

Diverse forme di energia o portatori di energia?

(Traduzione di Annamaria Fichera, XX ITIS, Roma, dall'Am J. Phys. vol. 51 No. 12, Dicembre 1983)

1. Introduzione

Scopo di questo articolo è mostrare come sia fuorviante il concetto di "forme d'energia" e vada quindi rifiutato e sostituito con un concetto più appropriato alla natura di grandezza tipo-sostanza (*) dell'energia: il concetto di portatori di energia.

Questo articolo è organizzato come segue: nel II paragrafo viene presentata l'idea di grandezza tipo-sostanza; nel III paragrafo, per poter dare una definizione fisica rigorosa di "forme di energia", viene fatto uso di una legge di natura, comunemente applicata, ma raramente riconosciuta; nel IV paragrafo viene spiegato perché, alla luce di questa definizione, il concetto, introdotto in questo articolo, di "portatori di energia", possa essere più appropriato del tradizionale concetto di forme d'energia per poter comprendere in modo chiaro l'energia.

2. La natura di tipo-sostanza dell'energia

C'è un insieme di grandezze fisiche le cui caratteristiche possono venir visualizzate in modo particolarmente semplice: le grandezze fisiche estensive per le quali può venir definita una densità. Esse includono la carica elettrica, la massa, la quantità di una sostanza (numero di particelle), ed altre. Per il ruolo fondamentale che tali grandezze giocano nella scienza e poiché tali grandezze possono trovarsi distribuite in una porzione di spazio e fluirne attraverso, attribuiamo loro un nome particolare: grandezze tipo-sostanza.

Se una grandezza è del tipo-sostanza, ha senso allora dire di essa che è contenuta in una regione di spazio. Ciò vuol dire che ha senso chiedersi quanto di tale grandezza sia contenuto dentro una regione dello spazio e correlare le variazioni di tale quantità al flusso di questa grandezza in o da la regione di spazio considerata. È infatti appropriato parlare di conservazione locale o di non conserva-

zione di una grandezza, soltanto se essa è una grandezza tipo-sostanza ed obbedisce o contravviene a un'equazione di continuità. Mentre d'altra parte non è appropriato parlare di conservazione o non conservazione di grandezze che non siano di tipo-sostanza, come ad es., il campo elettrico, la temperatura o la velocità. Alcune grandezze tipo-sostanza sono sempre conservate, per esempio la carica elettrica; mentre altre grandezze tipo-sostanza sono conservate solo in particolari situazioni, ad es. la quantità di una data sostanza (se non hanno luogo reazioni chimiche). Pertanto "tipo-sostanza" e "conservata" non sono sinonimi: "tipo-sostanza" è più comprensivo (1).

Entrambe le grandezze citate, carica elettrica e quantità di una data sostanza, vengono tradizionalmente riconosciute come grandezze tipo-sostanza. In questo articolo ci interessa però un'altra grandezza tipo-sostanza: l'energia.

La natura di grandezza tipo-sostanza dell'energia segue dal fatto che esistono per l'energia sia una densità che una corrente (la corrente di energia viene comunemente chiamata "potenza"). È anche evidente che è sensato chiedersi se l'energia sia localmente conservata. Ed in effetti l'energia è una grandezza tipo-sostanza conservata.

3. Forme di energia

Il termine "forme di energia" è usato insieme ad una gran quantità di nomi diversi come energia di riposo o di massa, energia cinetica, calore o energia termica, energia gravitazionale, energia di legame, energia radiante, energia elastica, energia potenziale, energia elettrica, energia chimica, energia nucleare etc. Uno studente attento potrebbe veramente confondersi nel tentativo di immaginare per es., se l'energia contenuta in una pila sia nella forma di energia elettrica o di energia chimica. Infatti anche libri di testo molto noti non sono fra loro concordi nella loro definizione del termine "forma di energia": alcuni (2) sottintendono che la definizione riguardi i vari modi in cui l'energia può venir scambiata; altri (3) invece sottintendono che la definizione riguardi i differenti modi in cui

(*) Il significato del termine emerge dalla versione originale del lavoro in tedesco: *Mengenartig* che letteralmente significa tipo-quantità.

l'energia può venir immagazzinata; altri (4, 5) usano il termine in modo tale che sembra riferirsi ad entrambe le accezioni. Potrebbe quindi sembrare che il concetto di forma di energia abbia un'interpretazione fisica alquanto confusa, e, di conseguenza, che l'importanza di questo concetto sia più di tipo divulgativo che scientifico. Scopo di questo paragrafo è fornire una definizione rigorosa di forma di energia.

