CAPITOLO

16

L'energia e la sua conservazione

L'energia non si vede e non si tocca: si vede soltanto che, comunque la si trasformi, il conto torna sempre.

OBIETTIVI

1. Definire l'energia come capacità di compiere lavoro e distinguere il significato moderno della parola da quello di Aristotele.
2. Calcolare l'energia cinetica e usare il teorema dell'energia cinetica, anche per lo spazio di frenata.
3. Calcolare l'energia potenziale gravitazionale ed elastica, scegliendo il livello di zero.
4. Applicare la conservazione dell'energia meccanica e riconoscere quando vale; calcolare l'energia dissipata dall'attrito.
5. Descrivere le forme dell'energia e il principio di conservazione dell'energia, e discutere il significato di «grandezza conservata».

INDICE DEL CAPITOLO

16.1 Che cos'è l'energia 2
16.2 L'energia cinetica 3
16.3 L'energia potenziale 6
16.4 La conservazione dell'energia meccanica 8
16.5 L'energia in tutte le sue forme 15

Fisica 3 · Parte VI · Lavoro ed energia · versione 1.0
Capitolo 16: L'energia e la sua conservazione · pagine 401–424 del volume completo · estratto per lo studio

Una palla da bowling appesa al soffitto con una lunga fune viene portata a sfiorare il naso di chi la tiene, e lasciata andare senza spinta. Attraversa l'aula, si ferma e torna indietro, dritta verso quel naso. Chi conosce la fisica di questo capitolo resta immobile: sa che la palla, tornando, si fermerà un poco prima del punto di partenza, mai oltre. Non serve calcolare le forze istante per istante; basta sapere che qualcosa, durante l'oscillazione, si trasforma senza crearsi dal nulla.

Quel «qualcosa» è l'energia. Nel capitolo precedente hai imparato a calcolare il lavoro di una forza e la potenza con cui viene compiuto; qui scoprirai che il lavoro è il modo in cui l'energia passa da un corpo all'altro e da una forma all'altra. Incontrerai la prima grande *legge di conservazione* della fisica, quella dell'energia meccanica, che risolve in due righe problemi lunghi da affrontare con i principi della dinamica.

16.1 Che cos'è l'energia

Una molla compressa può lanciare una pallina; l'acqua di un bacino in montagna può far girare una turbina; un'auto in corsa, urtando un ostacolo, lo deforma. In ciascuno di questi casi un sistema è in grado di esercitare forze che compiono lavoro. Diciamo allora che possiede **energia**: l'energia di un sistema è la sua capacità di compiere lavoro. Poiché si misura con il lavoro che può fare, l'energia si misura nella stessa unità, il joule (J), e come il lavoro è una grandezza scalare: ha un valore ma non una direzione.

La definizione dice anche che cosa accade quando una forza compie lavoro su un corpo: il corpo guadagna o perde energia. Il lavoro è energia *in transito*: quello positivo ne porta al corpo, quello negativo gliene toglie. Il conto delle entrate e delle uscite, come in un bilancio, è la chiave di tutto il capitolo.

In meccanica bastano due forme di energia. La prima è legata al *movimento*: un sasso fermo non rompe un vetro, lo stesso sasso lanciato sì. La seconda è legata alla *posizione* o alla *forma*: un vaso sul davanzale o un arco teso hanno energia anche se sono fermi. Sono l'energia cinetica e l'energia potenziale.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Energia viene dal greco ἐνέργεια, formato da ἐν, «in», e ἔργον, «opera, lavoro». La parola compare per la prima volta, per quanto sappiamo, in Aristotele, che la oppone a δύναμις: la δύναμις è la *potenza*, la possibilità di diventare qualcosa; l'ἐνέργεια è l'*atto*, l'essere effettivamente all'opera. Il seme è un albero in potenza; l'albero cresciuto è in atto. È un concetto filosofico, che studi quest'anno, e non quantitativo: Aristotele non misurava l'ἐνέργεια né pensava che si conservasse. Il significato moderno nasce duemila anni dopo (vedi l'Approfondimento). Dalla stessa radice di ἔργον viene l'*ergonomia*.

Cinetica viene da κινητικός, «che produce movimento», da κινέω, «muovere»: la stessa radice della *cinematica* (capitolo 10).

Potenziale viene, come *potenza* (capitolo 15), dal latino *potentia*: i traduttori latini di Aristotele resero proprio con *potentia* e *actus* la coppia δύναμις e ἐνέργεια. L'energia potenziale è energia «in attesa»: si manifesta solo quando il corpo cade o la molla si distende.

16.2 L'energia cinetica

16.2.1 Il lavoro che mette in moto un corpo

Un carrello di massa m, fermo o già in movimento con velocità v_0, viene spinto su una rotaia orizzontale, senza attrito, da una forza costante di modulo F diretta come lo spostamento. Per il secondo principio della dinamica (capitolo 13) il carrello ha un'accelerazione costante $a = F/m$. Dopo uno spostamento Δs la sua velocità v si ricava dalla relazione senza il tempo del moto uniformemente accelerato (capitolo 11):

$$v^2 = v_0^2 + 2a\,\Delta s = v_0^2 + 2\,\frac{F}{m}\,\Delta s$$

Moltiplichiamo entrambi i membri per $m/2$ e portiamo a sinistra il lavoro della forza, $W = F\,\Delta s$:

$$F\,\Delta s = \tfrac{1}{2}m\,v^2 - \tfrac{1}{2}m\,v_0^2$$

A sinistra c'è il lavoro compiuto sul carrello; a destra la differenza tra i valori finale e iniziale di una stessa espressione, che dipende solo dalla massa e dalla velocità del corpo. Questa espressione è l'**energia cinetica**:

$$K = \tfrac{1}{2}m\,v^2$$

Con la massa in chilogrammi e la velocità in metri al secondo, K risulta in $\mathrm{kg\cdot m^2/s^2} = (\mathrm{kg\cdot m/s^2})\cdot\mathrm{m} = \mathrm{N\cdot m} = \mathrm{J}$, come deve essere. L'energia cinetica non è mai negativa, perché v^2 non lo

è, ed è nulla soltanto per un corpo fermo. Dipende dal modulo della velocità e non dalla sua direzione: un'auto a 50 km/h ha la stessa energia cinetica in salita, in discesa o in curva.

La dipendenza dal quadrato della velocità è la proprietà più importante. Raddoppiare la massa raddoppia K; raddoppiare la velocità la *quadruplica*. Un'utilitaria di 1200 kg a 90 km/h, cioè 25 m/s, ha $K = \tfrac{1}{2} \cdot 1200\ \text{kg} \cdot (25\ \text{m/s})^2 = 3{,}75 \times 10^5$ J; a 45 km/h ne avrebbe un quarto, circa $9{,}4 \times 10^4$ J.

16.2.2 Il teorema dell'energia cinetica

Il risultato vale in generale, e non solo per una forza costante: se sul corpo agiscono più forze, si somma il lavoro di tutte, che è uguale al lavoro della forza risultante. Il **teorema dell'energia cinetica** afferma che il lavoro totale compiuto dalle forze che agiscono su un corpo è uguale alla variazione della sua energia cinetica:

$$W_{\text{tot}} = \Delta K = K_{\text{f}} - K_{\text{i}}$$

Se il lavoro totale è positivo il corpo accelera; se è negativo rallenta; se è nullo la sua velocità resta la stessa in modulo, anche se cambia direzione. È il caso del moto circolare uniforme: la forza centripeta, perpendicolare allo spostamento, non compie lavoro (capitolo 15) e non cambia l'energia cinetica.

ESEMPIO SVOLTO

Lo spazio di frenata

Problema. L'utilitaria di 1200 kg viaggia a 90 km/h su asfalto asciutto ($\mu_d = 0{,}70$) e frena con le ruote bloccate. a) Quanta energia cinetica deve perdere? b) In quanto spazio si ferma? c) E se viaggiasse a 180 km/h?

Le forze. Sull'auto agiscono il peso $m\,g$, la forza normale N della strada e l'attrito dinamico, opposto al moto. Peso e forza normale sono perpendicolari allo spostamento e non compiono lavoro; sulla strada orizzontale $N = m\,g$, quindi l'attrito vale $F_d = \mu_d\, m\,g = 0{,}70 \cdot 1200\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \approx 8{,}2 \times 10^3\ \text{N}$.

a) $K_i = \tfrac{1}{2} \cdot 1200\ \text{kg} \cdot (25\ \text{m/s})^2 = 3{,}75 \times 10^5\ \text{J} \approx 3{,}8 \times 10^5\ \text{J}$; alla fine $K_f = 0$.

b) Il lavoro dell'attrito su uno spazio d è $-F_d\,d$, e per il teorema dell'energia cinetica è uguale a $\Delta K = -K_i$:

$$d = \frac{K_i}{F_d} = \frac{3{,}75 \times 10^5\ \text{J}}{8{,}23 \times 10^3\ \text{N}} \approx 46\ \text{m}$$

c) Raddoppiando la velocità l'energia cinetica quadruplica, mentre la forza d'attrito resta la stessa: lo spazio di frenata diventa $4 \cdot 45{,}6\ \text{m} \approx 182\ \text{m}$, quasi due campi da calcio.

