

LE BOTTEGHE DELL'INSEGNARE

Scienza & scienze

L'energia

Un concetto chiave per interpretare le trasformazioni

Un percorso sull'energia

Tesi finale di TFA di Paolo Gritti
docente alla scuola secondaria di I grado "Maria Regina di Bergamo"
docente tutor Nadia Correale

"There is a fact, or if you wish a law, governing all natural phenomena that are known to date. There is no exception to this law – it is exact so far as is known. The law is called the conservation of energy. It says that there is a certain quantity, which we call energy, that does not change in the manifold changes which nature undergoes. That is a most abstract idea, because it is a mathematical principle; it says that there is a numerical quantity, which does not change when something happens. It is not a description of a mechanism, or anything concrete; it is just a strange fact that we can calculate some number and when we finish watching nature go through her tricks and calculate the number again, it is the same."

"Esiste una proprietà che governa tutti i fenomeni naturali conosciuti fino ad oggi. Non ci sono eccezioni a questa legge – così esatta per quanto conosciuta. Essa stabilisce che c'è una certa quantità che chiamiamo energia che non cambia nei molteplici mutamenti subiti dalla natura. Il concetto è astratto, poiché si tratta di un principio matematico; esso afferma che c'è una quantità numerica che non cambia qualsiasi cosa accada. È importante tener presente che nella fisica odierna noi non abbiamo cognizione di ciò che l'energia è." (The Feynman Lectures on Physics, 1963)

Premessa

Il concetto di energia è uno dei più importanti concetti fisici della scienza contemporanea e della pratica ingegneristica. Negli ultimi anni l'uso di questa parola è diventato pressoché quotidiano, si parla infatti di energia tutte le volte che ci riferiamo al costo del combustibile per trasporto o per riscaldamento, all'elettricità utilizzata per l'illuminazione o per il funzionamento di apparecchiature, alla quantità di alimenti che consumiamo ecc. Il concetto di energia è talmente centrale nella scienza e nella società, che è considerato una 'competenza' fondamentale: non a caso fa parte di **una delle tre competenze di base** per l'asse scientifico-tecnologico da raggiungere entro il 10° anno di scolarità (documento MPI del 22 Agosto 2007).

La prima parte di questo lavoro è un'introduzione storica del concetto di energia, in cui viene presentato il percorso scientifico che pian piano ha portato all'affermazione di questo concetto. Può essere vista come la sintesi di una lezione che il docente presenta alla classe, al fine di introdurre l'argomento cercando di creare curiosità e interesse. Personalmente credo che presentare argomenti scientifici parlando della storia che ha portato alla loro affermazione sia un modo per mostrare ai ragazzi che le scoperte scientifiche non avvengono solo come isolata intuizione di un ricercatore ma come progressiva conquista di elementi sempre più approfonditi che hanno consentito l'ampliarsi delle nostre conoscenze.

La seconda parte invece mette a confronto due metodologie didattiche diverse per affrontare l'argomento, il primo quello tradizionale delle "forme di energia" e il secondo quello più moderno dei "portatori di energia".

Introduzione

In modo sintetico possiamo definire la fisica come quella scienza che si occupa di ciò che è (le cose) e di ciò che accade (i fenomeni). Per indagare sulle cause e sugli effetti dei fenomeni, costruendo modelli che possano rendere tali fenomeni predicibili e controllabili, la fisica ha bisogno di una grande quantità di leggi e principi generali.

Esistono casi relativamente semplici in cui non è difficile riuscire a fare previsioni circa l'evoluzione temporale di un fenomeno. Un oggetto che cade da una certa altezza, ad esempio, rappresenta un fenomeno in cui su un corpo agisce la sola forza di gravità (ovviamente trascurando gli attriti) e che, grazie alle leggi del moto e della dinamica classica, siamo in grado di controllare facendo, ad esempio, previsioni molto accurate sulla variazione della posizione o della velocità:

$$s = \frac{1}{2}at^2 \quad v = \frac{2S}{t}$$

Ma i fenomeni a cui assistiamo quotidianamente non sono sempre assimilabili a situazioni o modelli così semplici. Se pensiamo a fenomeni in cui sono presenti forze che variano nel tempo e nelle posizioni è quasi impossibile fare previsioni in modo semplice circa la loro evoluzione temporale. Per risolvere anche queste situazioni la fisica cerca delle vere e proprie scappatoie, non indagando più le grandezze che variano continuamente, bensì concentrandosi su quelle grandezze che rimangono invariate nel tempo (*invarianti*) e che hanno portato alla definizione delle leggi di conservazione. Sapere che in un dato sistema esiste una grandezza che rimane invariata nel tempo non ci permette di controllare quel sistema, ma di certo ci fornisce delle informazioni preziose per comprendere quanto meno quello che non potrà succedere perché in contrasto con ciò che tali leggi affermano.

