

Grandezze arbitrariamente definite nella scienza: il caso dell'energia

Giampaolo Co'

*Dipartimento di Matematica e Fisica "E. De Giorgi", Università di Lecce,
Istituto di Fisica Nazionale di Fisica Nucleare, sezione di Lecce.*

Le scienze della natura utilizzano delle entità astratte per organizzare in modo oggettivo, coerente, sintetico e predittivo i risultati di varie osservazioni. Il caso dell'energia è esemplare.

Meccanica

La formulazione newtoniana della meccanica non include il concetto di energia. È possibile descrivere il moto dei corpi e gli effetti dinamici che le forze inducono su essi, senza mai utilizzarlo. D'altra parte, risulta estremamente comodo utilizzare il principio di conservazione dell'energia per affrontare molti problemi di meccanica. Ma comodità non implica necessità.

Il concetto moderno di energia si sviluppa nel periodo storico che va dalla fine del 1700 fino ai primi anni del 1800, in piena rivoluzione industriale. La spinta alla formulazione di questo concetto nasce dalla necessità di distinguere il lavoro dalla fatica, e da quella di comprendere e formalizzare l'uso delle macchine a vapore.

È ben noto che tenere un peso sollevato da terra implica fatica fisica, ma lo stesso risultato meccanico può essere ottenuto utilizzando un sostegno, un tavolo ad esempio. Una volta sistemato il sostegno, il sistema rimane stabile e solo l'azione di un agente esterno, una forza, ne può modificare lo stato.

Diversa è la situazione quando si vuole mantenere in movimento un apparato, una ruota di mulino, un pistone, una pompa idraulica. In questo caso, è necessario continuare ad alimentare il sistema in qualche modo, ad esempio con la spinta di animali, con lo scorrere di un corso d'acqua, con il calore fornito da un forno.

La formalizzazione di questa differenza tra fatica e lavoro è stata effettuata definendo il *lavoro meccanico*, W , come il prodotto scalare tra il vettore F_m che identifica la forza applicata ad un corpo, ed il vettore spostamento s

$$W = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s} , \quad (1)$$

cioè il prodotto tra il modulo della forza e la com-

ponente dello spostamento nella direzione in cui è applicata la forza.

Molto spesso l'energia è definita come la potenzialità di compiere lavoro. Ad esempio nel Dizionario Treccani della lingua italiana si legge [1]: *"In fisica, energia di un sistema, l'attitudine del sistema a compiere un lavoro, sia come energia in atto, che opera cioè in un processo in cui si produce lavoro e che è commisurata al lavoro fatto, sia come vera e propria attitudine, cioè come energia potenziale."*

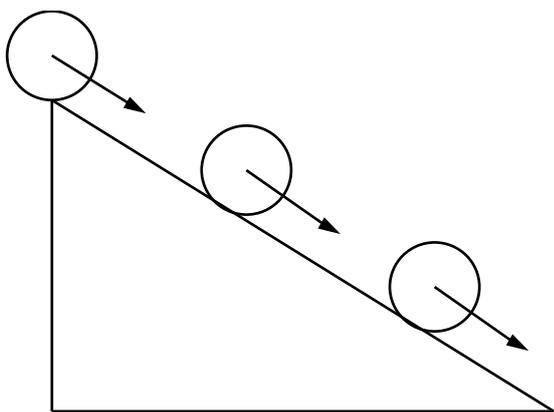


Figura 1: Pallina che rotola su un piano inclinato.

Utilizzando il principio di conservazione dell'energia, il caso di una pallina che rotola su un piano inclinato, Figura 1, viene descritto come segue. Alla sommità del piano la pallina possiede solo energia potenziale che poi viene man mano trasformata in energia cinetica dal lavoro svolto dalla forza peso. Quando arriva in fondo al piano la pallina ha solo energia cinetica. Anche in questo caso si può parlare di energia perché la pallina in fondo al piano inclinato può fare lavoro, ad esempio spingendo un'altra pallina.

L'interesse per l'entità teorica *energia* consiste nel fatto che un'appropriata definizione permette di definire un principio di conservazione utilissimo per analizzare i vari fenomeni. Ho presentato un esempio di come usare il principio di conservazione dell'energia. I manuali di fisica generale mostrano molte applicazioni di questo principio in ogni settore della meccanica.

