

# Spigolature astronomiche★

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS)

## Energia: che vi sia ciascun lo dice, cosa sia nessun lo sa<sup>1</sup>

Annibale D'Ercole

IMMAGINIAMO di posizionare delle palle da biliardo di massa  $m$  tramite un rack triangolare e di lanciarne poi un'altra contro di esse utilizzando l'energia muscolare del nostro braccio. Il risultato (nel caso ideale in cui il moto non venga rallentato dall'attrito assunto trascurabile) sarà quello di sparpagliare tutte le palle in direzioni diverse, ognuna con una differente velocità  $v$ . Se associamo ad ogni palla la quantità  $0,5mv^2$ , detta *energia cinetica*, osserviamo che la somma delle energie cinetiche di tutte le palle è pari all'energia cinetica iniziale della palla "proiettile" che a sua volta è uguale all'energia muscolare utilizzata. Pertanto l'energia si trasforma e si distribuisce, ma nella sua totalità rimane costante.

Consideriamo ora una pistola per bambini che utilizza come proiettile una freccetta con una ventosa alla sua estremità. Ricorrendo alla nostra energia muscolare carichiamo la pistola infilando la freccetta nella canna e comprimendo così una molla posta nel fondo. Quando il bambino decide, preme il grilletto e la molla si distende comunicando energia cinetica alla freccetta (FIG. 1). A differenza dell'esempio precedente, l'energia muscolare non viene immediatamente trasformata in energia cinetica

\* Questa rubrica – iniziata nel 1999 e che ha ormai quasi raggiunto i novanta numeri – si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare ad un pubblico non specialistico. Questi "fondamenti di astronomia", volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell'argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del *Giornale di Astronomia*, <http://giornaleastronomia.difa.unibo.it/giornale.html>.

<sup>1</sup> Il titolo è una scherzosa modifica di una frase resa celebre (e proverbiale) da Da Ponte, il librettista dell'opera di Mozart *Così fan tutte*. La frase originale recita: «che vi sia ciascun lo dice; dove sia nessun lo sa», e naturalmente non si riferisce all'energia ma alla mitica araba fenice.

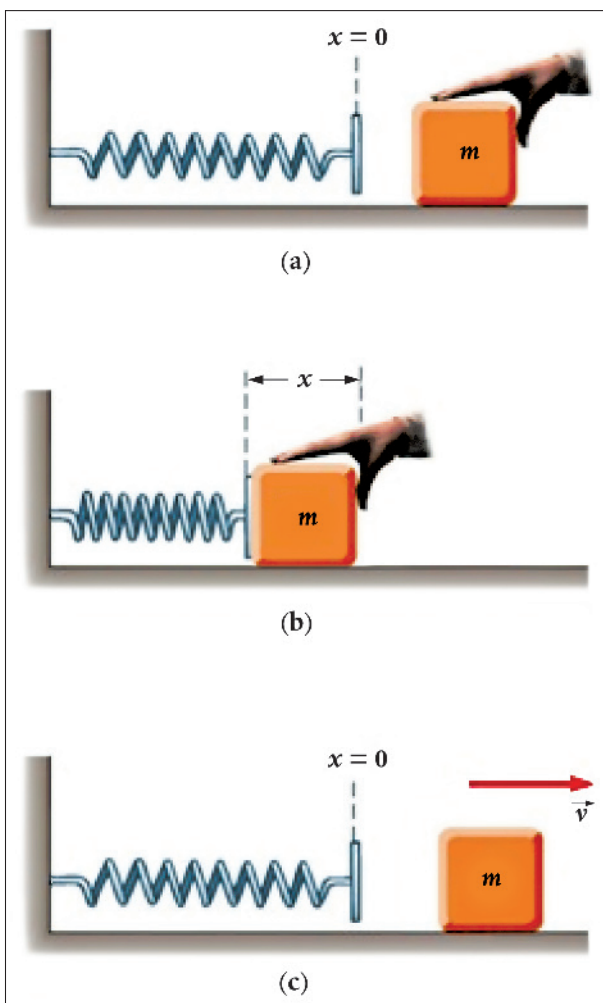


FIG. 1. Trasformazione dell'energia. a) Utilizzando la forza muscolare  $F$ , un oggetto viene spinto verso una molla la cui estremità a riposo è situata nella posizione  $x = 0$ . b) La molla viene compressa di una quantità  $x$  accumulando una certa quantità di energia potenziale derivante dal lavoro compiuto  $L = F \times x$ . c) Una volta rilasciato l'oggetto, la molla si distende fino al punto  $x = 0$  e cede la propria energia potenziale all'oggetto stesso sotto forma di energia cinetica. Pur assumendo diverse forme l'energia rimane costante.

ma rimane "immagazzinata" nella molla compressa che acquisisce la capacità di lanciare il proiettile. Per

questo motivo l'energia accumulata nella molla viene detta *energia potenziale*<sup>2</sup> (FIG. 1b). Anche in questo caso, andando a misurare le varie forme di energia, è possibile verificare che la loro somma rimane costante.