Osservazione. Scrivendo tutto in lettere, $\mu_d\, m\,g\,d = \tfrac{1}{2} m\,v^2$, la massa si semplifica: $d = \dfrac{v^2}{2\mu_d\,g}$. È la legge quadratica che nel capitolo 4 avevi riconosciuto nei dati: ora ne conosci la ragione (Figura 16.1).

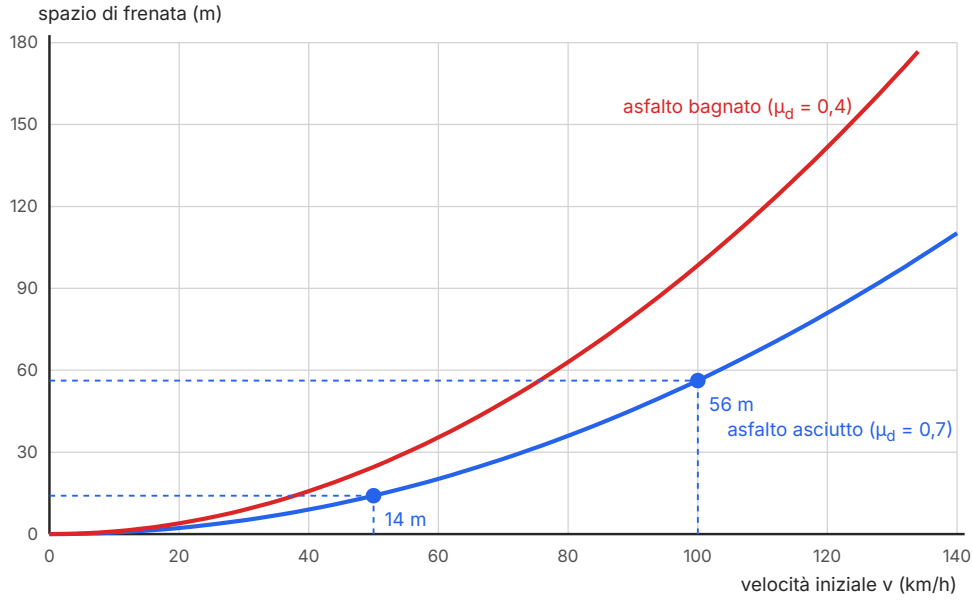


Figura 16.1 Spazio di frenata con le ruote bloccate in funzione della velocità iniziale, $d = v^2/(2\mu_d\, g)$, per due valori indicativi del coefficiente d'attrito dinamico (Tabella A.5 in Appendice). Passando da 50 a 100 km/h su asfalto asciutto lo spazio passa da 14 a 56 m: quattro volte tanto. Allo spazio di frenata va aggiunto, nella realtà, lo spazio percorso durante il tempo di reazione del guidatore.

ERRORE FREQUENTE

Velocità doppia, energia doppia?

No: l'energia cinetica è proporzionale al *quadrato* della velocità. Passare da 50 a 70 km/h sembra un piccolo aumento, del 40%; ma $(70/50)^2 \approx 1{,}96$: l'energia cinetica, e con essa lo spazio di frenata e l'energia da dissipare in un urto, quasi raddoppia. Un secondo errore è ritenere che l'energia cinetica abbia una direzione, o un segno: K è uno scalare, sempre positivo o nullo, e un corpo che si muove verso sinistra non ha energia «negativa».

16.3 L'energia potenziale

16.3.1 L'energia potenziale gravitazionale

Nel capitolo 15 hai visto che il lavoro del peso su un corpo che scende di un dislivello h vale $m\,g\,h$, qualunque sia il percorso: per le scale o per la rampa, in verticale o lungo uno scivolo. Il peso è una forza conservativa. Questo permette di attribuire al corpo, in ogni posizione, un'energia che dipende solo dalla sua quota: l'**energia potenziale gravitazionale**

$$U = m\,g\,h$$

dove h è l'altezza del corpo rispetto a un livello scelto, il **livello di zero**, in cui si pone $U = 0$. Il nome dice che si tratta di energia «in potenza»: il vaso fermo sul davanzale non compie lavoro, ma se cade il peso compie su di esso un lavoro $m\,g\,h$, che lo mette in moto. Un vaso di 2,0 kg a 1,5 m dal pavimento ha, rispetto al pavimento, $U = 2{,}0\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 1{,}5\ \text{m} \approx 29\ \text{J}$.

Il livello di zero si sceglie come conviene: il pavimento, il piano del tavolo, il fondo di una valle. Il valore di U cambia con la scelta, e sotto il livello di zero diventa negativo; ma la *variazione* ΔU tra due posizioni no, ed è l'unica cosa che ha un significato fisico, perché è legata al lavoro del peso (Figura 16.2). Quando il corpo scende il peso compie lavoro positivo e l'energia potenziale diminuisce; quando sale il peso compie lavoro negativo e l'energia potenziale aumenta:

$$W_{\text{peso}} = -\Delta U = U_{\text{i}} - U_{\text{f}}$$

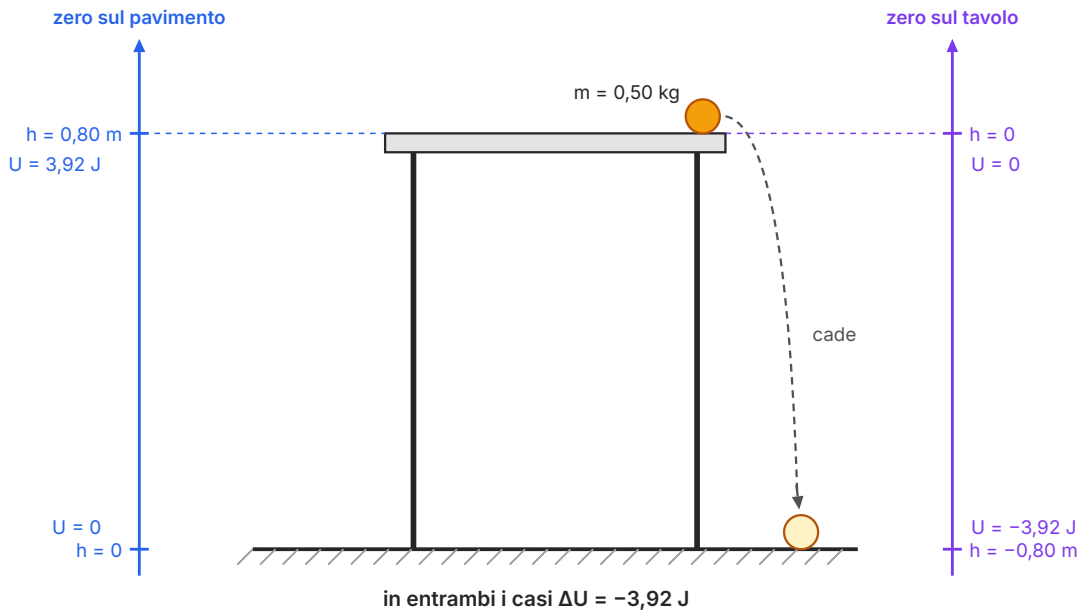


Figura 16.2 La stessa pallina di 0,50 kg descritta con due livelli di zero diversi. Scegliendo lo zero sul pavimento, sul tavolo (0,80 m) la pallina ha $U = 0{,}50\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 0{,}80\ \text{m} = 3{,}92\ \text{J}$; scegliendo lo zero sul tavolo, sul pavimento ha $U = -3{,}92$ J. I valori cambiano, la variazione nella caduta è la stessa.

A rigore l'energia potenziale non appartiene al corpo da solo ma al sistema corpo–Terra, perché nasce dalla loro interazione; per brevità si dice comunque «l'energia potenziale del vaso». La formula $m\,g\,h$, infine, vale vicino alla superficie terrestre, dove g è costante; per un satellite servirà un'espressione diversa, che vedrai il prossimo anno studiando la gravitazione.

16.3.2 L'energia potenziale elastica

Anche la forza elastica di una molla è conservativa: il lavoro che compie dipende solo dalla deformazione iniziale e da quella finale. Nel capitolo 15 hai calcolato, come area del triangolo sotto il grafico forza–deformazione, il lavoro necessario per allungare o comprimere di x una molla di costante elastica k: $\frac{1}{2}k\,x^2$. Questo lavoro resta immagazzinato nella molla deformata come **energia potenziale elastica**:

$$U_{\text{el}} = \tfrac{1}{2}k\,x^2$$

Qui il livello di zero è scelto una volta per tutte: la molla a riposo, $x = 0$. U_{el} non è mai negativa ed è proporzionale a un quadrato: compressa (o allungata) il doppio, la molla immagazzina un'energia quattro volte maggiore. Una molla con $k = 400$ N/m compressa di 10 cm contiene $U_{\text{el}} = \frac{1}{2} \cdot 400\ \text{N/m} \cdot (0{,}10\ \text{m})^2 = 2{,}0$ J. Funzionano così l'arco, la fionda, il trampolino: accumulano lentamente il lavoro dei muscoli e lo restituiscono in un istante.

