scatola, nell'acqua e così via. C'è l'energia dovuta al moto chiamata energia cinetica, l'energia dovuta all'interazione gravitazionale (energia potenziale gravitazionale), l'energia termica, l'energia elettrica, l'energia luminosa, l'energia elastica nelle molle ecc., l'energia chimica, l'energia nucleare, e poi c'è anche l'energia che una particella ha a causa della sua stessa esistenza, e che dipende direttamente dalla sua massa. Quest'ultima è un contributo di Einstein, come indubbiamente saprete.  $E = mc^2$  è la famosa legge di cui sto parlando.

Fra le numerose forme di energia che ho menzionato esistono varie relazioni sulle quali sappiamo diverse cose. Per esempio, quella che chiamiamo energia termica è per una gran parte semplicemente l'energia cinetica del moto delle particelle che sono all'interno di un corpo. L'energia elastica e quella chimica hanno ambedue la stessa origine, cioè le forze tra gli atomi. Quando gli atomi si riordinano in una nuova struttura, una parte dell'energia cambia, e se questa quantità varia, significa che anche un'altra quantità deve variare. Per esempio, se si brucia qualche cosa, l'energia chimica varia, e si trova calore dove prima non ce n'era, perché la somma deve rimanere la stessa. L'energia elastica e quella chimica derivano ambedue da interazioni fra atomi, e

ora sappiamo che queste interazioni sono una combinazione di due cose, l'una energia elettrica e l'altra di nuovo energia cinetica; questa volta però la formula viene dalle leggi della meccanica quantistica. L'energia luminosa non è altro che energia elettrica, perché la luce è stata interpretata come un'onda elettromagnetica.

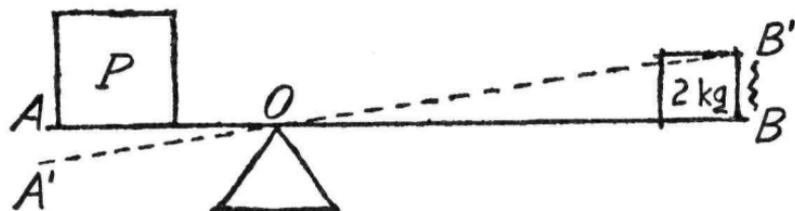


Figura 15

L'energia nucleare non può essere rappresentata in termini delle altre; in questo momento non posso dire altro se non che è il risultato delle forze nucleari. Non sto solo parlando soltanto dell'energia liberata. Nel nucleo dell'uranio c'è una certa quantità di energia, e quando esso si disintegra, varia l'energia che rimane nel nucleo; l'energia totale del mondo però non cambia, e perciò in quel processo si produce un sacco di calore e di altra roba per pareggiare il bilancio.

Questa legge di conservazione è molto utile e vi darò ora alcuni esempi semplici per far vedere come, conoscendo la legge di conservazione dell'energia e le formule per calcolare l'energia, possiamo comprendere altre leggi. In altre parole, molte altre leggi non sono indipendenti, ma sono solo modi nascosti di parlare della conservazione dell'energia. La più semplice è la

