

Nicola Armaroli Vincenzo Balzani Energia per l'astronave Terra

Quanta ne usiamo, come la produciamo,
che cosa ci riserva il futuro

Chiavi di lettura a cura di
Lisa Vozza e Federico Tibone

indice

<i>Introduzione</i>	5
1. Che cos'è l'energia	11
2. Ieri e oggi	35
3. Quanta energia sprechiamo?	63
4. L'energia nella stiva	83
5. Danni collaterali	103
6. Energia dall'atomo	121
7. Energia dal Sole	151
8. Energia dall'aria, dall'acqua e dalla Terra	173
9. Scenari per un futuro possibile	199
<i>Le fonti di questo libro</i>	215
<i>Siti web</i>	218
<i>Bibliografia</i>	221
12 miti da sfatare	224
Forse non sapevi che...	228
<i>Indice analitico</i>	234

A Claudia e Carla

La realtà ha la sconcertante abitudine di metterci di fronte all'imprevisto per cui, appunto, non eravamo preparati.

Hannah Arendt

Introduzione

Se nelle nostre strade circolano più di 30 modelli diversi di auto di media cilindrata e qui a Cambridge non c'è una casa che sia senza piscina, nonostante il clima inglese, vuol dire che viviamo in un sistema economico impazzito.

George Steiner

Se ho una scarpa un po' rotta, che faccio? La getto via, assieme all'altra ancora buona, e vado in un grande centro commerciale a scegliere, fra le centinaia di tipi di scarpe esposte, quelle che più mi piacciono. Grazie al cielo posso esercitare la mia libertà di consumatore.

L'alternativa suggerita da una poesia di Erri de Luca – *Considero valore risparmiare acqua, riparare un paio di scarpe...* – non la prendo neppure in considerazione. Anche perché è difficile trovare un calzolaio, e per di più la riparazione potrebbe costarmi più delle scarpe nuove. In fondo poi cosa c'è di male? È il nostro modello di sviluppo: il consumismo. È la nostra civiltà: la civiltà dell'usa-e-getta.

Il filosofo Umberto Galimberti ha scritto che il consumismo è «il primo dei vizi capitali della nostra epoca». È un modello di sviluppo «che offre un finito benessere basato sulla distruzione delle risorse e lo sfruttamento delle persone».

E se invece di farmi abbagliare dal luccichio del consumismo provassi allora a guardare dietro le quinte, per capire come stanno le cose nella loro realtà globale?

Scoprirei che quelle scarpe nuove appena comprate sono fabbricate usando materiali (plastica, collanti, vernici) che sono ottenuti dai combustibili fossili, consumando energia (elettrica, termica, meccanica, luminosa), anch'essa prodotta dai combustibili fossili. Scoprirei che per fare quelle scarpe si sono prodotte molte sostanze di rifiuto, a cui si aggiungono ora le scarpe vecchie che ho buttato. Scoprirei che le belle scarpe nuove forse sono state fabbricate da operai mal pagati e poco tutelati, a volte addirittura minorenni, in Paesi dove l'inquinamento raggiunge spesso livelli insostenibili.

Nel comprare le scarpe nuove ho creduto di esercitare una libera scelta. Però, guarda caso, sono proprio quelle scarpe che secondo uno spot suadente visto alla tv «renderanno felici i tuoi passi». E naturalmente con il nuovo paio di scarpe mi sono portato a casa anche una scatola di cartone e qualche foglio di carta, ottenuti dal legno degli alberi, e un sacchetto di plastica, prodotto ancora una volta con i combustibili fossili. Dovrò sbarazzarmene, e forse non sarò abbastanza scrupoloso da farlo differenziando quei rifiuti.

Il discorso fatto per il paio di scarpe si applica anche – con problemi ancora più seri di consumo di risorse e produzione di rifiuti – ogni volta che compriamo un computer, un telefonino, un televisore o perfino

no un prosciutto. Dietro le quinte dei 500 ipermercati italiani, per esempio, si gettano nei rifiuti ogni anno 55 000 tonnellate di cibo che, seppur prossimo alla scadenza, potrebbe essere tranquillamente mangiato.

Il nostro modello di sviluppo è fondato sulla circolarità forzata produzione-consumo: si producono merci per soddisfare bisogni, ma si producono anche bisogni per garantire la continuità della produzione delle merci. Queste devono essere rapidamente consumate per essere sostituite; e poiché non possono essere troppo fragili, altrimenti nessuno le comprerebbe, è sufficiente che sia fragile una loro parte. Così il «pezzo di ricambio» non esiste, o è venduto a un prezzo talmente alto da non rendere conveniente la riparazione.

Se non si sente il bisogno di sostituire un prodotto, questo «bisogno» viene indotto dalla pubblicità che, sostanzialmente, è un appello alla distruzione delle cose che abbiamo per far posto a quelle di nuova produzione. Dove non arriva la pubblicità soccorre la moda, un'altra strategia per vincere la resistenza degli oggetti alla distruzione. La moda rende infatti socialmente inaccettabile ciò che è ancora materialmente utilizzabile.