Breve storia del concetto di energia

L'evoluzione del concetto di energia è proprio la storia dei tentativi di comprendere il cambiamento attraverso ciò che rimane invariato. Il primo frutto di questa ricerca scientifica degli *invarianti* della natura fu la dottrina dell'indistruttibilità degli atomi, Democrito (V secolo a.C.) affermava infatti *"niente viene dal niente e niente può diventare niente"*, Epicuro (IV secolo a.C.) aggiungerà *"altrimenti tutto può venire da tutto"*. La conservazione non era attribuita solo alla materia ma anche al moto degli atomi stessi che veniva considerato come indefinitamente redistribuito e mai completamente annullato. Sotto questa concezione tutti i fenomeni dell'universo consistevano in ridistribuzioni di materia-movimento. Sebbene in questi concetti si possa già intravedere l'idea di conservazione (*nulla si crea e nulla si distrugge*) lo sviluppo e la formazione del concetto di energia sarà piuttosto travagliato.

Il termine energia, dal latino tardo *energìa*, a sua volta dal greco *ἐνέργεια* (*energhèia*), significa capacità di agire. Utilizzato da Aristotele (IV secolo a.C) nel senso di azione efficace, fu associato nel Rinascimento all'idea di "forza" e fu Keplero (1571–1630) ad usare per la prima volta il termine nell'accezione moderna. Si dovrà però aspettare il 1807 perché il termine "energia" venga introdotto ufficialmente nel linguaggio scientifico, in sostituzione delle cosiddette "forze vive"¹, grazie al fisico britannico Thomas Young (1173-1829), che nella pubblicazione *"Course of Lectures on Natural Philosophy"* (relativa ad alcune lezioni tenute nel 1802 presso la Royal Society), scrive:

"The product of the mass of a body into the square of its velocity may properly be termed its energy"

I punti di forza di questa nuova grandezza furono principalmente la sua natura universale e la possibilità di descrivere vari fenomeni nei più svariati ambiti della fisica. L'unico punto di debolezza era rappresentato dal fatto che non si manifestava sempre allo stesso modo, come ci si attende da una grandezza fisica normale. Per questo motivo alcuni fisici la consideravano un'utile grandezza matematica e nulla più. Intorno alla metà del XIX secolo si giunse alla conclusione di denominare le

¹ Termine utilizzato per l'energia cinetica prima dell'introduzione del termine energia.

varie combinazioni di questa grandezza con il termine *forme di energia*. L'energia quindi non si presentava in un unico modo ma sempre in una delle sue *forme*. Nella suddivisione dell'energia in forme si devono distinguere due procedimenti: l'uno permette di associare una forma all'energia immagazzinata in un sistema; l'altro classifica variazioni e flussi di energia. Il primo procedimento conduce a classi di energia come l'energia cinetica, l'energia potenziale, l'energia interna, l'energia elastica (di una molla) ecc. Il secondo porta alle categorie energia elettrica, energia chimica, calore, lavoro, ecc. Per distinguere le forme di energia a seconda del procedimento usato per definirle, le prime sono dette forme di esistenza o di immagazzinamento, le seconde forme di scambio.

Questa suddivisione, del tutto logica e sensata nel XIX secolo, è ancora quella maggiormente riportata in tutti i libri scolastici, ma vedremo più avanti che è diventata ormai superflua alla luce della fisica moderna.

Dal calorico al principio di conservazione

Per capire meglio il percorso storico che ha portato alla definizione dell'energia, e alla rispettiva legge di conservazione, è interessante soffermarsi brevemente sul caso particolare del calore. È noto che se due corpi a diversa temperatura vengono messi in contatto tra loro, la temperatura del corpo più caldo diminuisce e quella del corpo più freddo aumenta fino a raggiungere la stessa temperatura. Si dice in questo caso che c'è stato un passaggio di calore. Ma che cosa è il calore?

Prima di Platone si riteneva che fuoco e calore fossero la stessa cosa. Il filosofo greco cominciò a distinguere fra queste due entità, affermando che il calore fosse una percezione provocata dalla penetrazione della fiamma nella materia. Anche per Aristotele il fuoco era uno dei quattro elementi insieme a terra, aria e acqua e la sostanza che costituisce il calore veniva immaginata come qualcosa di molto più fluido della materia ordinaria, a carattere continuo o discontinuo, capace di diffondersi attraverso i corpi e presumibilmente dotata di peso.

Nella prima metà del '700 da esperimenti in cui corpi di varie temperature erano messi a contatto, si osservò che la quantità totale di calore restava costante. Questo portò alla legge di conservazione del calore:

"il calore non si crea nè si distrugge"

che per la sua analogia con la legge di conservazione della materia diede un forte impulso alla visione sostanzialistica del calore. In seguito anche agli sviluppi della chimica della fine del '700 si affermò sempre più la concezione del calore come sostanza e ad esso venne dato da Lavoisier (1743-1794), fervente sostenitore di questa teoria, il nome di "calorico" (*Traité élémentaire de chimie*, 1789).

Sebbene già a partire dal '600 cominciarono a diffondersi concezioni che spiegavano il calore come la vibrazione delle particelle atomiche dei corpi riscaldati e diversi esperimenti diedero risultati in contrasto con la teoria del calorico, si dovrà aspettare fino alla metà del XIX secolo perché si possa sviluppare e affermare il concetto moderno del calore.

