

# Un bilancio sempre in pari

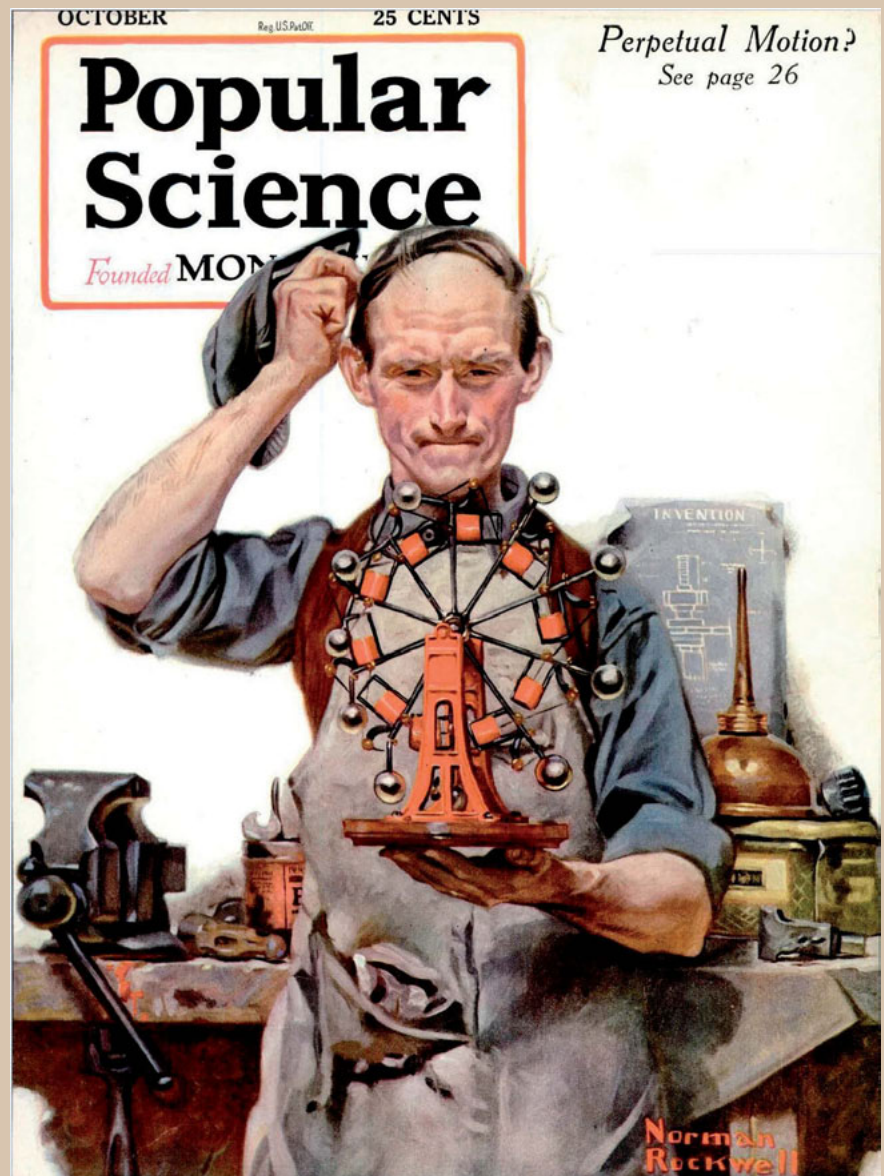
## La legge di conservazione dell'energia