Ogni volta che si usano risorse per produrre un manufatto (come un'automobile) o per mettere in opera un servizio (come riscaldare l'acqua di una piscina) si producono rifiuti, che spesso occupano un volume maggiore rispetto a quello delle risorse che si

sono utilizzate. A seconda del loro stato di aggregazione i rifiuti si accumulano come escrescenze sulla superficie della Terra (per poi unirsi alle acque superficiali o profonde, percorrendo spesso molta strada dai punti di scarico) oppure, nel caso siano gassosi, si diffondono nell'atmosfera. Come sappiamo ormai bene, il problema della collocazione e del destino dei rifiuti è oggi sempre più complesso.

Alla fine dei processi che generano merci e servizi l'ambiente naturale risulta impoverito del suo contenuto originale e addizionato (brutta parola, ma non possiamo certo dire «arricchito») di una certa quantità di sostanze estranee solide, liquide o gassose. Queste sostanze modificano il suolo, le acque e l'atmosfera, rendendoli sempre meno idonei a servire per le funzioni vitali; e anche a sostenere la stessa economia che, in ultima analisi, vive delle risorse naturali.

Purtroppo ogni richiamo a minori consumi, a partire da quelli energetici, contrasta con l'idea oggi dominante – sostenuta da molti economisti e fatta propria dalla maggior parte dei politici – secondo cui è necessario che il prodotto interno lordo (PIL) delle nazioni aumenti almeno del 2–3% l'anno. Dimenticano però che un aumento del PIL implica un aumento nel consumo delle risorse e nella produzione di rifiuti e che, per il secondo principio della termodinamica, come è impossibile creare il moto perpetuo è anche impossibile avere uno sviluppo infinito sulla base di risorse inesorabilmente finite. Questa è una realtà con cui economia e politica dovranno rassegnarsi a fare i conti.

A questo punto potreste dire: veramente io volevo leggere un libro sull'energia, che c'entra tutta questa solfa? Non temete, non vi abbiamo ingannato. Nelle pagine che seguono si parlerà di ciò che vi aspettate: dal legame chimico alla legge di Einstein, dal carbone al nucleare, dall'obesità alimentare all'energia solare.

Ma tenevamo a chiarire fin d'ora che l'energia è un tema davvero cruciale per capire il mondo in cui viviamo. È la grande disponibilità energetica a permetterci di condurre una vita immensamente più comoda di quella che vivevano i nostri nonni. Allo stesso tempo però il nostro stile di vita può aggravare il degrado del pianeta e compromettere seriamente la qualità della vita dei nostri nipoti.

La più grande sfida e opportunità che l'umanità ha davanti, per provare a mitigare i principali problemi che l'affliggono, è quella di mettere a punto nuove tecnologie energetiche sostenibili. Conoscere le leggi fondamentali dell'energia, disporre di alcune informazioni basilari sull'attuale sistema energetico, avere un'idea delle prospettive delle nuove tecnologie può aiutarci a diventare persone più consapevoli e responsabili.

Dopo aver letto questo libro, insomma, la prossima volta che vi si rompe una scarpa potreste essere tentati di portarla a riparare, o magari di provare a ripararla da soli.

Che cos'è l'energia

*Non occorre sapere tutto
prima di poter sapere qualcosa.*

James D. Barrow

State leggendo un libro; chiudete gli occhi e rimanete immobili per qualche secondo.

Forse, penserete, in queste condizioni non si consuma energia. Non è vero: respirate, il cervello lavora, il cuore pulsa, il corpo ha certamente una temperatura diversa (presumibilmente più alta) rispetto al luogo in cui vi trovate. Tutto questo costa energia, quella che avete assunto con la colazione di stamattina, la cena di ieri sera o attingendo alle riserve di grasso accumulate in qualche parte del corpo.

Se più tardi farete un po' di attività sportiva, alla fine proverete una sensazione di grande benessere; lo sforzo compiuto stimola il rilascio di endorfine, neurotrasmettitori che inducono piacere. Ma il vostro contenuto energetico, dopo una bella nuotata, è inferiore a prima. Non crediate che il docciaschiuma «energizzante» vi possa ricaricare: è meglio andare a fare uno spuntino.

Se ci andate in macchina e vi fermate a fare il pieno, avrete modo di lagnarvi per gli ultimi aumenti

dei carburanti. E dopo che l'auto si è rifocillata, magari vi viene sete. Andate alla cassa, pagate il pieno e comprate una bottiglietta d'acqua fresca. Avete notato che un litro d'acqua minerale costa più di un litro di benzina? E pensare che il 65% del prezzo del carburante va all'erario (nel caso dell'acqua lo Stato trattiene solo il 4%...). Ma di solito non ci pensiamo neppure, e non ci lamentiamo.

Arrivati a casa, è l'ora del meritato spuntino: una banana e un kiwi. I talloncini adesivi vi informano che la prima viene dal Costa Rica, il secondo dalla Nuova Zelanda; per arrivare sulla vostra tavola hanno viaggiato migliaia di chilometri. Li mangiate di gusto e vi sentite meglio. Ora accendete il PC e potete finire quel lavoretto che avevate in sospeso.

Non vi potete lamentare, non è stato un brutto pomeriggio. In poco tempo avete fatto varie cose piacevoli e diverse tra loro: leggere un libro, nuotare, guidare, mangiare, lavorare stando seduti in casa.

Tutto questo è stato possibile grazie a un'enorme disponibilità di energia, di cui probabilmente non vi rendete neppure conto: l'energia delle cellule del corpo, quella del boiler della piscina, del carburante nel serbatoio dell'auto, di una nave che ha solcato gli oceani, della rete elettrica.