Nel mondo reale, tuttavia, neanche il meccanismo più attentamente progettato e realizzato può essere esente dalla presenza di attrito che rallenta il moto. Ad esempio, l'oggetto messo in movimento dalla molla (FIG. 1c) è destinato a fermarsi perché l'attrito trasforma la sua energia cinetica macroscopica in *energia termica*, ossia energia cinetica di moti disordinati delle molecole che compongono sia lui sia il tratto di piano percorso. Vi sono molte altre forme di energia quali, p.e., quelle contenute nei campi elettrici, magnetici e gravitazionali, e l'energia chimica che dà luogo alla combustione. Un'automobile, ad esempio, trasforma parte dell'energia chimica della benzina in energia cinetica del moto.

Come nel caso dei semplici esempi illustrati sopra, tutti questi tipi di energia (ed altri ancora) possono subire una conversione da una forma ad un'altra purché il valore totale rimanga costante (in un sistema fisico isolato). Benché per lungo tempo la conservazione dell'energia sia stata ritenuta una legge empirica basata sull'esperienza, si è poi capito che essa ha basi teoriche estremamente profonde che non possono essere discusse in questa sede.<sup>3</sup>

A dimostrazione dell'assoluta fiducia dei fisici nella conservazione dell'energia vale la pena ricordare quanto è avvenuto nello studio del cosiddetto *decadimento  $\beta$* . Senza entrare nel dettaglio diremo che questo fenomeno è coinvolto in alcuni processi di decadimento radioattivo e prevede che un neutrone decada in un protone  $p$  ed un elettrone  $e$  ( $n \rightarrow p + e$ ). Gli esperimenti mostrano però che quest'ultimo è dotato di un'energia inferiore alle aspettative. Bohr (1885-1962; premio Nobel nel 1922) suggerì la presenza di una violazione della conservazione dell'energia. Pauli (1900-1958; premio Nobel nel 1945), al contrario, tenendo fede alla validità di tale conservazione, nel 1930 ipotizzò la presenza di un'ulteriore particella  $\nu$ , piccolissima e non osservabile con le strumentazioni abituali (battezzata più tardi *neutrino* da Enrico Fermi); nel decadimento del neutrone entra in gioco la sua antiparticella  $\bar{\nu}$  che trasporta con sé l'energia (cinetica) mancante ( $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$ ). Il neutrino venne effettivamente scoperto nel 1956.

Quanto abbiamo detto finora può indurre a credere che le diverse forme di energia siano tutte equi-

<sup>2</sup> Come vedremo nel livello avanzato, possiamo parlare di energia potenziale non solo nel caso della forza elastica della molla, ma anche in riferimento alla forza gravitazionale.

<sup>3</sup> Esiste un teorema, tra i più belli e importanti della fisica, il teorema di Noether (dal nome dell'autrice, la matematica tedesca Emmy Noether, 1882-1935), il quale dimostra, tra l'altro, che se le leggi della natura sono invarianti nel tempo (come sembra dalle osservazioni cosmologiche) l'energia deve necessariamente conservarsi.

valenti fra loro e tutte possano essere convertite in lavoro come sollevare pesi o muovere veicoli (una più accurata definizione di lavoro verrà data nel livello avanzato). In realtà non è così: esistono energie di alta e di bassa qualità. Nel primo gruppo ricadono le cosiddette forme di energia nobili, quali l'energia meccanica, elettrica, potenziale, cinetica, elettromagnetica, e l'energia chimica che possa convertirsi efficacemente in energia elettrica (come nelle pile). Le energie di bassa qualità sono forme degradate che hanno una bassa capacità di conversione come il calore o l'energia chimica non convertibile in energia elettrica o lavoro meccanico, ma trasformabile in calore mediante combustione.

Un semplice caso di "degrado" dell'energia è dato da un sasso posto ad una certa altezza che cadendo dissipa tutta la sua energia cinetica in calore al momento dell'impatto al suolo e riducendo così la sua capacità di compiere lavoro utile (ne riparleremo nel livello avanzato).

Un altro semplice esempio è rappresentato dalle lampadine che tramutano in luce solo il 4-6% dell'energia elettrica, mentre il resto è trasformato in energia termica dispersa nell'ambiente.