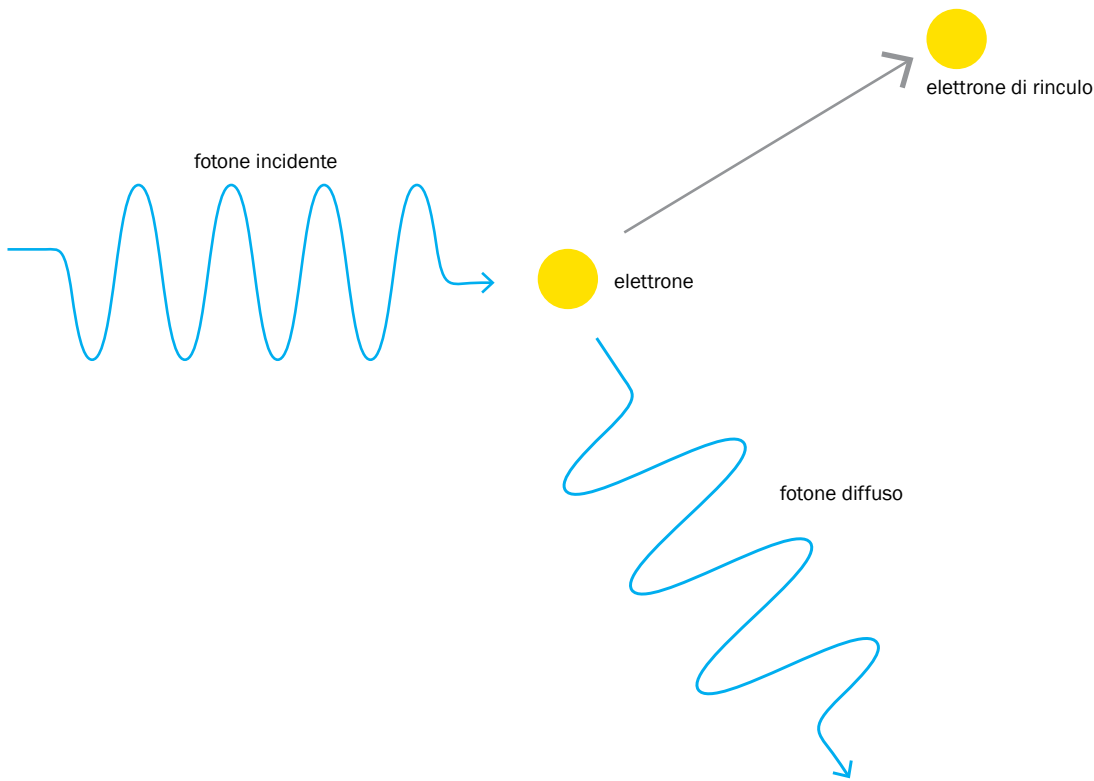
di Vincenzo Barone

Per secoli gli uomini hanno inseguito il sogno di realizzare il *perpetuum mobile*, una macchina in grado di produrre più di ciò che viene consumato - di creare energia dal nulla, diremmo oggi. Ancora nel 1911 l'Ufficio Brevetti americano si trovò costretto a emanare una circolare in cui, dopo aver ribadito l'impossibilità del moto perpetuo, stabiliva molto pragmaticamente che le domande di brevetto sarebbero state prese in esame solo previa presentazione di un prototipo funzionante.

Il motivo per cui il moto perpetuo è un'illusione è che esiste una legge fondamentale della natura - la legge di conservazione dell'energia - che lo vieta. Questa legge, centrale nella moderna visione fisica del mondo, fu acquisita, assieme al concetto stesso di energia, abbastanza tardi, solo verso la metà dell'800. Fu allora che, grazie ai lavori di alcuni fisici e fisiologi (in particolare Robert Mayer e Hermann von Helmholtz), si scoprì che, dato un sistema isolato, è possibile attribuire a esso una grandezza fisica - l'energia - che rimane costante nel tempo. La caratteristica peculiare di tale grandezza è che si presenta in varie forme, apparentemente diverse tra loro; ma se le addizioniamo tutte, senza dimenticarne nessuna, la somma si conserva, cioè mantiene lo stesso valore istante per istante. La prima forma di energia identificata, da Huygens e Leibniz, fu l'energia cinetica, cioè l'energia legata al movimento dei corpi. L'altra importante forma di energia è l'energia potenziale, l'energia dovuta alle interazioni (i pianeti possiedono un'energia potenziale gravitazionale; gli elettroni in un atomo possiedono un'energia potenziale elettrostatica, ecc.). Con la relatività abbiamo

a.  
L'ossessione del *perpetuum mobile* ha attraversato i secoli. La macchina per il moto perpetuo proposta attorno al 1230 dal francese Villard de Honnecourt non era molto diversa da quella raffigurata da Norman Rockwell su questa copertina di "Popular Science" del 1920.





b.  
La diffusione Compton è dovuta agli urti elastici tra fotoni ed elettroni liberi. Per la conservazione dell'energia, i fotoni diffusi hanno una lunghezza d'onda maggiore di quella dei fotoni incidenti.