Se qualcuno ora vi chiedesse che cos'è l'energia, forse avreste qualche difficoltà a definire in modo chiaro e rigoroso questa entità onnipresente nella nostra vita. In effetti è un imbarazzo preoccupante: di solito ci piace conoscere quello che ci circonda e tendiamo a diffidare di ciò che non conosciamo.

Non vi angosciate troppo, però: l'ignoranza energetica è diffusissima, ma anche comprensibile. L'energia è un concetto sfuggente e soltanto apparentemente intuitivo. È così difficile che per millenni gli studiosi ne hanno dato definizioni vaghe o completamente sbagliate, come quella riportata nella settima edizione dell'*Enciclopedia Britannica* del 1842: «*the power, virtue, and efficacy of a thing*».

Se siamo arrivati a capire, passo dopo passo, che cos'è l'energia e quali sono le leggi che la governano, è grazie al lavoro appassionato e alle felici intuizioni di un piccolo gruppo di uomini curiosi che, a partire dalla fine del 1700, si applicarono con dedizione al problema: James Watt, Sadi Carnot, Justus von Liebig, James Joule, Rudolf Clausius, William Thompson (meglio noto come Lord Kelvin) Ludwig Boltzmann, Walther Nernst e Albert Einstein.

L'energia e i suoi parenti

Quello di energia non è un concetto primario. Prima di capire cos'è l'energia dobbiamo definire un concetto che lo precede, quello di *lavoro*.

Si definisce lavoro l'utilizzo di una forza per spostare qualcosa. La quantità di lavoro dipende da quanta forza si usa e su quale distanza spostiamo l'oggetto; dal punto di vista matematico il lavoro è il prodotto di una forza per una lunghezza.

Compiamo un lavoro quando alziamo un peso contro la forza di gravità, per esempio una cassa di mele. L'entità del nostro lavoro dipende dalla massa

da spostare (quante mele ci sono nella cassa?), dall'entità della forza gravitazionale (siamo sulla Terra o sulla Luna?) e dall'altezza a cui vogliamo porre l'oggetto (sul tavolo o su uno scaffale in alto?).

Spesso la massa è quella del nostro corpo: per esempio compiamo lavoro quando saliamo una scala. Dato che la forza di gravità è identica in Valle d'Aosta e in Abruzzo e la massa da spostare è costante da anni (alla linea ci teniamo), il lavoro da compiere è maggiore se vogliamo salire sulla vetta del Monte Bianco, a 4810 metri di quota, piuttosto che su quella del Gran Sasso, a 2912 metri. Se cerchiamo di muovere qualcosa senza riuscirci (provate a sollevare un fuoristrada con le braccia) non facciamo alcun lavoro. Nel linguaggio comune «lavoro» significa anche altre cose. Sia un facchino che un notaio «lavorano»; dal punto di vista scientifico il facchino lavora molto più del notaio, anche se non lo intuiresti dal loro tenore di vita. Ma qui, appunto, la scienza non c'entra.

Come si fa a descrivere la capacità di un sistema (un litro di benzina, un essere vivente, un sasso che cade, una macchina...) di compiere lavoro? Qual è il parametro che quantifica questa capacità? Siamo arrivati: la capacità di compiere un lavoro è l'*energia*. Essa non va confusa con la *potenza*, che invece descrive la rapidità di impiego dell'energia, ovvero il rapporto matematico tra l'energia e il tempo.

Due atleti con uguale massa corporea che gareggiano nella finale olimpica dei 100 metri compiono esattamente lo stesso lavoro nella gloriosa impresa,

quello però che svilupperà anche solo un briciolo di potenza in più arriverà prima al traguardo. E forse questo basterà per fare la differenza tra l'immortale gloria olimpica e l'oblio.

Da un'energia all'altra

A questo punto possiamo spingerci un po' più in là e svincolarci dal concetto di lavoro puramente meccanico, che pure ci è stato di aiuto per iniziare a districarci con l'intuito (la cassa di mele).

Qualsiasi processo che *produce un cambiamento* (di temperatura, composizione chimica, velocità, posizione) *in un certo sistema* (un organismo vivente, un oggetto inanimato, una macchina) è un lavoro.

La capacità di compiere questo «lavoro in senso lato» si manifesta a sua volta in molti modi, quelle che noi definiamo «forme di energia», che vanno ben oltre l'energia muscolare descritta prima.

Tutte le forme di energia, nella loro diversità, hanno una caratteristica comune: sono sempre espressione di un sistema capace di esercitare una forza, che può agire contro un'altra forza. Possiamo individuare sette forme di energia, quasi tutte riscontrabili nella nostra esperienza quotidiana:

energia termica: i termosifoni che scaldano la nostra casa

energia chimica: il gas che alimenta la caldaia

energia elettrica: l'alimentazione degli elettrodomestici

energia elettromagnetica o luminosa: la luce del Sole, che fa crescere la pianta nel vaso sul balcone

energia cinetica: quella del vaso che cade verso il suolo

energia gravitazionale: se il vaso cade da 10 centimetri d'altezza forse si salva, se cade da 2 metri non c'è speranza

energia nucleare: è difficile vederla, ma ne riparleremo.