La prima contestazione sulla natura del calorico si deve a Benjamin Thompson (1753-1814).

L'origine dei suoi dubbi risiedeva nell'osservazione che nella perforazione di una canna di cannone, presso l'arsenale di Monaco, veniva prodotta una gran quantità di calore dalla perforatrice, e se ipotizzò che se la perforatrice fosse stata fatta girare abbastanza a lungo si poteva generare una quantità illimitata di calore. Da questo fatto dedusse che il calore non poteva essere contenuto nel metallo già all'inizio, come asseriva la teoria del "calorico", bensì era prodotto nel processo meccanico di perforazione.²

Il calore, dunque, non poteva essere considerato come una qualsiasi sostanza, ma doveva essere attribuito a qualche tipo di moto sconosciuto.

Agli inizi dell'800 la teoria Thompson (nonostante potesse dar conto della normale espansione termica, della conducibilità, dei cambiamenti di stato, ecc.) si trovava ancora in una situazione di inferiorità in quanto non riusciva a spiegare altrettanto bene della teoria del calorico né la conservazione del calore nei casi in cui con un opportuno isolamento la quantità di calore resta costante senza produzione né conversione, né il fenomeno della propagazione del calore nel vuoto (calore radiante).

Le idee di Thompson furono riprese e sviluppate, qualche decina di anni dopo, dal medico tedesco Julius Robert Mayer (1814-1878) che nel suo articolo *Sulle forze della Natura inanimata* (1842) arriva a parlare esplicitamente dell'equivalenza fra lavoro meccanico e calore:

² Thompson calcolò anche la quantità di lavoro equivalente al calore, però non con la precisione con cui venne calcolato più tardi da Joule.

“se, per esempio, strofiniamo fra loro due lastre di metallo, vediamo il moto scomparire e d’altro canto fa la sua comparsa il calore”

“affermo quanto segue: la forza di caduta, il movimento, il calore, la luce, l’elettricità e la differenza chimica tra corpi ponderali costituiscono un solo oggetto sotto apparenze diverse”

E ancora:

“il movimento si trasforma in calore. In queste cinque parole è implicita tutta la mia teoria”.

Mayer deve essere considerato anche come il primo ad aver compreso l’unità di tutte le manifestazioni energetiche della natura. Con intuizione metafisica egli affermò che:

“le forze³ sono oggetti indistruttibili, convertibili e imponderabili”

Il mulinello di joule

Seppure in queste parole sia già espresso genericamente il principio di conservazione dell’energia, si dovrà attendere l’opera dell’inglese Prescott Joule (1818–1889) per averne una formulazione

chiara e sintetica che tenga

conto anche di possibili

variazioni di energia interna.

Joule costruì il mulinello

riprodotto in figura. I due pesi

raffigurati, scendendo verso il

basso mettono in rotazione il mulinello contenuto in un recipiente termicamente isolato in cui si

trova una certa quantità di acqua. L’acqua, contenuta nel calorimetro, agisce sulle palette del

mulinello creando un attrito viscoso che cresce all’aumentare della velocità delle palette. I due

pesi scendono inizialmente con un’accelerazione pari a g (accelerazione di gravità), ma quando la

³ probabilmente la “forza viva” come veniva chiamata allora l’energia cinetica

velocità aumenta anche l'attrito dell'acqua diventa maggiore. In breve tempo, quindi, la resistenza idrodinamica che agisce sul mulinello diventa uguale (in modulo) alla forza peso agente sui due pesi per cui questi scendono a velocità costante; l'acqua che viene agitata dalle pale del mulinello si riscalda per effetto dell'attrito fra essa e le pale. Se trascuriamo l'energia persa sui supporti e attraverso le pareti, allora la perdita in energia potenziale dei pesi è uguale al lavoro meccanico fatto dalle pale del mulinello. Se i due pesi si abbassano di una distanza h , la perdita di energia potenziale è $2mgh$, ed è questa energia che viene utilizzata per scaldare l'acqua. Variando le condizioni dell'esperimento Joule trovò che la perdita di energia meccanica è proporzionale all'aumento di temperatura dell'acqua ΔT e che la costante di proporzionalità (*il calore specifico dell'acqua*) era $4.18 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$. Pertanto concluse che 4.18J di energia meccanica innalzeranno la temperatura di 1 g da 14.5°C a 15.5°C . In modo più semplice

$$1 \text{ cal} = 4.18\text{J} \quad (\text{equivalente meccanico del calore})$$

Dopo aver misurato questa equivalenza le sue osservazioni lo portarono a concludere che l'energia che ogni qual volta del calore viene assorbito o ceduto da un sistema durante qualche trasformazione, l'assorbimento o la cessione di calore possono essere spiegate da un'equivalente quantità di lavoro meccanico fatto sul sistema. Pertanto estendendo il concetto di energia per includere il calore la legge di conservazione dell'energia venne generalizzato:

"L'energia interna di un sistema isolato rimane costante"

in formule:

$$dU = dQ - dW$$

dove:

dU = variazione di energia interna del sistema

dQ = quantità di calore assorbita o ceduta dal sistema sull'ambiente

dW = quantità di lavoro fatto dal (o sul) sistema

COME INSEGNARE L'ENERGIA

Approccio tradizionale all'insegnamento dell'Energia

Nella nostra scuola si introduce il concetto di energia seguendo il metodo tradizionale che ha portato all'affermazione stessa di tale concetto. In questo modo l'energia non è altro che

“La capacità di compiere lavoro”

e si aggiunge che per fare un lavoro esistono varie forme di energia che possono essere utilizzate: potenziale, cinetica, potenziale elastica, elettrica e magnetica, chimica, nucleare, ecc.