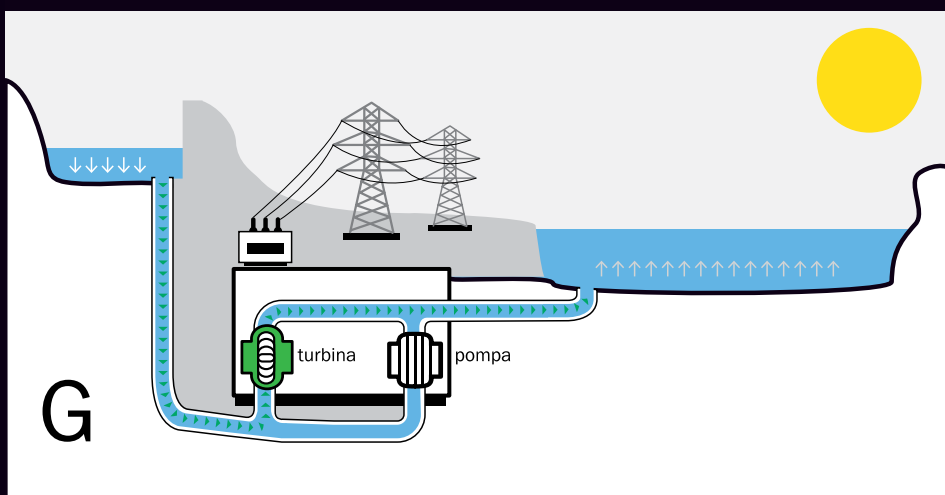
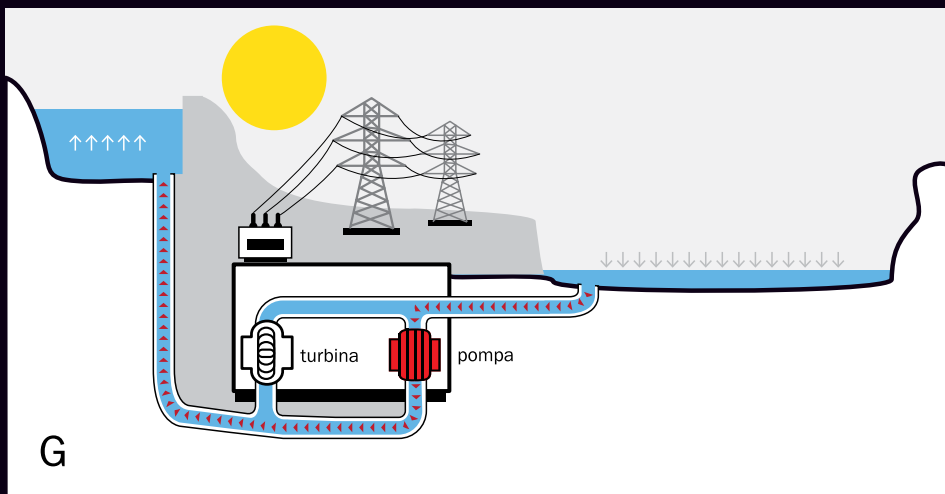
imparato che anche la massa è energia, e va conteggiata nelle reazioni nucleari e subnucleari, nelle quali può convertirsi in altre forme di energia o essere generata a partire da altre forme di energia. Nell'annichilazione di un elettrone e di un positrone, per esempio, tutta l'energia di massa delle due particelle si trasforma in energia cinetica dei fotoni prodotti. Infine, quando si ha a che fare con sistemi macroscopici, l'energia può essere scambiata anche sotto forma di calore. Il primo principio della termodinamica, in effetti, è nient'altro che la legge di conservazione dell'energia, che tiene conto degli scambi di calore, dell'energia interna di un sistema e del lavoro compiuto da o su di esso.