16.4 La conservazione dell'energia meccanica

16.4.1 Una somma che non cambia

Lasciamo cadere un sasso, trascurando la resistenza dell'aria. Mentre scende, l'unica forza che compie lavoro è il peso. Per il teorema dell'energia cinetica $W_{\text{peso}} = \Delta K$; per la definizione di energia potenziale $W_{\text{peso}} = -\Delta U$. Quindi $\Delta K = -\Delta U$, cioè $\Delta K + \Delta U = 0$: l'energia cinetica aumenta esattamente di quanto diminuisce quella potenziale. Chiamiamo **energia meccanica** la somma

$$E = K + U$$

Il ragionamento vale per ogni forza conservativa, e dà il **principio di conservazione dell'energia meccanica**: *se sul corpo compiono lavoro soltanto forze conservative, la sua energia meccanica resta costante*. In due istanti qualsiasi:

$$K_{\text{i}} + U_{\text{i}} = K_{\text{f}} + U_{\text{f}}$$

La condizione va letta con cura. Possono esserci altre forze, purché non compiano lavoro: la forza normale di un piano liscio o di una rotaia, perpendicolare allo spostamento, o la tensione del filo di un pendolo, perpendicolare all'arco descritto. Ciò che non deve esserci è il lavoro di attriti, resistenze o spinte di motori e di muscoli.

Che cosa significa che una grandezza **si conserva**? Che, mentre tutto il resto cambia (la posizione, la velocità, la forma del sistema), il suo valore resta lo stesso. È un'informazione potentissima: permette di collegare direttamente lo stato iniziale e quello finale, senza seguire il moto istante per istante. È il primo esempio di una famiglia di leggi su cui si regge la fisica: il prossi-

mo anno incontrerai la conservazione della quantità di moto, e più avanti quella della carica elettrica.

16.4.2 Le montagne russe

Il carrello di un ottovolante di 500 kg parte da fermo dalla cima A, a 30 m dal suolo, e percorre senza attriti il tracciato della Figura 16.3. Scegliamo il livello di zero al suolo: in A il carrello ha $U = 500\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 30\ \text{m} = 147\ \text{kJ}$ e $K = 0$, quindi $E = 147$ kJ. Questa somma non cambia più. Nel punto più basso B tutta l'energia è cinetica; in C, a 18 m, l'energia potenziale vale 88 kJ e la cinetica i 59 kJ che mancano; in D, a 10 m, 49 kJ e 98 kJ.

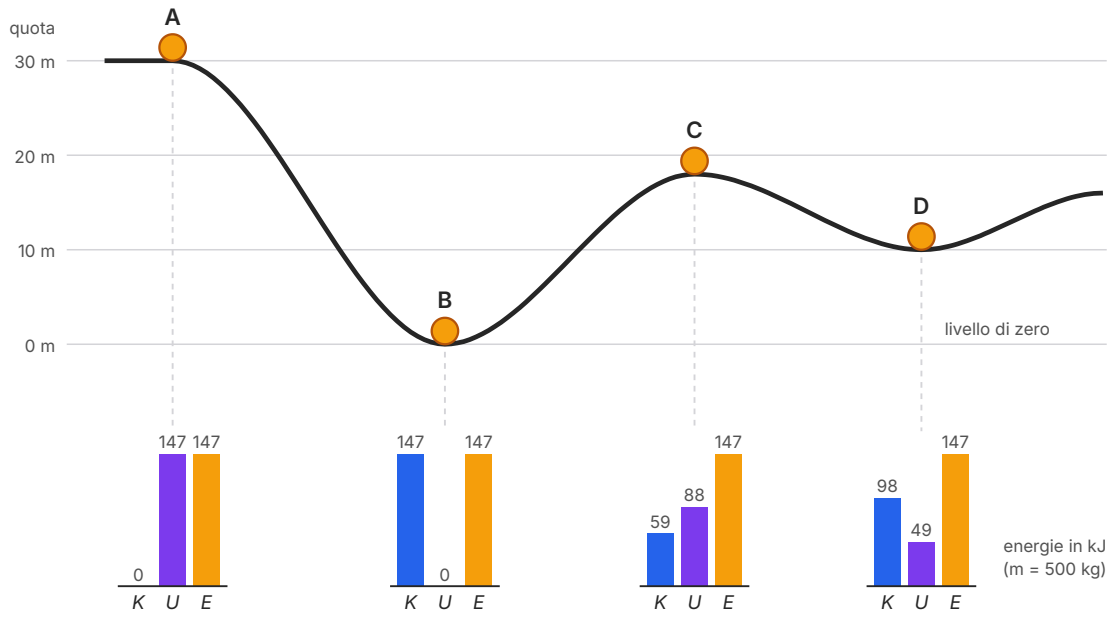


Figura 16.3 Un carrello di 500 kg parte da fermo da A, a 30 m dal suolo, su un tracciato senza attriti. Sotto ogni punto, gli istogrammi dell'energia cinetica *K*, dell'energia potenziale *U* (zero al suolo) e dell'energia meccanica *E* = *K* + *U*, in kJ: *K* e *U* si scambiano, la loro somma resta 147 kJ.

Per trovare la velocità in un punto basta uguagliare l'energia meccanica a quella iniziale. In B: $\tfrac{1}{2} m\, v_B^2 = m\, g\, h_A$, dunque

$$v_B = \sqrt{(2g\, h_A)} = \sqrt{(2 \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 30\ \text{m})} \approx 24\ \text{m/s}$$

In C il carrello è sceso, rispetto ad A, di 12 m: $v_C = \sqrt{(2 \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 12\ \text{m})} \approx 15$ m/s. La massa si semplifica: un carrello pieno e uno vuoto hanno la stessa velocità nello stesso punto. E la velocità dipende solo dal *dislivello* percorso, non dalla forma del tracciato. Infine, il carrello non potrà mai superare una cima più alta di A: gli servirebbe più energia di quella di cui dispone.

ESEMPIO SVOLTO

Il lanciatore a molla

Problema. Nel tubo verticale della Figura 16.4 una molla con $k = 400$ N/m è compressa di 10,0 cm e trattiene una pallina di 50 g. Liberata la molla, a quale altezza sale la pallina? Con quale velocità lascia la molla? Trascura gli attriti.

Il livello di zero conviene metterlo nella posizione iniziale della pallina. All'inizio tutta l'energia è elastica: $U_{el} = \tfrac{1}{2} \cdot 400\ \text{N/m} \cdot (0{,}100\ \text{m})^2 = 2{,}00$ J; $K = 0$ e $U = 0$.

Nel punto più alto la pallina è ferma e la molla è a riposo: tutta l'energia è gravitazionale. Da $mgh = 2{,}00$ J:

$$h = \frac{2{,}00\ \text{J}}{0{,}050\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2} \approx 4{,}1\ \text{m}$$

Quando lascia la molla, cioè quando questa torna alla lunghezza a riposo, la pallina è salita di 0,100 m e ha $U = 0{,}050\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 0{,}100\ \text{m} \approx 0{,}05$ J. Il resto è energia cinetica: $\tfrac{1}{2}mv^2 = 2{,}00\ \text{J} - 0{,}05\ \text{J} = 1{,}95$ J, da cui $v = \sqrt{(2 \cdot 1{,}95\ \text{J} / 0{,}050\ \text{kg})} \approx 8{,}8$ m/s.

Controllo. Le energie hanno l'unità giusta ($\text{N/m} \cdot \text{m}^2 = \text{N}\cdot\text{m} = \text{J}$); e il risultato è ragionevole: una velocità di quasi 9 m/s verso l'alto porta un corpo a circa 4 m, come per un sasso lanciato a mano.