Si potrebbero citare innumerevoli altri casi dello stesso tenore. Diamo un ultimo esempio legato, in un certo senso, all'attualità e probabilmente poco noto al di fuori della cerchia degli addetti ai lavori. Si tratta del cosiddetto *limite di Betz* che riguarda le pale eoliche. Queste sono messe in rotazione dall'energia cinetica del moto ordinato del vento che le investe. Se questo meccanismo avesse un'efficienza del 100% tutta l'energia del vento verrebbe tramutata in energia meccanica delle pale e il vento dovrebbe arrestarsi dopo averle superate. Questo è impossibile perché, fermandosi del tutto, il vento non si smuoverebbe dal retro delle pale impedendo ulteriore flusso d'aria e provocando l'arresto delle pale stesse. In realtà Albert Betz (1885-1968) ha calcolato che al massimo solo il 59,3% dell'energia eolica può trasformarsi in energia di rotazione destinata a generare elettricità. Questo, tuttavia, è un limite teorico: nella realtà le efficienze realizzabili cadono nell'intervallo 35-45%. Infatti, quando il vento passa attraverso le pale crea delle turbolenze, ossia moti disordinati (assimilabili ai moti disordinati degli atomi quando si genera calore) creando un degrado dell'energia disponibile.

È interessante notare che tutti gli esempi citati mostrano fenomeni la cui evoluzione naturale è quella di trasformare energia di alta qualità in energia meno pregiata (calore). I processi inversi, pur rispettando anch'essi la conservazione dell'energia, non si verificano mai; ossia il sasso non si solleva utilizzando il calore prodotto, e il calore disperso dalla lampadina non si trasforma in energia elettrica. Infine, i moti turbolenti del vento non si "ricompongono" in un flusso laminare ordinato in grado di produrre efficacemente nuovo lavoro. Al pari della conservazione dell'energia, anche questa evoluzione "unidirezionale" da energia nobile a energia de-

gradata storicamente è stata considerata un assioma in base a quanto si osserva in natura.<sup>4</sup>

In questa nota dedicata all'energia vale la pena menzionare gli sforzi che fin dal Medioevo (quando il concetto di conservazione dell'energia era di là da venire) molti studiosi, anche di notevole livello, hanno dedicato alla progettazione di macchine dotate di *moto perpetuo*.<sup>5</sup> Questo è definito come un movimento in grado, una volta attivato, di continuare indefinitamente senza alcuna fonte esterna di energia. Una ruota il cui mozzo è posto su sostegni privi di attrito corrisponde a un simile requisito. Sfortunatamente l'attrito è ineliminabile e la ruota è destinata a fermarsi.<sup>6</sup> Per ovvie ragioni gli inventori hanno quindi concentrato i loro sforzi su macchine che potessero anche fornire del lavoro utile, piuttosto che su macchine capaci soltanto di muoversi indefinitamente senza permettere il funzionamento di nessun altro dispositivo.

In FIG. 2 sono mostrati due esempi di (falsi) moti perpetui. Nel pannello superiore è illustrata una ruota ideata da Leonardo da Vinci (1452-1519) il quale, peraltro, era giunto alla conclusione che il moto perpetuo è impossibile.<sup>7</sup> Ogni raggio (curvo) è dotato di una pallina libera di muoversi lungo di esso e che va a posizionarsi nel punto di equilibrio compatibile con l'inclinazione del raggio stesso. Con il loro peso le palline operano un'azione torcente che tende a far girare la ruota; maggiore è la loro distanza dal centro, maggiore è l'efficacia di questa azione. La FIG. 2a mostra che le singole palline "nella metà sinistra" hanno la massima efficacia nel far girare la ruota in senso antiorario, mentre le palline "a destra", prese singolarmente, sono meno efficienti nel produrre una rotazione oraria. L'idea sarebbe quindi che la ruota, girando, "rifornisca" continuamente la metà sinistra, più efficace, innescando – come effetto netto – una rotazione antioraria che si sostiene "da sola", senza interventi esterni (e in grado di produrre un'energia almeno sufficiente a contrastare l'azione frenante dell'attrito). Tuttavia, le palline a destra sono più numerose; si può dimostrare che gli effetti cumulativi delle due metà si pareggiano e la ruota non gira.

