

Il concetto di energia e le sue applicazioni *

E. Fabri

Dipartimento di Fisica dell'Università di Pisa

—oOo—

Il tema di questa lezione è l'energia, e perciò il centro del discorso sarà di carattere fisico. Il corso nel suo insieme si propone di trattare l'energia anche in rapporto ai cicli vitali delle piante; il mio scopo è quello di fare un'introduzione al corso, che dia una certa sistemazione logica alle idee fisiche di base.

Dovendo parlare di energia, ci si potrebbe aspettare che io cominci con la definizione di energia; ma questa è una cosa che eviterò, perché non saprei come darla. Molti concetti fisici sono difficili da definire in partenza in maniera accurata; sicuramente l'energia è tra i più difficili. Se qualcuno insistesse a chiedermi: "insomma, che cosa è l'energia?" forse la sola risposta che saprei dare a questo punto è una che non considerereste una definizione: direi che la cosa più importante che si può dire sull'energia è che si conserva.

La parte iniziale del mio discorso cercherà di precisare che cosa vuol dire, dal punto di vista di un fisico, qualcosa che si conserva. Se l'energia fosse l'unica, potrei dire: "l'energia è quella cosa che, come tutti sappiamo, si conserva"; ma in fisica ci sono altre cose che si conservano. Questo però ci aiuta, perché permette di costruire il discorso partendo da esempi più semplici e anche più direttamente accessibili dal punto di vista della vostra didattica.

Significato di una legge di conservazione

L'esempio più ovvio di cosa che si conserva è il numero. Voglio però precisare subito che qui non stiamo facendo matematica, ma fisica: quindi io mi riferisco a fatti ed esperimenti del mondo reale. Perciò quando dico che il numero si conserva, intendo dire che se prendo un certo numero di oggetti discreti e distinti — per es. 4 pezzi di gesso — il fatto che sono 4 rimane anche se li sposto di qua e di là: a meno che non se ne rompa qualcuno, continuano ad essere 4. Potrò contare questi gessi ripetutamente, e troverò sempre 4.

La cosa può sembrare banale, ma non lo è tanto che non valga la pena di essere considerata e fatta oggetto di riflessione didattica. Finché mi limito a 4 pezzetti di gesso, tutto è semplice; ma se si prende in considerazione un insieme un po' più numeroso (ad es. i fagioli del famoso barattolo che si vede alla TV) contare può diventare una faccenda complicata, ed è difficile arrivare in fondo senza sbagliare: allora la conservazione del numero non è più così evidente.

* Lezione tenuta il 29-1-84; pubbl. in *La macchina albero* (a cura del Seminario Didattico della Facoltà di Scienze M.F.N. dell'Università di Pisa) e in *Energia e vita*, Quaderno 20 di *La Fisica nella Scuola* **42** (2009), suppl. al n. 3, pag. 100.

Comunque la ragione per cui ho scelto di partire dalla conservazione del numero è che questa mi rende facile introdurre un discorso che diventerà più importante nel seguito. La conservazione del numero significa che il numero degli oggetti non cambia; ma significa anche che se cambia — se per es. il numero dei fagioli nel barattolo non resta lo stesso — ciò vuol dire che ne sono stati tolti o aggiunti.

Questo può venir espresso in maniera precisa: la conservazione di una quantità si connette immediatamente a quello che si chiama bilancio. Se contate i vostri fagioli a un certo momento, e li ricontate più tardi, il secondo numero può differire dal primo soltanto per due motivi: perché ne sono stati aggiunti, quindi sono entrati nel barattolo, oppure perché ne sono stati tolti, cioè ne sono usciti. La cosa si riassume così:

$$N_{\text{dopo}} = N_{\text{prima}} + N_{\text{entrati}} - N_{\text{usciti}}$$

Questa è una prima forma di bilancio estremamente semplice, che esprime una proprietà di conservazione. Generalmente i fisici preferiscono scriverla in quest'altro modo:

$$\Delta N \stackrel{\text{Df}}{=} \text{variaz. di } N = N_{\text{dopo}} - N_{\text{prima}} = N_{\text{entr.}} - N_{\text{usc.}}$$

ΔN è un simbolo che sta a indicare la variazione che è avvenuta nella grandezza; il segno uguale con Df sopra indica che quella è un'uguaglianza per definizione. L'intera formula ci dice che il numero di fagioli dopo, meno il numero di fagioli prima — cioè la variazione — è uguale al numero di quelli che sono entrati meno il numero di quelli usciti.

Passiamo ora a un esempio di conservazione meno evidente: la conservazione del volume di un liquido. Credo che tutti abbiate sentito parlare degli studi di Piaget, dai quali risulta che l'idea che il volume di un liquido si conserva nel travaso è tutt'altro che innata: un bambino l'acquiesce a una certa età, o meglio a un certo stadio del suo sviluppo intellettuale. Aggiungo che tale acquisizione inevitabilmente avviene in base alle esperienze che il bambino fa: perciò non si deve parlare di stadi di sviluppo in senso rigido e acritico. Il grado di sviluppo intellettuale, l'età alla quale un bambino conquista certi concetti, dipendono dall'ambiente e dalle esperienze che il bambino fa. Tutti i bambini fanno normalmente, senza che nessuno glielo suggerisca, esperimenti con i liquidi (del resto i bambini fanno esperimenti su tutto): a un certo punto questi esperimenti si coagulano — per così dire — nell'acquisizione di un concetto. Ma naturalmente la rapidità con cui un tale processo avviene dipende dalla quantità e qualità degli stimoli che arrivano dall'ambiente familiare e sociale del bambino.

