

L'energia meccanica



Cesare Gallimberti, Olycom

Il record mondiale di salto in alto è di 2,45 m. Se si facessero le Olimpiadi sulla Luna, l'asta dovrebbe essere sistemata molto più in alto, perché la forza di gravità è minore che sulla Terra e saltare è più facile.

► **Quale sarebbe il record di salto in alto sulla Luna?**

LA RISPOSTA A PAG. 345

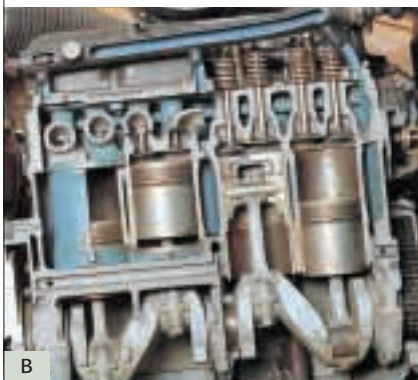
1. Il lavoro

Nel corso della storia gli uomini hanno inventato diversi tipi di macchine per sollevare, spostare e mettere in movimento gli oggetti.

- Nel mulino lo spostamento di una mola trasforma il grano in farina.



- Il moto dei pistoni del motore mette in movimento l'automobile.

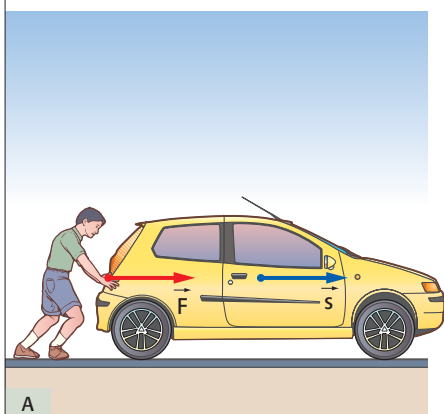


In tutte le macchine vi sono forze che producono spostamenti. Una nuova grandezza, il *lavoro* di una forza, misura l'effetto utile della combinazione di una forza con uno spostamento.

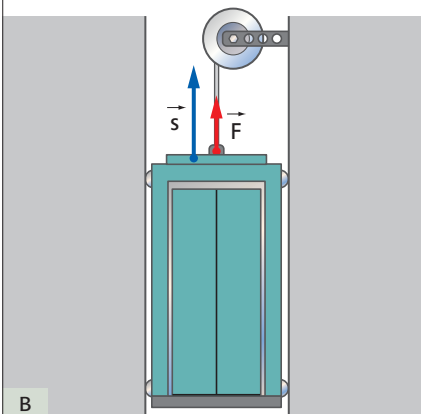
■ Forza e spostamento paralleli

Il caso più semplice è quello in cui il vettore forza è parallelo al vettore spostamento: i due vettori hanno la stessa direzione e lo stesso verso.

- Quando spingiamo un'automobile, sia la forza sia lo spostamento sono orizzontali e in avanti.



- In un ascensore, la forza del motore e lo spostamento della cabina sono verticali e verso l'alto.



Se la forza e lo spostamento sono *paralleli*, si definisce il lavoro come

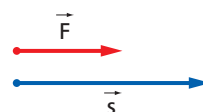
lavoro (N · m)

$$W = Fs$$

forza (N)

spostamento (m)

(1)



Parallelismo

Due vettori si dicono «paralleli» se hanno la stessa direzione e anche lo stesso verso.

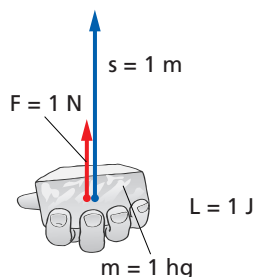
Per esempio, un motore di ascensore che esercita una forza di 2000 N mentre solleva la cabina di 6 m compie un lavoro

$$W = (2000 \text{ N}) \times (6 \text{ m}) = 12\,000 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

Nel Sistema Internazionale l'unità di misura del lavoro è il newton per metro ($\text{N} \cdot \text{m}$). Questa unità di misura è detta anche **joule** (J):

$$1 \text{ J} = (1 \text{ N}) \times (1 \text{ m}).$$

Un **joule** è il lavoro compiuto da una forza di un newton quando il suo punto di applicazione si sposta di un metro (nella direzione e nel verso della forza).



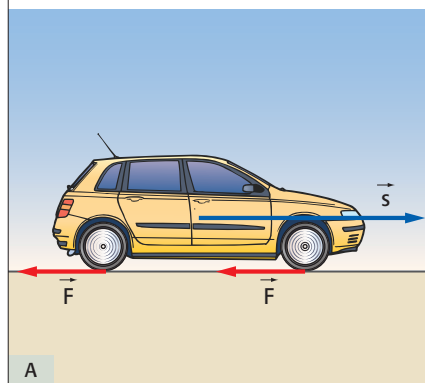
Puoi eseguire un lavoro pari a 1 J sollevando di un metro un corpo che pesa 1 N. Così, se afferrì un panetto di burro da 1 hg (→ figura a sinistra) e lo sollevi di 1 m compì il lavoro di circa 1 J.

Quando i vettori forza e spostamento sono paralleli, la forza mette o mantiene in movimento il corpo su cui essa è applicata. In questo caso il lavoro della forza è positivo ed è detto **lavoro motore**.

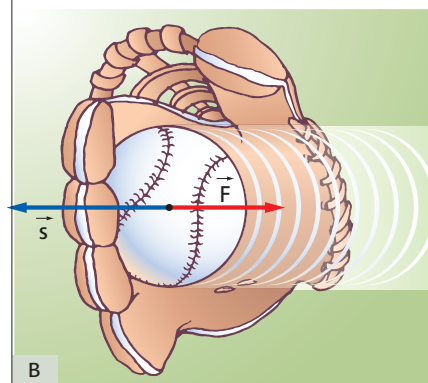
■ Forza e spostamento antiparalleli

Un altro caso molto comune è quello in cui i vettori forza e spostamento hanno la stessa direzione ma versi opposti.

► Quando si frena in automobile, l'automobile procede in avanti, ma le forze di attrito con l'asfalto sono rivolte all'indietro.



► Quando il guantone da baseball ferma la pallina, la forza del guantone ha verso opposto rispetto allo spostamento della pallina.



Se la forza e lo spostamento sono *antiparalleli*, il lavoro è dato dalla formula

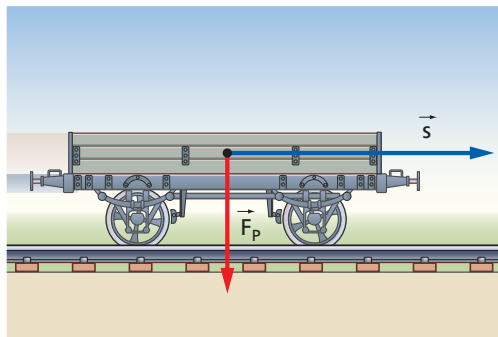


$$\text{lavoro (J)} \quad W = -Fs \quad \begin{array}{l} \text{forza (N)} \\ \text{spostamento (m)} \end{array} \quad (2)$$

Il segno meno è introdotto per descrivere il fatto che, quando forza e spostamento hanno versi opposti, la forza agisce in modo da *opporsi* al moto del corpo e quindi compie un **lavoro resistente**.

■ Forza e spostamento perpendicolari

Considera un carrello (→ figura sotto) che si muove senza attrito su un binario orizzontale. Sul carrello agisce la forza-peso $\vec{F}_P$, che è rivolta verso il basso e, quindi, risulta perpendicolare allo spostamento (orizzontale) $\vec{s}$ del carrello. In questa situazione la forza $\vec{F}_P$ non influenza in alcun modo lo spostamento $\vec{s}$ (non lo asseconda ma non lo ostacola neppure).

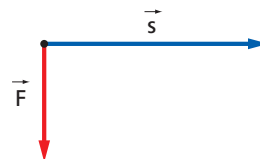


Nel caso di forza e spostamento *perpendicolari* il **lavoro è nullo**:

lavoro (J)

$$W = 0$$

(3)



CASI SEMPLICI DI LAVORO

Angolo		Formula	Valore	Tipo di lavoro
0°		$W = Fs$	+	Motore
90°		$W = 0$	0	Nullo
180°		$W = -Fs$	-	Resistente

DOMANDA

► Indica nella tabella se il lavoro compiuto dall'uomo è positivo, negativo o nullo.