La meccanica quantistica ha introdotto un importante elemento di novità nel discorso sull'energia. Il principio di indeterminazione di Heisenberg stabilisce infatti che se si osserva un sistema per un intervallo di tempo limitato, la sua energia può essere misurata solo con un'incertezza inversamente proporzionale al tempo di osservazione. Dunque, se il sistema è instabile e vive solo per poco, la sua energia è necessariamente indeterminata. Ciò apre una serie di interessanti possibilità. Si può dimostrare che in virtù della legge di conservazione dell'energia un elettrone isolato non può emettere un fotone reale; ma, proprio a causa del principio di indeterminazione energia-tempo, l'elettrone può emettere un fotone "virtuale", cioè un fotone che acquista massa e vive per un tempo limitato, venendo poi assorbito da un altro elettrone. È così che due elettroni interagiscono

elettromagneticamente. Va detto che se si guarda alle particelle realmente osservate (gli elettroni) la legge di conservazione dell'energia è perfettamente rispettata, perché l'energia totale dei due elettroni prima dell'interazione è uguale alla loro energia totale dopo l'interazione. Il primo esempio storico di applicazione della legge di conservazione dell'energia a un processo elementare risale al 1923, quando il fisico statunitense Arthur Compton scoprì che, irradiando un bersaglio di grafite con raggi X, la radiazione diffusa aveva una lunghezza d'onda maggiore di quella della radiazione incidente, secondo una semplice legge matematica. Compton ipotizzò che l'effetto fosse dovuto, a livello microscopico, agli urti elastici tra i fotoni dei raggi X e gli elettroni del materiale irradiato, e fu in grado, applicando le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto, di spiegare la variazione della lunghezza d'onda osservata. Negli anni successivi, tuttavia, non mancò chi suggerì che la legge di conservazione dell'energia potesse non valere a livello nucleare e subnucleare. Attorno al 1930 i fisici erano alle prese con un problema legato al decadimento beta dei nuclei, il processo in cui un nucleo di una certa specie si trasforma in un altro nucleo emettendo un elettrone. Gli elettroni emessi hanno una distribuzione continua di energia, il che è incompatibile con la legge di conservazione dell'energia, se si suppone che nel decadimento venga emesso solo un elettrone. Niels Bohr propose allora che la legge di conservazione dell'energia fosse violata a livello di

# Energia e tempo

1.  
Se la costante di gravità  $G$  aumentasse nel corso della giornata, potremmo creare energia pompando in alto dell'acqua la mattina e facendola ricadere in basso la sera.



Per capire in che modo la legge di conservazione dell'energia è legata all'uniformità del tempo, cioè alla simmetria delle leggi fisiche rispetto alle traslazioni temporali, si può ricorrere a un semplice esperimento ideale (suggerito dal fisico statunitense Leon Lederman). Una delle tecniche usate per immagazzinare l'energia elettrica prodotta da una centrale è l'accumulazione per pompaggio. Il principio è semplice: quando l'elettricità è abbondante, se ne utilizza il sovrappiù per pompare l'acqua di un bacino a valle verso un serbatoio a monte; quando invece scarseggia, si usa il dislivello dell'acqua per azionare una turbina e produrre così l'energia elettrica necessaria. Questo meccanismo è basato sulla legge di conservazione dell'energia. L'energia elettrica impiegata per pompare in alto l'acqua si trasforma in energia potenziale dell'acqua contenuta nel serbatoio in quota. Quando, successivamente, l'acqua precipita, la sua energia potenziale si trasforma in energia cinetica che mette in movimento la turbina (trascureremo per semplicità tutte le complicazioni del processo). Supponiamo che per qualche misterioso motivo la costante di gravità  $G$  di Newton sia soggetta a variazioni diurne: per esempio, che aumenti nel corso della giornata. Se le cose stessero così, potremmo