Spesso le varie forme di energia possono convertirsi una nell'altra, ma non sempre. Per esempio possiamo trasformare l'energia luminosa del Sole in energia elettrica, attraverso un pannello fotovoltaico. Invece, contrariamente a quanto spesso si pensa, non possiamo trasformare direttamente l'energia nucleare in energia elettrica. Le centrali nucleari sono infatti dei sofisticatissimi bollitori d'acqua che convertono energia nucleare in energia termica, a sua volta convertita poi in energia meccanica e infine in energia elettrica.

Se volete altri esempi di trasformazione dell'energia, pensate alla vostra giornata-tipo e sbizzarrite la fantasia; troverete qualche ispirazione nella tabella 1.

Le fonti di energia

Le *fonti* di energia sono entità fisiche da cui è possibile ricavare una o più *forme* di energia. Questi «oggetti» possono essere i più svariati:

- *risorse minerarie e vegetali:* nel caso di carbone, petrolio, gas e biomasse l'energia è di tipo chimico ed è immagazzinata nei legami chimici carbonio-carbonio e carbonio-idrogeno; per liberarla servono un innesco e un comburente (l'ossigeno); nel caso dell'uranio l'energia invece è di tipo nucleare ed è liberata dalla frammentazione del nucleo atomico;

Tabella 1. Diverse forme di energia e alcuni modi o dispositivi con cui una forma si converte nell'altra

DA:	A: termica	chimica	elettrica	elettrom. (luminosa)	cinetica	nucleare
termica		reazioni endotermiche	processi termoionici	lampadine a filamento	motori a scoppio	
chimica	combustione		batterie	luciole	muscoli	
elettrica	resistenze elettriche	elettrolisi		elettroluminescenza	motori elettrici	
elettrom. (luminosa)	collettori solari	fotosintesi clorofilliana	pannelli fotovoltaici		vele solari	
cinetica	attrito	reazioni radiolitiche	alternatori elettrici	cariche accelerate		
nucleare	fissione e fusione	ionizzazione	batterie nucleari	ordigni nucleari	radioattività	

- *manufatti:* se con una diga si blocca l'acqua di un fiume è possibile trasformare, attraverso una serie di condotte e di macchine, l'energia potenziale gravitazionale dell'acqua in energia cinetica, meccanica ed elettrica; in modo simile i mulini a vento possono convertire l'energia cinetica di masse d'aria in movimento;
- *corpi celesti:* il Sole è una fonte di energia luminosa; la Terra è una fonte di energia termica (dal sottosuolo) e gravitazionale (il vaso che cade).

È bene ricordare che le fonti di energia non sono *unicamente* fonti di energia: con i combustibili fossili produciamo un'infinità di cose utili (come plastica, fertilizzanti, farmaci); con una diga possiamo controllare i regimi delle acque; quanto alla Terra, non è difficile vedere che è utile per molti altri scopi.

Si chiamano fonti energetiche *primarie* quelle reperibili direttamente in natura, per esempio combustibili fossili, luce del sole, vento, flussi d'acqua in movimento, vegetazione, uranio. Possono essere sfruttate come tali oppure trasformate in altre forme energetiche, dette *secondarie*, più comode per l'impiego.

Il petrolio per esempio è una fonte primaria da cui si ottengono combustibili raffinati (fonti secondarie) utilizzabili per vari scopi (benzina, gasolio, kerosene). Il carbone invece è una fonte primaria che può essere usata direttamente (ma è un caso abbastanza raro).

I pilastri dell'universo

I primi studi ed esperimenti scientifici sulle trasformazioni di energia risalgono a più di due secoli fa: si basavano su macchine che trasformavano calore in movimento e viceversa, e questa branca della fisica prese storicamente (e logicamente) il nome di *termodinamica*.

Gli uomini che nel XIX secolo gettarono le basi della termodinamica erano soprattutto inglesi, francesi e tedeschi che, in quegli anni di grande progresso tecnologico, erano spesso animati dal desiderio di contribuire allo sviluppo e alla supremazia tecnologica della loro nazione.

Gli studi termodinamici condotti nella seconda metà dell'Ottocento permisero di individuare alcune leggi fondamentali, o principi, la cui validità è estendibile a tutte le forme di energia. In altre paro-

le gli scienziati e gli ingegneri termodinamici di quell'epoca superarono largamente, senza renderse ne conto, il confine della loro ambizione. Volevano capire il funzionamento di semplici macchine e arrivarono a svelare alcuni pilastri fondamentali che reggono l'universo.

Quei principi della termodinamica sono così basilari che spesso si indicano semplicemente come Primo e Secondo Principio. E le maiuscole non sono errori di stampa.

Prima di illustrare brevemente i Principi, è però utile cercare di chiarire i concetti alla base delle grandezze chiamate temperatura e calore.

Particelle in movimento

L'*energia termica* o *calore* è una manifestazione del movimento incessante con cui si agitano gli atomi, ossia le particelle submicroscopiche che costituiscono la materia.

Quanto alla *temperatura*, tutti siamo convinti di sapere che cos'è: chi non ha mai usato un termometro? Tuttavia il concetto di temperatura è assai meno banale di quel che sembra e viene rigorosamente descritto in base all'energia cinetica media del moto degli atomi.