L'uomo	Lavoro		
	Negativo	Nullo	Positivo
Solleva la valigia			
Trattiene la valigia mentre cade			
Cammina con la valigia in mano			
Sta fermo con la valigia in mano			

2. La definizione di lavoro per una forza costante

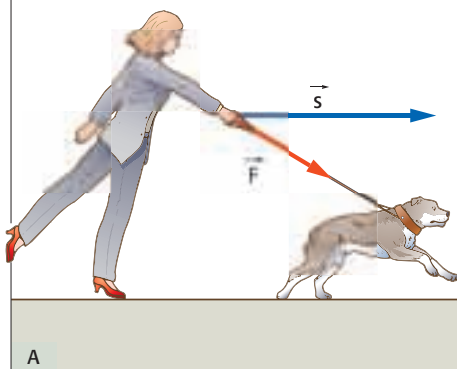
LEZIONE

- Il lavoro di una forza costante

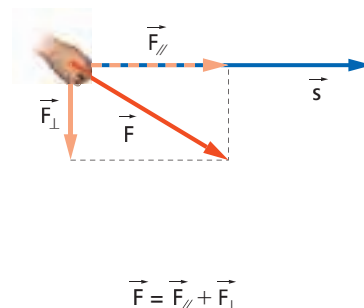


In generale il vettore forza e il vettore spostamento non hanno la stessa direzione. Per esempio:

- il cane esercita una forza $\vec{F}$ inclinata verso il basso, ma lo spostamento $\vec{s}$ della mano che regge il guinzaglio avviene in orizzontale.



- È conveniente scomporre la forza $\vec{F}$ esercitata dal cane nei due vettori componenti $\vec{F}_{||}$ (orizzontale) e $\vec{F}_{\perp}$ (verticale).



Il lavoro W della forza $\vec{F}$ è uguale alla somma del lavoro W_1 compiuto dal componente $\vec{F}_{||}$ e del lavoro W_2 compiuto dal componente $\vec{F}_{\perp}$:

$$W = W_1 + W_2. \quad (4)$$

Per le formule (1) e (2), il lavoro W_1 , fatto da una forza che è parallela al vettore spostamento, vale

$$W_1 = \pm F_{||} s$$

(il segno + vale se la forza $F_{||}$ ha lo stesso verso dello spostamento $\vec{s}$, il segno - si usa se i due vettori hanno versi opposti).

Per la formula (3) il lavoro W_2 della forza $\vec{F}_{\perp}$, perpendicolare allo spostamento $\vec{s}$, è nullo:

$$W_2 = 0.$$

Sostituendo questi due risultati nella formula (4) otteniamo allora:

$$W = W_1 + W_2 = (\pm F_{||}) + 0 = (\pm F_{||})s. \quad (5)$$

Questa formula dice che

La componente

La componente di $\vec{F}$ lungo $\vec{s}$ è proprio uguale a $+F_{||}$ o a $-F_{||}$, a seconda che il verso di $\vec{F}_{||}$ sia uguale o opposto a quello di $\vec{s}$.

il lavoro di una forza $\vec{F}$ durante uno spostamento $\vec{s}$ è dato dalla componente di $\vec{F}$ parallela a $\vec{s}$, moltiplicata per il modulo di $\vec{s}$:

$$W = (\pm F_{||})s \quad (6)$$

lavoro (J) componente della forza lungo lo spostamento (N) valore dello spostamento (m)

■ Il lavoro come prodotto scalare

Nell'Unità «I vettori» abbiamo visto che una formula come la (6) può essere scritta in modo sintetico come un *prodotto scalare* tra $\vec{F}$ e $\vec{s}$.

Il lavoro di una forza costante $\vec{F}$ durante uno spostamento $\vec{s}$ è uguale al prodotto scalare tra i vettori $\vec{F}$ e $\vec{s}$:

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} \quad (7)$$

Infatti, per definizione il prodotto scalare tra due vettori è uguale al prodotto del modulo di uno di essi (per esempio quello di $\vec{s}$) per la componente dell'altro vettore (in questo caso $\vec{F}$) lungo il primo.

■ La formula goniometrica del lavoro

La formula (2) dell'Unità «I vettori» permette di calcolare il valore del lavoro se conosciamo i moduli F e s dei vettori $\vec{F}$ e $\vec{s}$ e l'angolo α formato da essi. Allora si ha:

$$W = Fs \cos \alpha. \quad (8)$$

La tabella sotto mostra che questa formula contiene le tre formule del lavoro che abbiamo visto nel paragrafo precedente.

FORMULA GONIOMETRICA DEL LAVORO

Caso	α	$\cos \alpha$	Formula per il lavoro: $W = Fs \cos \alpha$
$\vec{F}$ e $\vec{s}$ paralleli	0°	+1	$W = Fs \cos \alpha = Fs$
$\vec{F}$ e $\vec{s}$ antiparalleli	180°	-1	$W = Fs \times (-1) = -Fs$
$\vec{F}$ e $\vec{s}$ perpendicolari	90°	0	$W = Fs \times 0 = 0$

■ Fatica e lavoro

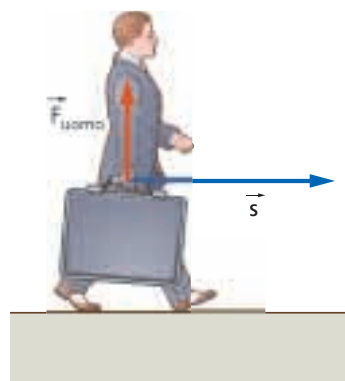
Se trasportiamo una cassa su per le scale, la fatica che sperimentiamo cresce sia all'aumentare del peso della cassa, sia all'aumentare della lunghezza della salita. In questo caso la grandezza fisica «lavoro», proporzionale sia alla forza che allo spostamento, descrive piuttosto bene anche la nostra sensazione di fatica.

Secondo la formula (3), però, un uomo che porta una valigia lungo un percorso orizzontale compie un lavoro nullo, perché la forza e lo spostamento sono perpendicolari.

Naturalmente, per trasportare la valigia questa persona non fa una fatica nulla. In questo caso, quindi, la grandezza fisica «lavoro» non corrisponde alla nostra sensazione di fatica.

La contraddizione è soltanto apparente: i nostri muscoli striati non sono in grado di «bloccarsi» e rimanere immobili per sostenere la valigia; mentre la trasportiamo, essa ci piega verso il basso e noi continuiamo a rispondere, anche senza accorgercene, con microscopici ma continui movimenti verso l'alto dei muscoli del braccio.

In ognuno di questi spostamenti la forza che esercitiamo e lo spostamento sono paralleli, per cui il lavoro che compiamo è positivo. È la somma di questi lavori che noi avvertiamo come fatica.



DOMANDA

Una bambina tira una slitta per 11,5 m con una forza di 84,1 N inclinata di 30° verso l'alto rispetto all'orizzontale.

► Quanto vale il lavoro compiuto dalla bambina?

LEZIONE

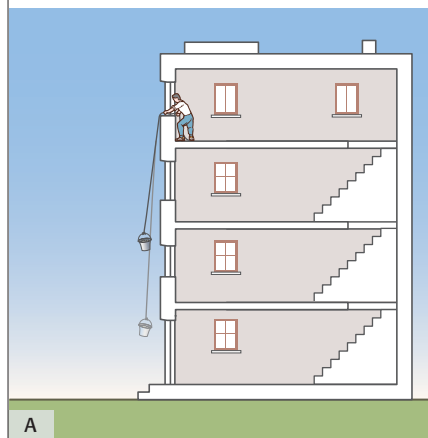
• La potenza



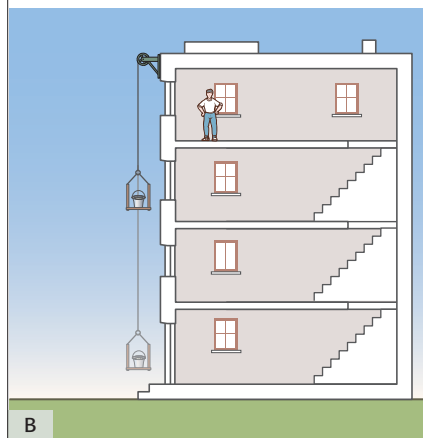
3. La potenza

Uno stesso lavoro può essere compiuto più o meno rapidamente.

► Un muratore solleva un secchio di cemento fino al terzo piano.