Di solito una volta introdotta la definizione di energia ci si sofferma sulle forme di energia (cinetica, potenziale, elettrica, chimica ecc) affermando che l'energia è in grado di “trasformarsi” quando avviene un processo: passa cioè da una “forma” ad un'altra, contribuendo così all'idea comune e diffusa che l'energia esiste in varie forme.

Al termine forma di energia, infatti, è associato un gran numero di nomi diversi come energia di riposo, energia cinetica, calore o energia termica, energia gravitazionale, energia di legame, energia radiante, energia elastica, energia potenziale, energia elettrica, energia chimica, ecc. Tra l'altro anche i libri di testo sono spesso in contrasto fra loro sulla definizione di forma di energia. Alcuni affermano che la definizione riguarda i vari modi in cui l'energia può venir scambiata; altri sottolineano che la definizione riguarda i differenti modi in cui l'energia può essere immagazzinata; altri ancora usano il termine in modo tale che sembra riferirsi ad entrambe le accezioni. Uno studente attento avrebbe tutte le ragioni per confondersi nel tentativo di immaginare se l'energia contenuta in una pila sia nella forma di energia elettrica o di energia chimica senza giungere ad una conclusione certa.

Parlare di diverse forme di energia sarebbe come parlare di differenti forme di carica elettrica. Sarebbe come se alla carica elettrica dessimo dei nomi diversi a seconda del portatore di carica: carica elettronica, carica protonica, carica muonica, carica dello ione Cl, ecc. Ovviamente dare nomi differenti alla carica elettrica porterebbe all'impressione errata che questi indichino grandezze fisiche differenti mentre è soltanto una stessa grandezza fisica in gioco in ogni caso: la

pag. 9 di 21

carica elettrica. Se si tiene il dovuto conto della natura della carica elettrica, così come quella dell'energia, parlare di differenti forme di queste grandezze è fuorviante.

Per chiarire meglio questo concetto è molto significativo il seguente paragone: “è comodo parlare di latte in bottiglia e di latte nelle confezioni di plastica. È completamente inutile tuttavia chiamare il processo di trasferirlo o il semplice berlo *trasformazione del latte*, o definire il contenuto di un bicchiere o dello stomaco come differenti *forme di latte*” (Georg Job, *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 2008).

Gli svantaggi nell'affrontare l'argomento energia nel modo tradizionale possono essere diversi:

- innanzitutto parlare di energia come della capacità di fare qualcosa, utilizzando così una definizione che è diventata abbastanza comune, significa darne una definizione talmente ampia che in pratica può andare bene per tutto;
- parlare di lavoro apre un'altra questione importante sulla diversità tra l'idea di lavoro che ognuno possiede e il concetto di lavoro dal punto di vista fisico, per es. portando una valigia si compie lavoro oppure no?;
- la “trasformazione” dell'Energia diventa un'idea un po' “magica”;
- parlare di forme di energia è una cosa che viene naturale, ma facendo in questo modo si rischia di perdere la visione d'insieme non soffermandosi a sufficienza sulla distinzione fondamentale tra le forme di esistenza e le forme di scambio dell'energia (concetti che erroneamente si tende ad unificare) spingendo così gli alunni a spostare l'attenzione verso la memorizzazione dei vari tipi di energia senza farli concentrare a dovere sulla spiegazione del fenomeno che stanno studiando;
- Introdurre troppi concetti non essenziali;
- Introdurre difficoltà concettuali inutili;
- Condurre ad una non corretta analisi dei processi;

Cos'è l'Energia

L'energia è un concetto difficile da spiegare e soprattutto da far capire agli alunni della scuola secondaria di primo grado, si tratta infatti di un concetto astratto, non si vede e non si sente, non è una sostanza, ma una proprietà dei corpi o dei sistemi, è necessaria per far muovere gli oggetti,

perché accelerino, perché si scaldino, perché si illuminino, quindi tutto quello che possiamo fare è vedere gli effetti che produce quando ci sono dei cambiamenti.

È importante sottolineare il fatto che l'energia non è la causa dei cambiamenti (a differenza delle forze) e il solo fatto di "avere energia" non fa avvenire un cambiamento.

Qualora si debba definire l'energia si può pensare di dire intuitivamente che:

L'energia è una proprietà che associamo agli oggetti o sistemi che fa sì che in un sistema si possano produrre dei cambiamenti: di temperatura, di colore, di posizione, di velocità, di forma ...