legge della leva (fig. 15). Abbiamo una leva su un perno. La lunghezza di un braccio è 20 centimetri e dell'altro 80 centimetri. Per prima cosa, devo darvi la legge per l'energia gravitazionale: se si ha un certo numero di pesi, si prende il peso di ciascuno, lo si moltiplica per l'altezza da terra, si fa la somma di questi prodotti su tutti i pesi e questo dà l'energia gravitazionale totale. Supponiamo di avere un peso di due chili sul braccio più lungo, e sull'altro un misterioso peso sconosciuto: l'incognita si chiama sempre  $X$ , ma noi, per far credere di saperne di più la chiameremo  $P$ ! Ora il problema è il seguente: come deve essere  $P$  per fare in modo che la leva sia equilibrata e oscilli liberamente su e giù? Se oscilla liberamente su e giù, ciò significa che l'energia è la stessa sia che la bilancia sia parallela al terreno, o inclinata in modo che il peso di due chili sia, diciamo, a 1 cm da terra. Se l'energia è la stessa, alla leva non importa molto in che posizione sia, e quindi non cade giù. Se il peso di due chili sale di un centimetro, di quanto scende  $P$ ? Dal diagramma (fig. 15) si può vedere che se  $AO$  è 20 cm e  $OB$  è 80 cm, allora quando  $BB'$  è 1 cm,  $AA'$  sarà  $1/4$  cm. Adesso applichiamo la legge per l'energia gravitazionale. Prima che succedesse qualche cosa, tutte le altezze erano zero, così l'energia totale era zero. Dopo che c'è stato il movimento, per avere l'energia di gravità, moltiplichiamo il peso 2 kg per l'altezza 1 cm e lo sommiamo al peso sconosciuto  $P$  per l'altezza che è  $-1/4$  cm. La somma di questo deve dare la stessa energia di prima, cioè zero. Così:

$$2 - \frac{P}{4} = 0 \quad , \text{ dunque } P \text{ deve essere } 8.$$

Ecco un modo di capire la semplice legge della leva, che naturalmente conoscevate già. È interessante però che non solo questa, ma centinaia di altre leggi della fisica possano essere collegate alle varie forme di energia, e vi ho mostrato questo esempio solo per farvi vedere come la cosa è utile.

L'unico inconveniente, però, è che in pratica le cose non sono così semplici, a causa dell'attrito del fulcro. Se qualcosa si muove, per esempio una sfera che rotola a un'altezza costante, si fermerà a causa dell'attrito. Che cosa è successo all'energia cinetica della sfera? La risposta è che l'energia del moto della sfera è andata nell'energia necessaria per accelerare gli atomi del pavimento e della sfera. Il mondo come lo vediamo su grande scala sembra una bella palla rotonda lucidata ma in realtà, quando lo guardiamo più in dettaglio, è assai più complicato, fatto com'è di miliardi di piccolissimi atomi con ogni sorta di forme irregolari. Quando lo si guarda molto attentamente, è come un masso molto ruvido, perché è fatto di piccole palline. Il pavimento è la stessa cosa, un affare ineguale fatto di palline. Quando rotolate questo masso enorme sul pavimento ingrandito potete vedere i piccoli atomi saltellare da tutte le parti. Dopo che esso è passato, gli atomi rimasti continuano ancora a muoversi un po' a causa dei movimenti cui sono stati sottoposti; così sul pavimento rimane un certo movimento, ossia dell'energia termica. A prima vista sembrava che la legge di conservazione fosse falsa, ma sappiamo che l'energia ha una tendenza a nascondersi, per cui abbiamo bisogno di termometri e di altri strumenti per accertarci che sia ancora lì. Il risultato di tutte queste

osservazioni è che l'energia è conservata, per quanto complicato sia il processo, e anche quando non conosciamo in dettaglio le leggi.

La prima dimostrazione della legge di conservazione dell'energia non fu data da un fisico, ma da un medico. La dimostrò per i topi; se si brucia del cibo si può trovare quanto calore è generato. Se si dà da mangiare la stessa quantità di cibo a dei topi, essa si cambia, con l'ossigeno, in anidride carbonica, nello stesso modo che nella combustione. Quando si misura l'energia, si trova sempre che le creature viventi si comportano esattamente come le cose inanimate. La legge della conservazione dell'energia è vera tanto per la vita quanto per gli altri fenomeni. Incidentalmente, è interessante che ogni legge o principio che conosciamo per le cose "morte", funziona altrettanto bene quando lo possiamo provare sul grande fenomeno della vita. Non c'è nessuna prova che quello che accade negli esseri viventi sia necessariamente diverso, almeno per quello che concerne le leggi fisiche, da quello che accade nelle cose inanimate, anche se gli esseri viventi possono essere assai più complicati.