► Il montacarichi solleva lo stesso secchio più rapidamente.



Velocità costante

Pensiamo che, in entrambi i casi, il secchio sia sollevato a velocità costante. Allora, per il principio di inerzia, la forza verso l'alto è uguale al peso del secchio.

Il lavoro è lo stesso perché:

- in entrambi i casi la forza verso l'alto è uguale alla forza-peso del secchio;
- lo spostamento è identico.

Il montacarichi compie lo stesso lavoro più rapidamente, perché lo fa in meno tempo. Per misurare la rapidità con cui una forza compie un lavoro, introduciamo una nuova grandezza, la *potenza*.

La **potenza** di un sistema fisico è uguale al rapporto tra il lavoro compiuto dal sistema e l'intervallo di tempo necessario per eseguire tale lavoro:

$$P = \frac{W}{\Delta t} \quad (9)$$

lavoro compiuto (J)

tempo impiegato (s)

Il montacarichi sviluppa una potenza maggiore di quella del muratore. Per esempio, un montacarichi che compie in 10 s un lavoro di 6000 J (sollevando di 6 m un peso di 1000 N) ha una potenza

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{6000 \text{ J}}{10 \text{ s}} = 600 \frac{\text{J}}{\text{s}}.$$

Troviamo così che in ogni secondo il montacarichi compie un lavoro di 600 J. In generale, il valore della potenza indica il lavoro che una macchina o un sistema fisico è in grado di eseguire in un secondo.

Nel Sistema Internazionale l'unità di misura della potenza è il joule al secondo (J/s). Questa unità di misura è detta **watt** e si indica con il simbolo W:

$$1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}}. \quad (10)$$



James Watt

(1736-1819) era costruttore di strumenti scientifici presso l'università di Glasgow.

Nel 1769 egli riuscì a costruire la prima macchina a vapore veramente efficiente, in grado di produrre cinque volte più lavoro per tonnellata di carbone di quelle che l'avevano preceduta. In suo onore, l'unità di misura della potenza venne chiamata watt.

Un watt è la potenza di un sistema fisico che compie il lavoro di un joule in un secondo. Puoi sviluppare la potenza di circa 1 W sollevando di 1 m, in 1 s, un panetto di burro da 1 hg.

► Durante una gara ciclistica un corridore può sviluppare una potenza di oltre 1 kW.



A

R. Bettini/Olympia, Milano 1994

► Una centrale sviluppa una potenza di 1000 MW, erogando energia elettrica.



B

Ventram di attività del CTN-MI, Milano 1982

Una lampadina da 100 W assorbe ogni secondo 100 J di energia elettrica, che viene trasformata in energia luminosa e in calore.

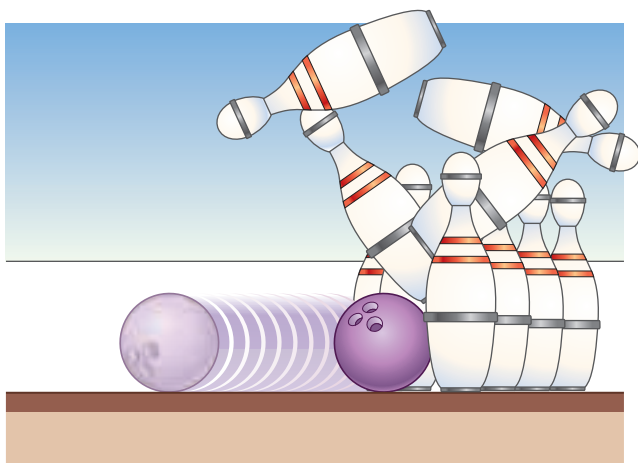
DOMANDA

Il cuore di un adulto, nel pompare il sangue, compie ogni minuto un lavoro di 150 J.

► Quanto vale la sua potenza?

4. Energia cinetica

Un oggetto in movimento è in grado di compiere lavoro. Per esempio, una palla da bowling (→ figura sotto) compie un lavoro positivo sui birilli, perché esercita su di essi una forza mentre li sposta.



LEZIONE

• L'energia cinetica

Perché «cinetica»

Dal greco, il termine energia cinetica significa energia di movimento.

Questo lavoro avviene a spese dell'energia cinetica immagazzinata nell'oggetto. Definiamo **energia cinetica** K di un corpo di massa m , che si muove a velocità v , il prodotto

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (11)$$

energia cinetica (J) massa (kg)
velocità (m/s)

L'energia cinetica si misura in joule ed è proporzionale:

- alla massa del corpo;
- al quadrato della sua velocità.

Per esempio, una palla da bowling, che ha massa $m = 3,6 \text{ kg}$ e che si muove con una velocità $v = 5,0 \text{ m/s}$, possiede un'energia cinetica

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times (3,6 \text{ kg}) \times \left(5,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 1,8 \times 25 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 45 \text{ J}.$$

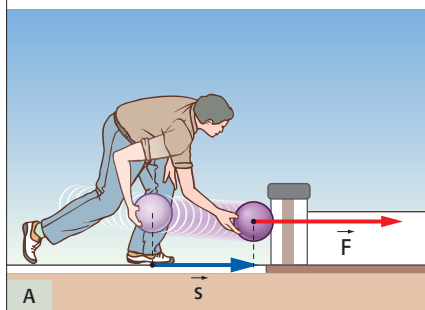
■ Il lavoro per portare un corpo fermo a velocità v

L'energia cinetica K è uguale al lavoro W che una forza deve compiere per portare un corpo di massa m , inizialmente fermo, fino alla velocità v :

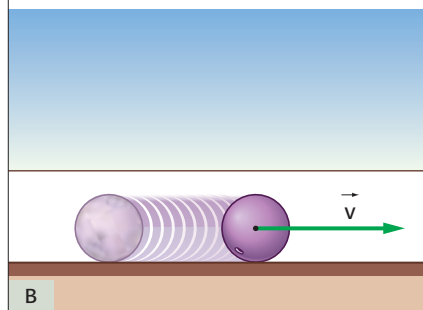
$$K = W \quad (12)$$

Consideriamo una palla di massa m ferma e immaginiamo di accelerarla con una forza costante di intensità F .

► La forza continua ad agire mentre la palla si sposta con moto rettilineo uniformemente accelerato per un tratto s .



► Dopo che la forza ha smesso di agire, la palla si muove di moto rettilineo uniforme con velocità costante v .



Calcoliamo il lavoro $W = Fs$. Per il secondo principio della dinamica, la forza imprime al corpo un'accelerazione costante di intensità

$$a = \frac{F}{m}.$$

Nel moto uniformemente accelerato con partenza da fermo la velocità del corpo è $v = at$. Quindi il corpo raggiunge la velocità v all'istante

$$t = \frac{v}{a}.$$

Sostituendo in questa espressione la formula precedente, otteniamo

$$t = \frac{v}{a} = v \frac{1}{a} = v \frac{m}{F} = \frac{mv}{F}.$$

La distanza percorsa dal corpo fino all'istante t è data dalla formula

$$s = \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2} \frac{F}{m} \left(\frac{mv}{F} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{F}{m} \frac{m^2 v^2}{F^2} = \frac{1}{2} \frac{mv^2}{F}.$$

Il lavoro fatto dalla forza è quindi:

$$W = Fs = \frac{1}{2} \frac{mv^2}{F} F = \frac{1}{2} mv^2,$$

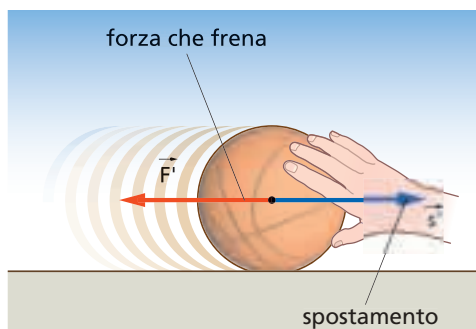
che è l'energia cinetica finale K , come volevamo dimostrare.

■ Il lavoro per fermare un corpo che ha velocità v

L'energia cinetica è anche uguale al lavoro che un corpo di massa m , in moto a velocità v , compie quando viene fermato.

Consideriamo una palla di massa m che si muove con velocità costante v e immaginiamo di fermarla con una forza costante di intensità F' .

La forza $\vec{F}'$ continua ad agire mentre la palla si sposta con accelerazione negativa $a' = -F'/m$ per un tratto s' . I vettori $\vec{F}'$ e $\vec{s}'$ hanno versi opposti, per cui il lavoro W' della forza che ferma la palla è $W' = -F's'$.