L'energia, nonostante sia un concetto astratto, appartiene ad una classe di grandezze fisiche delle quali è particolarmente facile farsi una rappresentazione concettuale: le *grandezze estensive*. Ognuna di queste grandezze può essere immaginata come una specie di sostanza, o un fluido. Con "immaginata" si intende che, dal punto di vista fisico, è corretto parlarne come si parla di una sostanza. Ha senso allora chiedersi quanta di tale grandezza sia contenuta dentro una regione dello spazio e correlare le variazioni di tale quantità al flusso di questa grandezza in entrata o in uscita dalla regione di spazio.

Una caratteristica che permette di dire se una grandezza X è estensiva, è il suo comparire in un'equazione di bilancio:

$$\frac{dX}{dt} = I_x + \sum x \quad (1)$$

Dove $\frac{dX}{dt}$ descrive la variazione nel tempo del valore di X all'interno della regione considerata, $\sum x$ indica quanto della grandezza X viene prodotto (o annientato) all'interno della regione considerata, per unità di tempo, I_x l'intensità di una corrente attraverso la superficie della regione in questione.

Le variazioni del valore di X possono avere quindi due cause: produzione o annientamento di X all'interno dell'area o una corrente attraverso la superficie.

Per alcune grandezze estensive, il termine \sum^x è sempre nullo. Queste grandezze possono variare il loro valore all'interno di una regione dello spazio solo se una corrente fluisce attraverso la superficie: tali grandezze sono dette *conservate*. L'energia è una grandezza conservata, la sua equazione di bilancio è:

$$\frac{dE}{dt} = P \quad (2)$$

dove P è l'intensità di corrente d'energia o potenza.

L'esigenza di ogni grandezza estensiva di soddisfare un'equazione di bilancio implica alcune semplici proprietà di queste grandezze:

1. Il valore di una grandezza estensiva è riferito a una regione dello spazio.
2. A ogni grandezza estensiva è associata un'altra grandezza che possiamo interpretare come intensità di corrente.
3. Le grandezze estensive sono additive.
4. Le intensità di corrente sono additive.

Queste quattro proprietà sono la giustificazione del fatto che le grandezze estensive possono essere immaginate come una sostanza. Il fatto di poter parlare di determinate grandezze come si parla di sostanze come l'acqua o l'aria, assume un particolare valore nell'insegnamento.

Ad esempio nella formulazione di frasi che contengono le grandezze estensive ci si può servire di tutti i modi di dire comunemente usati nel riferirsi a sostanze dicendo:

"un corpo contiene una certa quantità di energia", ma anche "il corpo ha energia" oppure "c'è una certa energia nel corpo". Si possono anche usare aggettivi come *molto* e *poco*: "un sistema può avere molta o poca energia".

Anche il fluire di una corrente di una grandezza estensiva si può descrivere con termini del linguaggio comune. Si potrà quindi dire che una corrente *fluisce* o *scorre* da A verso B, ma anche che *va* da A a B oppure che *parte* da A e *arriva* in B.

Questo modo di riferirsi alle grandezze estensive è di grande aiuto nell'insegnamento perché sfrutta un linguaggio già conosciuto dagli studenti. Nell'insegnamento tradizionale però questa possibilità non viene sfruttata (solo la massa e la carica elettrica sono presentate in questo modo)

e l'energia viene solitamente derivata dal lavoro nascondendo così la sua proprietà di grandezza estensiva.

	grandezza estensiva	intensità della corrente	grandezza intensiva
meccanica	quantità di moto p	forza F	velocità v
elettrologia	carica elettrica Q	intensità della corrente elettrica I	Potenziale elettrico Φ
termologia	entropia S	intensità della corrente di entropia I_s	temperatura T
chimica	quantità di sostanza n	intensità della corrente di materia I_n	potenziale chimico μ

Classificazione di alcune grandezze fisiche

Forme di esistenza e forme di scambio

Vedremo in questo paragrafo che la suddivisione dell'energia nelle varie *forme* non si fonda su un vero principio ma è la conseguenza di diversi punti di vista con cui si osserva tale grandezza.

L'energia E di un sistema può sempre essere espressa in funzioni di altre variabili x_1, x_2, x_3 , ecc.

Scegliendo in modo appropriato le variabili il sistema viene descritto interamente dalla funzione

$$E = E(x_1, x_2, \dots)$$

In questo caso la funzione dell'energia è detta "hamiltoniana" nei sistemi meccanici o "potenziale termodinamico" nei sistemi termodinamici.

In tutta una serie di sistemi a noi familiari, la funzione si scompone in una somma di termini, ognuno dei quali dipende da variabili che negli altri termini della somma non compaiono. Ad esempio potrebbe succedere che

$$E(x_1, x_2, x_3) = E'(x_1, x_2) + E''(x_3) \quad (4)$$

Si dice in questo caso che il sistema si scompone in sottosistemi non interagenti.

Ogni qualvolta una scomposizione del genere è possibile, ai vari termini della somma possono essere dati dei nomi: energia di riposo, energia cinetica, energia potenziale, energia del campo elettrico, ecc. In questo modo si ottengono le forme di *esistenza di energia*.