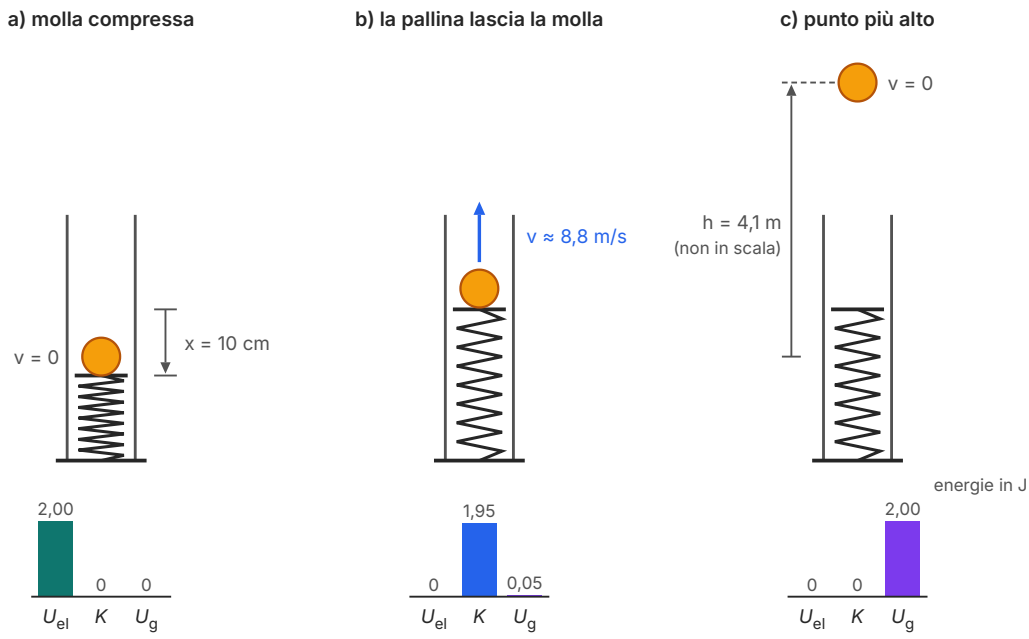
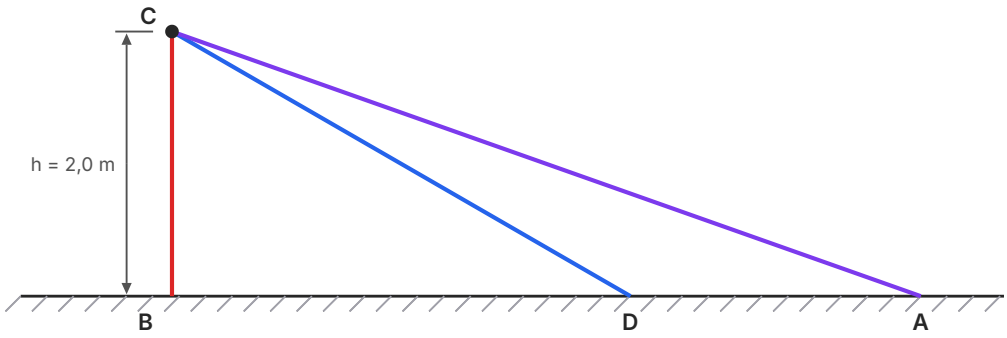


Figura 16.4 Il lanciatore a molla dell'esempio, in tre istanti: l'energia elastica (U_{el}) si trasforma in cinetica (K) e poi in potenziale gravitazionale (U_g, zero nella posizione iniziale della pallina). La somma resta 2,00 J. Le altezze non sono in scala.

16.4.3 Piani inclinati e pendoli: l'osservazione di Galileo

Un corpo scende, da fermo e senza attrito, lungo piani inclinati con la stessa altezza h ma diversa pendenza (Figura 16.5). La forza normale del piano non compie lavoro, e la conservazione dell'energia dà subito la velocità in fondo: $v = \sqrt{(2g\,h)}$, la stessa per tutti i piani, e la stessa della caduta libera in verticale. Cambia invece il tempo: sul piano più lungo l'accelerazione $g\,h/l$ è minore (capitolo 14) e la discesa dura di più.



percorso	lunghezza	tempo di discesa	velocità in fondo
CB (verticale)	2,0 m	0,64 s	**6,3 m/s**
CD	4,0 m	1,28 s	**6,3 m/s**
CA	6,0 m	1,92 s	**6,3 m/s**

Figura 16.5 Tre percorsi senza attrito dallo stesso punto C, alto 2,0 m, al suolo: la caduta verticale CB e due piani inclinati di lunghezza 4,0 m e 6,0 m. Tempi calcolati con $t = \sqrt{(2l/a)}$ e $a = g\,h/l$: crescono con la lunghezza. La velocità in fondo, $\sqrt{(2g\,h)} \approx 6{,}3$ m/s, è la stessa. Le lettere C, A, B, D sono quelle usate da Galileo nei *Discorsi*.

Galileo aveva messo questo fatto alla base della sua teoria del moto accelerato, nella Giornata terza dei *Discorsi* (1638), come unico principio da assumere: le velocità acquistate da uno stesso corpo che scende lungo piani diversamente inclinati sono uguali, se i piani hanno la stessa altezza. Per convincere i suoi lettori descrive un esperimento con un pendolo. Una palla di piombo, appesa a un filo AB lungo «due o tre braccia» e lasciata cadere dal punto C, risale dall'altra parte fino quasi alla stessa altezza, sulla linea orizzontale CD; poi si pianta un chiodo E sulla verticale del filo, che a metà oscillazione si impiglia e costringe la palla a risalire lungo un arco più stretto (Figura 16.6):

«Ora, Signori, voi vedrete con gusto condursi la palla all'orizzontale nel punto G, e l'istesso accadere se l'intoppo si mettesse più basso, come in F, dove la palla descriverebbe l'arco BI, terminando sempre la sua salita precisamente nella linea CD» (Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Giornata terza, Edizione Nazionale, vol. VIII, p. 206).

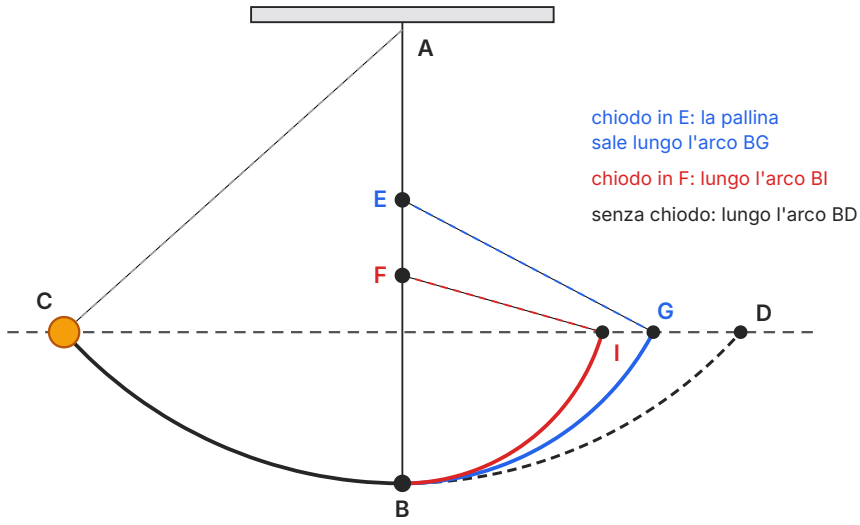


Figura 16.6 L'esperimento del pendolo con il chiodo descritto da Galileo, ridisegnato con le sue lettere. Lasciata da C, la palla risale fino alla linea orizzontale CD lungo l'arco BD; se il filo si impiglia nel chiodo E, risale lungo l'arco BG; se si impiglia in F, lungo l'arco BI. La quota d'arrivo è sempre la stessa.

Galileo ragiona di «impeto» e di «momento», non di energia; ma il suo esperimento è una bella dimostrazione della conservazione dell'energia meccanica: la velocità acquistata scendendo fino a B riporta la palla alla quota di partenza, qualunque arco percorra. La tensione del filo, perpendicolare all'arco, non compie lavoro.

DA RICORDARE

Quando usare l'energia

Se un problema chiede una *velocità* in funzione di una *posizione* (un'altezza, una compressione, uno spostamento), l'energia è quasi sempre la via più breve: confronta due istanti, senza bisogno di conoscere tempi e accelerazioni. Se chiede un *tempo*, o se le forze cambiano direzione in modo complicato, servono i principi della dinamica e la cinematica. Prima di usare la conservazione, chiediti sempre: quali forze compiono lavoro? Sono tutte conservative?

16.4.4 Quando c'è attrito

Un bambino scende da uno scivolo e arriva in fondo più lento di quanto prevede $\sqrt{(2g\,h)}$. Ora su di lui compie lavoro anche l'attrito, che è una forza non conservativa, anzi dissipativa (capitolo 15): il suo lavoro è negativo e dipende dal percorso. Il teorema dell'energia cinetica, scritto con tutte le forze, diventa $W_{\text{peso}} + W_{\text{attr}} = \Delta K$, cioè $-\Delta U + W_{\text{attr}} = \Delta K$, e quindi

$$W_{\text{attr}} = \Delta E = E_{\text{f}} - E_{\text{i}}$$

Il lavoro dell'attrito è uguale alla variazione dell'energia meccanica: siccome è negativo, l'energia meccanica diminuisce. Ma dove va a finire? I vestiti del bambino e la superficie dello scivolo si scaldano: l'energia meccanica «perduta» non sparisce, si trasforma nell'**energia interna** dei corpi a contatto, l'energia legata al moto disordinato delle particelle di cui sono fatti, che si manifesta come un aumento di temperatura. Lo studio del calore, il prossimo anno, ti mostrerà come misurarla.