Qui ci limitiamo a dire che la temperatura è la proprietà che definisce la direzione del trasferimento di energia termica da un sistema a un altro. L'energia termica tende a trasferirsi dal sistema che definiamo «a temperatura più alta» verso il sistema

che definiamo «a temperatura più bassa». Il processo si ferma al raggiungimento del cosiddetto «equilibrio termico»: quando due corpi sono alla stessa temperatura, tra loro non avviene alcun trasferimento di energia termica.

La *scala* che impieghiamo per misurare la temperatura è una semplice convenzione e ognuno può usare quella che più gli piace (Celsius, Fahrenheit, Kelvin). Non sorprendetevi allora se vi capita di essere negli Stati Uniti durante una tempesta di neve e sentite dire alla radio che fuori ci sono 32 gradi (Fahrenheit).

Calore: energia che si scambia

Il calore è energia termica che viene scambiata tra due corpi a temperatura differente. Per millenni si è creduto che il calore fosse un fluido immateriale (forse qualcuno lo crede ancora...) ma questo non è affatto vero. Quando scaldiamo acqua in una pentola, la fiamma non scalda direttamente l'acqua: scalda il fondo della pentola, il quale a sua volta scalda l'acqua; si ha insomma uno scambio di calore fra tre corpi.

Gli atomi e le molecole che costituiscono la fiamma (che tecnicamente è un *plasma*, un gas molto caldo e perciò ionizzato) hanno una temperatura altissima e si spostano, ruotano e vibrano vorticosamente. Queste particelle vanno a sbattere sul fondo della pentola e stimolano la vibrazione degli atomi del metallo (non il loro spostamento, almeno fintantoché la pentola non fonde...). Questo processo di

trasferimento a catena procede velocemente fino a coinvolgere le molecole d'acqua all'interno del recipiente, partendo dal loro primo strato che è a diretto contatto con il metallo.

Se teniamo la fiamma accesa, l'acqua bollirà in fretta e dopo un po' potremo buttare la pasta. Se il fondo della pentola fosse perfettamente isolante, dovremmo rassegnarci a mangiare la pasta cruda o a morire di fame: l'acqua rimarrebbe desolatamente fredda.

Da qui non si scappa: i Principi

Il *Primo Principio* afferma che l'energia di un sistema isolato, che cioè non scambia materia né energia con ciò che lo circonda, è sempre la stessa; può passare da una forma a un'altra, ma la sua quantità totale non cambia. Dunque l'energia del sistema isolato per eccellenza, l'universo, è costante.

Il Primo Principio è oggettivamente una buona notizia, anche se un po' angosciante per chi cerca di stare a dieta: l'energia del cibo o la si spende con l'esercizio fisico e mentale, oppure si accumula sotto forma di grasso.

L'energia accumulata nel serbatoio dell'auto che ci porta in vacanza serve per compiere un lavoro, e quando «siamo in riserva» crediamo inconsciamente che il motore si sia mangiato tutta l'energia che era nel serbatoio della macchina. Non è proprio così.

Se siamo saliti allo Stelvio, per esempio, l'energia che avevamo acquistato dal benzinaio è stata convertita in parte in energia potenziale gravitazionale

(noi e l'auto ora siamo a una quota maggiore di prima), in parte in calore emesso tramite lo scarico della marmitta, in parte in calore sotto forma di attrito con l'asfalto, con l'aria e all'interno del motore.

La massa del combustibile liquido è stata convertita in gas, soprattutto vapore acqueo e diossido di carbonio (CO₂, comunemente chiamato anidride carbonica), ed è finita nell'atmosfera*. In questa trasformazione il volume iniziale del combustibile è aumentato 2000 volte, perché il gas prodotto è molto meno denso della benzina iniziale. Ma poiché il gas è invisibile, non ci facciamo troppi sensi di colpa. Noi insomma non vediamo più nulla, ma l'energia non è andata perduta. È davvero sorprendente la discrezione con cui la benzina riesce a dileguarsi.

Il *Secondo Principio* è una delle leggi della natura più affascinanti e le conseguenze che ne derivano sono vastissime. Lo si può formulare in vari modi, ma il più intuitivo è probabilmente il seguente: in un sistema isolato l'energia termica si trasferisce sempre da un corpo a temperatura più alta a uno a temperatura più bassa.

È importante notare che il Secondo Principio non dice che il calore non può passare da un corpo freddo a uno caldo: il frigorifero serve proprio per que-

* Come vedremo più avanti, una parte minuscola della massa del combustibile in realtà è scomparsa, trasformandosi nell'energia liberata dalla combustione. Ma nelle reazioni chimiche la variazione di massa è infinitesima e si può trascurare.

sto, e non c'è dubbio che funzioni; ma non è un sistema isolato. Il Secondo Principio stabilisce che, se vogliamo far fluire il calore in direzione contraria alla sua naturale tendenza, dobbiamo fornire energia al sistema: il frigo funziona soltanto se è collegato alla presa di corrente.

Il Secondo Principio conduce in maniera sottile alla nozione che esiste una *gerarchia* tra le varie forme di energia. Fateci caso: ogni volta che si produce una qualche forma di lavoro, consumando energia, si dissipa calore da qualche parte.