Il volume di un liquido è dunque un'altra grandezza che si conserva: tanto è vero che i liquidi si comprano misurati in volume, si versano da un recipiente all'altro senza preoccupazioni, ecc. È inutile dilungarci: per il volume di un liquido si può scrivere lo stesso tipo di bilancio che abbiamo visto per il numero.

Un'idea che si avvicina molto di più al nostro tema, e sulla quale mi soffermerò più a lungo, è la conservazione della massa. Anche la conservazione della massa è in una certa misura esperienza comune; tuttavia l'idea di massa è già molto meno intuitiva che non l'idea di volume. Sapete benissimo che non è facile per un bambino accettare l'idea che oggetti che hanno volumi uguali possono avere masse diverse; oppure che oggetti con la stessa massa possono avere volumi diversi. Massa e volume non sono la stessa cosa, non vanno sempre insieme.

Per questo motivo non è didatticamente opportuno usare la conservazione del volume per arrivare alla conservazione della massa (per esempio deformando una pallina di pongo). La conservazione del volume ha validità più ristretta: è circoscritta ai liquidi o in generale ai casi in cui non c'è compressione o dilatazione apprezzabile. Ci sono invece casi in cui la massa si conserva e il volume no: per es. nell'evaporazione dell'acqua di una bacinella, l'acqua che non c'è più si ritrova come vapore nell'aria, e il volume del vapore è molto maggiore di quello del liquido originario. Spesso il volume non si conserva nelle soluzioni: quando si mescolano due liquidi può capitare che il volume della miscelazione non sia la somma di quelli dei due liquidi di partenza, mentre la massa si somma sempre. Questo succede per es. con acqua e alcool, ma anche più evidente è il caso del sale sciolto nell'acqua: in un litro d'acqua si può sciogliere molto sale (almeno 300 g) e il livello dell'acqua non sale quanto dovrebbe, perché il cloruro di sodio (più esattamente gli ioni cloro e sodio) trovano posto negli interstizi tra le molecole dell'acqua.

Ripeto: a differenza di quella del volume, la conservazione della massa è un principio fisico assolutamente generale. Scriveremo dunque per la massa una relazione dello stesso tipo di quella scritta per il numero:

$$\Delta M \stackrel{\text{Df}}{=} \text{variaz. di } M = M_{\text{dopo}} - M_{\text{prima}} = M_{\text{entr.}} - M_{\text{usc.}}$$

La variazione di massa durante un certo intervallo di tempo, in cui avviene un qualunque fenomeno, può dipendere solo dal fatto che nel sistema è entrata o uscita della materia.

Ho già detto che la massa è un concetto un po' meno immediato e intuitivo del volume: bisogna quindi fare un po' più di attenzione quando si usa la conservazione della massa. A questo scopo vediamo un esempio, che ho scelto anche perché permette qualche riflessione legata al tema generale del corso, a proposito dello sviluppo delle piante. Anche qui si tratta di cose apparentemente banali, ma che non lo sono forse del tutto quando si cerca di metterle insieme in maniera ordinata.

Consideriamo lo sviluppo di una pianta, dal seme alla pianta adulta, e per fissare le idee prendiamo il caso di una ghianda. Dalla ghianda viene fuori una quercia, che è un albero bello grosso; applichiamo a questo fenomeno il bilancio della massa. Che cosa vuol dire? come ragiona il fisico in questo caso? C'è una M_{prima} , che è quella della ghianda; e c'è una M_{dopo} , che è quella della

quercia. Ovviamente la massa dopo è maggiore di quella prima, e abbiamo perciò una variazione di massa, una ΔM , positiva. Nell'equazione che esprime il bilancio c'è scritto che ΔM dev'essere uguale alla massa entrata meno la massa uscita: dobbiamo dunque cercare la massa entrata e quella uscita.

Da dove prende massa una pianta che cresce? Le fonti di entrata sono essenzialmente due: l'aria e il terreno. Semplificando molto, possiamo dire che dal terreno una pianta prende soprattutto acqua. (Questo non è del tutto vero: nessuna pianta potrebbe crescere se dal terreno prendesse solo acqua; tuttavia in termini di massa l'acqua è la parte preponderante.) Dall'aria la pianta prende essenzialmente anidride carbonica. Qui non ha importanza come questa anidride carbonica viene utilizzata (la chimica della fotosintesi): stiamo facendo solo un bilancio quantitativo della massa. Il nostro discorso è semplicemente: quella piccola ghianda è diventata una quercia, un oggetto bello massiccio, che può pesare qualche tonnellata; questa materia è venuta in parte dal terreno (acqua) e in parte dall'aria (anidride carbonica).