L'energia può venir classificata in due modi del tutto diversi (6): nel primo modo si guarda a *scambi* d'energia, o, che è lo stesso, a come l'energia *fluisca* (per esempio in o da un sistema fisico in cui l'energia sta variando); nel secondo modo si guarda a come l'energia sia *immagazzinata*. Nel primo caso si arriva a concetti come quelli di energia elettrica, energia chimica, calore, lavoro, etc. Nel secondo caso ci si riferisce a concetti come quelli di energia interna, energia di campo elettrico, energia cinetica, energia potenziale etc.

Sfortunatamente però molti libri parlano di *forme di energia* in entrambi i casi.

Consideriamo la prima classificazione dell'energia in scambi di energia o correnti di energia. *L'esperienza mostra che l'energia fluisce sempre contemporaneamente al flusso di almeno un'altra grandezza tipo-sostanza*. Questa frase esprime una legge di natura. Essa può così venir scritta [1]

$$I_E = \phi I_Q + \mu I_n + \nu I_p + T I_S \quad [1]$$

Qui I_E , I_Q , I_n , I_p ed I_S stanno rispettivamente per corrente di energia, di carica, molare, quantità di moto (7, 8) e corrente di entropia, mentre ϕ , μ , ν , e T rappresentano il potenziale elettrico, il potenziale chimico, la velocità e la temperatura assoluta. Per esempio, l'energia fluisce in un tostapane (come specificato dal campo del vettore di Poynting) contemporaneamente al flusso di carica elettrica attraverso i fili che portano all'apparecchio; l'energia fluisce insieme ad una quantità di una data sostanza (carburante più ossigeno) in una macchina; l'energia fluisce insieme alla quantità di moto attraverso una fune che tiri un vagone e l'energia fluisce insieme all'entropia attraverso le pareti di una casa: in tali casi si parla di trasferimento o scambio di energia dall'una all'altra "forma" a seconda della grandezza fisica che fluisce contemporaneamente all'energia. Negli esempi precedenti si parla di energia elettrica, energia chimica, lavoro e calore rispettivamente. Sia detto per inciso che la stessa tecnica può venir usata per classificare le forme di energia in termini delle grandezze fisiche che cambiano nel cambiamento di energia di un sistema. Tale classificazione è espressa matematicamente dalla forma fondamentale di Gibbs ben nota in termodinamica (10).

Il frazionamento dell'energia immagazzinata in vari componenti segue da una considerazione di-

versa. L'energia di un sistema può sempre venir espressa come funzione di certe variabili del sistema stesso.

Se per esempio indichiamo queste variabili con x_1, x_2, x_3, \dots avremo allora $E = E(x_1, x_2, x_3, \dots)$. Se le variabili sono scelte in modo adeguato, il sistema può venir completamente descritto da una tale funzione. In questo caso la funzione dell'energia è comunemente detta "hamiltoniana" del sistema (in meccanica) o un "potenziale termodinamico" (in termodinamica) (11). La funzione dell'energia di molti sistemi fisici comuni può venir divisa in termini separati, ognuno dei quali dipende da variabili che non sono in comune con alcun altro termine della somma. Per esempio, si potrebbe avere $E = E'(x_1, x_2) + E''(x_3) + \dots$. Se questo è il caso, ognuno dei termini può ricevere un nome diverso e si arriva a poterli chiamare "forme di esistenza" dell'energia.

Un esempio di questo modo di procedere è dato da un condensatore. L'energia di questo oggetto può essere scritta come $E(Q) = E_0 + Q^2/2C$, dove Q è la carica e C la capacità: il secondo termine è indipendente da E_0 ed è detto "energia del campo elettrico". Se si considera anche un moto, l'energia del condensatore può venir scritta come:

$$E(Q, p) = E_0 + Q^2/2C + p^2/2m.$$

Qui p è la quantità di moto del condensatore ed m è la sua massa. I primi due termini a destra di quest'espressione sono identici a quelli dell'espressione iniziale e sono già stati discussi. Il termine $p^2/2m$ è indipendente da Q e da E_0 e, quindi, gli può venir dato un proprio nome: "energia cinetica" (o "energia di moto").