L'energia termica fa capolino in qualsiasi processo di conversione energetica: il motore dell'auto e quello del frigo scottano, il nostro corpo è caldo e, senza torri di raffreddamento, una centrale elettrica fonde. Tutte le energie possono trasformarsi completamente in calore, ossia in energia termica; il contrario invece non può accadere. Tutte le volte che convertiamo una forma «nobile» di energia in un'altra, per esempio in energia elettrica o meccanica, non tutta la quota iniziale disponibile può essere utilizzata per compiere lavoro utile. Inesorabilmente una parte sarà degradata per sempre a energia termica.

Nella maggior parte dei casi questa «tassa termica» è incassata dall'ambiente, principalmente l'atmosfera e le acque superficiali, e questo spiega perché le centrali elettriche vengono costruite in riva ai mari, ai laghi, ai fiumi. Per quanto una centrale elettrica possa essere ben costruita, essa non può convertire direttamente in elettricità nemmeno la metà dell'energia chimica del combustibile; la maggior

parte di quell'energia si trasforma in calore ed è riversata come rifiuto nelle immediate vicinanze dell'impianto.

Sfortunatamente nessuna nave in transito sul Po può azionare i propri motori prelevando dal fiume il calore dissipato dalle numerose centrali elettriche che sorgono sulle sue sponde. La ragione è che l'energia termica che è stata dissipata dalle centrali ha un «valore» molto più basso dell'energia chimica del combustibile da cui deriva: il suo impiego per scopi utili è limitato.

Lo stesso vale per l'automobile: buona parte dell'energia compatta e preziosa inizialmente immagazzinata nel serbatoio sarà dispersa in una miriade di inutili rivoli di calore, per esempio tutti gli attriti che abbiamo già citato. In questi processi l'energia dell'universo si conserva, in obbedienza al Primo Principio, ma perde valore, per rispettare il Secondo. Chi è ancora convinto di poter costruire la macchina del moto perpetuo conosce forse il Primo, ma evidentemente ignora il Secondo Principio.

Il Secondo Principio ci svela, più in generale, una profonda asimmetria della natura: il disordine si ottiene in un attimo mentre l'ordine costa lavoro, tempo e fatica.

I sistemi naturali tendono inesorabilmente al disordine: l'universo è fatto così, e dobbiamo farcene una ragione. La tendenza spontanea e inesorabile dell'energia a trasformarsi nella sua forma più disordinata, il calore, è una delle tante espressioni della generale tendenza dell'universo al caos, che si espri-

me scientificamente mediante una funzione chiamata *entropia*. L'energia dell'universo è costante, ma l'entropia aumenta.

Per illustrare questo concetto possiamo immaginare di mettere in una scatola uno strato di cento biglie rosse, poi sovrapporvi cento biglie blu e poi ancora cento biglie verdi. Se ora agitiamo con forza la scatola, le biglie si mescoleranno. Quando abbiamo raggiunto questo stato, anche se continuiamo ad agitare la scatola per milioni di anni, è altamente improbabile (verrebbe da dire impossibile) riottenere la configurazione ordinata iniziale. A ben pensarci, la nostra vita quotidiana è una dimostrazione continua della potenza implacabile del Secondo Principio: per mettere a soqquadro la nostra stanza basta un minuto e poca fatica, per rimetterla in ordine occorrono ore di duro lavoro.

Giunti a questo punto potreste essere tentati di pensare che gli esseri viventi non obbediscano al Secondo Principio. Purtroppo è un'illusione: la tendenza al disordine (l'entropia, appunto) va misurata in relazione a tutto l'ambiente che circonda un dato sistema.

L'ordine e la complessità straordinaria di tutte le forme di vita, anche le più semplici, è ampiamente bilanciata dal disordine che si genera dal progressivo consumarsi del Sole, dal quale non siamo isolati. Ma non è tutto. Gli esseri viventi, per sopravvivere, cioè per rimanere ordinati, producono continuamente rifiuti (una forma di disordine) che scaricano nell'ambiente, a cominciare da quelli... fisiologici.

Il Primo e il Secondo Principio dovrebbero essere una parte basilare della preparazione culturale di ciascuno di noi, come l'alfabeto, le tabelline, la Costituzione e la *Divina Commedia*. Purtroppo così non è, e ogni giorno ascoltiamo giornalisti convinti che un inceneritore distrugge i rifiuti e produce energia, economisti e sindacalisti fiduciosi che la crescita economica possa non avere mai fine, assessori all'ambiente che parlano di carbone pulito, scienziati che negano il surriscaldamento del pianeta.

Forse a casa loro il frigo funziona senza attaccare la spina.

$E=mc^2$

Questa è una formula che conoscono tutti, è una sorta di icona del ventesimo secolo. La si mette sulle T-shirt come il nome di una *band* musicale o la foto di Che Guevara. Questa equazione in fondo permette di dare una definizione di energia comprensibile a tutti, anche se per la verità un po' difficile da accettare.

$E=mc^2$ significa che massa ed energia sono la stessa cosa sotto spoglie diverse. Come il ghiaccio si scioglie e si trasforma in acqua, cambiando totalmente le sue sembianze, così la massa è una forma «congelata» di energia, che può essere convertita nelle forme familiari di energia (termica, cinetica e così via).

Nella formula la lettera c rappresenta la velocità della luce nel vuoto, pari a 300 000 chilometri al secon-

do. Elevata al quadrato, ha un valore numerico gigantesco. Quindi, poiché a destra e a sinistra dell'equazione di Einstein debbono esserci numeri uguali (altrimenti, che equazione sarebbe?), e poiché c^2 sta dalla parte di m , per ottenere quantità enormi di energia basta convertire quantità di massa minuscole.