La FIG. 2b si riferisce a un moto perpetuo immaginato da Robert Boyle<sup>8</sup> (1627-1691). Il suo ragionamento è alquanto semplice: il peso del liquido nel

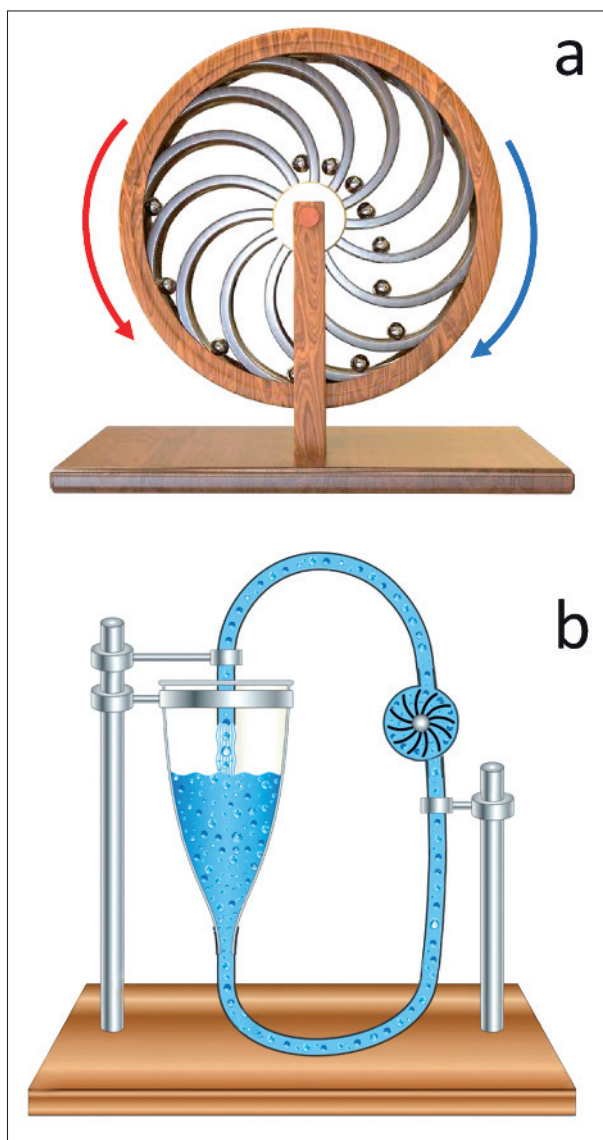


FIG. 2. Due esempi di (impossibili) moti perpetui di prima specie. a) Ruota realizzata da un disegno di Leonardo. Le palline nella metà sinistra della ruota tendono, con il loro peso, ad imprimerle un moto antiorario (freccia rossa). L'opposto avviene per le palline nella metà destra. (freccia blu). b) Meccanismo ideato da Boyle per un flusso perpetuo d'acqua che, azionando una turbina, è in grado di produrre energia "dal nulla". In realtà, per l'equazione dei vasi comunicanti, il livello del liquido nel tubo non può essere più alto di quello del liquido nel recipiente e il moto perpetuo non può attuarsi.

recipiente è maggiore di quello del liquido nel tubo "di risalita". Questo crea uno "sbilanciamento" a favore del liquido nel recipiente che scendendo riesce a spingere il liquido nel tubo fino ad un'altezza superiore a quella del bordo del recipiente in cui infine si reimmette. Questo flusso ininterrotto del liquido avverrebbe a costo energetico nullo e potrebbe essere utilizzato, per esempio, per azionare una turbina collegata a una dinamo, producendo così energia elettrica dal nulla. Il congegno di Boyle è facilmente confutabile in base alla *legge dei vasi comunicanti* (basato sulla pressione e non sul peso del liquido) secondo cui il livello di un liquido contenuto in due (o più) recipienti comunicanti è lo stesso. Pertanto nella "macchina" di Boyle il livello del liquido nel tubo non può superare quello nel recipiente.

<sup>4</sup> In realtà questa regola rappresenta il nucleo della *seconda legge della termodinamica* cui accenneremo nel livello avanzato ed è attualmente interpretata in termini di comportamenti probabilistici di un enorme numero di atomi o molecole.

<sup>5</sup> Abbiamo già incontrato il moto perpetuo su questa rivista, nelle "Spigolature" del n. 1 del 2021.

<sup>6</sup> In realtà, secondo la definizione appena data, un pianeta in moto attorno alla sua stella è effettivamente dotato di moto perpetuo.

<sup>7</sup> «O speculatori dello continuo moto, quanti vani disegni in simile cerca ave' creati! Accompagnatevi colli cercator d'oro» (qui Leonardo si riferisce agli alchimisti).

<sup>8</sup> Robert Boyle è considerato uno dei fondatori della chimica moderna e scopritore della legge che porta il suo nome: la pressione di un gas perfetto isoterma è inversamente proporzionale al volume occupato.