La quantità di energia del cibo, che dice quanto calore, lavoro meccanico ecc. esso può generare, è misurata in calorie. Quando sentite parlare di calorie, non state mangiando una cosa chiamata calorie: questa è solo una misura della quantità di energia termica del cibo. I fisici spesso si sentono così superiori e intelligenti che agli altri piacerebbe qualche volta prenderli in castagna. Ora vi dirò qualche cosa per aiutarvi. Dovrebbero vergognarsi del modo in cui prendono l'energia e la misurano in un sacco di modi

diversi, con nomi diversi. È assurdo che l'energia possa essere misurata in calorie, in erg, in elettronvolt, in chilogrammetri, in cavalli vapore ora, in chilowattora, tutto per misurare la stessa cosa. È come avere il denaro in dollari, sterline e così via; ma a differenza dal sistema economico, in cui il rapporto può variare, queste strane cose hanno dei rapporti assolutamente garantiti. Un'analogia più vicina è quella con le sterline e gli scellini, dove ci sono sempre 20 scellini in una sterlina. Ma per complicare le cose il fisico invece di avere un numero come 20 usa magari dei rapporti irrazionali come 1,6183178 scellini per sterlina. Si potrebbe credere che almeno i moderni fisici teorici di alta classe usino un'unità comune, invece si trovano lavori con gradi Kelvin per misurare l'energia, megacicli, e adesso Fermi alla meno uno, l'ultima invenzione. Per quelli che vogliono una prova che i fisici sono dopotutto umani, la prova sta nell'idiozia di tutte le diverse unità che usano per misurare l'energia.

In natura ci sono numerosi fenomeni interessanti che pongono dei problemi curiosi riguardanti l'energia. Recentemente si sono scoperti degli oggetti chiamati *quasar*, che sono estremamente lontani e che irradiano una tale quantità di energia sotto forma di luce e onde radio che ci si chiede da dove venga. Se la conservazione dell'energia è vera, la condizione del *quasar* dopo che ha irradiato questa enorme quantità di energia deve essere diversa dalla sua condizione precedente. Ci si può chiedere se questa energia venga dall'energia gravitazionale, cioè se l'oggetto abbia subito un collasso gravitazionale, e si trovi quindi in una diversa condizione. Oppure questa grande emissione proviene

da energia nucleare? Nessuno lo sa. Potreste forse proporre che la legge della conservazione dell'energia è violata. Però, se in un oggetto studiato in maniera così incompleta come i *quasar* — essi sono talmente distanti che gli astronomi non riescono a vederli bene — qualcosa sembra essere in disaccordo con le leggi fondamentali, è molto improbabile che le leggi siano sbagliate; è più facile che siano i dettagli a essere sconosciuti.

Un altro interessante esempio dell'utilità della legge della conservazione dell'energia è nella reazione in cui un neutrone si disintegra in un protone, un elettrone, e un antineutrino. All'inizio si credeva che un neutrone diventasse un protone più un elettrone. Ma si poteva misurare l'energia di ogni particella, e quelle del protone e dell'elettrone insieme non davano quella del neutrone. C'erano due possibilità: poteva darsi che la legge della conservazione dell'energia non fosse giusta; e difatti Bohr,<sup>11</sup> per un po', suggerì che la legge funzionasse solo statisticamente, cioè in media. Ma adesso appare che l'altra possibilità è quella giusta, e cioè che il conto dell'energia non torni per la presenza di un'altra cosa che viene fuori, una cosa che ora chiamiamo un antineutrino. Questo antineutrino porta con sé dell'energia. Potreste dire che l'unica ragione di essere per l'antineutrino è per far tornare la legge della conservazione dell'energia. Tuttavia fa tornare anche molte altre cose, come la conservazione dell'impulso e altre leggi di conservazione, e molto recentemente è stato dimostrato che tali neutrini esistono veramente.

---

11 Niels Bohr, fisico danese.