Nel moto uniformemente accelerato (con velocità iniziale $v_0 = v$) la velocità del corpo è $v' = v + a't'$. Quindi il corpo si ferma (cioè raggiunge la velocità $v' = 0$) all'istante

$$t' = -\frac{v}{a'} = -v \frac{1}{a'} = -v \left(-\frac{m}{F'} \right) = \frac{mv}{F'}.$$

La distanza percorsa dal corpo dall'istante in cui inizia a rallentare all'istante t' è

$$s' = vt' + \frac{1}{2} a't'^2 = \frac{mv^2}{F'} - \frac{1}{2} \frac{F'}{m} \left(\frac{mv}{F'} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{mv^2}{F'}.$$

Il lavoro compiuto dalla forza frenante è quindi:

$$W' = -F's' = -\frac{1}{2} \frac{mv^2}{F'} F' = -\frac{1}{2} mv^2.$$

Per il terzo principio della dinamica, mentre la mano esercita una forza $\vec{F}'$ sulla palla per rallentarla, anche la palla esercita una forza $-\vec{F}'$ sulla mano.

Nuova origine degli istanti di tempo

Poniamo $t' = 0$ nell'istante in cui la forza di attrito inizia ad agire.

lavoro positivo



Validità generale

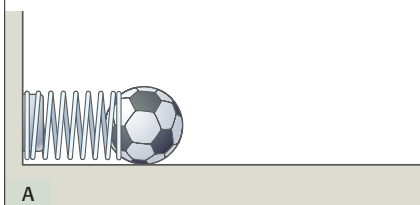
Per semplicità, abbiamo calcolato i lavori $\frac{1}{2}mv^2$ nel caso di forze costanti. Ma lo stesso risultato si ottiene anche nel caso di forze variabili, come quelle di una molla.

La palla, quindi, esercita una forza parallela allo spostamento $\vec{s}'$ e, di conseguenza, compie un lavoro motore (positivo)

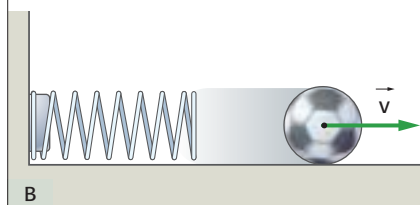
$$W = -W' = +\frac{1}{2}mv^2.$$

Per accelerare la palla (di massa m) fino alla velocità v (partendo da ferma) è necessario un lavoro pari a $\frac{1}{2}mv^2$. Quando viene fermata, la palla esercita sull'oggetto che la ostacola lo stesso lavoro $\frac{1}{2}mv^2$ che era stato compiuto su di essa alla partenza. In pratica, la palla

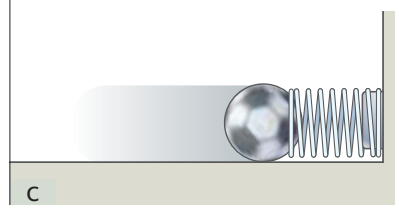
► ha richiesto un lavoro $W = \frac{1}{2}mv^2$ per giungere alla velocità v partendo da ferma.



► Poi, muovendosi a velocità costante per il primo principio della dinamica, ha «portato con sé» la capacità di compiere un lavoro.



► Infine, la palla ha «restituito» il lavoro quando è stata fermata dall'azione di un altro sistema fisico.



■ Il teorema dell'energia cinetica

La formula (12) è un esempio di una proprietà generale:

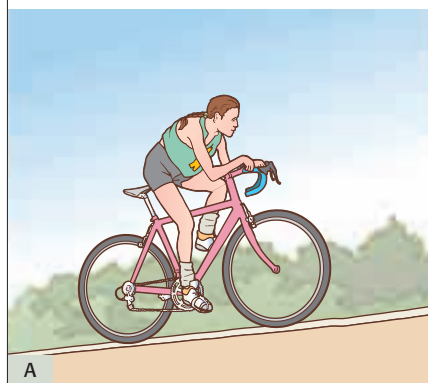
se un corpo possiede un'energia cinetica iniziale K_i e una forza agisce su di esso effettuando un lavoro W , l'energia cinetica finale K_f del corpo è uguale alla somma di K_i e di W .

$$\text{energia cinetica finale (J)} \quad K_f = K_i + W \quad \text{energia cinetica iniziale (J)} \quad (13)$$

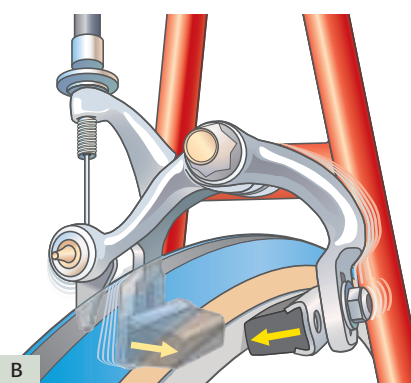
lavoro (J)

Se K_i è uguale a zero, otteniamo la formula appena dimostrata $K_f = W$ (lavoro per accelerare la massa m da 0 a v). Quando invece K_f è uguale a zero, ritroviamo la formula $K_i = -W$ (lavoro per fermare la massa m che parte con velocità v).

► Durante uno scatto compiamo un lavoro positivo, che fa aumentare l'energia cinetica.



► Durante una frenata compiamo un lavoro negativo, che fa diminuire l'energia cinetica.



■ L'energia

L'energia cinetica è solo il primo tipo di energia che incontriamo nello studio della fisica. In generale

l'energia è la capacità di un sistema fisico di compiere lavoro.

Nello specifico, l'energia cinetica misura la capacità di un oggetto di compiere un lavoro per il fatto di essere in movimento.

DOMANDA

► Se raddoppio la velocità di un corpo, come cambia la sua energia cinetica?

5. Forze conservative e forze dissipative

Una forza si dice **conservativa** se il lavoro che essa fa nello spostamento da un punto A fino a un punto B dipende soltanto dagli estremi A e B , ma non dal particolare percorso seguito durante lo spostamento.

Una forza che *non* è conservativa si dice **dissipativa**.

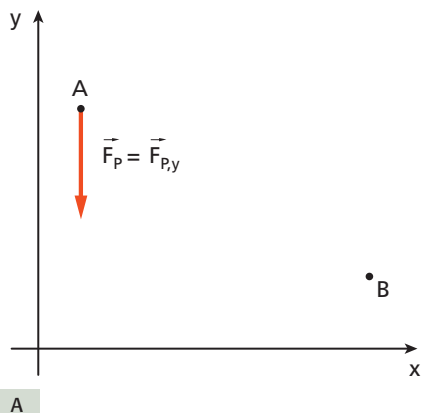
■ Un esempio di forza conservativa: la forza-peso

Consideriamo una palla di massa m che si sposta da un punto di partenza A a un punto di arrivo B spostato di l a destra di A e di h sotto di esso, come è mostrato nella ➔ figura.

Per descrivere i vettori forza-peso $\vec{F}_p$ e spostamento $\vec{s}$ introduciamo un sistema di riferimento che ha l'asse x rivolto verso destra e l'asse y in alto. Allora:

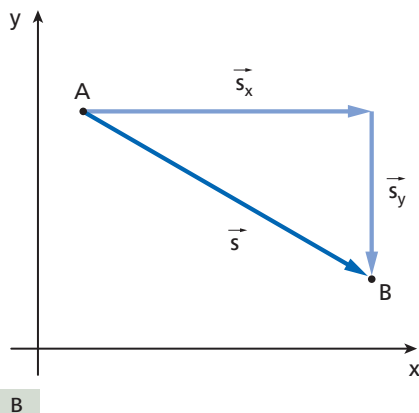
► il vettore forza-peso ha la componente orizzontale nulla e quella verticale negativa:

$$F_{px} = 0; F_{py} = -mg.$$



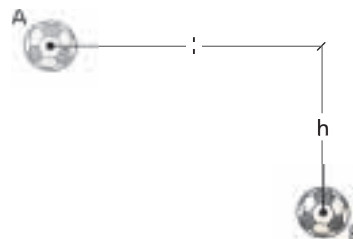
► Il vettore spostamento ha la componente orizzontale positiva e quella verticale negativa:

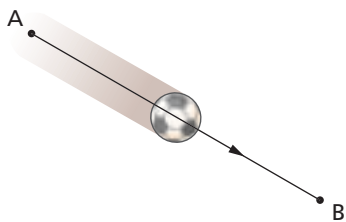
$$s_x = l; s_y = -h.$$



LEZIONE

- Forze conservative e forze dissipative





Componenti e prodotto scalare

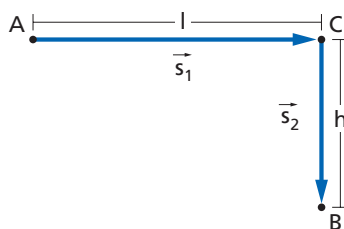
Ricorda che il prodotto scalare $\vec{a} \cdot \vec{b}$ si può calcolare come $\vec{a} \cdot \vec{b} = a_x b_x + a_y b_y$.