Occupiamoci ora della massa uscita. Una pianta perde acqua a causa della traspirazione delle foglie; emette ossigeno nel processo di fotosintesi. Inoltre durante la vita di una pianta le foglie cadono: quindi la pianta perde la massa delle foglie cadute... Forse ci sarà ancora qualche altra perdita, che non mi è venuta in mente; ma quelle che abbiamo visto sono già abbastanza significative.

Torniamo allora all'equazione: dal momento che la pianta è cresciuta, la massa entrata deve superare di un bel po' quella uscita. Questo esempio è interessante per il seguente motivo: mentre la caduta delle foglie e l'acqua che esce si vedono facilmente, il contributo importante che viene alla massa dall'anidride carbonica non è per niente ovvio. Ma su questo tornerò un po' più avanti.

Restando sempre in tema di conservazione, ci sono anche altre cose che si conservano, e di cui ora vorrei parlare. In realtà si tratta più di chimica che di fisica, ma d'altra parte la distinzione non è poi così netta. Oltre a esserci la conservazione della massa nel suo insieme, cioè di tutta la materia che partecipa al processo, c'è anche la conservazione dei singoli elementi chimici. Per fare un solo esempio, in una pianta c'è del carbonio: allora voi potete applicare alla quantità di carbonio presente nella pianta il ragionamento di prima, e cioè: la differenza tra la massa di carbonio alla fine e quella al principio dev'essere uguale alla massa del carbonio entrato meno quella del carbonio uscito.

A questo punto debbo usare un dato che ho stimato a occhio, e di cui chiedo conferma ai botanici: è vero che in una pianta il 20% in peso è carbonio? (Osservate comunque che anche se fosse il 10% sarebbe sempre una bella quantità!) Ovviamente nella quercia c'è molto più carbonio che nella ghianda: la differenza da dove è venuta? Se ricordate quello che ho detto prima, sappiamo già che la fonte essenziale è l'aria; forse un po' ne viene anche dal terreno, ma in quantità

trascurabile. Notate che nell'aria di anidride carbonica ce n'è pochina; però quel poco è essenziale a spiegare il carbonio contenuto nella pianta.

Ma supponiamo di non saperlo: come potremmo arrivarci? Siccome credo nella conservazione degli elementi chimici, per cominciare dico che questo carbonio da qualche parte dev'essere venuto, e vado in cerca della sua origine. Poiché una pianta può crescere anche con le radici nell'acqua, dove di carbonio non ce n'è, faccio l'ipotesi che sia venuto dall'aria. Però uno scienziato non si può accontentare di un'affermazione pura e semplice: ha bisogno di una prova sperimentale. La ricerca di questa prova non fa parte del nostro argomento, ma è bene ricordare che a questo punto bisognerebbe dimostrare che effettivamente il carbonio viene dall'aria.

Se ora potessi allargare il mio discorso ad altri argomenti di fisica, potrei mostrarvi moltissime applicazioni di questo stesso ragionamento. Una volta stabilita una legge di conservazione in fisica, prima o poi si scopre sempre qualche fenomeno nuovo che sembra violare questa conservazione. Può capitare che non si conservi la massa, o magari il numero barionico (un concetto più sofisticato, di cui non vi parlerò); i particolari non hanno importanza, l'idea è sempre la stessa: c'è un nuovo fenomeno che sembra contraddire una legge di conservazione in cui si credeva. Darò qui due esempi che sono alla portata della vostra didattica: in una pozzanghera c'è dell'acqua, ci tornate il giorno dopo e non c'è più. Allora l'acqua non si conserva? Noi sappiamo che è evaporata, però bisogna dimostrarlo. Oppure: ho colto dei funghi e li ho messi a seccare; se li avevo pesati prima e li ripeso dopo, trovo che non c'è rimasto quasi niente. Dov'è andata a finire la massa che manca? Anche qui si tratta di acqua che è evaporata; ma un conto è dirlo, e un conto è darne la prova.

Qual è l'atteggiamento generale del fisico in un caso del genere? Fa un'ipotesi: per es. che la massa se ne sia andata in evaporazione; ma dopo aver fatto l'ipotesi non ha pace finché non ha trovato il modo di verificarla con un esperimento. In altre parole: non dovete credere che avendo detto che la massa si conserva siamo a posto per sempre: prima o poi ci sarà qualche esperimento che sembrerà rimettere tutto in discussione. Allora si dovrà fare un'ipotesi per spiegare il nuovo fatto, ma si dovrà anche cercarne una conferma sperimentale: solo così si potrà dire che le cose sono tornate a posto.

A questo punto ho esaurito la premessa, e possiamo cominciare a parlare di energia.

Energia: forme e trasformazioni

Avevo detto all'inizio che l'energia è una cosa che si conserva; ora posso dire meglio: l'energia è un'altra delle cose che si conservano, in aggiunta a quelle di cui abbiamo già parlato. Però l'energia non si vede e non si tocca, e questo naturalmente crea un problema ancora più grave: mentre la massa si manifesta in cose tangibili, che si possono pesare, ciò non accade per l'energia. E' questa

la ragione per cui nella storia della scienza l'idea dell'energia e della sua conservazione è relativamente recente: esiste da poco più di un secolo, dalla metà dell'ottocento. Si tratta di un concetto più astratto; e se è stato difficile per i grandi scienziati, lo è anche per tutti i giovani ai quali cerchiamo d'insegnarlo; la sua acquisizione è un processo meno immediato e intuitivo di quanto non sia per il volume o anche per la massa.