Concludiamo questo livello base dando una giustificazione del titolo di queste *Spigolature*. Come abbiamo visto, i fisici sono in grado di comprendere, di esprimere matematicamente e di misurare in modo rigoroso (si veda il livello avanzato) le diverse forme di energia aggettivata (cinetica, potenziale, termica, ecc.). Ma che dire dell'energia assoluta, ossia dell'energia in sé? Nei manuali di Fisica essa è definita come *la capacità di produrre lavoro*. Tuttavia, in questa definizione permane qualcosa di vago similmente alla definizione di uomo come «bipede privo di piume» data da Platone; una descrizione difficilmente contestabile e tuttavia insoddisfacente (e infatti derisa da Diogene il Cinico).<sup>9</sup> Il motivo di questa insoddisfazione risiede nel fatto che l'energia in sé non è qualcosa di materiale – come, p.e., una sostanza o un fluido – ma piuttosto un concetto astratto. Ma un concetto astratto manca di una caratteristica fondamentale in fisica, ossia quella di poter essere misurato; e anche la proprietà di conservazione applicata a un concetto astratto risulta nebulosa. Non possiamo che concludere citando le parole di Richard Feynman (1918-1988; premio Nobel nel 1965) nelle sue *Lezioni di Fisica*: «È importante rendersi conto che, nella fisica odierna, non abbiamo idea di cosa sia l'energia».

Seguendo la classica definizione che si trova nei manuali di fisica, descriviamo l'energia di un corpo come la sua capacità di produrre lavoro. Se applichiamo una forza  $F$  ad un oggetto provocandone uno spostamento  $s$  che, per semplicità, assumiamo avvenire nella stessa direzione di  $F$  (ricordiamo che  $F$  e  $s$  sono due vettori, e la nostra assunzione implica che siano paralleli), il lavoro compiuto è  $L = F \times s$ . Immaginiamo allora il seguente semplicissimo esempio: abbiamo un sasso di massa  $m$  sospeso a un'altezza  $h$  dal suolo (FIG. 3). Essendo sottoposto alla forza di gravità  $F = mg$  – dove  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$  è l'accelerazione (costante) dovuta alla gravità – il corpo, se rilasciato, è in grado di compiere un lavoro che, al termine della caduta, è pari a  $L = mgh$ . Se l'oggetto non cade perché trattenuto, l'energia equiparata al lavoro che potrebbe fare non è persa ma “immagazzinata” nel corpo col nome di energia potenziale a cui poter ricorrere in caso di bisogno (tagliando la corda che tiene sospeso l'oggetto). Una volta in caduta e con il corpo giunto quasi a terra abbiamo  $h \approx 0$  e l'energia potenziale è “sparita”. Per capire se l'energia è effettivamente scomparsa o se è andata a “nascondersi”, possiamo chiederci qual è la velocità  $v_f$  raggiunta dal corpo un attimo prima di toccare ter-

<sup>9</sup> Pare che, per smentire il maestro, Diogene si sia presentato in Accademia portando un pollo spennato annunciando: «Ecco l'uomo di Platone». Platone aveva ragione nel sostenere che l'uomo è un bipede senza piume, ma Diogene sapeva che c'era di più.

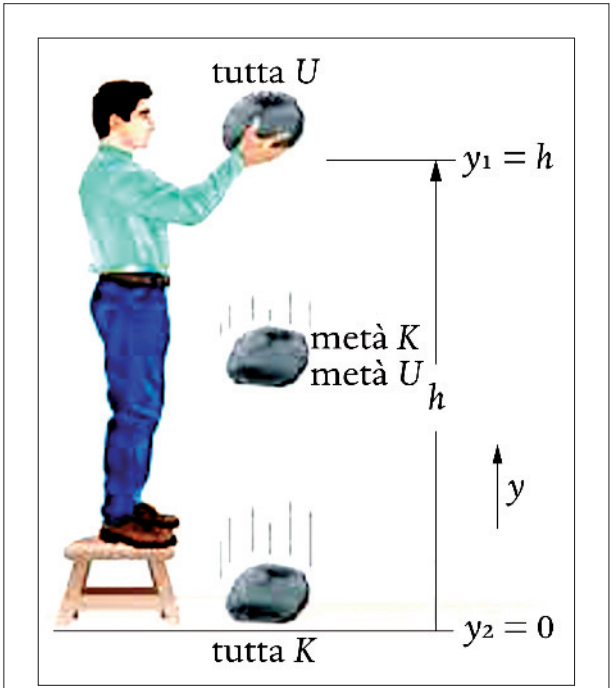


FIG. 3. Trasformazione da energia potenziale  $U_i = mgh$  a energia cinetica  $K_f = 0,5 mv_f^2$ . Inizialmente l'energia totale è  $E = U_i$  perché  $K = 0$ . Durante la caduta  $E = U + K$ , dove  $U = mgy$ , con  $h > y > 0$  e  $v < v_f$ . Al termine (un attimo prima di toccare terra) l'energia del sasso è  $E = K_f$  perché  $y = 0$ . Per tutto il tempo della caduta l'energia  $E$  rimane costante.