In genere è lecito assegnare nomi ai vari termini di una somma che rappresenti l'energia, se l'energia di un sistema può venir divisa in termini separati, ognuno dei quali non dipende da variabili in comune con un altro termine della somma. Tuttavia questo non sempre è possibile. Infatti molti sistemi fisici importanti non consentono una tale suddivisione. Per esempio l'energia di un gas ideale è una funzione non separabile dell'entropia S , del volume V , e della quantità di una data sostanza n . In genere la funzione dell'energia di ogni macchina trasformatrice dell'energia è non separabile nelle variabili associate alle forme di energia che vengono trasformate. Per esempio, la funzione dell'energia di una macchina capace di trasformare calore TdS in lavoro $-pdV$ (dove p è qui la pressione) non è separabile in S e V .

A differenza della denominazione delle forme di energia in termini di una suddivisione della funzione dell'energia, le correnti di energia possono sempre venir classificate secondo l'equazione [1]. Così la classificazione dell'energia in termini di correnti di energia è più generale della suddivisio-

ne in vari termini dell'energia immagazzinata. Non è comunque consigliabile chiamare queste correnti "forme di energia". Parlare di forme diverse dell'energia è fuorviante da un punto di vista didattico. Ciò sarà discusso nel prossimo paragrafo dove noi ci pronunceremo in favore di una classificazione più attuale dell'energia in termini di *portatori di energia*.

4. Portatori di energia

Se accettiamo la classificazione precedente di correnti di energia, cosa c'è allora di sbagliato nel concetto generale di forma di energia? Il miglior modo di rispondere a questa domanda è di considerare la risposta ancora ad un'altra domanda quale ad esempio: "Cosa ci sarebbe di sbagliato nel parlare di differenti forme di carica elettrica?" In altre parole perché non dare nomi diversi alla carica elettrica, cioè, "carica elettronica", "carica protonica", "carica mionica", "carica dello ione CL" a seconda del portatore di carica coinvolto in un trasferimento di cariche? Perché non dire ad esempio che la carica ionica è "convertita" nella carica elettronica (o viceversa) negli elettrodi di una batteria o che la carica protonica è convertita in carica positronica nel decadimento β^+ ? Ovviamente dare nomi differenti alla carica elettrica porterebbe all'impressione errata che questi designino grandezze fisiche differenti mentre è soltanto una stessa grandezza fisica in gioco in ogni caso: la carica elettrica. Se si tiene il dovuto conto della natura di grandezza tipo-sostanza dell'energia come della natura tipo-sostanza della carica elettrica, allora parlare di differenti forme di energia è altrettanto fuorviante come lo sarebbe parlare di differenti forme di carica. Non è l'energia trasportata attraverso il campo elettromagnetico, un gasdotto, o un muro di una casa ad avere caratteristiche differenti, ma piuttosto l'altra grandezza fisica tipo-sostanza che fluisce contemporaneamente insieme all'energia in ciascun caso. Conseguentemente non è l'energia a venir trasformata o convertita all'interno di un così detto "trasformatore di energia" e "convertitore di energia". Piuttosto è corretto dire che l'altra grandezza fisica di tipo-sostanza che fluisce insieme all'energia è *scambiata* all'interno di una tale macchina. Per esempio l'energia vien portata ad una centrale di energia insieme con carbone ed ossigeno, o, scientificamente parlando, insieme con la quantità di sostanza (la grandezza misurata in moli) di carbone e di ossigeno e l'energia sempre fluisce fuori dalla centrale insieme alla carica elettrica. L'energia fluisce in un filo contemporaneamente al flusso di carica elettrica in un motore rotante e l'energia ne fluisce di nuovo via attraverso il filo insieme al momento della quantità di moto.