Un fatto caratteristico è che non si vede l'energia come tale, l'energia delle cose che stanno intorno a noi. Quello che si vede è l'effetto dell'energia nelle trasformazioni. In un qualunque fenomeno chimico, fisico, biologico ... o come lo si voglia chiamare (a volte è difficile decidere come classificare un fenomeno), insomma in qualunque cosa accada in natura o in laboratorio, c'è sempre in ballo una trasformazione di energia. Quella che si nota non è l'energia che se ne sta in un certo corpo, bensì quella che un corpo scambia interagendo con un altro. E del resto è proprio così che si è arrivati all'idea di conservazione: osservando che quando due corpi interagivano, sebbene avvenissero delle trasformazioni, pure si riusciva a trovare un qualche cosa che rimaneva costante, che si conservava, nello stesso senso del "bilancio" che abbiamo discusso prima per la massa.

Dicendo questo ho implicitamente introdotto un fatto molto importante: l'energia ha varie forme. Non intendo farne un elenco, e nemmeno dare definizioni: preferisco mostrare degli esempi, da cui si veda come si arriva all'idea delle diverse forme di energia.

Un esempio che mi pare istruttivo è quello dell'orologio: tutti adoperiamo orologi, e ce ne sono di tante specie, che funzionano con meccanismi diversi. Possiamo raggrupparli in quattro classi, a seconda della sorgente di energia: orologi a molla, a peso, a pila, a cella solare.

Gli orologi a molla ormai sono quasi scomparsi; però la sveglia di casa (quella che mia moglie carica tutte le sere) è un orologio a molla. Gli orologi a peso sono i vecchi classici orologi a pendolo, con il peso attaccato a una catenella, che ogni tanto dev'essere tirato su. Gli orologi a pila sono comunissimi, e tutti sappiamo che quando non vanno più bisogna cambiare la pila. Infine alcuni orologi più sofisticati, quelli che si ricaricano da sé, sono a cella solare: hanno una piccola superficie sensibile alla luce.

Che cosa c'è in comune tra questi quattro oggetti (oltre al fatto di essere orologi)? Tutti e quattro per funzionare hanno bisogno di energia. I loro meccanismi possono essere diversi oppure no; per noi la sola differenza importante è che utilizzano forme di energia diverse, cioè attingono energia a quattro fonti diverse.

L'orologio a molla utilizza l'energia elastica della molla. L'orologio a peso utilizza l'energia che possiede un peso quando lo si solleva nel campo della gravità, e perciò la chiameremo energia gravitazionale. L'energia della pila, che verrebbe fatto di chiamare energia elettrica, è invece energia chimica, perché

proviene da una reazione chimica. È vero che una pila produce una corrente elettrica, con tutti gli effetti che ne conseguono; ma alla fine dei conti la pila fornisce all'orologio un'energia che è stata perduta dai composti chimici al suo interno. La cella solare usa energia elettromagnetica: infatti la luce che essa assorbe è una forma di onde elettromagnetiche, sia che provenga dal Sole o da una lampada.

Mi è servito l'esempio dell'orologio per mostrare come si può far funzionare uno stesso oggetto attingendo energia a fonti diverse, il che vuol dire che in un certo senso queste forme di energia sono equivalenti: una può fare le veci dell'altra. Naturalmente per raggiungere questo scopo bisogna saper fabbricare l'oggetto nel modo giusto, in modo che sia capace di utilizzare la forma di energia voluta; ma il fatto importante è che da questo punto di vista una forma di energia non è meglio di un'altra: tutte possono svolgere ugualmente bene la funzione di far camminare l'orologio.

Possiamo rivedere quest'idea dell'equivalenza delle diverse forme di energia esaminando il quadro qui sotto.

<i>Per riscaldare dell'acqua si può usare:</i>	
CARBONE
GAS
PETROLIO
ELETTRICITÀ
SOLE
ATTRITO
REAZIONI CHIMICHE
REAZIONI NUCLEARI

Come vedete, a destra ho messo dei puntini, perché vorrei sapere da voi cosa mettere al loro posto. Ho elencato diversi modi di scaldare dell'acqua: alcuni sono del tutto naturali, ovvi; altri forse li dovrò spiegare perché non sono altrettanto evidenti. Non devo certo spiegare cosa vuol dire scaldare l'acqua col carbone, con il gas, con il petrolio o l'elettricità; neanche con il sole, anche se non è molto comune.

Passiamo all'attrito: di solito non si ricorre all'attrito per scaldare l'acqua per la pastasciutta; però è noto a tutti che con l'attrito si possono riscaldare gli oggetti. Tutti sanno che uno può bruciare i freni della macchina se continua a frenare troppo a lungo in discesa; quindi se potesse buttare dell'acqua fredda sui tamburi dei freni, li raffredderebbe e riscalderebbe l'acqua.

Reazioni chimiche: ci sono numerosi esempi di reazioni tra sostanze in soluzione nell'acqua, il cui risultato — oltre alla reazione chimica che si voleva — è anche che l'acqua si scalda.