Veniamo alla definizione delle forme di scambio. L'esperienza ci insegna che in ogni trasformazione di un sistema da uno stato ad un altro, almeno due grandezze cambiano il loro valore. Ciò è conseguenza della validità della cosiddetta forma fondamentale dell'energia secondo Gibbs:

$$dE = Tds + \varphi dQ + vdp + \mu dn + \dots \quad (5)$$

dove T è la temperatura, S l'entropia, φ il potenziale elettrico, Q la carica elettrica, v la velocità, p la quantità di moto, μ il potenziale chimico e n la quantità di materia.

Notiamo che ogni singolo termine della (5) è formato da una grandezza *estensiva* (S , Q , p , n ...) associata ad una corrispondente grandezza *intensiva* (T , φ , v , μ ...); tali grandezze sono dette *coniugate*.

Possiamo anche immaginarci ogni termine della (5) nella forma ydx come una corrente della grandezza X che fluisce da o verso il sistema. L'equazione (5) evidenzia un fatto importante ma purtroppo spesso trascurato: quando fluisce energia fluisce sempre almeno un'altra grandezza estensiva, in altre parole:

"l'energia non fluisce mai sola"

Esattamente come per la (4), la variazione di energia dE di un sistema può essere espressa in funzioni della (5) che nei casi più semplici sarà formata da pochi termini. Questi termini (cioè tutti quelli diversi da zero) ci permetteranno di capire in che modo si è ottenuta la variazione di energia. Nella visione tradizionale ad esempio se il termine TdS è diverso da zero diremo che l'energia varia sotto forma di calore; se è diverso da zero il termine φdQ diremo che l'energia

varia sottoforma di energia elettrica; se è diverso da zero il termine **vdp** diremo che l'energia varia sottoforma di lavoro; ecc.

Per quanto sia comprensibile che con le conoscenze del XIX secolo i singoli termini delle equazioni (4) e (5) fossero considerati forme di energia e gli apparecchi, che assorbono energia in una forma e la restituiscono in un'altra, dei trasformatori di energia, questo approccio è infelice da un punto di vista moderno in quanto non fa che evidenziare il fatto che le varie forme di energia sono grandezze fisiche diverse con la singolare proprietà di poter essere trasformate l'una nell'altra.

Da quando conosciamo la teoria della relatività ristretta, sappiamo che l'energia è una grandezza fisica indipendente e non una grandezza di calcolo "derivata". Parlare di forme di energia appare di conseguenza, da un punto di vista moderno, altrettanto ingiustificato del parlare di varie forme di carica elettrica a seconda che la carica sia portata da elettroni, protoni o muoni. La teoria della relatività (che qui non sarà approfondita) ci dice che caratteristiche ha l'energia. Dall'equivalenza massa-energia segue che l'energia ha le stesse proprietà della massa: peso e inerzia. (La teoria della relatività generale ci dice addirittura che peso e inerzia sono la stessa proprietà).

Approccio dei "portatori di Energia"

Agli studenti si può insegnare che l'energia può essere immagazzinata e trasferita. L'Energia rimane sempre la stessa "cosa" mentre passa da un posto/oggetto/sistema ad un altro posto/oggetto/sistema. Non si dovrebbe associare l'energia con le sue "sorgenti", ma piuttosto con i "modi" in cui viaggia. Per cui non vi sono diverse "forme" di Energia ma diversi "modi di trasferire" energia. (Boohan, Ogborn, Driver & Millar, Pintò, Gutierrez & Couso).

Abbiamo visto nel paragrafo precedente che l'energia può essere suddivisa in forme di esistenza e forme di scambio. Tuttavia parlare genericamente di "forme di energia" è fuorviante da un punto di vista didattico perché si trasmette l'idea che a cambiare è qualcosa che di per sé non cambia quando invece a cambiare è soltanto il suo "portatore".

Alla luce di ciò, i termini della (4) potrebbero essere descritti in funzione della grandezza estensiva che fluisce insieme all'energia. Invece di energia sotto forma di calore possiamo dire che insieme

alla corrente di energia c'è anche una corrente di entropia e questa grandezza estensiva che fluisce con l'energia la chiamiamo genericamente "portatore di energia".

L'energia è dunque letteralmente portata da entropia, da carica elettrica, da quantità di moto, da quantità di sostanza, ecc. Un flusso del portatore può essere collegato a un flusso di energia più o meno intenso perché il portatore può essere caricato con molta o con poca energia.

Quello che bisognerebbe riuscire a veicolare è che non è l'energia trasportata attraverso il campo elettromagnetico, un gasdotto, o un muro di una casa ad avere caratteristiche differenti, ma piuttosto il suo portatore che fluisce contemporaneamente insieme all'energia in ciascun caso.

Per capire meglio questo concetto consideriamo per semplicità delle patate che cambino i loro portatori durante il trasporto. Le patate devono percorrere un lungo tragitto dal campo fino a casa: esse vengono portate da un trattore dai campi fino a un furgone per la 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. Andando avanti col nostro confronto possiamo affermare che 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".