ESEMPIO SVOLTO

Lo skateboard e l'energia dissipata

Problema. Uno skater, che con la tavola ha una massa di 60 kg, parte da fermo in cima a una rampa alta 2,5 m e arriva in fondo a 6,5 m/s. Prosegue poi su un tratto orizzontale, dove l'attrito delle ruote e la resistenza dell'aria equivalgono a una forza costante di 30 N opposta al moto. a) Quanta energia meccanica è stata dissipata sulla rampa? b) Dopo quanti metri di piano lo skater si ferma, se non spinge più?

a) Zero in fondo alla rampa. $E_{\text{i}} = m\,g\,h = 60\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 2{,}5\ \text{m} = 1470\ \text{J}$; $E_{\text{f}} = \tfrac{1}{2} \cdot 60\ \text{kg} \cdot (6{,}5\ \text{m/s})^2 \approx 1268\ \text{J}$. $W_{\text{attr}} = \Delta E \approx 1268\ \text{J} - 1470\ \text{J} \approx -2{,}0 \times 10^2\ \text{J}$: circa il 14% dell'energia iniziale è diventato energia interna di ruote, cuscinetti e aria. Senza attriti lo skater arriverebbe a $\sqrt{(2 \cdot 9{,}8 \cdot 2{,}5)}\ \text{m/s} = 7{,}0\ \text{m/s}$.

b) In piano il peso e la forza normale non compiono lavoro; la forza resistente di 30 N toglie tutta l'energia cinetica: $30\ \text{N} \cdot d = 1268\ \text{J}$, da cui $d \approx 42\ \text{m}$.

16.4.5 L'energia sotto la lente: misure di un moto

In laboratorio la conservazione dell'energia si può controllare filmando una pallina che cade e ricavando dal video, fotogramma per fotogramma, la sua altezza e la sua velocità. La Tabella 16.1 riporta i risultati per una pallina di 0,200 kg lasciata cadere da 2,00 m.

Tabella 16.1 Altezza h (zero al pavimento) e velocità v di una pallina di 0,200 kg in caduta, ricavate dall'analisi di un video (dati tipici). Le energie sono calcolate.

h (m) ± 0,01	v (m/s) ± 0,05	U (J)	K (J)	E (J)
2,00	0,00	3,92	0,00	3,92
1,60	2,79	3,14	0,78	3,91
1,20	3,95	2,35	1,56	3,91
0,80	4,83	1,57	2,33	3,90
0,40	5,57	0,78	3,10	3,89

ESEMPIO SVOLTO

Leggere una tabella di energie

Problema. Dai dati della Tabella 16.1: a) l'energia meccanica della pallina si conserva? b) La piccola diminuzione dell'ultima colonna è significativa?

a) Le energie si calcolano riga per riga. Per $h = 0{,}80$ m: $U = 0{,}200\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 0{,}80\ \text{m} = 1{,}57$ J; $K = \tfrac{1}{2} \cdot 0{,}200\ \text{kg} \cdot (4{,}83\ \text{m/s})^2 = 2{,}33$ J; $E = 3{,}90$ J. Mentre U scende da 3,92 a 0,78 J e K sale da 0 a 3,10 J, la somma resta tra 3,92 e 3,89 J: entro meno dell'1%, è costante.

b) Valutiamo le incertezze (capitolo 3). Sull'altezza $\pm\ 0{,}01$ m dà su U $\pm\ 0{,}200 \cdot 9{,}8 \cdot 0{,}01\ \text{J} \approx \pm\ 0{,}02$ J. Sulla velocità $\pm\ 0{,}05$ m/s pesa di più nell'ultima riga, dove K è grande: l'incertezza relativa di v^2 è il doppio di quella di v, $2 \cdot 0{,}05/5{,}57 \approx 1{,}8\%$, cioè $\pm\ 0{,}06$ J su 3,10 J. L'energia meccanica dell'ultima riga è quindi $(3{,}89 \pm 0{,}08)$ J, compatibile con i 3,92 J iniziali: la diminuzione non è significativa. Con misure più precise si vedrebbe forse l'effetto della resistenza dell'aria, che per una pallina pesante e lenta è piccolo.

16.5 L'energia in tutte le sue forme

L'energia meccanica è solo una parte della storia. Una centrale idroelettrica trasforma l'energia potenziale dell'acqua in energia cinetica della turbina, poi in energia elettrica; una lampadina trasforma l'energia elettrica in luce e in energia interna; una pianta trasforma la luce del Sole in energia chimica; noi trasformiamo l'energia chimica del cibo nel lavoro dei muscoli. Le forme principali, che approfondirai negli anni prossimi in fisica, chimica e scienze, sono:

- l'**energia chimica**, immagazzinata nei legami fra gli atomi delle molecole e liberata nelle reazioni chimiche: nella combustione della benzina o del legno, nella respirazione delle cellule;
- l'energia interna, legata al moto disordinato delle particelle di un corpo e alla sua temperatura;
- l'**energia elettrica**, trasportata dalle correnti elettriche e trasformata dagli apparecchi in moto, luce, calore;
- l'**energia radiante**, trasportata dalla luce e dalle altre radiazioni: è così che l'energia del Sole arriva sulla Terra attraverso lo spazio vuoto;
- l'**energia nucleare**, immagazzinata nei nuclei degli atomi e liberata nelle reazioni nucleari: quelle che fanno brillare il Sole e quelle delle centrali nucleari.

In ogni trasformazione osservata finora una forma di energia diminuisce e altre aumentano, sempre della stessa quantità. Il **principio di conservazione dell'energia** afferma che *l'energia totale di un sistema isolato resta costante*: l'energia non si crea e non si distrugge, si trasforma e passa da un corpo all'altro. È la legge più generale della fisica: nessun esperimento l'ha mai

smentita, e quando sembrava violata (è successo più volte) l'analisi più attenta ha rivelato una forma di energia che non si era contata. La conservazione dell'energia meccanica ne è un caso particolare, valido quando le forze non conservative non compiono lavoro: allora nessuna energia esce dalla forma meccanica. Nella sua forma completa, con il calore, la legge diventa il primo principio della termodinamica, che studierai il prossimo anno.

Il principio spiega perché il *moto perpetuo* sia impossibile: nessuna macchina produce lavoro senza ricevere energia, e una parte di quella che riceve diventa sempre energia interna. Per questo il rendimento (capitolo 15) è sempre minore di 1.

Anche il nostro corpo segue queste regole. Le etichette degli alimenti indicano l'energia chimica del cibo in chilojoule e in chilocalorie (1 kcal = 4,184 kJ); i muscoli ne trasformano in lavoro meccanico meno di un quarto, e il resto diventa energia interna: per questo in salita si suda.

COLLEGAMENTI

Società: le fonti di energia

Quando si dice che «l'energia si consuma» non si contraddice il principio di conservazione: ciò che si consuma sono le **fonti di energia**, i sistemi da cui ricaviamo energia in forma utilizzabile. Petrolio, carbone e metano contengono energia chimica accumulata in milioni di anni: sono fonti *non rinnovabili*, e bruciandoli si libera anidride carbonica nell'atmosfera. Il Sole, il vento, l'acqua che scorre, il calore interno della Terra sono fonti *rinnovabili*, che la natura ricostituisce di continuo.

A ogni trasformazione, poi, una parte dell'energia finisce in energia interna diffusa nell'ambiente, da cui è difficile ricavare di nuovo lavoro: lo spiegherà il secondo principio della termodinamica, il prossimo anno.

APPROFONDIMENTO

Leibniz, Cartesio e la «forza viva»

Che cosa si conserva quando i corpi si muovono e si urtano? Cartesio, nei *Principia philosophiae* (1644), aveva sostenuto che si conserva la «quantità di moto», il prodotto della grandezza di un corpo per la sua velocità. Nel 1686 Gottfried Wilhelm Leibniz gli rispose sulla rivista di Lipsia *Acta Eruditorum* con una breve memoria dal titolo eloquente: *Brevis demonstratio erroris memorabilis Cartesii*, «breve dimostrazione di un errore memorabile di Cartesio».

Leibniz partiva dalla caduta dei gravi di Galileo. Sollevare 1 libbra a un'altezza di 4 unità costa lo stesso sforzo che sollevare 4 libbre a 1 unità; e cadendo da un'altezza quattro volte maggiore si acquista una velocità doppia. In fondo alla caduta i due corpi hanno dunque la stessa «forza», cioè la stessa capacità di risalire, ma quantità di moto diverse: $1 \cdot 2 = 2$ e $4 \cdot 1 = 4$. La misura giusta è la massa per il *quadrato* della velocità: $1 \cdot 2^2 = 4 \cdot 1^2$. Negli scritti successivi Leibniz chiamò questa grandezza *vis viva*, «forza viva».

Ne nacque una disputa durata decenni, in cui entrambe le parti avevano ragione su qualcosa: la «forza viva» è, a meno di un fattore ½, l'energia cinetica; la quantità di moto, intesa come vettore, si conserva negli urti (lo vedrai il prossimo anno). La parola «energia» in un senso vicino al nostro comparve nelle lezioni del fisico inglese Thomas Young, pubblicate nel 1807; il fattore ½ entrò nella definizione nella prima metà dell'Ottocento, con ingegneri francesi come Gaspard-Gustave de Coriolis.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: il carrello sulla rotaia inclinata

Materiali. Una rotaia a basso attrito lunga circa 1,5 m, inclinabile; un carrello di 0,500 kg con una bandierina larga w = 2,00 cm (± 0,01 cm); una fotocellula con cronometro elettronico (sensibilità 0,1 ms), che misura il tempo Δt in cui la bandierina oscura il fascio; un metro a nastro. In alternativa, un video dello smartphone (laboratorio virtuale).