Calcoliamo ora il lavoro fatto dalla forza-peso mentre la palla si sposta da A a B in linea retta (→ figura a lato). Questo lavoro si può calcolare come:

$$W = \vec{F}_P \cdot \vec{s} = F_{P,x} s_x + F_{P,y} s_y = 0 \times l + (-mg) \times (-h) = mgh. \quad (14)$$

Il lavoro fatto è, quindi, $W = mgh$.

Ora spostiamo la palla da A a B lungo un percorso diverso: da A la portiamo in un punto C che si trova alla destra di A a una distanza l e sopra B; poi, da C la portiamo a B percorrendo una distanza h .

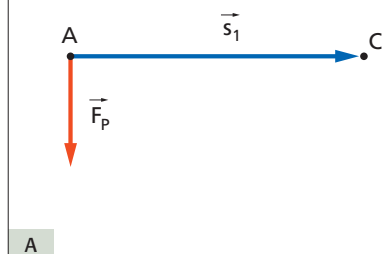


Questa volta il cammino fatto per andare da A a B è composto da due tratti rettilinei e così il lavoro W è la somma di due contributi:

$$W = W_1 + W_2.$$

► Durante il tratto 1, da A a C, il vettore $\vec{F}_P$ è perpendicolare allo spostamento $\vec{s}$, per cui il lavoro W_1 è nullo:

$$W_1 = 0.$$



► Nel tratto 2, da C a B, i vettori $\vec{F}_P$ e $\vec{s}$ hanno la stessa direzione e lo stesso verso, perciò il lavoro W_2 è positivo:

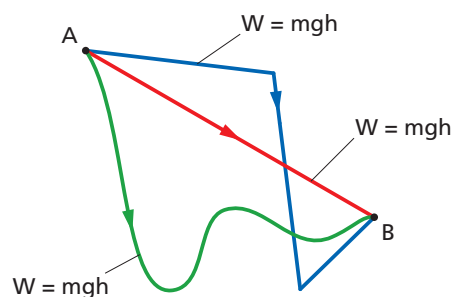
$$W_2 = F_P \times s_2 = mg \times h = mgh.$$



Anche in questo caso il lavoro totale risulta

$$W = W_1 + W_2 = 0 + mgh = mgh \quad (15)$$

e, quindi, è uguale a quello calcolato con la formula (14). In realtà, facendo calcoli più complicati possiamo vedere che il lavoro compiuto dalla forza-peso mentre la palla si sposta tra A e B vale sempre mgh , qualunque sia la forma del cammino seguito (→ figura a lato). Ciò significa che

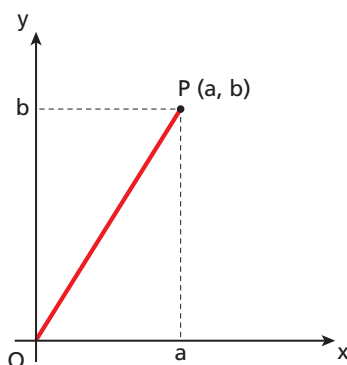


la forza-peso è una forza conservativa.

■ Un esempio di forza dissipativa: l'attrito radente

Consideriamo una persona che spinge una cassa sul pavimento, in linea retta, dal punto O al punto P . Se scegliamo un sistema di riferimento che ha l'origine nel punto O , il punto P ha coordinate (a, b) e, per il teorema di Pitagora, la distanza tra O e P è

$$\overline{OP} = \sqrt{a^2 + b^2}.$$



Mentre la cassa si muove, tra essa e il pavimento agisce la forza di attrito $\vec{F}_A$, che ha sempre la direzione dello spostamento $\vec{s}_{O \rightarrow P}$ della cassa e verso opposto.

Per la formula (2), il lavoro di questa forza è

$$W_{O \rightarrow P} = -F_A \overline{OP} = -F_A \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (16)$$

Ora la cassa viene spostata da O a P passando per il punto Q , che ha coordinate $(a, 0)$. Il lavoro $W_{O \rightarrow Q \rightarrow P}$ della forza di attrito durante questo spostamento è la somma di due contributi: $W_{O \rightarrow Q}$ durante lo spostamento $\vec{s}_{O \rightarrow Q}$ da O a Q e $W_{Q \rightarrow P}$ durante lo spostamento $\vec{s}_{Q \rightarrow P}$ da Q a P :

$$W_{O \rightarrow Q \rightarrow P} = W_{O \rightarrow Q} + W_{Q \rightarrow P}.$$

Per la stessa ragione di prima si ha

$$W_{O \rightarrow Q} = -F_A \overline{OQ} = -F_A a \quad \text{e} \quad W_{Q \rightarrow P} = -F_A \overline{QP} = -F_A b,$$

perciò risulta

$$W_{O \rightarrow Q \rightarrow P} = W_{O \rightarrow Q} + W_{Q \rightarrow P} = -F_A a - F_A b = -F_A(a + b). \quad (17)$$

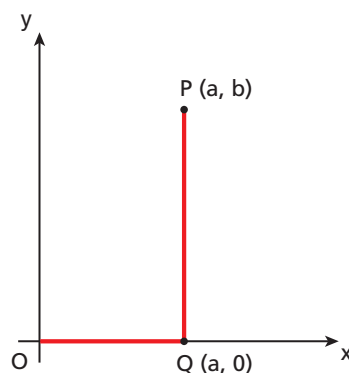
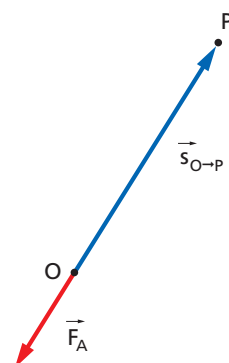
Così, il lavoro compiuto dalla forza di attrito mentre la cassa è spostata da O a P in linea retta (formula (16)) è diverso da quello compiuto dalla stessa forza lungo il percorso da O a P passando per Q : è quindi dimostrato che l'attrito radente non è una forza conservativa. Cioè:

la forza di attrito radente è dissipativa.

DOMANDA

Una cassa può essere spostata da O a Q lungo varie traiettorie. Considera il lavoro fatto dalla forza di attrito durante lo spostamento.

► In quale caso il valore assoluto del lavoro è minore?



Attrito viscoso

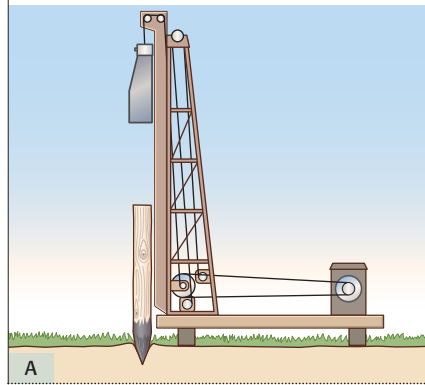
In modo simile si dimostra che anche la forza di attrito viscoso (che si esercita su un corpo che si muove in un fluido) è dissipativa.

6. Energia potenziale gravitazionale (della forza-peso)

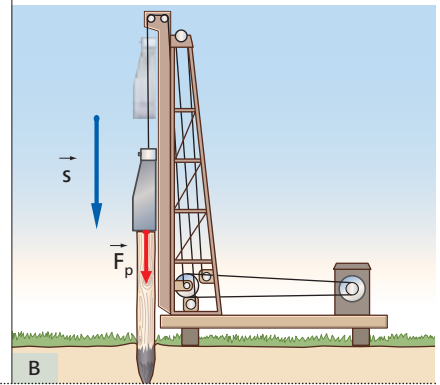
Un corpo che si trova in alto è in grado di compiere lavoro quando scende. Quindi un oggetto fermo può possedere un'energia per il semplice fatto di occupare una certa posizione rispetto al suolo. Questo tipo di energia è detta **energia potenziale gravitazionale**, perché nasce dall'attrazione gravitazionale della Terra.