Naturalmente ci sono dei limiti su come vada letteralmente intesa l'espressione "portatore di energia" e bisogna fare molta attenzione a non banalizzare troppo il discorso. La parola "portatore" implica soltanto una relazione temporale tra il flusso di energia e il flusso di un portatore di energia, è uno strumento didattico che può essere utilizzato 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 esempio un camion, può essere caricato con una maggiore o minore quantità di una merce.

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 trasformatori di energia. Per esempio l'energia è trasferita dal portatore "carica elettrica" al portatore "entropia" in un forno elettrico; è trasferita dal portatore "quantità di sostanza" al portatore "carica elettrica" in una centrale; è trasferita dal portatore "carica elettrica" al portatore "fotone" in una lampadina; ecc.

In un corso di fisica per la scuola secondaria di primo grado sarebbe complicato introdurre le grandezze estensive, tuttavia questo approccio è possibile associando la grandezza estensiva a correnti di sostanza. Così, il portatore d'energia in un tubo di un impianto di riscaldamento non sarà associato all'entropia ma all'acqua calda; nel caso di trasporto di energia in un gasdotto non associamo il portatore di energia con la quantità di sostanza ma con il gas stesso; in una centrale elettrica l'energia è portata dal carbone e dall'ossigeno e fluisce fuori dalla centrale insieme al flusso di carica elettrica; ecc. Da un punto di vista didattico queste situazioni si possono rappresentare graficamente con un diagramma di flusso di energia offrendo i mezzi per un semplice calcolo grafico.

ESEMPI DI DIAGRAMMI DI FLUSSO PER L'ENERGIA

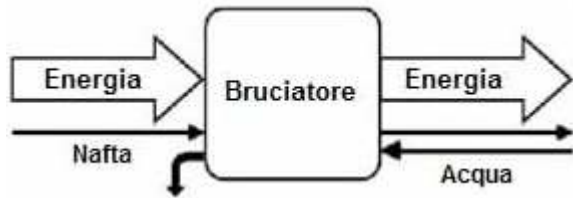


Fig.1 Diagramma di flusso di una centrale termoelettrica o di un impianto di riscaldamento.

Fig.2 Diagramma di flusso dell'energia di un aspirapolvere, di un ventilatore o di un compressore.



Fig.3 Diagramma di flusso dell'energia di una dinamo.

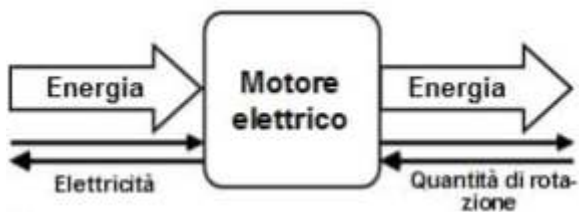
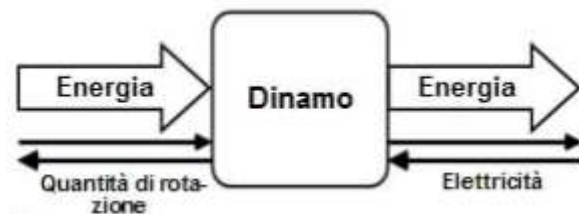


Fig.4 Diagramma di flusso dell'energia di un motore elettrico.

Fig.5 Diagramma di flusso dell'energia di una cella solare.



Fig.6 Diagramma di flusso dell'energia di una lampadina.



Dai diagrammi di flusso chi non sa cosa sia un motore elettrico e una dinamo, (o ugualmente una cella solare e una lampadina) può facilmente capire dai disegni quello che i due apparecchi fanno. Il motore elettrico trasferisce energia dall'elettricità alla quantità di rotazione e la dinamo dalla

quantità di rotazione all'elettricità. La dinamo svolge esattamente il processo inverso del motore elettrico. Si può quindi dire che i due dispositivi funzionano in modo inverso l'uno rispetto all'altro.

L'energia si conserva

Il discorso sull'energia però non finisce qui. Tale concetto infatti rappresenta un punto di vista molto utile per analizzare i fenomeni più complessi attraverso il principio di conservazione dell'energia (per semplicità, visto lo scopo del lavoro, trascuro l'equivalenza relativistica tra massa ed energia) che ci dà indicazioni precise per interpretare in che modo l'energia può passare da un portatore all'altro. Tra le numerose analogie che si possono fare per veicolare questo principio, ho trovato molto efficace quello Richard P. Feynman (1918-1988) nella sua opera "The Feynman Lectures on Physics", (vol I Parte 1).