Procedimento. Con la fotocellula in fondo alla rotaia, lascia partire il carrello da fermo da diverse altezze h sopra la fotocellula (± 0,002 m) e leggi Δt. La velocità in fondo è $v = w/\Delta t$. Per ogni altezza calcola l'energia potenziale persa, $m\,g\,h$, e l'energia cinetica acquistata, $\frac{1}{2}m\,v^2$ (Tabella 16.2).

Tabella 16.2 Energia potenziale persa e energia cinetica acquistata da un carrello di 0,500 kg in fondo a una rotaia inclinata (dati tipici). L'incertezza relativa di K è il doppio di quella di v, che a sua volta è la somma delle incertezze relative di w e di Δt.

h (m) ± 0,002	Δt (ms) ± 0,1	v (m/s)	U persa (J)	K (J)	K/U
0,050	20,7	0,97	0,245	0,233 ± 0,005	0,95
0,100	14,7	1,36	0,490	0,46 ± 0,01	0,94
0,150	12,0	1,67	0,735	0,69 ± 0,02	0,94
0,200	10,4	1,92	0,980	0,92 ± 0,03	0,94
0,250	9,3	2,15	1,225	1,16 ± 0,04	0,94

Che cosa concludere. L'energia cinetica cresce in proporzione all'altezza di partenza: il grafico di K in funzione di $m\,g\,h$ è una retta per l'origine, come previsto. Ma la pendenza non è 1: il rapporto K/U resta intorno a 0,94–0,95. Il 5–6% dell'energia potenziale non è diventato energia cinetica di traslazione: lo hanno sottratto l'attrito delle ruote e dei loro assi, la resistenza dell'aria e l'energia cinetica con cui le ruote girano. Per h = 0,200 m la differenza (0,98 − 0,92) J = 0,06 J è maggiore della somma delle incertezze su U (0,01 J) e su K (0,03 J): non è un errore di misura, è un effetto reale.

Sicurezza. Metti un respingente imbottito in fondo alla rotaia e non sporgerti sul percorso del carrello.

Per la relazione. Segui lo schema del capitolo 4: la tabella con le misure e le incertezze, il grafico di K in funzione di U con le barre d'errore, la pendenza con la sua incertezza ricavata dalle rette di massima e minima pendenza, il confronto con il valore ideale 1, la stima della frazione di energia dissipata e la discussione delle sue cause (come cambia il risultato con un carrello più pesante o con la rotaia pulita?).

IN SINTESI

Le formule del capitolo e il loro significato

Energia cinetica: $K = \frac{1}{2} m v^2$: l'energia di un corpo dovuta al suo moto; mai negativa; proporzionale al quadrato della velocità. In joule, con m in kg e v in m/s.

Teorema dell'energia cinetica: $W_{\text{tot}} = \Delta K$: il lavoro di tutte le forze che agiscono su un corpo è uguale alla variazione della sua energia cinetica.

Energia potenziale gravitazionale: $U = m\,g\,h$, con h misurata dal livello di zero scelto; solo ΔU ha significato fisico: $W_{\text{peso}} = -\Delta U$.

Energia potenziale elastica: $U_{\text{el}} = \frac{1}{2} k\,x^2$, con k in N/m e x (deformazione dalla lunghezza a riposo) in m.

Conservazione dell'energia meccanica: $E = K + U$; $K_{\text{i}} + U_{\text{i}} = K_{\text{f}} + U_{\text{f}}$ se compiono lavoro solo forze conservative. Conseguenza: da fermo, dopo un dislivello h, $v = \sqrt{(2g\,h)}$, qualunque sia il percorso.

Con l'attrito: $W_{\text{attr}} = \Delta E < 0$: l'energia meccanica diminuisce e diventa energia interna; l'energia totale si conserva sempre.

Con questo capitolo si chiude il volume. Sei partito dalla misura di una lunghezza e sei arrivato a una legge di conservazione: un percorso che ricalca, in piccolo, quello della fisica da Galileo a Newton. Il prossimo anno vedrai che l'energia è la chiave anche per la gravitazione, il calore, la luce e le onde.

SINTESI

- L'energia è la capacità di un sistema di compiere lavoro; è una grandezza scalare e si misura in joule. Il lavoro è energia che passa da un corpo a un altro o da una forma a un'altra.
- L'energia cinetica di un corpo è $K = \tfrac{1}{2} m v^2$: non è mai negativa e cresce con il quadrato della velocità.
- Teorema dell'energia cinetica: il lavoro totale delle forze che agiscono su un corpo è uguale alla variazione della sua energia cinetica, $W_{\text{tot}} = \Delta K$.
- Lo spazio di frenata con le ruote bloccate è $d = v^2/(2\mu_d g)$: raddoppiando la velocità quadruplica; non dipende dalla massa.
- L'energia potenziale gravitazionale è $U = m g h$, con h misurata da un livello di zero scelto a piacere; ha significato fisico solo la sua variazione, $W_{\text{peso}} = -\Delta U$.
- L'energia potenziale elastica di una molla deformata di x è $U_{\text{el}} = \tfrac{1}{2} k x^2$.
- L'energia meccanica $E = K + U$ si conserva quando compiono lavoro soltanto forze conservative; forze perpendicolari allo spostamento, come la forza normale di un piano liscio o la tensione del filo di un pendolo, non compiono lavoro.
- Un corpo che parte da fermo e scende senza attrito di un dislivello h arriva con velocità $\sqrt{(2gh)}$, indipendente dalla massa e dal percorso: è il principio che Galileo pose alla base dei *Discorsi* e illustrò con il pendolo e il chiodo.
- Con l'attrito, $W_{\text{attr}} = \Delta E$: l'energia meccanica diminuisce e si trasforma in energia interna dei corpi.
- L'energia si presenta in molte forme (meccanica, interna, chimica, elettrica, radiante, nucleare); il principio di conservazione dell'energia afferma che l'energia totale di un sistema isolato resta costante.
- La parola ἐνέργεια in Aristotele significa «atto», «essere all'opera»; il concetto quantitativo di energia nasce con la *vis viva* di Leibniz (1686) e prende il nome moderno nell'Ottocento.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Se la velocità di un corpo triplica, la sua energia cinetica:

   A. triplica

   B. diventa sei volte maggiore

   C. diventa nove volte maggiore

   D. non cambia, perché la massa è la stessa

2. ● Nel Sistema Internazionale l'energia si misura in:
   - **A.** joule
   - **B.** watt
   - **C.** newton
   - **D.** kg·m/s

3. ● Il valore dell'energia potenziale gravitazionale di un libro posato su uno scaffale dipende:
   - **A.** solo dalla massa del libro
   - **B.** anche dal livello di zero scelto
   - **C.** dalla velocità con cui il libro è stato posato
   - **D.** dal percorso seguito per portarlo sullo scaffale

4. ● L'energia meccanica di un corpo si conserva quando:
   - **A.** sul corpo non agisce l'attrito
   - **B.** il corpo si muove con velocità costante
   - **C.** sul corpo agiscono soltanto forze di modulo costante
   - **D.** compiono lavoro soltanto forze conservative

5. ● Un sasso è lanciato verticalmente verso l'alto; la resistenza dell'aria è trascurabile. Nel punto più alto della traiettoria:
   - **A.** l'energia cinetica è nulla e l'energia potenziale è massima
   - **B.** l'energia cinetica e l'energia potenziale sono uguali
   - **C.** l'energia meccanica è nulla
   - **D.** l'energia potenziale è nulla e l'energia cinetica è massima

6. ● Il teorema dell'energia cinetica afferma che la variazione dell'energia cinetica di un corpo è uguale:
   - **A.** al lavoro del peso
   - **B.** al lavoro totale di tutte le forze che agiscono sul corpo
   - **C.** alla variazione dell'energia potenziale
   - **D.** al lavoro della forza d'attrito

7. ●● Una pallina scende da ferma, senza attrito, lungo due piani inclinati con la stessa altezza ma pendenze diverse. In fondo:
   - **A.** è più veloce sul piano più ripido
   - **B.** è più veloce sul piano più lungo
   - **C.** ha la stessa velocità, ma ci arriva in tempi diversi
   - **D.** ha la stessa velocità e impiega lo stesso tempo

8. ●● Una molla compressa di x immagazzina un'energia di 3 J. Compressa di $2x$, ne immagazzina:
   A. 6 J
   B. 1,5 J
   C. 9 J
   D. 12 J

Vero o falso

9. ● Un corpo che si muove verso sinistra ha energia cinetica negativa. V / F

10. ● Il valore dell'energia potenziale gravitazionale dipende dal livello di zero scelto, la sua variazione fra due posizioni no. V / F

11. ● Quando un corpo scivola con attrito, la sua energia meccanica diminuisce, ma l'energia totale si conserva. V / F

12. ●● Un'auto percorre una curva su una strada orizzontale con velocità di modulo costante: il lavoro totale delle forze che agiscono su di essa è nullo. V / F

13. ● Nel linguaggio di Aristotele la parola ἐνέργεια indicava, come oggi, la capacità di compiere lavoro. V / F

Applicare

14. ● Calcola l'energia cinetica di un velocista di 70 kg che corre a 8,0 m/s.