Questa definizione puramente meccanica dell'energia come possibilità di svolgere un lavoro, definito dall'equazione (1), è stata ampliata, e modificata per poter continuare a mantenere valido il principio di conservazione.

Termodinamica

Nella seconda metà del XVIII secolo, il grande sviluppo della tecnologia industriale basata sulle macchine termiche poneva la comprensione dei fenomeni termodinamici al centro dell'interesse della comunità scientifica dell'epoca. Non è un caso che i principali contributi allo studio di questo ramo della fisica siano stati proposti da scienziati provenienti dalle nazioni in cui maggiore era la presenza di industrie: Gran Bretagna, Francia e Germania.

Un primo tentativo di descrizione teorica dei fenomeni termici fu fatto considerando il calore come un fluido inerte, trasparente ed inodore, che passava da un corpo all'altro scaldando il corpo che lo riceveva e raffreddando quello che lo cedeva. Questo tentativo di definire un'entità teorica che si conserva si dimostrò poco efficiente. La perforazione di metalli per la produzione di canne di cannone indicava che il calore veniva prodotto senza che alcun corpo caldo fosse a contatto con il metallo. Queste osservazioni ispirarono una serie di esperimenti la cui interpretazione collegava il concetto di calore con quello di lavoro meccanico. Questo portò a formulare il primo principio della termodinamica che afferma l'equivalenza tra calore e lavoro.

La quantità che si conserva, utile per la descrizione e comprensione dei fenomeni termodinamici, è l'energia. L'energia non è più solo meccanica, ma è anche termica, legata alla temperatura del sistema. In un ciclo termodinamico, che è quello che svolgono le macchine termiche nel loro funzionamento, questo nuovo tipo di energia non può essere completamente trasformato in lavoro, anche nel caso si utilizzino macchine termiche ideali, cioè senza alcuna perdita dovuta ad attriti. Per poter funzionare, una macchina termica deve lavorare tra due riserve di calore a temperature diverse, e parte dell'energia deve essere rilasciata alla riserva con temperatura inferiore. Questo è il secondo principio della termodinamica.

In termodinamica l'energia ha un ruolo importantissimo. La conservazione di questa quantità permette di descrivere i cicli di macchine termiche considerando la parte che si trasforma in lavoro, fatto dalla o sulla macchina, e quella che si trasforma in calore, rilasciato o assorbito dal-

le riserve a temperature differenti tra le quali la macchina funziona.

Relatività

La definizione di lavoro (1), e quindi di energia, è strettamente legata al sistema di riferimento in cui si osserva lo spostamento \mathbf{s} . Due sistemi che si muovono di moto rettilineo uniforme uno rispetto all'altro misurano valori diversi dell'energia per lo stesso processo. Ad esempio, in un sistema di riferimento solidale con il corpo in movimento l'energia cinetica è nulla.

È merito della visione di Einstein della relatività ristretta quello di identificare l'energia non come una quantità universalmente conservata, ma come una delle componenti di un quadrivettore energia-impulso il cui modulo è costante in ogni sistema di riferimento inerziale.

Un esempio di quadrivettore in relatività ristretta, è quello spazio-tempo. Le coordinate spaziali \mathbf{r} e quella temporale t di un punto dello spazio sono le componenti di un quadrivettore $\underline{x} = (ct, x, y, z)$ il cui modulo è dato da

$$\sum_{\mu=0,3} x^\mu x_\mu = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = K, \quad (2)$$

dove c è la velocità della luce nel vuoto e K una costante reale. Questa quantità rimane costante, indipendentemente dal sistema di riferimento inerziale in cui si osserva l'evento. Questo significa che due osservatori che si muovono in moto rettilineo uniforme tra loro misurano lo stesso valore della quantità K , anche se, per loro, tempo t e spazio \mathbf{r} sono differenti.

Questo tipo di invarianza ricorda quella del modulo di un vettore rispetto a rotazioni del sistema di riferimento. Anche in questo caso le coordinate x, y e z che definiscono \mathbf{r} sono modificate dalla rotazione, ma il modulo del vettore rimane costante.

L'analogia con l'invarianza dell'equazione (2) spinge a considerare le trasformazioni di Lorentz, che indicano come spazio e tempo si modificano quando osservati in sistemi di riferimento in moto relativo, come fossero rotazioni nello spazio-tempo a quattro dimensioni.