Se si è d'accordo che il termine "forma di energia" sia fuorviante ed inadeguato per esprimere la

legge sumenzionata, che altro termine potrebbe venir usato per meglio sostituirlo? Di nuovo la risposta diventa ovvia rispondendo ad un'analoga domanda per la carica elettrica. La risposta è *portatore di energia*. Diciamo che una grandezza fisica di tipo-sostanza che fluisca mentre l'energia sta fluendo, "porta" l'energia. Essa è un "portatore di energia".

Non è appropriato parlare di forme di qualcosa che di per sé non cambia, ma soltanto cambia portatori. Per es., consideriamo per semplicità delle patate che cambino i loro portatori durante il trasporto. Le patate debbono spesso percorrere un lungo tragitto dal campo fino a casa: esse vengono portate da un trattore dai campi a un furgone per raccolta che le porta a un deposito, dove vengono caricate su un camion, trasportate in un'altra città, ricaricate su un furgone per la consegna quindi portate al supermercato dove arrivano finalmente al consumatore. Tuttavia nessuno penserebbe di dare nomi diversi alle patate durante ciascun tratto del loro viaggio, per esempio, "patate trattore", "patate di raccolta", "patate di consegna" e "patate mercato". D'altra parte è del tutto naturale dire che le patate hanno cambiato il loro portatore molte volte durante il loro percorso dai campi a casa. Il concetto di "portatore di patate" è razionale; il concetto di "forma di patata" non lo è. Possiamo andare ancora avanti con il nostro confronto. Per esempio a nessuno verrebbe in mente di dare alle patate un nome del tutto diverso, diciamo, "peso da camion" o "bioamido" durante un particolare tratto del loro percorso. Ciò è tuttavia quanto viene fatto nel caso dell'energia quando si parla di "calore" e di "lavoro".

Confrontare energia e patate non è poi così ridicolo come si potrebbe pensare. Non è importante per il confronto il fatto che le patate si possano vedere, ma non possiamo vedere l'energia o che la patata sia una cosa concreta e l'energia un concetto astratto. La sua validità è basata soltanto sul fatto che si può parlare di una densità e di corrente sia per l'energia che per le patate. Ci sono naturalmente dei limiti sul come vada letteralmente intesa l'espressione "portatore di energia".

La parola "portatore" implica qui soltanto una relazione *temporale* tra il flusso di energia e il flusso di un portatore di energia.

Non significa implicare che l'energia e il suo portatore occupino necessariamente la stessa posizione nello spazio o anche che fluiscono con la stessa velocità. L'esempio del portatore di energia "carica elettrica" illustra ampiamente questo punto. L'espressione "portatore di energia" è uno strumento didattico che può venir usato con vantaggio considerevole se non è applicato in modo troppo ingenuo.

Un portatore d'energia può essere "caricato" con più o meno energia nello stesso modo che un

portatore di merci, per es. un camion, può essere caricato con una maggiore o minore quantità di una merce. Per esempio una corrente elettrica di 2A può portare una maggiore o minore energia, diciamo 1kW o 10kW a seconda del valore del potenziale. Quindi il potenziale elettrico è una misura di con quanta energia il portatore di energia "carica elettrica" (o "elettricità") sia caricato. Il potenziale elettrico è un *fattore di carico dell'energia*. Molte altre variabili intensive comuni sono anch'esse dei fattori di carico dell'energia. Per esempio la temperatura assoluta T è una misura di con quanta energia sia caricata una corrente di entropia ed il potenziale chimico μ è una misura di con quanta energia sia caricata una corrente di moli. È semplice vedere l'importanza di molte variabili fisiche intensive se vien sottolineato il loro ruolo come fattori di carico dell'energia. L'immagine dei portatori di energia e dei fattori di carico dell'energia è particolarmente utile per descrivere apparecchi che vengono tradizionalmente chiamati "trasformatori di energia" o "convertitori". In termini tradizionali, l'energia fluisce dentro un trasformatore di energia in una forma e ne defluisce in un'altra. Sfortunatamente questo modo di parlare suggerisce che una grandezza fisica venga trasformata in un'altra in un tale apparecchio. Tuttavia l'energia cambia solo il proprio portatore dentro l'apparecchio. In altre parole l'energia è trasferita da un portatore ad un altro dentro l'apparecchio. Quindi il nome di *trasformatore di energia* è più appropriato per l'effettiva funzione di tali dispositivi.