Reazioni nucleari: l'espressione può fare un po' effetto, ma vuol dire una cosa molto semplice: anche le reazioni nucleari producono calore. Del resto, che uno dei grossi problemi dei reattori nucleari sia quello di smaltire il calore che non viene utilizzato per produrre energia elettrica, è cosa di cui si discute molto di questi tempi, ogni volta che si progetta una nuova centrale nucleare: è il problema detto dell' "inquinamento termico." È per questa ragione che i reattori nucleari vengono costruiti vicino ai fiumi: l'acqua del fiume viene utilizzata per raffreddare gli impianti del reattore e quando esce è un po' più calda di quando entra; poiché viene reimpressa nel fiume, a volte ne nascono dei problemi ecologici, soprattutto per gli animali che vivono nel fiume. Dunque anche un reattore nucleare scalda l'acqua, sebbene questo non sia un modo molto "domestico" di raggiungere lo scopo.

Quello che ora vi chiedo è: quali forme di energia si utilizzano nei vari casi? Guardate che per la maggior parte la risposta è la stessa; solo qualcuno richiede una risposta diversa.

La risposta giusta non è mai "energia termica." È vero che in tutti i casi si produce calore, ma per sapere quale forma di energia si è usata bisogna andare a vedere la sorgente. Nel caso del carbone, del petrolio e del gas si tratta di energia chimica. In tutti questi casi avviene una reazione chimica (una combustione): il carbonio si combina con l'ossigeno dell'aria e dà luogo ad anidride carbonica; l'idrogeno presente nel gas e nel petrolio si combina anch'esso con l'ossigeno per formare acqua. Dato che le molecole finali hanno meno energia di quelle iniziali, la differenza viene resa disponibile per scaldare l'acqua.

Nel caso dell'elettricità la cosa è diversa, e dipende soprattutto dall'origine di questa energia elettrica. Naturalmente l'energia viene da una centrale elettrica, ma la centrale può essere idroelettrica, a gasolio, nucleare: quindi non si può dire la forma di energia utilizzata se non si sa in quale centrale l'elettricità è stata prodotta.

Nel caso del Sole si può dire che si tratta di energia elettromagnetica: è la stessa cosa dell'orologio a cella solare di cui abbiamo parlato prima. Si potrebbe però fare un'altra osservazione: quale processo succede nel Sole, il cui risultato è l'emissione di quell'energia? Nel Sole avvengono reazioni nucleari (essenzialmente trasformazioni di quattro nuclei di idrogeno in un nucleo di elio): quindi l'energia dal Sole può essere vista come energia nucleare.

Passiamo all'attrito: potremmo dire energia meccanica, ma possiamo precisare. Per esserci l'attrito ci dev'essere qualcosa che si muove: l'attrito ha come effetto di fermare un oggetto in moto. Dunque abbiamo a che fare con una forma più specifica di energia meccanica: l'energia cinetica.

Possiamo perciò riempire il nostro quadro come segue:

Per riscaldare dell'acqua si può usare:

CARBONE	Chimica
GAS	"
PETROLIO	"
ELETTRICITÀ	dip. dalla centr.
SOLE	Nucleare
ATTRITO	Cinetica
REAZIONI CHIMICHE	Chimica
REAZIONI NUCLEARI	Nucleare

Gli esempi che abbiamo visto ci hanno mostrato come varie forme di energia possono produrre lo stesso effetto, e quindi in questo senso si equivalgono. Possiamo riassumere e generalizzare così: tutte le forme di energia sono convertibili. Non posso ora entrare nel merito di questa affermazione per criticarla, ma forse avete già un'idea del fatto che bisognerebbe prenderla con qualche cautela: la convertibilità non è sempre incondizionata, e soprattutto non è reversibile.

Per noi è più utile però un'altra osservazione: la convertibilità è anche quantitativa, nel senso che quello che si fa con una certa quantità di carbone si può fare con una certa quantità di petrolio, e tra le due quantità c'è un rapporto fisso. Se parliamo in termini quantitativi è necessario avere delle unità di misura, e la convertibilità ci permette di usare la stessa unità: non c'è bisogno di un'unità di misura per l'energia chimica, di una per l'energia elettromagnetica, ecc. L'unità può essere la stessa perché si riferisce a una stessa cosa — l'energia — che si può convertire da una forma all'altra.

Per l'energia esistono moltissime unità di misura: potrei fare una lista sterminata, mentre ho appena detto che si può misurare qualunque energia con la stessa unità. Perciò, anche per evitare la "babele" che ne seguirebbe, ve ne citerò soltanto tre, che troveranno applicazione nel seguito: il joule (J), la grande caloria (kcal) e il chilowattora (kWh). Ho scelto queste tre perché sono quelle più significative: sia nella vita pratica, sia nelle applicazioni all'ambito fisico-chimico-biologico. Come al solito, non mi metterò a dare definizioni: darò solo i fattori di conversione, perché parlando di unità diverse bisogna sapere quanto vale ciascuna in funzione dell'altra.

La grande caloria è pari a 4184 J; in cifra tonda 4000 J, perché non avremo bisogno di fare calcoli molto precisi. Il chilowattora è un'unità che tutti conosciamo dalle bollette dell'Enel, e vale invece $3.6 \cdot 10^6$ J, ossia 3 600 000 J.