Immaginiamo un ragazzo, per esempio "Dennis la peste", che abbia dei dadi assolutamente indistruttibili, e che non possano essere suddivisi in pezzi. Ognuno è uguale all'altro. Supponiamo che abbia 28 dadi. Sua madre lo mette con i suoi 28 dadi in una stanza, al mattino. Alla sera, essendo curiosa, conta accuratamente i dadi e scopre una legge fenomenale. Non importa che cosa egli abbia fatto con i dadi, questi sono sempre 28! Ciò continua per un certo numero di giorni, finché un giorno i dadi sono solo 27. Una piccola ricerca ne svela uno sotto il tappeto: la mamma deve cercare ovunque per accertarsi che il numero di dadi non sia cambiato. Un giorno, tuttavia, il numero appare diverso: vi sono solo 26 dadi. Un'accurata indagine mostra che la finestra era aperta, e uno sguardo all'aperto permette di ritrovare gli altri due dadi. Un altro giorno, un conteggio accurato indica che vi sono ben 30 dadi! Ciò causa una considerevole costernazione finché si scopre che Bruce è venuto a far visita, portando con sé i suoi dadi, e ne ha lasciati alcuni a casa di Dennis. Dopo aver sistemato i dadi in più, la mamma chiude la finestra e non permette più a Bruce di entrare. Tutto sta andando nel verso giusto finché una volta, contando, essa trova solo 25 dadi. Però nella stanza c'è una scatola, una scatola per i giocattoli e la mamma si accinge ad aprirla, ma il ragazzo dice "No, non devi aprire la mia scatola", e strilla. Alla mamma viene impedito di aprire la scatola. Essendo estremamente curiosa, e talvolta ingegnosa, essa inventa un trucco! Sa che ogni dado pesa 3g, così pesa la scatola quando ha sotto gli occhi tutti i 28 dadi e

trova 200 g. Più tardi desidera controllare, pesa di nuovo la scatola, sottrae 200 g e divide per 3.

Scopre così quanto segue:

$$n^{\circ} \text{ cubi visibili} + (\text{Peso scatola} - 200\text{g}) / 3\text{g} = \text{costante}$$

In seguito trova qualche discordanza, ma uno studio accurato indica che l'acqua sporca della vasca da bagno non è più allo stesso livello. Il bambino sta gettando dadi nell'acqua, essa non può vederli perché l'acqua è sporca, ma può trovare quanti dadi sono nell'acqua aggiungendo alla formula un altro termine. Poiché il livello iniziale dell'acqua era di 20 cm e ogni dado solleva l'acqua di 0,5 cm, la nuova formula sarà:

$$n^{\circ} \text{ cubi visibili} + (\text{Peso scatola} - 200\text{g}) / 3\text{g} + (H \text{ acqua} - 20\text{cm}) / 0.5\text{cm} = \text{costante}$$

Col graduale aumento della complessità del suo ambiente familiare, essa trova tutta una serie di termini che rappresentano i modi di calcolare il numero dei dadi, che sono in posti dove le è impossibile vederli. Come risultato ottiene una formula complicata e una quantità da calcolare, che rimane sempre la stessa in ogni situazione che si presenta ("La fisica di Feynman", Vol. 1, Zanichelli, 2001).

Trovo questo "racconto" denso di significati e spunti teorici che vanno oltre il principio di conservazione stesso e che ci mostrano il "modus operandi" del fisico stesso.

Nella figura della mamma e nel suo comportamento si può ricollegare il lavoro stesso del fisico che attraverso congetture sempre più approfondite riesce ad arrivare alla descrizione di un fenomeno.

La prima cosa da mettere in evidenza è infatti lo stupore della mamma di Dennis nello scoprire che in una situazione alcuni dadi sono stati gettati via dalla finestra e in un'altra che Bruce ha dimenticato alcuni suoi dadi, portando il computo totale dei dadi da ventotto a trenta.

La mamma a questo punto chiude la finestra e non permette all'amico di giocare con Dennis perché cerca di verificare la legge che ha scoperto all'inizio. Nota infatti, che qualunque cosa faccia Dennis, finché la finestra è chiusa e nessuno aggiunge cubi "estranei", i cubi restano ventotto. L'idea promossa è che l'energia si conserva in una particolare situazione, cioè all'interno di quello

che la fisica chiama *sistema isolato*. Inoltre, quest'esempio fa riflettere sul fatto che l'energia può non presentarsi chiaramente perché "nascosta" dalla scatola piuttosto che dall'acqua o sotto il tappeto ma sempre esiste un modo per scoprirla analizzando delle proprietà che cambiano a seconda del contenuto di energia (peso della scatola, volume dell'acqua, ecc). Certo proponendo un esempio del genere, per certi versi illuminante e molto più costruttivo di tante definizioni, si deve anche stare attenti che gli alunni non banalizzino la cosa perché nella realtà è tutto decisamente più complicato in quanto non conosciamo né la forma (i dadi), né la quantità (il numero dei dadi) dell'energia.

BIBLIOGRAFIA

- *Der Karlsruher Physikkurs*, 2006
- Friedrich Herrmann, Georg Job, *Concezioni Inadatte all'Insegnamento della Fisica*, 2008
- Raymond A. Serway, *Fisica per Scienze e Ingegneria*, Vol. I, 1995
- *The Feynman Lectures on Physics*, 1963
- *La fisica di Feynman*, Vol. 1, Zanichelli, 2001
- F. Bevilacqua, *L'evoluzione del concetto di energia in fisica*, Università di Pavia
- Michela Mayer, *Insegnare l'energia, come e perché?*, Portale Treccani, 2008
- *La fisica per i licei scientifici*, Zanichelli editore