Ogni volta che si produce energia, di qualsiasi tipo, quantità più o meno grandi di massa «scompaiono». Questa «smaterializzazione» ci ricorda improbabili film di fantascienza e ci rende un po' scettici. Ma così è.

L'energia consumata in un mese da un'immensa megalopoli moderna come Londra è comparabile all'energia «congelata» nella massa di questo libro. La terrificante distruzione di Hiroshima e Nagasaki fu ottenuta convertendo meno di 30 grammi di materia in energia; una quantità piccola, ma certamente misurabile.

La fissione nucleare permette di convertire materia in energia in modo molto efficiente, ma, come vedremo, lasciando scorie estremamente pericolose. Un chilogrammo di uranio in una centrale nucleare può generare 50 000 kilowattora di energia, mentre 1 kg di carbone in una centrale termica produce soltanto 3 kilowattora. In entrambi i casi vale l'equazione di Einstein; cambia però enormemente la quantità di materia che «si volatilizza» diventando energia: è molto maggiore per l'uranio che per il carbone.

Da quasi cinque miliardi di anni, attraverso processi di fusione nucleare a temperature superiori ai 10 milioni di gradi, il Sole converte ogni secondo 4,4

miliardi di tonnellate di idrogeno in energia elettromagnetica. Una frazione minuscola di questo sterminato flusso energetico illumina le nostre giornate.

Naturalmente è possibile anche convertire energia in massa, e questo è stato verificato con esperimenti molto complicati: è possibile «creare» nuove particelle di materia concentrando in un piccolo volume di spazio enormi quantità di energia.

Dal kilowattora al barile

Le unità di misura sono la disperazione di molti studenti. Ce ne sono alcune di uso comune e comprensibili a tutti, altre più difficili da digerire. Il cosiddetto Sistema Internazionale (SI) definisce le unità di misura per sette grandezze fisiche fondamentali: la *lunghezza* si misura in metri (m), il *tempo* in secondi (s), la *massa* in kilogrammi (kg), la *temperatura* in kelvin (K), la *quantità di sostanza* in moli (mol), la *corrente elettrica* in ampere (A), l'*intensità luminosa* in candele (cd).

Tutte le altre grandezze fisiche, per quanto strano possa sembrare, sono una combinazione di queste sette. Qualche insegnante di scienze prova un gusto sadico nel vedere lo studente allibito di fronte al fatto che la resistenza elettrica ha qualcosa a che fare con i kilogrammi, o la capacità termica con i metri. Molti ragazzi non se ne faranno mai una ragione e abbandoneranno gli studi scientifici.

Come avevamo anticipato, l'energia non è un concetto fisico primario. Può apparire bizzarro che

da questo punto di vista la corrente elettrica o l'intensità luminosa siano gerarchicamente superiori all'energia, ma così è.

Abbiamo già detto che il lavoro si può esprimere come una forza moltiplicata per una lunghezza. In termini delle dimensioni delle grandezze fisiche, indicate da parentesi quadre:

$$[\text{lavoro}] = [\text{forza}] \times [\text{lunghezza}]$$

La forza a sua volta è una grandezza derivata che si può esprimere come una massa per una lunghezza divise per un tempo al quadrato^{**}:

$$[\text{forza}] = [\text{massa}] \times [\text{lunghezza}] / [\text{tempo}]^2$$

Dunque il lavoro – cioè l'energia, che ne è la quantificazione – ha le seguenti dimensioni fisiche:

$$[\text{lavoro}] = [\text{energia}] = [\text{massa}] \times [\text{lunghezza}]^2 / [\text{tempo}]^2$$

Nessuno però sarebbe entusiasta di usare un'unità di misura contorta come il $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ per esprimere una quantità di energia. Fortunatamente per le grandezze derivate da quelle fondamentali sono state adottate nuove unità, spesso indicate da cognomi di illustri scienziati del passato.

Nel caso dell'energia si è deciso che l'unità $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ si chiama semplicemente «joule» e si rappresenta con il simbolo maiuscolo J.

^{**} Infatti la celebre legge di Newton $F=ma$ mostra che una forza equivale a una massa moltiplicata per un'accelerazione; questa a sua volta è un cambiamento di velocità (lunghezza diviso tempo) nell'unità di tempo.

Il watt (il simbolo è W) è invece l'unità di misura della potenza: 1 W equivale 1 J diviso per 1 secondo (J/s). La scelta di onorare Joule e Watt è stata senza dubbio appropriata, visto il contributo di questi due scienziati britannici al progresso della conoscenza in campo energetico.

Sfortunatamente il joule è un'unità di misura piccolissima. Un topolino di campagna consuma circa 50 000 J al giorno per sopravvivere. Il serbatoio di un'automobile di media cilindrata contiene oltre un miliardo di joule di energia.

Nella pratica si utilizzano perciò unità di misura energetiche molto più grandi. Tra le più comuni vi sono la *kilocaloria* utilizzata per misurare l'energia termica e il *kilowattora* per l'energia elettrica. Per stilare bilanci energetici a livello mondiale si utilizzano anche altre unità di misura, non rigorosamente legate alla grandezza fisica energia, come mostra la tabella 2.