■ Il lavoro della forza-peso

► Nelle battipali un grande maglio è sollevato fino a una certa altezza e poi lasciato andare.



► Tornando a terra, il maglio è in grado di compiere un lavoro, cioè conficcare un palo nel terreno.



- Il lavoro per conficcare il palo è uguale all'energia cinetica che il maglio ha acquisito a fine corsa.
- A sua volta questa energia cinetica è uguale al lavoro che la forza-peso compie sul maglio durante la caduta.

Calcoliamo il lavoro della forza-peso e quindi il lavoro di conficcamento del palo.

Notiamo che la forza-peso $\vec{F}_P$ del maglio e il suo spostamento $\vec{s}$ sono paralleli, per cui il lavoro della forza-peso è

$$W = F_P s.$$

Se la massa del maglio è m (per cui si ha $F_P = mg$) e la caduta è lunga h (in modo che si ha $s = h$), il lavoro è

$$W = mgh.$$

Il lavoro che il maglio compie per conficcare il palo è direttamente proporzionale alla sua massa e all'altezza da cui è partito.

Possiamo allora dire che, quando il maglio era fermo all'altezza h rispetto alla testa del palo, aveva una capacità di compiere lavoro uguale a mgh .

■ La definizione dell'energia potenziale gravitazionale

Un oggetto di massa m che si trova a una altezza h possiede un'energia potenziale che descrive la sua capacità di compiere lavoro. Questa **energia po-**

tenziale della forza-peso (o energia potenziale gravitazionale) vale:

$$U = mgh \quad (18)$$

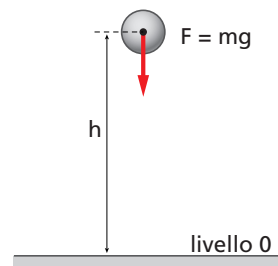
energia potenziale della forza-peso (J) massa (kg) accelerazione di gravità (m/s^2) altezza (m)

Possiamo misurare h rispetto al suolo o da qualsiasi altro *livello di riferimento*, per esempio da un balcone, dal fondo di un pozzo. Il livello di zero può essere scelto in modo arbitrario.

L'energia potenziale gravitazionale di un corpo è uguale al lavoro compiuto dalla forza-peso quando il corpo stesso si sposta dalla posizione iniziale a quella di riferimento (livello di zero).

Essendo uguale a un lavoro, l'energia potenziale è una grandezza scalare che si misura in joule.

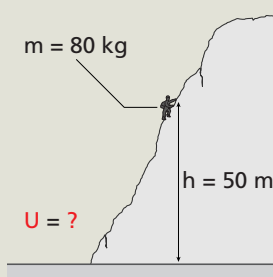
In questo caso si può definire l'energia potenziale perché la forza-peso è conservativa, quindi il lavoro dipende solo dai punti di partenza e di arrivo, e non dal percorso seguito dal corpo.



PROBLEMA

Uno scalatore si trova a un'altezza di 50 m rispetto alla base della parete su cui arrampica. La massa dello scalatore (compresa l'attrezzatura) è di 80 kg.

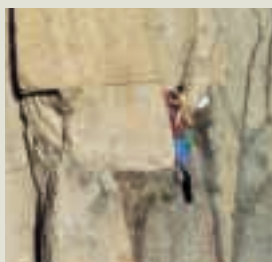
► Qual è l'energia potenziale dello scalatore, avendo scelto come livello di riferimento la base della parete?



■ Strategia e soluzione

Per la formula (17), l'energia potenziale gravitazionale è direttamente proporzionale alla massa e all'altezza:

$$\begin{aligned} U &= mgh = 80 \text{ kg} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 50 \text{ m} = \\ &= 3,9 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 3,9 \times 10^4 \text{ J.} \end{aligned}$$



■ Discussione

L'energia potenziale di una massa di 1,0 kg posta a 50 m di altezza è di circa 500 J:

$$U_1 = 1,0 \text{ kg} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 50 \text{ m} = 4,9 \times 10^2 \text{ J.}$$

Se la massa è 80 volte più grande, anche l'energia potenziale è 80 volte più grande:

$$U = 80 U_1 = 80 \times 4,9 \times 10^2 \text{ J} = 3,9 \times 10^4 \text{ J.}$$

DOMANDA

► Con lo stesso livello di riferimento, quanto vale l'energia potenziale dello scalatore quando egli si trova all'altezza di 5,0 m rispetto alla base della parete?

→ Esercizio simile: 38 a pag. 351.

7. La definizione generale dell'energia potenziale

LEZIONE

- L'energia potenziale



Condizioni iniziali e finali

Esempi di condizioni iniziali A e condizioni finali B possono essere:

- A: una massa m si trova a livello del tavolo;
- B: la stessa massa m si trova al suolo.
- A: una molla è compressa di 4 cm;
- B: la stessa molla è allungata di 5 cm.

Segno del lavoro

Se la forza rimane uguale e si cambia il verso dello spostamento, il lavoro cambia segno.

L'energia potenziale U può essere introdotta per tutte le forze conservative, generalizzando la definizione che abbiamo usato per la forza-peso.

Consideriamo un sistema fisico che è soggetto alla forza conservativa $\vec{F}$. Esso si trova nella condizione iniziale A e passa ora nella condizione finale B.

Definiamo la **variazione di energia potenziale** $\Delta U = U_B - U_A$ come l'opposto del lavoro $W_{A \rightarrow B}$ fatto dalla forza $\vec{F}$ durante il passaggio dalla situazione A a quella B:

$$\text{variazione di energia potenziale (J)} \quad \Delta U = - W_{A \rightarrow B} \quad (19)$$

lavoro compiuto dalla forza conservativa (J)

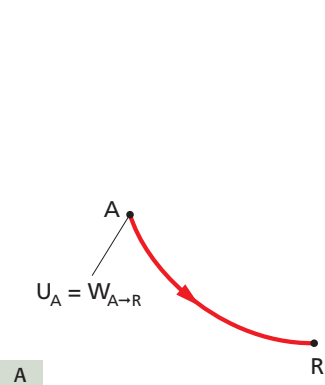
Una volta scelta una condizione R di zero (in modo che si abbia $U_R = 0$):

si chiama **energia potenziale** in A il valore della differenza di energia potenziale tra A e la situazione di riferimento R:

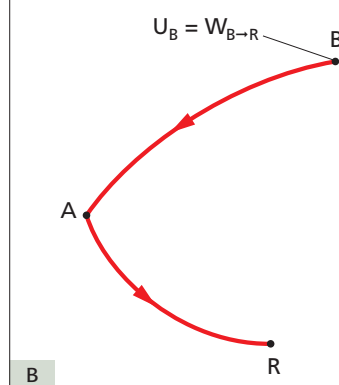
$$U_A = U_A - 0 = U_A - U_R = - W_{R \rightarrow A} = + W_{A \rightarrow R}. \quad (20)$$

Se si considerano il primo e l'ultimo termine della precedente catena di uguaglianze si vede che l'energia potenziale in A è anche uguale al lavoro $W_{A \rightarrow R}$ fatto dalla forza conservativa $\vec{F}$ mentre il sistema passa dalla condizione A a quella di riferimento R.

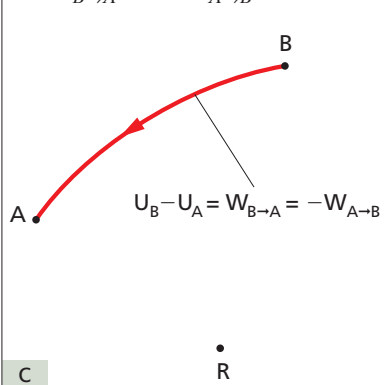
► L'energia potenziale in A è uguale al lavoro $W_{A \rightarrow R}$ fatto da $\vec{F}$ quando il sistema fisico passa da A a R.



► L'energia potenziale in B è uguale al lavoro $W_{B \rightarrow R}$ fatto da $\vec{F}$ quando il sistema fisico passa da B a R.



► La differenza di energia potenziale tra A e B ($U_B - U_A$) è uguale a $W_{B \rightarrow R} - W_{A \rightarrow R} = W_{B \rightarrow A} = -W_{A \rightarrow B}$.