Il nostro ambiente quotidiano, naturale e tecnologico, è pieno di esempi di trasferitori di energia. Per esempio l'energia è trasferita dal portatore "carica elettrica" al portatore "entropia" in un forno elettrico, e l'energia è trasferita dal portatore "quantità di sostanza" al portatore "carica elettrica" in una centrale.

È semplice rappresentare graficamente il trasporto di energia da un apparecchio ad un altro o da una regione dello spazio ad un'altra con l'aiuto di un *diagramma di flusso di energia*. Tali diagrammi offrono i mezzi per un semplice calcolo grafico applicabile alla soluzione di problemi correlati all'energia. Un corso (12, 13) elementare di fisica (classe 5 o 6) è stato sviluppato sulla base di tali diagrammi ed è disponibile un libro di testo destinato ad accompagnare il corso. Una discussione più dettagliata sull'uso elementare dei diagrammi di flusso dell'energia è già stata altrove pubblicata (12-14).

5. Riassunto

L'energia è una grandezza tipo-sostanza: essa è distribuita nello spazio e può fluire attraverso esso.

Poichè il termine "forme d'energia" lascia spazio a diverse interpretazioni errate di forme d'energia come quantità fisiche diverse, esso dovrebbe venir sostituito da un concetto più adeguato. A tal scopo ci riconduciamo al fatto che l'energia fluisce sempre insieme ad almeno un'altra grandezza tipo-sostanza. Ciò indica che ci si dovrebbe concentrare sulle grandezze tipo-sostanza che accompagnano il flusso di energia se si vuol raggiungere un'adeguata descrizione del trasferimento d'energia.

Invece di parlare di forme d'energia, è più appropriato visualizzare l'energia come una sorta di "sostanza" che può fluire da un posto all'altro solo se "portata" da un altro tipo di sostanza detta un *portatore d'energia*. In questa concezione l'energia non viene trasformata (o convertita) da una forma all'altra, ma piuttosto, cambia i suoi portatori. In questo modo si arriva ad un'idea dei processi di trasporto d'energia che è rigorosamente corretta, ma anche semplice da presentare anche per un livello elementare.

Bibliografia

- (1) G. Falk, F. Herrmann, *Konzepte eines Zeitgemässen Physikunterrichts* (Schroedel-Verlag, Hannover, 1979), Vol. 3, pp. 14-22.
- (2) R. Resnick, D. Halliday, *Physics for Students of Science and Engineering* (Wiley, New York, 1963), Vol. 1, Cap. 8, p. 144.
- (3) C. Kittel, W.D. Knight, M.A. Ruderman, *Berkeley Physics Course: Mechanics* (McGraw-Hill, New York, 1973), Cap. 5, p. 150.
- (4) R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1964), Cap. 4.
- (5) *College Physics: Physical Science Study Committee* (Heath, New York, 1968), Cap. 17.
- (6) G. Falk, F. Herrmann, *Konzepte eines Zeitgemässen Physikunterrichts* (Schroedel-Verlag, Hannover, 1977), Vol. 1, pp. 9-13.
- (7) G. Falk, F. Herrmann, *Konzepte eines Zeitgemässen Physikunterrichts* (Schroedel-Verlag, Hannover, 1979), Vol. 3, pp. 80-87.
- (8) A.A. di Sessa, *Am. J. Phys.* 48 (5), 365-369 (1980).
- (9) J.W. Gibbs, "On the Equilibrium of Heterogeneous Substances," *Trans. Conn. Acad.* III (1875).
- (10) G. Falk, *Theoretische Physik auf der Grundlage einer Allgemeinen Mechanik* (Springer-Verlag, New York, 1968), Vol. II.
- (11) G. Falk and W. Ruppel, *Energie und Entropie* (Springer-Verlag, New York, 1976), pp. 127-146.
- (12) Reference 1, pp. 32-58.
- (13) G.B. Schmid, *Phys. Educ.* 17, 212-218 (1982).
- (14) G. Falk, F. Herrmann, *Neue Physik: Das Energiebuch* (Scheredel-Verlag, Hannover, 1981).