ra. Data la costanza dell'accelerazione la velocità aumenta linearmente nel tempo come

$$v = gt. \tag{1}$$

Possiamo allora scrivere la velocità media di caduta come

$$\bar{v} = 0,5 (v_o + v_f) = v_f/2,$$

dove  $v_o = 0$  è la velocità di partenza al momento del rilascio. Il tempo finale per giungere a terra è dunque

$$t_f = h/\bar{v} = 2h/v_f,$$

e l'eq. (1) porta a scrivere  $0,5 v_f^2/h = g$ . Moltiplicando infine ambo i membri per  $mh$  otteniamo

$$\frac{1}{2} mv_f^2 = mgh. \tag{2}$$

Quindi, in realtà, l'energia potenziale mancante si è “camuffata” o – con linguaggio più appropriato – si è trasformata in energia cinetica.<sup>10</sup>

Una volta toccata terra anche l'energia cinetica scompare perché  $v_f = 0$ . Se però andiamo a misurare con un termometro la temperatura del sasso e del terreno dove è avvenuto l'impatto, scopriamo che è aumentata. Infatti, l'energia cinetica macroscopica del sasso si è trasferita all'energia cinetica delle molecole del sasso stesso e del terreno. L'aumento di temperatura è una misura dell'incremento

<sup>10</sup> Questa trasformazione avviene con continuità durante la caduta mentre la distanza dal terreno diminuisce e la velocità aumenta. La somma delle due forme di energia rimane tuttavia costante durante tutto il tragitto e pari all'energia potenziale iniziale  $mgh$ .

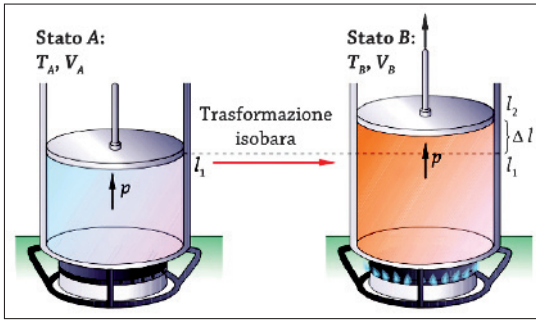


FIG. 4. Illustrazione di un caso particolare della prima legge della termodinamica; si tratta di una trasformazione isobara (ossia, a pressione costante). Accendendo il fornello si trasferisce una quantità di calore  $Q > 0$  e la temperatura del gas aumenta ( $T_B > T_A$ ). Il gas si espande compiendo un lavoro  $L$  sul pistone che subisce uno spostamento  $\Delta l$ :  $L = F\Delta l = pS\Delta l$ . L'ultimo passaggio è stato ottenuto dalla definizione di pressione:  $p = F/S$ , dove  $F$  è la forza e  $S$  la superficie del pistone. Dal momento che  $S\Delta l = V_B - V_A = \Delta V$  è l'incremento di volume del gas, possiamo scrivere  $L = p\Delta V$ . In questo caso abbiamo  $L > 0$  perché il pistone spinge verso l'esterno ( $\Delta V > 0$ ).

to della velocità del moto disordinato di agitazione delle molecole e, in ultima analisi, testimonia la trasformazione dell'energia cinetica del sasso in energia termica.

Approfondiamo meglio questo concetto. Il primo principio della termodinamica (enunciato da R. Clausius nel 1865) è una formulazione della conservazione dell'energia comprendente non solo quella meccanica (come, p.e. l'eq. (2)) ma anche quella termica. In un sistema termodinamico tale conservazione può esprimersi così: la variazione di energia termica di un gas è pari alla differenza tra il calore assorbito (o ceduto) e il lavoro acquisito (o compiuto),<sup>11</sup> In formula, questo equivale alla seguente somma algebrica

$$Q + L = \Delta U, \quad (3)$$

dove  $Q$  è la quantità di calore scambiata con l'esterno e  $\Delta U$  è la variazione di energia termica del gas detta anche energia interna (adattandoci alla convenzione in uso, la indichiamo con il simbolo  $U$  facendo attenzione a non confonderla con l'energia potenziale gravitazionale). Un caso particolare di trasformazione termodinamica è esemplificato in FIG. 4.

Dall'eq. (3) si capisce che, se il sistema non è rifornito di energia dall'esterno ( $Q = 0$ ), il massimo lavoro che può realizzare è a spese della sua energia interna iniziale. Una volta che questa si esaurisce il sistema non è più in grado di produrre lavoro. Immaginiamo di prendere una ruota, p.e. come quella di

<sup>11</sup> Per convenzione, consideriamo positivo il calore ricevuto dall'ambiente ( $Q > 0$ ) e negativo quello ceduto dal sistema all'ambiente ( $Q < 0$ ). Al contrario, è positivo il lavoro compiuto dal sistema sull'ambiente e negativo quello operato dall'ambiente sul sistema (si veda l'esempio illustrato in FIG. 4). Inoltre, per energia interna di un gas si intende l'energia cinetica dovuta al moto di tutte le sue molecole.