Sono di uso comune per esempio unità di massa o di volume dei combustibili fossili, a cui si può associare un certo contenuto di energia. La più usata è il *tep* (tonnellata equivalente di petrolio, in inglese *toe*, *ton of oil equivalent*), che rappresenta l'energia termica sviluppata dalla combustione completa di una tonnellata di petrolio, o il suo sottomultiplo *keg* (kilogrammo equivalente di petrolio). Si usa molto anche il *barile* equivalente *bep* (in inglese *boe*, *barrell of oil equivalent*), che corrisponde all'energia sviluppata dalla combustione di 159 litri (ossia circa 130 kg) di petrolio.

Tabella 2. Alcune unità di misura dell'energia di uso comune

unità	simbolo	valore in joule
caloria	cal	4,19 J
British thermal unit	BTU	$1,05 \cdot 10^3$ J
kilowattora	kWh	$3,60 \cdot 10^6$ J
barile equivalente di petrolio	bep, boe	$6,12 \cdot 10^9$ J
tonnellata equivalente di petrolio	tep, toe	$4,19 \cdot 10^{10}$ J

Dal legame chimico allo tsunami

Le quantità di energia in gioco nella grande varietà dei processi naturali e artificiali possono variare immensamente. Per esempio il salto di una pulce richiede cento milionesimi di joule, mentre un uragano tropicale sviluppa un'energia di decine di miliardi di miliardi di joule. Se quindi vogliamo mantenere la stessa unità di misura per qualsiasi fenomeno energetico, evitando il fardello di cifre a moltissimi zeri, conviene usare i prefissi convenzionali per multipli e sottomultipli, riportati nella tabella 3.

Facciamo ora un breve viaggio sulla scala dell'energia, partendo da due entità infinitesime che possono apparire insignificanti ma in realtà custodiscono il tesoro energetico dei combustibili fossili; stiamo parlando dei legami chimici fra due atomi di carbonio (C-C) e fra un atomo di carbonio e uno di idrogeno (C-H). Ciascuno di questi legami contiene circa 0,7 miliardesimi di miliardesimi di joule, ossia 0,7 aJ (attojoule).

Questa è la moneta spicciola su cui si fondano la civiltà industriale, l'era digitale, la globalizzazione dell'economia. In una parola, la modernità. Per acca-

parrarci questa moneta, che spesso detta letteralmente il prezzo della moneta economica, sempre più spesso nel mondo non si esita a impugnare le armi.

Per battere un tasto sul computer consumiamo 20 millesimi di joule (20 mJ). Attraverso il cibo una persona adulta ben nutrita assume mediamente 10 milioni di joule (10 MJ) al giorno. Un kg di carbone di buona qualità contiene circa 30 milioni di joule di energia, ovvero 30 megajoules (30 MJ).

Il consumo mondiale annuale di energia primaria si aggira oggi attorno ai 400 miliardi di miliardi di joule, ossia 400 esajoule (400 EJ). Di questi circa 300 EJ sono combustibili fossili.

La più grande bomba a idrogeno sperimentata finora ha sviluppato 240

milioni di miliardi di joule (240 PJ), un'energia tremila volte maggiore rispetto alla bomba sganciata su Hiroshima (84 mila miliardi di joule, 84 TJ).

Ogni anno la Terra riceve dal Sole 5,5 milioni di miliardi di miliardi di joule (5 500 000 EJ) di energia luminosa; di questi circa 2000 EJ sono convertiti in nuova biomassa attraverso la fotosintesi clorofilliana.

Tabella 3. Simboli e prefissi di multipli e sottomultipli

simbolo	prefisso	fattore
a	atto-	10^{-18}
f	femto-	10^{-15}
p	pico-	10^{-12}
n	nano-	10^{-9}
μ	micro-	10^{-6}
m	milli-	10^{-3}
k	kilo-	10^3
M	mega	10^6
G	giga-	10^9
T	tera-	10^{12}
P	peta-	10^{15}
E	esa-	10^{18}

È interessante anche passare brevemente in rassegna la *potenza*, cioè la quantità di energia per unità di tempo, di alcuni fenomeni. Una candela che brucia sviluppa appena 5 watt (W), una normale lampadina a incandescenza 60 W. Una lavatrice che lavora a 60 gradi richiede circa 800 W. Il motore di una Ferrari di Formula 1 sviluppa 550 mila W (550 kW). I quattro motori di un aereo transcontinentale Boeing 747 producono 80 milioni di watt (80 MW) in fase di decollo. Un violento temporale sviluppa 100 miliardi di watt (100 GW).

La velocità media del consumo energetico mondiale ammonta a circa 13 mila miliardi di watt (13 TW), valore che si ottiene dividendo il consumo energetico mondiale annuale (400 EJ) per il numero di secondi in un anno (circa 31,5 milioni).

Un'eruzione vulcanica eroga 100 mila miliardi di watt (100 TW). Un terremoto di magnitudo 8 della scala Richter sprigiona 1,6 milioni di miliardi di W (1,6 PW), e può spostare immense onde oceaniche in grado di seminare morte e distruzione quando giungono sulla terraferma.

Questi numeri danno una vaga idea dell'immensa energia della natura e del rispetto che dovrebbe meritare da parte dell'umanità.