Apriamo una parentesi sulla notazione che ho usata, e che si chiama notazione esponenziale o scientifica. Non so quanto vi sia familiare: è abbastanza comune anche nei calcolatorini, dove si trova in questa forma: 3.6E6. A prima vista può sembrare una notazione un po' bizantina, ma è utile quando si ha a che fare con numeri molto grandi o molto piccoli, per non dover scrivere lunghe

sfilze di zeri; inoltre, questa notazione semplifica le operazioni di moltiplicazione e divisione. Ho preparato qualche esempio per mostrarvi perché i fisici hanno simpatia per la notazione esponenziale.

Primo esempio: $3.5 \cdot 10^6$ è più comodo di tre milioni e mezzo; se dovete fare una moltiplicazione come

$$(3.5 \cdot 10^6) \times (4 \cdot 10^3) = 14 \cdot 10^9$$

provate invece a scrivere

$$3\,500\,000 \times 4\,000 = 14\,000\,000\,000:$$

è chiaro che è molto più pratico lavorare con le potenze di 10. Intanto si debbono scrivere meno zeri; poi il calcolo si fa moltiplicando 3.5 per 4, che dà 14, e moltiplicando 10^6 per 10^3 che dà 10^9 (regoletta del prodotto di potenze di ugual base). Vedete che si fa molto prima.

Ma c'è anche un'altra ragione: ai fisici capita di dover esprimere grandezze un po' insolite, come per es. l'energia totale che si prevede che il Sole potrà emettere prima di esaurire la sua sorgente interna di energia. Questa energia è dell'ordine di 10^{45} J: provate un po' a scriverlo alla maniera solita . . .

$$1\,00000\,00000\,00000\,00000\,00000\,00000\,00000\,00000\,00000\,00000\,00000\,00000$$

Prendiamo un altro esempio: l'energia che si ottiene dall'ossidazione di una molecola di glucosio (potrebbe servire a un biochimico): questa è di circa

$$5 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 0.000\,000\,000\,000\,000\,000\,005 \text{ joule,}$$

e vi mostra l'utilità degli esponenti negativi. Per quanto si possa non avere simpatia per l'uso degli esponenti, mi sembra che a questo punto non ci siano alternative.

Abbiamo visto i fattori di conversione fra le nostre unità; ora resta da vedere il significato di almeno una di queste. Occupiamoci del joule, che evidentemente è un'unità piccola rispetto alle altre. La sua definizione risulta implicitamente dal seguente problema (un problema che troverete un po' strano, perché non è del tipo cui siete abituati):

Un uomo di 70 kg fa una passeggiata in montagna, e sale per 600 metri.
Basterà un piatto di pastasciutta per restituirgli l'energia consumata?

Analizziamo un po' questo problema: dicendo "un uomo di 70 kg" ho usato volutamente l'espressione del linguaggio comune; a rigore avrei dovuto dire "un uomo di massa uguale a 70 kg." Tra parentesi, visto che mi capita l'occasione, vi faccio notare che ho scritto "un uomo di 70 kg" e non "di kg 70," e così pure "600 m" e non "m 600". Dico questo perché credo che nella scuola elementare

stia la sorgente di un'abitudine che va contro il buon senso e contro la regola scientifica. Le unità di misura vanno scritte dopo il numero: esiste al riguardo una precisa convenzione internazionale, ma del resto nel parlare comune tutti diciamo “dieci cavalli” e non “cavalli dieci,” e non c'è motivo di scostarsi da quest'uso.

Tornando al nostro uomo, che ha una massa di 70 kg e sale di 600 m dal punto di partenza, chiediamoci in primo luogo: quanta energia consuma per far questo? Siamo certi che consuma dell'energia, perché deve aumentare la sua energia potenziale; quindi in ultima analisi dovrà spendere una parte dell'energia chimica contenuta nel suo corpo per far funzionare il “motore biologico” costituito dai muscoli che lo sollevano fino a 600 m.

L'energia necessaria è data dal prodotto della massa per l'accelerazione di gravità, per l'altezza:

$$\Delta E = mgh.$$

Questa è una formuletta che sicuramente tutti avrete visto quando avete studiato fisica. Per fare il calcolo dobbiamo usare un sistema coerente di unità: se usiamo il Sistema Internazionale (MKS) dovremo esprimere la massa in kg, l'accelerazione di gravità in m/s^2 , l'altezza in metri. Nel nostro caso abbiamo: $70 \times 10 \times 600$, avendo preso uguale a 10 l'accelerazione di gravità (il suo valore più preciso è 9.8 m/s^2). Il risultato è espresso in joule, che è l'unità di energia del Sistema Internazionale: così ho dato implicitamente la definizione di joule.

Troviamo 420000 , che scrivo $4.2 \cdot 10^5$. Un'altra cosa che forse troverete curiosa è che adopero il punto invece della virgola per separare i decimali. Questo non rientra nelle convenzioni internazionali, ma è un'usanza diffusissima tra i fisici. Si potrebbe dire che ciò deriva dall'essere quello l'uso normale nei paesi anglosassoni; ma qualche tempo fa, leggendo dei manoscritti di Galileo, ho scoperto che anche lui usava il puntino per separare i decimali. Perciò non potete accusarmi di esterofilia. Comunque non è una cosa essenziale, basta intendersi.