Anche l'energia E e la quantità di moto \mathbf{p} sono le componenti di un quadrivettore, detto energia-

impulso, e, in qualsiasi sistema di riferimento soddisfano la relazione

$$\frac{E^2}{c^2} - \mathbf{p}^2 c^2 = m^2 c^2, \quad (3)$$

dove ho indicato con m la massa della particella nel sistema di riferimento in cui è ferma. In questo sistema di riferimento $\mathbf{p} = 0$, quindi si ottiene la famosa equazione

$$E = mc^2. \quad (4)$$

La conservazione del modulo del quadrivettore (3) è la relazione fondamentale nella fisica sperimentale delle alte energie poiché permette l'identificazione di particelle elementari. La produzione di una particella con massa M è legata alle energie E_α e agli impulsi \mathbf{p}_α delle N particelle in cui decade dalla relazione, detta della massa invariante,

$$(Mc^2)^2 = \left(\sum_{\alpha=1,N} E_\alpha \right)^2 - \left(\sum_{\alpha=1,N} \mathbf{p}_\alpha c \right)^2. \quad (5)$$

La misura di E_α e \mathbf{p}_α permette di identificare la massa M della particella prodotta.

Nel momento in cui la somma delle energie e degli impulsi rivelati non corrisponde all'energia totale del sistema, ad esempio alla somma delle energie delle particelle che si scontrano in un collisore, come LHC, significa che è stata prodotta almeno una particella priva di carica elettrica che, per questo motivo, non lascia traccia nei rivelatori.

Questo tipo di deficit energetico ha spinto W. Pauli, nel 1930, a formulare l'ipotesi dell'esistenza del neutrino, che fu identificato utilizzando la (5) nel 1956 [2].

Un altro esempio più recente ed altrettanto clamoroso è quello dell'identificazione del bosone di Higgs, anche questa una particella elettricamente neutra, scoperta grazie al deficit energetico legato alla (5) [3].

Conclusioni

L'esempio dell'energia è illuminante su come procede il metodo scientifico. Vengono ideate delle entità astratte che sono utilizzate per mettere in relazione tra loro dati ottenuti dall'osser-

vazione. Queste quantità teoriche, e accanto all'energia posso citare altri esempi come massa, forza, momento angolare, impulso, entropia ..., sono costruite in modo da soddisfare delle caratteristiche ben precise, alcune della quali elencate qui sotto.

- *Oggettività*. La definizione di queste entità è strutturata in maniera tale da essere la meno ambigua possibile, in modo da permettere la comunicazione più precisa ed universale possibile. Per questo motivo, in fisica, si usa il linguaggio più preciso costruito dall'uomo, la matematica.
- *Coerenza*. Le varie entità sono collegate tra loro da legami logici di tipo non contraddittorio. Si usa una logica a due valori, vero o falso, senza alternative. Le teorie che utilizzano questi legami logici tra le varie entità sono internamente coerenti, ovvero non contengono antinomie.
- *Sintesi*. Un'altra proprietà della costruzione teorica che collega queste entità è la minimizzazione delle ipotesi di partenza. A parità di capacità descrittiva dei fenomeni osservati, si preferisce la teoria che richiede meno ipotesi.
- *Predittività*. Si richiede che le teorie abbiano capacità predittive, ovvero possano prevedere nuovi fenomeni, od osservazioni, cioè che non appartengano all'insieme di quei fenomeni od osservazioni utilizzati per costruire le teorie stesse.

Perché nella storia del rapporto tra esseri umani e natura si siano affermate le teorie che godono delle proprietà menzionate sopra, è un interessante argomento che allaccia studi storici, sociologici, psicologici ed antropologici.

Questa lezione è stata presentata il 6 marzo 2019 all'ISUFI nell'ambito dei seminari del *Laboratorio didattico ISUFI sul metodo scientifico*.



[1] Enciclopedia Treccani,
www.treccani/enciclopedia/energia

[2] G. Co': "Neutrini ed interazione debole", *Ithaca VI* (2015) 7.

[3] A. NISATI: "La scoperta del bosone di Higgs", *Ithaca I* (2013) 15.



Giampaolo Co': Professore associato di Fisica Nucleare presso l'Università del Salento si occupa di teorie a molti corpi applicate allo studio della struttura dei nuclei atomici.