15. ● Un vaso di 2,0 kg è su uno scaffale a 1,5 m dal pavimento. Calcola la sua energia potenziale gravitazionale con lo zero sul pavimento e con lo zero sullo scaffale.

16. ● Una molla con costante elastica 250 N/m è compressa di 4,0 cm. Quanta energia potenziale elastica contiene?

17. ●● Completa. Un corpo cade da fermo da 5,0 m senza resistenza dell'aria: arriva al suolo con velocità _____ m/s. Se cadesse da 20 m, cioè da un'altezza quattro volte maggiore, la velocità sarebbe _____ volte maggiore, e l'energia cinetica _____ volte maggiore.

18. ●● Leggi nella Figura 16.1 lo spazio di frenata a 100 km/h su asfalto asciutto e su asfalto bagnato, poi controlla i due valori con la formula $d = v^2/(2\mu_d g)$.

19. ●● Un carrello di 1,5 kg passa da 2,0 m/s a 6,0 m/s. Quanto lavoro totale è stato compiuto su di esso?

20. ●● Una pallina di 0,50 kg si trova a 3,0 m dal suolo e si muove a 4,0 m/s. a) Calcola la sua energia meccanica (zero al suolo). b) Senza attriti, con quale velocità arriva al suolo?

Problemi

21. ●● Un carrello delle montagne russe di 400 kg passa sulla cima di una salita, a 25 m dal suolo, con velocità 3,0 m/s; gli attriti sono trascurabili. a) Con quale velocità arriva al punto più basso del percorso, al suolo? b) E sulla cima di una seconda salita alta 15 m? c) Qual è l'altezza massima di una salita che il carrello potrebbe superare? d) Perché la massa del carrello non serve?

22. ●●● Un lanciatore a molla verticale ha una molla con $k = 600$ N/m, compressa di 5,0 cm sotto una pallina di 20 g. Trascura gli attriti. a) Calcola l'energia elastica immagazzinata. b) Di quanto sale la pallina, rispetto alla posizione iniziale? c) Con quale velocità lascia la molla, quando questa torna alla lunghezza a riposo?

23. ●●● Un pendolo è formato da una pallina di 0,30 kg appesa a un filo lungo 1,20 m. La pallina viene lasciata da ferma da un punto che si trova 0,40 m più in alto della posizione di equilibrio. a) Con quale velocità passa nel punto più basso? b) Disegna il diagramma di corpo libero della pallina nel punto più basso e calcola la tensione del filo in quell'istante (ricorda la forza centripeta, capitolo 14). c) Perché la tensione del filo non compare nel bilancio dell'energia?

24. ●● Un bambino di 25 kg scende da fermo lungo uno scivolo rettilineo lungo 6,0 m e alto 3,0 m, e arriva in fondo a 5,5 m/s. a) Quanta energia meccanica è stata dissipata? b) Supponendo la forza d'attrito costante lungo lo scivolo, quanto vale? c) Che fine ha fatto l'energia dissipata?

25. ●●● Un'auto di 1100 kg viaggia a 72 km/h; il guidatore vede un ostacolo, reagisce dopo 1,0 s e frena con le ruote bloccate su asfalto asciutto ($\mu_d = 0{,}70$). a) Calcola l'energia cinetica iniziale. b) Calcola lo spazio percorso durante il tempo di reazione e quello di frenata. c) A quale velocità, in km/h, lo spazio di frenata (senza il tempo di reazione) sarebbe la metà?

26. ●●● In una piccola centrale idroelettrica cadono sulle turbine 1000 kg d'acqua al secondo, da un'altezza di 50 m. a) Quanta energia potenziale perde l'acqua in un secondo? b) Se il rendimento dell'impianto è dell'85%, quale potenza elettrica fornisce? c) Quanti kWh produce in un'ora di funzionamento?

Ragionare e argomentare

27. ●● Stima. Quanta energia potenziale guadagni salendo dal piano terra al quinto piano di un palazzo, circa 15 m più in alto? I muscoli trasformano in lavoro meccanico circa un quarto dell'energia chimica che consumano: quanta energia chimica serve? Un biscotto la cui etichetta indica 80 kJ basterebbe? Scrivi i dati che hai stimato.

28. ●●● Commenta la fonte. Nei *Discorsi* di Galileo (1638, Giornata terza) Sagredo afferma: «una palla grave e perfettamente rotonda, scendendo per le linee CA, CD, CB, giugnerebbe ne i termini A, D, B con impeti eguali» (CA, CD, CB sono piani di inclinazione diversa e la stessa altezza, «impeto» indica qui la velocità). Che cosa sostiene? È corretto alla luce di questo capitolo, e a quali condizioni? Come lo verificheresti in laboratorio?

29. ●● Trova l'errore. Uno studente scrive: «Se un'auto raddoppia la velocità, la sua energia cinetica raddoppia; poiché la forza frenante è la stessa, anche lo spazio di frenata raddoppia». Individua l'errore e correggi il ragionamento.

PER APPROFONDIRE

- [GAL] Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Giornata terza: il principio delle velocità acquistate su piani della stessa altezza e l'esperimento del pendolo con il chiodo.
- [FEY] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: il capitolo sulla conservazione dell'energia si apre con la storia di un bambino e dei suoi cubetti, che spiega che cosa significa «conservarsi».
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: la storia del concetto di energia, dalla meccanica al calore.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: i capitoli su energia cinetica, lavoro ed energia potenziale, con molti problemi.
- [NEW] Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*: nei *Principia* l'energia non compare; confrontare le leggi del moto con l'impostazione di questo capitolo aiuta a capire quanto il concetto sia venuto tardi.

Glossario del capitolo

Energia
Capacità di un sistema di compiere lavoro; grandezza scalare, si misura in joule.

Energia chimica
Energia immagazzinata nei legami fra gli atomi delle molecole e liberata nelle reazioni chimiche.

Energia cinetica
Energia di un corpo dovuta al suo moto: $K = \frac{1}{2} m\, v^2$.

Energia elettrica
Energia trasportata dalle correnti elettriche.

Energia interna
Energia legata al moto disordinato delle particelle di un corpo; aumenta, con la temperatura, quando l'attrito dissipa energia meccanica.

Energia meccanica
Somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale di un corpo: $E = K + U$.

Energia nucleare
Energia immagazzinata nei nuclei degli atomi e liberata nelle reazioni nucleari.

Energia potenziale elastica
Energia immagazzinata in una molla deformata di x rispetto alla lunghezza a riposo: $U_{el} = \frac{1}{2} k\, x^2$.

Energia potenziale gravitazionale
Energia legata alla quota di un corpo vicino alla superficie terrestre: $U = m\, g\, h$, con h misurata dal livello di zero; $W_{peso} = -\Delta U$.

Energia radiante
Energia trasportata dalla luce e dalle altre radiazioni, anche attraverso il vuoto.

Fonte di energia
Sistema naturale da cui si ricava energia in forma utilizzabile; rinnovabile se la natura la ricostituisce di continuo, non rinnovabile in caso contrario.

Grandezza conservata
Grandezza il cui valore totale resta lo stesso mentre il sistema si trasforma; si dice che «si conserva».

Livello di zero
Posizione, scelta a piacere, in cui si pone uguale a zero l'energia potenziale; la scelta cambia i valori di U ma non le loro variazioni.

Principio di conservazione dell'energia
L'energia totale di un sistema isolato resta costante: l'energia non si crea né si distrugge, ma si trasforma.

Principio di conservazione dell'energia meccanica
Se su un corpo compiono lavoro soltanto forze conservative, la sua energia meccanica resta costante.

Teorema dell'energia cinetica
Il lavoro totale delle forze che agiscono su un corpo è uguale alla variazione della sua energia cinetica: $W_{tot} = \Delta K$.

Soluzioni

1. C. $K \propto v^2$: $3^2 = 9$.

2. A. Il joule, come il lavoro: 1 J = 1 N·m. Il watt è l'unità di potenza.

3. B. $U = m\,g\,h$, con h misurata dal livello di zero, che si sceglie a piacere; il valore non dipende dal percorso (il peso è conservativo).

4. D. Altre forze possono agire, purché non compiano lavoro (per esempio la forza normale di un piano liscio). La A non basta: anche senza attrito una spinta, un motore o i muscoli possono compiere lavoro e cambiare l'energia meccanica (un corpo sollevato a velocità costante).

5. A. Nel punto più alto $v = 0$, quindi $K = 0$, e tutta l'energia meccanica è potenziale.

6. B. $W_{tot} = \Delta K$, con il lavoro di tutte le forze.

7. C. $v = \sqrt{(2g\,h)}$ dipende solo dall'altezza; sul piano più lungo l'accelerazione è minore e la discesa dura di più.

8. D. $U_{el} \propto x^2$: $2^2 \cdot 3$ J = 12 J.

9. F. $K = \frac{1}{2} m\,v^2$ non è mai negativa e non dipende dalla direzione del moto.

10. V. Cambiando il livello di zero tutti i valori di U si spostano della stessa quantità, e le differenze restano uguali.