Torniamo al nostro problema: sappiamo che l'uomo nella salita ha consumato $4.2 \cdot 10^5$ joule; ora dobbiamo occuparci del piatto di pastasciutta. Per sapere quanta energia dà un piatto di pastasciutta occorrono altre informazioni, che non sono fornite nell'enunciato del problema. Questo accade spesso nei problemi presi dalla vita reale, che non sono già belli e cucinati come quelli scolastici: spesso mancano dei dati, che bisogna andarsi a cercare. L'ingrediente principale della pastasciutta è la pasta (!) che grosso modo fornisce 4 kcal/g . Supponiamo che quel piatto sia di 100 g : avremo 400 kcal , e con il fattore di conversione che vi ho dato si arriva a $16 \cdot 10^5 \text{ J}$, cioè quasi 4 volte l'energia consumata nella salita. Però si sente che c'è qualche cosa che non funziona: in realtà il piatto di pastasciutta non basta! Quindi ci dev'essere qualcosa di sbagliato (lo scopo di questi problemi non è solo di fare dei conti; è anche di far riflettere).

Lo sbaglio sta nell'idea che tutta l'energia che si ricava dal piatto di pastasciutta possa essere utilizzata per far funzionare i muscoli. Questo non è vero,

come si capisce se si pensa che anche se uno se ne sta seduto in poltrona non si può dire che non consuma niente; per farla breve, possiamo dire che il rendimento nel lavoro muscolare è in media del 25% (almeno così stimano i fisiologi). Ciò significa che solo un quarto dell'energia ricavata dalla pastasciutta potrà andare a compensare il lavoro muscolare. Perciò invece di $16 \cdot 10^5$ J ne ho solo $4 \cdot 10^5$, e ci starei giusto giusto; ma poi bisogna almeno pensare alla discesa, che costa anch'essa un po' di lavoro (come mai? non è tanto facile capirlo!) ed ecco che quella pastasciutta non è più sufficiente.

Come conclusione, vorrei dirvi che questo problema aveva anche un altro scopo: quello di farvi vedere che il joule è un'unità molto piccola per la vita pratica.

E adesso un altro problema:

Per far bollire 5 litri d'acqua quanto petrolio debbo bruciare?

Qui bisogna sapere una quantità di altre cose che non ho detto, ma che posso supporre note, o che sapete dove trovare. Far bollire l'acqua significa portarla dalla temperatura ambiente, di circa 20 gradi, fino a 100 gradi; bisogna dunque sapere quanto calore è necessario a questo scopo. Nel caso dell'acqua la cosa è semplice: si moltiplica la massa dell'acqua (5 litri cioè 5 kg) per il salto di temperatura (80 gradi). Questo perché per far salire di un grado un kg d'acqua ci vuole una kcal: dunque per 80 gradi e 5 litri ci vogliono $80 \times 5 = 400$ kcal. Questa è l'energia che mi occorre.

Per trovare quanto petrolio devo bruciare ho bisogno di sapere quanta energia posso tirare fuori da una data quantità di petrolio: quello che si chiama il calore di combustione o potere calorifico; per 1 kg di petrolio questo vale all'ingrosso 10000 kcal. Se un kg di petrolio mi dà 10^4 kcal, e io ho bisogno di 400 kcal, me ne bastano 40 grammi.

Però anche qui siamo stati ottimisti a credere che tutto il calore che viene fuori dal petrolio vada a scaldare l'acqua: in realtà una parte verrà portata via dall'aria calda prodotta dalla fiamma. Diciamo che con un buon fornello se ne utilizza forse la metà, il che vuol dire che quei 40 grammi non bastano: ce ne vorranno forse 80. Tra l'altro questo si potrebbe facilmente verificare con un esperimento: sarebbe utile, per vedere che non stiamo facendo discorsi campati in aria.

L'ultimo problema che vorrei proporvi è:

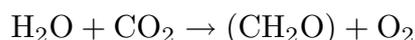
Un kWh di energia elettrica costa 180 lire, un metro cubo di metano costa 400 lire. Che cosa è più economico per scaldare l'acqua: un fornello a metano o un fornello elettrico?

In questo caso bisogna sapere quanta energia si ottiene da un metro cubo di metano: all'ingrosso diciamo 9000 kcal. Lascio a voi i calcoli: il risultato è che il costo dell'energia elettrica, per riscaldare la stessa quantità di acqua, è almeno 4 volte quello del metano. C'è però da tener conto che il fornello elettrico permette

una migliore utilizzazione del calore, mentre quello prodotto dalla fiamma del metano va in gran parte perduto. Tutto considerato, il metano sembra ancora più conveniente.

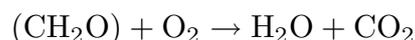
Questo problema aveva lo scopo di farvi vedere che la convertibilità delle diverse forme di energia, e l'uso delle varie unità di misura, possono applicarsi a situazioni di carattere pratico.