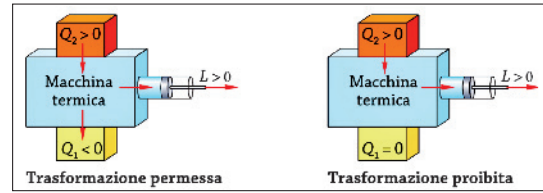


FIG. 5. Schema della seconda legge della termodinamica secondo la formulazione di Kelvin (si veda il testo). Per convenzione, il calore assorbito dal sistema è positivo e quello ceduto è negativo.

Leonardo, con una fune arrotolata lungo la circonferenza e un estremo libero di pendere a cui è legato un peso. Se avviamo la ruota in modo opportuno, essa solleverà il peso trasferendogli energia potenziale a spese della propria energia cinetica. Quando quest'ultima si sarà esaurita la ruota si fermerà confermando l'impossibilità del moto perpetuo.

L'esempio appena descritto e gli oggetti illustrati in FIG. 2 rappresentano tutti progetti di macchine di moto perpetuo cosiddetto di prima specie perché contraddicono la prima legge della termodinamica. Esiste anche un moto perpetuo detto di seconda specie che, pur rispettando la prima legge, contraddice la seconda legge della termodinamica ed è pertanto anch'esso impossibile. La seconda legge ha due diverse formulazioni. Una di esse è dovuta a Lord Kelvin (1824-1907): «È impossibile realizzare una trasformazione ciclica il cui unico risultato sia la trasformazione in lavoro di tutto il calore assorbito da una sorgente» (FIG. 5). Una seconda formulazione fu data da Rudolf Clausius (1822-1888): «È impossibile realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia quello di un trasferimento spontaneo di calore da un corpo più freddo ad uno più caldo». Si può dimostrare che le due formulazioni sono equivalenti in quanto la validità della prima implica la validità della seconda, e viceversa.<sup>12</sup>

Commentando la FIG. 5, una macchina termica può produrre lavoro solo se assorbe calore da una sorgente e cede calore a una sorgente a temperatura minore. Per esempio, il motore dell'automobile assorbe calore dalla combustione del carburante e cede all'ambiente calore attraverso il radiatore. Un moto perpetuo di seconda specie può essere rappresentato da una nave che sottrae calore al mare trasformandolo interamente in energia cinetica senza cederne una parte a una sorgente più fredda (del mare). Questo moto rispetterebbe la prima legge della termodinamica, ma non la seconda che impone a un motore termico di lavorare necessariamente tra due sorgenti a diversa temperatura.

Terminiamo questa nota descrivendo un giocattolo che il lettore certamente conoscerà. Si tratta dell'uccello che beve, un pupazzo a forma di uc-

<sup>12</sup> Le due formulazioni – in particolare quella di Clausius – rendono evidente l'unidirezionalità temporale dei fenomeni fisici che abbiamo evidenziato nel livello base.