Proprio perché la forza che stiamo considerando è conservativa, in tutte le affermazioni precedenti non occorre specificare il percorso fatto per passare da un punto a un altro.

Se la forza fosse dissipativa (come nel caso dell'attrito) il lavoro dipenderebbe dal percorso scelto e non avrebbe senso definire un'«energia potenziale».

le» che avrebbe un valore differente ogni volta che si sceglie un percorso diverso nel passare da un punto a un altro.

L'energia potenziale è una caratteristica del sistema fisico in esame. Per esempio, l'energia potenziale di un vaso che si trova a 3 m dal suolo è una proprietà del sistema fisico (vaso + Terra). Infatti, se non ci fosse la Terra non esisterebbe neppure la forza-peso che compie lavoro positivo mentre il vaso scende verso il suolo (o lavoro negativo mentre esso è sollevato verso l'alto).

DOMANDA

Il punto R si trova al suolo, il punto A è 2,0 m sopra il punto R e il punto B è 3,0 m sopra il punto A . Un secchio di massa $m = 10$ kg è sollevato con una fune da A a B .

- Scegliendo il punto R come livello di zero, calcola
 - l'energia potenziale del secchio in A ;
 - l'energia potenziale del secchio in B ;
 - la differenza di energia potenziale $U_B - U_A$.
- Calcola le stesse grandezze scegliendo il punto A come livello di zero.
- Verifica che la differenza di energia potenziale è la stessa nei due casi.



8. Energia potenziale elastica

Una molla compressa o allungata è in grado di compiere lavoro quando viene lasciata andare. Per esempio, nel campanello della bicicletta (→ figura sotto) il suono è causato dal ritorno di una molla che è stata allungata.



Quindi possiamo dire che anche una molla deformata possiede un'energia **potenziale elastica**, esattamente come un oggetto sollevato rispetto alla quota di riferimento possiede un'energia potenziale gravitazionale.

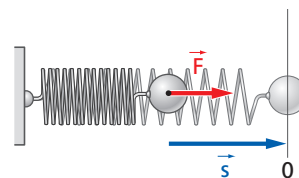
Scegliamo lo zero dell'energia potenziale della molla nella situazione in cui essa è a riposo. In questo modo possiamo definire l'energia potenziale della molla come abbiamo visto nel paragrafo precedente:

l'energia potenziale elastica di una molla deformata è uguale al lavoro compiuto dalla forza elastica quando la molla si riporta nella sua posizione di riposo (livello di zero).

L'energia potenziale elastica è sempre positiva, perché (sia per la molla compressa, sia per quella allungata) i vettori forza elastica (di richiamo) e spostamento della molla sono paralleli tra loro, per cui il lavoro è sempre positivo.

Altra forza conservativa

Anche la forza elastica è conservativa. Quindi, anche per essa si può definire un'energia potenziale.



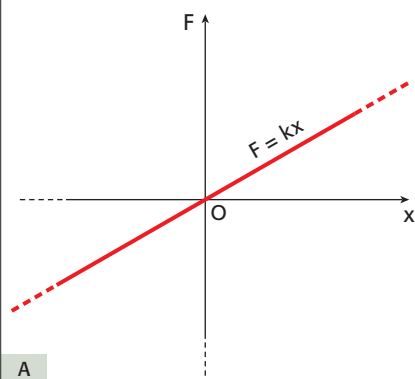
■ Il lavoro della forza elastica

Ricorda che il modulo della forza elastica, per una molla che ha subito una deformazione x , è dato dalla formula

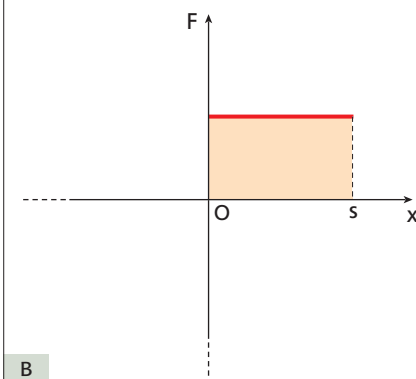
$$F = kx,$$

dove k è la costante elastica della molla. Così, mentre la deformazione x della molla passa dal valore iniziale s a quello finale (pari a zero), il valore della forza elastica cambia continuamente. Ciò significa che, mentre la molla ritorna alla posizione di riposo, la grandezza F non ha un valore fissato e, quindi, il lavoro non può essere calcolato con la formula $W = Fs$.

► In un grafico, la legge $F = kx$ è rappresentata da una retta che passa per l'origine: F è direttamente proporzionale a x .

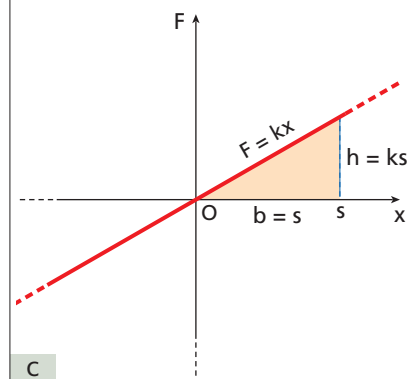


► Se la forza fosse costante (rappresentata da una retta orizzontale), il lavoro $W = Fs$ sarebbe l'area di un rettangolo di base s e altezza F .



► Per la forza elastica il lavoro è in questo caso l'area di un triangolo:

$$W = \frac{b \times h}{2} = \frac{s \times (ks)}{2} = \frac{1}{2} ks^2.$$



Così abbiamo calcolato il lavoro della forza elastica, che è anche uguale all'energia potenziale elastica U_e della molla deformata con uno spostamento s :

$$U_e = \frac{1}{2} ks^2 \quad (21)$$

energia potenziale elastica (J) costante elastica (N/m) spostamento (m)

DOMANDA

Una molla è allungata di 3,6 cm. La costante elastica della molla è $k = 400 \text{ N/m}$.

► Quanto vale l'energia potenziale elastica della molla?

LEZIONE

- La conservazione dell'energia meccanica



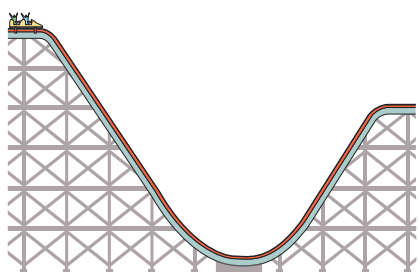
9. La conservazione dell'energia meccanica

Nelle montagne russe un carrello continua ad andare su e giù. Quando scende, l'energia potenziale gravitazionale si trasforma in energia cinetica; quando sale avviene il contrario, cioè l'energia cinetica si trasforma in energia potenziale.

Dimostreremo tra poco che, se non ci sono attriti (tra il carrello e le rotaie, con l'aria), la somma di queste due energie (che si chiama **energia meccanica**) rimane sempre uguale: quando una diminuisce, l'altra aumenta, in modo che la loro somma non cambia nel tempo.

In assenza di attriti, l'energia meccanica totale (energia cinetica + energia potenziale) di un sistema soggetto alla forza-peso si conserva, cioè rimane sempre uguale.

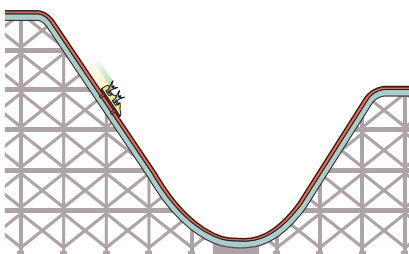
► Quando il carrello è fermo in alto, l'energia meccanica è solo potenziale.



energia meccanica = energia potenziale

A

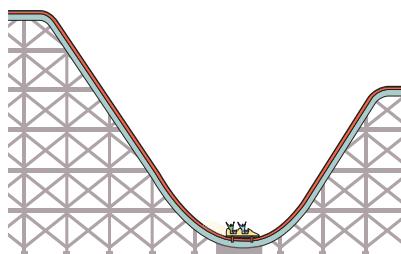
► Durante la discesa l'energia potenziale diminuisce e quella cinetica aumenta.



energia potenziale energia cinetica

B

► Quando il carrello arriva veloce in basso, l'energia meccanica è solo cinetica.



energia meccanica = energia cinetica

C

Questa legge di conservazione consente di fare semplici previsioni. Per esempio, due carrelli uguali partono da fermi dalla stessa altezza e scendono uno su rotaie molto inclinate, l'altro su rotaie poco inclinate. Quale dei due, quando arriva in basso, è più veloce?