realizzare una macchina a moto perpetuo (cioè una macchina che produce più energia di quella che consuma) spostando per esempio una massa d'acqua da un serbatoio a terra a un serbatoio in alto e facendola poi ricadere. Il lavoro necessario a pompare l'acqua verso l'alto è uguale all'energia potenziale gravitazionale dell'acqua ed è proporzionale a  $G$ ; anche l'energia cinetica dell'acqua che ricade in basso (e che può essere utilizzata per azionare una turbina) è proporzionale a  $G$ . Dunque, se pompassimo l'acqua, quando  $G$  è piccola, consumeremmo una quantità di energia inferiore alla quantità di energia che produrremmo facendo precipitare l'acqua, quando  $G$  è grande. Il bilancio di energia sarebbe in attivo: avremmo realizzato il moto perpetuo. Nella realtà, le leggi della fisica non cambiano (fortunatamente) nel corso della giornata, e una macchina che crei energia dal nulla è irrealizzabile. Aggiungiamo che, in concreto, non è neanche possibile recuperare tutta l'energia potenziale accumulata con il pompaggio idrico, perché una parte di essa inevitabilmente si dissipa, convertendosi in energia termica (gli impianti di pompaggio hanno un'efficienza dell'ordine dell'80%, il che significa che un quinto dell'energia viene dissipata).

singoli eventi di decadimento e mantenesse solo una validità statistica (come media su un gran numero di eventi). Si sbagliava. La soluzione corretta del problema fu trovata da Pauli, il quale suggerì che nel decadimento beta, assieme all'elettrone, fosse emessa un'altra particella, neutra e poco interagente, e perciò non osservata: il "neutrino" (nome coniato da Fermi nel 1931). Si trattò, nelle parole dello stesso Pauli, di un "rimedio disperato per salvare la legge di conservazione dell'energia". La legge, in effetti, era salva: poiché in un decadimento beta sono prodotte due particelle, l'elettrone e il neutrino, l'energia può distribuirsi tra esse in modo arbitrario, e gli elettroni hanno quindi uno spettro continuo, come osservato sperimentalmente.

Nella fisica delle particelle la legge di conservazione dell'energia rappresenta oggi uno strumento di uso comune: è incorporata nei programmi di analisi dei dati e interviene sempre nell'interpretazione dei risultati sperimentali. La massa del bosone di Higgs, per esempio, è stata determinata sulla base del fatto che, in virtù della legge di conservazione dell'energia, essa deve essere uguale alla somma delle energie delle particelle in cui l'Higgs decade (quelle effettivamente osservate dai rivelatori di Lhc).

La legge di conservazione dell'energia ha attraversato indenne tutte le rivoluzioni fisiche del Novecento, rivelandosi valida in qualunque contesto, classico, relativistico e quantistico. Perché è così universale? La risposta sta in un famoso teorema enunciato dalla matematica tedesca Emmy Noether esattamente un secolo fa, nel 1918. Questo teorema stabilisce che la legge di conservazione dell'energia è una conseguenza diretta di una proprietà fondamentale del tempo: la sua uniformità. L'energia si conserva perché ogni istante di tempo è uguale a un altro e le leggi fisiche sono invarianti rispetto alle traslazioni temporali - cioè sono le stesse ieri, oggi e domani (nessun esperimento, in altri termini, dà esiti diversi a seconda dell'ora in cui viene compiuto). È proprio questo che rende speciale la legge di conservazione dell'energia: la sua validità è legata alla costanza nel tempo delle leggi di natura, senza la quale la possibilità

stessa di una descrizione fisica del mondo verrebbe messa a repentaglio. Ma, in ultima analisi, la legge di conservazione dell'energia - come tutte le leggi della fisica - è un fatto sperimentale, ed è consolante constatare che finora non è mai stata trovata alcuna evidenza di una sua violazione.



c.  
La tedesca Emmy Noether (1882-1935) è stata una delle più grandi matematiche di tutti i tempi. Insegnò a Göttinga e, dopo il trasferimento negli Stati Uniti, al Bryn Mawr College in Pennsylvania.

#### Biografia

**Vincenzo Barone** insegna meccanica quantistica all'Università del Piemonte Orientale ed è associato alla sezione Infn di Torino. Si occupa di teoria delle interazioni forti. Il suo più recente libro divulgativo è *L'infinita curiosità. Breve viaggio nella fisica contemporanea* (con P. Bianucci, Edizioni Dedalo, 2017).

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.24.2