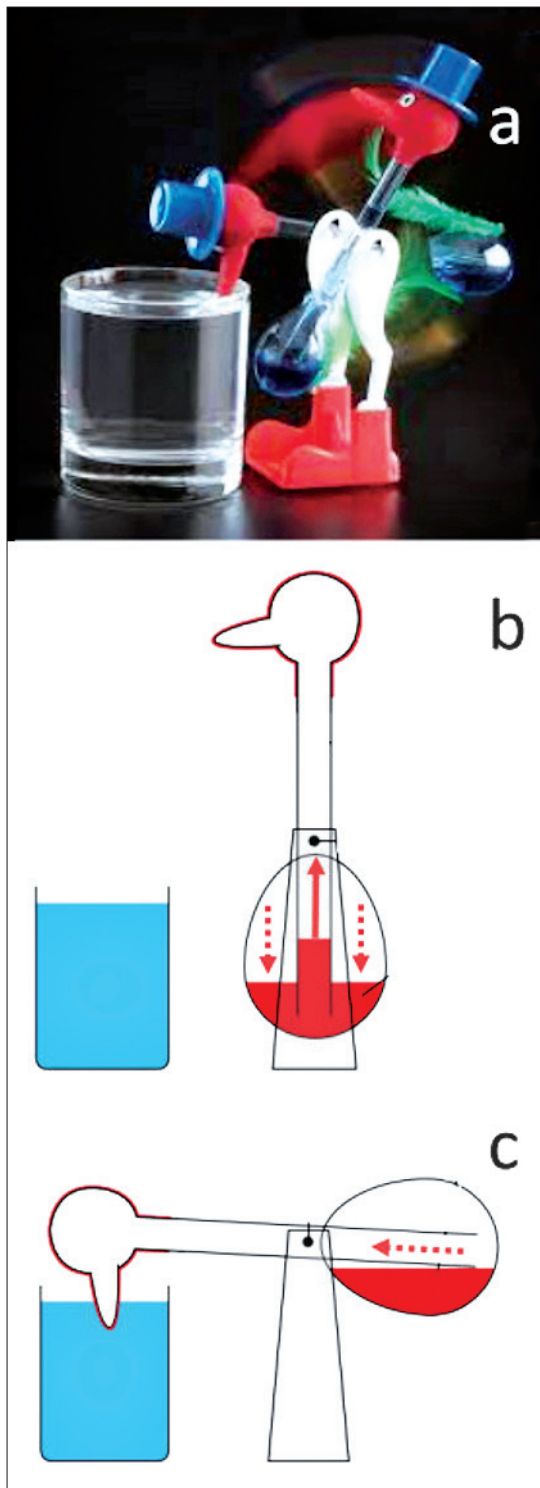


FIG. 6. L'uccello che beve. a) Moto oscillatorio dell'uccello. b) Le frecce rosse tratteggiate rappresentano la pressione del vapore che spinge in alto (freccia continua) il liquido nell'ampolla. c) Nella posizione inclinata l'estremità inferiore del tubo è al di sopra del livello del liquido e lascia passare il vapore a maggior pressione (freccia tratteggiata) che raggiunge la testa e la svuota del liquido (non mostrato in figura) che scende verso l'ampolla.

cello posto davanti a un bicchiere d'acqua. L'uccello si inclina per bere l'acqua, torna in posizione verticale, si inclina ancora e così via, dando l'impressione di essere dotato di un moto perpetuo (FIG. 6a). Pare che Einstein fosse così affascinato dall'uccello che beve da dedicargli oltre tre mesi di studio divertendosi ad analizzare la relazione tra evaporazione, pressione e lavoro meccanico.

L'uccello è composto da un'ampolla inferiore (l'addome) e un contenitore superiore (a forma di testa con un lungo becco) ricoperto da un feltro aderente; i due recipienti sono collegati da un tubo sottile (il collo) che attraversa quasi interamente l'ampolla fino a sfiorarne la base. Questa struttura è poi libera di oscillare attorno ad un asse orizzontale i cui sostegni sono modellati a forma di zampa. All'interno dell'uccello è stato fatto il vuoto e successivamente è stato immesso un liquido, il diclorometano, che evapora a temperatura ambiente. All'equilibrio il liquido evapora fintanto che lo stato gassoso e quello liquido non si ritrovano alla stessa pressione. Per ovvi motivi di peso il vapore riempie la testa e il collo, mentre lo stato liquido riempie parte dell'ampolla, facendo assumere al pupazzo la posizione verticale.

Partiamo dunque dal momento in cui l'uccello è in tale posizione e il feltro è stato inizialmente inumidito con acqua. Questa, evaporando, trasporta via calore; il diclorometano raffredda e condensa riducendo la pressione nella testa, perché il liquido occupa un volume minore del vapore. La maggior pressione del vapore nell'ampolla spinge allora il liquido "addominale" su per il tubo (FIG. 6b) fino a fargli raggiungere la testa che, così appesantita, provoca l'inclinazione in avanti dell'uccello e l'immersione del suo becco nell'acqua del bicchiere di fronte. In questa posizione (quasi) orizzontale l'estremità inferiore del tubo non è più immersa nel liquido (FIG. 6c). Da questa estremità bolle di vapore "caldo" si muovono verso la testa provocando la discesa del liquido in essa contenuto. A questo punto il pupazzo riacquista la posizione eretta e, quando dal feltro inumidito inizia a evaporare l'acqua assorbita dalla precedente "bevuta", il ciclo ricomincia.

In conclusione, l'uccello che beve non è dotato di moto perpetuo, ma funziona grazie alla differenza di temperatura tra la testa e l'addome (si tenga presente che, data l'alta volatilità del diclorometano, per attivare il giocattolo è sufficiente una differenza di temperatura di tre decimi di grado). Quando l'acqua nel bicchiere si esaurisce l'uccello non ha più modo di creare questa differenza di temperatura e si ferma, nel pieno rispetto della seconda legge della termodinamica.

**Annibale D'Ercole** si è laureato in Fisica all'Università di Roma "La Sapienza". Astronomo associato presso l'INAF-Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS), si occupa di simulazioni numeriche di idrodinamica, applicate alle nebulose e al gas interstellare delle galassie. È autore di numerosi articoli divulgativi pubblicati presso questa e altre riviste.