11. V. Il lavoro dell'attrito è negativo e diminuisce E; l'energia perduta diventa energia interna dei corpi a contatto.

12. V. Il modulo della velocità non cambia, quindi $\Delta K = 0$ e, per il teorema dell'energia cinetica, $W_{tot} = 0$ (la forza centripeta è perpendicolare allo spostamento).

13. F. Per Aristotele l'ἐνέργεια è l'«atto», l'essere all'opera, contrapposto alla potenza; il significato quantitativo moderno nasce nel Seicento–Ottocento.

14. $K = \frac{1}{2} \cdot 70$ kg $\cdot$ (8,0 m/s)$^2 = 2240$ J $\approx 2{,}2 \times 10^3$ J.

15. Zero sul pavimento: $U = 2{,}0$ kg $\cdot$ 9,8 m/s$^2 \cdot 1{,}5$ m = 29,4 J ≈ 29 J. Zero sullo scaffale: $h = 0$, quindi $U = 0$.

16. $U_{el} = \frac{1}{2} \cdot 250$ N/m $\cdot$ (0,040 m)$^2 = 0{,}20$ J.

17. $v = \sqrt{(2 \cdot 9{,}8}$ m/s$^2 \cdot 5{,}0$ m) $\approx 9{,}9$ m/s; con un'altezza quattro volte maggiore la velocità è $\sqrt{4} = 2$ volte maggiore (19,8 m/s) e l'energia cinetica 4 volte maggiore ($K = m\,g\,h$).

18. Dal grafico: circa 56 m (asciutto) e circa 98 m (bagnato). Con la formula: $v = 100/3{,}6$ m/s = 27,8 m/s; $d = (27{,}8$ m/s$)^2/(2 \cdot 0{,}7 \cdot 9{,}8$ m/s$^2) \approx 56$ m; con $\mu_d = 0{,}4$: $d \approx 98$ m.

19. $W_{tot} = \Delta K = \frac{1}{2} \cdot 1{,}5$ kg $\cdot$ [(6,0 m/s)$^2 -$ (2,0 m/s)^2] = 0,75 kg $\cdot$ 32 m^2/s$^2 = 24$ J.

20. a) $U = 0{,}50$ kg $\cdot$ 9,8 m/s$^2 \cdot 3{,}0$ m = 14,7 J; $K = \frac{1}{2} \cdot$ 0,50 kg $\cdot$ (4,0 m/s)$^2 = 4{,}0$ J; $E = 18{,}7$ J ≈ 19 J. b) Al suolo $\frac{1}{2} m\,v^2 = 18{,}7$ J: $v = \sqrt{(2 \cdot 18{,}7}$ J / 0,50 kg) $\approx 8{,}6$ m/s (oppure $v = \sqrt{(v_0^2 + 2g\,h)} = \sqrt{(16 + 58{,}8)}$ m/s).

21. Zero al suolo; la massa si semplifica: $\frac{1}{2} v^2 + g\,h =$ costante. a) $v = \sqrt{(v_0^2 + 2g\,h)} = \sqrt{(9{,}0 + 2 \cdot 9{,}8 \cdot 25)}$ m/s = $\sqrt{499}$ m/s ≈ 22 m/s. b) Dislivello 25 − 15 = 10 m: $v = \sqrt{(9{,}0 + 196)}$ m/s ≈ 14 m/s. c) Con $v = 0$ in cima: $h = 25$ m $+ v_0^2/(2g) = 25$ m + 0,46 m $\approx 25{,}5$ m. d) Tutti i termini dell'equazione dell'energia sono proporzionali a m, che si semplifica.

22. a) $U_{el} = \frac{1}{2} \cdot 600$ N/m $\cdot$ (0,050 m)$^2 = 0{,}75$ J. b) Zero nella posizione iniziale; nel punto più alto $m\,g\,h =$ 0,75 J: $h = 0{,}75$ J / (0,020 kg $\cdot$ 9,8 m/s^2) $\approx 3{,}8$ m. c) Alla lunghezza a riposo la pallina è salita di 0,050 m: $U =$ 0,020 $\cdot$ 9,8 $\cdot$ 0,050 J $\approx 0{,}0098$ J; $K = 0{,}75$ J − 0,0098 J $\approx$ 0,74 J; $v = \sqrt{(2 \cdot 0{,}74}$ J / 0,020 kg) $\approx 8{,}6$ m/s.

23. a) Zero nel punto più basso: $\frac{1}{2} m\,v^2 = m\,g\,h$, $v =$ $\sqrt{(2 \cdot 9{,}8}$ m/s$^2 \cdot 0{,}40$ m) $\approx 2{,}8$ m/s. b) Sulla pallina agiscono il peso $m\,g = 2{,}94$ N, verso il basso, e la tensione T del filo, verso l'alto (verso il centro); la risultante è la forza centripeta: $T - m\,g = m\,v^2/l$. Con $v^2 = 7{,}84$ m^2/s^2: $T = 2{,}94$ N + 0,30 kg $\cdot$ 7,84 m^2/s^2 / 1,20 m = 2,94 N + 1,96 N $\approx 4{,}9$ N. c) La tensione è sempre perpen-

dicolare all'arco descritto dalla pallina, cioè allo spostamento: non compie lavoro.

24. a) Zero in fondo: $E_i = 25\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 3{,}0\ \text{m} = 735\ \text{J}$; $E_f = \frac{1}{2} \cdot 25\ \text{kg} \cdot (5{,}5\ \text{m/s})^2 \approx 378\ \text{J}$; $\Delta E \approx -357\ \text{J} \approx -3{,}6 \times 10^2\ \text{J}$. b) $W_{attr} = -F_d\, l$: $F_d = 357\ \text{J} / 6{,}0\ \text{m} \approx 59\ \text{N}$. c) È diventata energia interna del bambino, dei suoi vestiti e dello scivolo, che si scaldano un poco.

25. a) $v = 72/3{,}6\ \text{m/s} = 20\ \text{m/s}$; $K = \frac{1}{2} \cdot 1100\ \text{kg} \cdot (20\ \text{m/s})^2 = 2{,}2 \times 10^5\ \text{J}$. b) Reazione: $20\ \text{m/s} \cdot 1{,}0\ \text{s} = 20\ \text{m}$ (moto uniforme). Frenata: $F_d = \mu_d\, m\, g$, $F_d\, d = K$, $d = v^2/(2\mu_d\, g) = 400/(2 \cdot 0{,}70 \cdot 9{,}8)\ \text{m} \approx 29\ \text{m}$; in tutto circa 49 m. c) $d \propto v^2$: per dimezzare d la velocità va divisa per $\sqrt{2}$: $72\ \text{km/h} / 1{,}414 \approx 51\ \text{km/h}$.

26. a) $\Delta U = 1000\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 50\ \text{m} = 4{,}9 \times 10^5\ \text{J}$ in ogni secondo. b) Potenza disponibile $4{,}9 \times 10^5\ \text{W}$; potenza elettrica $P = 0{,}85 \cdot 4{,}9 \times 10^5\ \text{W} \approx 4{,}2 \times 10^5\ \text{W} = 420\ \text{kW}$. c) In un'ora: $420\ \text{kW} \cdot 1\ \text{h} \approx 4{,}2 \times 10^2\ \text{kWh}$ ($1{,}5 \times 10^9\ \text{J}$).

27. Traccia. Con una massa di circa 60 kg: $U = 60\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 15\ \text{m} \approx 8{,}8 \times 10^3\ \text{J} \approx 9\ \text{kJ}$. Energia chimica: circa 4 volte tanto, ≈ 35 kJ. Un biscotto da 80 kJ ne basta e avanza: ci vorrebbero più di due salite di cinque piani per «bruciarlo» (la stima trascura l'energia consumata per il moto delle gambe e il metabolismo di base).

28. Traccia. Sagredo sostiene che corpi che scendono da fermi da una stessa altezza, lungo piani di pendenza diversa (e in verticale), arrivano in fondo con la stessa velocità. È corretto se gli attriti sono trascurabili: la forza normale non compie lavoro, si conserva l'energia meccanica e $v = \sqrt{(2g\,h)}$ dipende solo dall'altezza; per una palla che rotola senza strisciare la velocità in fondo è un po' minore (una parte dell'energia fa ruotare la palla), ma è ancora la stessa per tutti i piani. Lo stesso Sagredo, subito prima, precisa che bisogna rimuovere «tutti gl'impedimenti accidentarii ed esterni». Verifica: rotaie di pendenza diversa con la partenza alla stessa quota, una fotocellula in fondo per misurare la velocità (come nel laboratorio del capitolo); i valori devono essere compatibili fra loro, mentre i tempi di discesa saranno diversi.

29. L'errore è nella prima affermazione: $K \propto v^2$, quindi con velocità doppia l'energia cinetica quadruplica. Il lavoro della forza frenante, $F\, d$, deve annullare tutta l'energia cinetica; con la stessa forza lo spazio di frenata è quattro volte maggiore, non doppio.