Ora vorrei avvicinarmi al tema del corso, e cioè parlare di energia nelle piante e di fotosintesi. Il processo fondamentale della fotosintesi — descritto in maniera molto sommaria, trascurando tutti gli stadi intermedi fra l'anidride carbonica e l'acqua iniziali, e lo zucchero o l'amido finali — è il seguente:



dove (CH_2O) è un'abbreviazione per un mono- o polisaccaride (amido, cellulosa, zuccheri ...). L'acqua, come sappiamo, proviene principalmente dal terreno, e l'anidride carbonica dall'aria; dei prodotti finali, (CH_2O) resta nella pianta, sotto forma di materiale strutturale, riserve, frutti ..., mentre l'ossigeno ritorna nell'aria.

La prima osservazione da fare è che la reazione di fotosintesi assorbe energia. Che questo sia vero, lo si capisce dal fatto che la reazione inversa:



non è altro che la combustione dell'amido, della cellulosa, ecc.: quella che si produce quando bruciamo della legna; e questa ovviamente libera energia. In termini quantitativi, da un kg di legno secco si ottengono all'incirca 3500 kcal: la stessa energia è stata dunque necessaria per la fotosintesi. La nostra domanda è ora: da dove proviene questa energia? Dal momento che si parla di fotosintesi, sappiamo già che la risposta dev'essere: dalla luce del Sole. Cercheremo ora di stimare quanta energia un albero ricava dalla luce del Sole, per vedere se i conti tornano.

Prendiamo in considerazione un albero alto 10 metri, con una chioma di 40m^2 di superficie, e con un tronco di 30 cm di diametro. Un tale albero potrebbe avere un secolo di vita, grosso modo. Dobbiamo in primo luogo stimare la sua massa, e qui occorre un'avvertenza: è chiaro che non possiamo fare misure e calcoli precisi, ma per il nostro scopo — come capita spesso nei problemi scientifici — ci basta un ordine di grandezza. Mi sembra ragionevole stimare che il volume totale (tronco, rami, radici) possa essere intorno al metro cubo, che dà meno di 1000 kg di legno secco, corrispondenti a

$$3.5 \cdot 10^6 \text{ kcal} = 14 \cdot 10^9 \text{ J.}$$

Questa è dunque l'energia necessaria per la sintesi della materia presente nel nostro albero.

Calcoliamo ora l'energia ricevuta dal Sole. Si sa che la luce solare manda sulla Terra in un giorno un'energia di circa 10^7 J/m^2 (sarebbero più di 1000 J al secondo nelle ore e nella stagione più favorevoli, ma bisogna tener conto anche della notte e delle ore in cui il Sole è basso...). Sul nostro albero arrivano dunque $4 \cdot 10^8 \text{ J/giorno}$.

Se l'albero utilizzasse tutta questa energia, potrebbe dunque svilupparsi in soli 35 giorni, anziché in 100 anni; e questo ci pone un nuovo problema: dove va a finire tutta l'energia che manca? Notate che fra 35 giorni e 100 anni c'è circa un fattore 1000: sembra dunque che solo 1/1000 dell'energia solare sia utilizzata. Cerchiamo di capire come stanno le cose.

In primo luogo, non tutta la radiazione solare viene assorbita da una pianta: una parte viene riflessa (se non fosse così, la piante apparirebbero nere, anziché verdi). Poi non tutta l'energia assorbita viene usata per la fotosintesi: ad es. una parte non piccola è spesa per far evaporare l'acqua dalle foglie. Gli esperti stimano che un albero possa in media utilizzare per la fotosintesi solo 1/100 dell'energia solare incidente. Ma anche così, siamo fuori di un fattore 10: che cosa abbiamo dimenticato?

Prima di continuare, lasciatemi ricordare che questo discorso non ha lo scopo di fare un bilancio esatto dell'energia in una pianta, ma solo di farvi vedere come si possono affrontare i diversi problemi che vengono fuori; perciò le nostre conclusioni non pretendono di essere né esatte, né definitive. Ma torniamo all'energia che manca, e andiamo in cerca di qualcosa che abbiamo trascurato.

A me viene in mente prima di tutto una cosa: nella nostra stima della massa dell'albero, noi abbiamo calcolato la massa presente sull'albero oggi, ma abbiamo dimenticato che l'albero ogni anno perde le foglie, e che queste foglie cadute sono anch'esse massa prodotta per fotosintesi. Non so stimare questa massa, ma non è irragionevole che in un secolo di vita la massa di foglie possa essere molto maggiore della massa attuale dell'albero: forse proprio 10 volte.

Conclusioni

Vorrei concludere riassumendo la linea del discorso che abbiamo fatto. Abbiamo visto in primo luogo come si esprime in fisica una legge di conservazione, in termini di bilancio fra entrate e uscite di un sistema fisico. Abbiamo esaminato diversi esempi di grandezze conservate: numero, volume, massa, elementi chimici; per poi passare all'energia. La conservazione dell'energia ci ha portati a parlare delle diverse forme di energia, e della loro equivalenza, anche quantitativa. Abbiamo passato in rassegna alcune unità di misura dell'energia, e ne abbiamo vista l'applicazione in problemi pratici. Infine, abbiamo tentato di discutere il bilancio dell'energia di un albero, ossia l'utilizzazione dell'energia solare per la fotosintesi della materia vegetale.