Trascurando gli attriti, tutti e due arrivano nel punto più basso alla stessa velocità. Infatti, entrambi hanno la stessa provvista di energia potenziale che si converte tutta in energia cinetica. E, a parità di energia cinetica, se i due carrelli hanno la stessa massa, devono anche avere la stessa velocità.

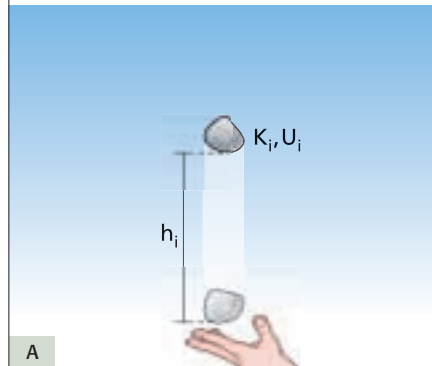
Livello di zero di U

In questo esempio si è posto lo zero dell'energia potenziale gravitazionale al livello più basso della discesa.

■ Dimostrazione della conservazione dell'energia meccanica

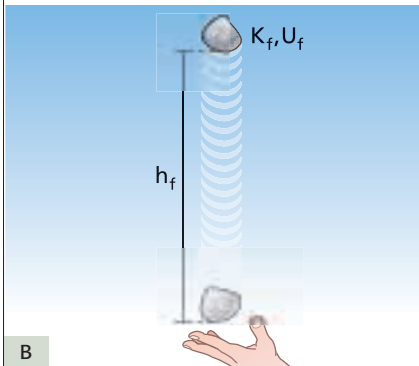
Consideriamo un sasso che passa da una quota h_i a una quota h_f .

► Alla quota iniziale h_i la sua energia cinetica è K_i e l'energia potenziale iniziale del sistema (sasso + Terra) è U_i .



A

► Alla quota finale h_f la sua energia cinetica è K_f e l'energia potenziale finale del sistema (sasso + Terra) è U_f .



B

- Per il teorema dell'energia cinetica (formula (13)), la differenza $K_f - K_i$ è uguale al lavoro $W_{i \rightarrow f}$ compiuto dalla forza-peso durante il moto del sasso:

$$K_f - K_i = W_{i \rightarrow f} \quad (22)$$

- Per la formula (18), il lavoro $W_{i \rightarrow f}$ è anche uguale alla differenza tra l'energia potenziale *iniziale* e quella *finale*:

$$W_{i \rightarrow f} = U_i - U_f \quad (23)$$

- Allora il primo membro della (22) è uguale al secondo membro della (23) (visto che entrambe queste quantità sono uguali a $W_{i \rightarrow f}$) e possiamo scrivere

$$U_i - U_f = K_f - K_i.$$

- Se portiamo l'energia cinetica iniziale al primo membro e l'energia potenziale finale al secondo, otteniamo che l'energia meccanica totale iniziale è uguale a quella finale:

$$U_i + K_i = U_f + K_f \quad (24)$$

energia potenziale iniziale (J)
energia potenziale finale (J)
energia cinetica iniziale (J)
energia cinetica finale (J)

■ L'espressione generale del teorema di conservazione dell'energia meccanica

Il teorema della conservazione dell'energia meccanica totale non vale soltanto per il sistema (sasso + Terra) dell'esempio precedente, ma in tutti i casi in cui:

1. si ha un sistema fisico **isolato**, cioè un sistema su cui non agiscono forze esterne (nell'esempio precedente, la forza-peso è *interna* al sistema, perché agisce tra due corpi, il sasso e la Terra, che appartengono al sistema);
2. le forze che agiscono all'interno del sistema sono tutte conservative.

Tutto ciò è riassunto nel seguente teorema, che si dimostra a partire da $\vec{F} = m\vec{a}$:

in un sistema isolato in cui sono presenti soltanto forze conservative l'energia meccanica totale (cinetica + potenziale) si conserva.

■ Il lavoro è energia in transito

► Il lavoro della forza-peso riduce l'energia cinetica del saltatore che sale verso l'alto, mentre la sua energia potenziale aumenta.



► Il lavoro della forza elastica del telo aumenta l'energia cinetica dell'atleta e la sua energia potenziale gravitazionale.



Forze conservative

Ricorda che, per le forze *non* conservative, l'energia potenziale non può essere definita.

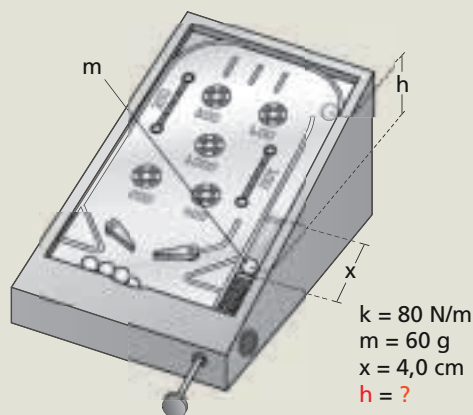
In tutti i casi, il lavoro di una forza permette di trasformare una parte dell'energia da una forma a un'altra.

Il lavoro non è una forma di energia, ma è energia in transito.

PROBLEMA

In un flipper, una biglia di massa $m = 60 \text{ g}$ è appoggiata su una molla compressa di un tratto $x = 4,0 \text{ cm}$. La costante elastica della molla è $k = 80 \text{ N/m}$ e l'effetto dell'attrito è trascurabile.

► Di quale dislivello h salirà la biglia quando la molla viene lasciata andare?



Strategia e soluzione

- Trascurando gli attriti, sulla biglia agiscono soltanto la forza-peso e la forza elastica della molla, che sono entrambe conservative. Quindi possiamo risolvere il problema grazie alla conservazione dell'energia meccanica totale:

$$U_{e1} + U_{g1} + K_1 = U_{e2} + U_{g2} + K_2,$$

dove

- U_e è l'energia potenziale elastica, U_g è l'energia potenziale della forza-peso e K è l'energia cinetica;
- gli indici 1 si riferiscono alla situazione iniziale mentre quelli 2 indicano l'istante in cui la biglia si trova al massimo dislivello h .
- Nella condizione 2 la biglia è istantaneamente ferma, per cui si ha $K_2 = 0$; inoltre, in tale situazione la molla è ritornata nella posizione di riposo, per cui vale anche $U_{e2} = 0$.
- Anche K_1 è nullo, perché all'inizio la biglia era ferma, e possiamo porre $U_{g1} = 0$.
Con questa scelta si ha $U_{g2} = mgh$; inoltre, ricorda che vale $U_{e1} = \frac{1}{2} kx^2$.

- Su queste basi, la legge di conservazione dell'energia meccanica può essere scritta come

$$\frac{1}{2} kx^2 = mgh,$$

da cui

$$h = \frac{kx^2}{2mg} = \frac{\left(80 \frac{\text{N}}{\text{m}}\right) \times (4,0 \times 10^{-2} \text{ m})^2}{2 \times (6,0 \times 10^{-2} \text{ kg}) \times \left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 0,11 \text{ m}.$$

Prima di ricadere, la biglia risale nel flipper fino a un dislivello di 11 cm rispetto alla quota di partenza.

Discussione

In questo problema sono coinvolte due forze conservative, cioè la forza-peso e la forza elastica della molla. Quindi l'energia potenziale del sistema (biglia + molla + Terra) è data dalla somma di due termini (l'energia elastica e quella gravitazionale). Con le convenzioni adottate, nella condizione 1 tutta l'energia del sistema è sotto forma di energia potenziale elastica e nella condizione 2 tutta l'energia si è trasformata in energia potenziale gravitazionale.

DOMANDA

Per fare uscire la biglia nel campo di gioco del flipper occorre farle superare almeno un dislivello di 8,5 cm.

- Qual è la minima compressione della molla che permette di ottenere questo effetto?



→ Esercizi simili: 60 e 61 a pag. 353.

10. La conservazione dell'energia totale

LEZIONE

- La conservazione dell'energia totale

FILM

- Energia meccanica ed energia termica
- Energia dal Sole

In realtà, quasi sempre l'energia meccanica totale di un sistema *non* si conserva.

- Un sasso che cade diminuisce la propria energia potenziale e aumenta l'energia cinetica. Ma quando si ferma sul terreno perde l'una e l'altra.
- Un'automobile che viaggia in pianura ha un'energia cinetica. Frenando fino a fermarsi, però, la perde completamente.

In tutti questi casi, abbiamo l'impressione che una certa quantità di energia scompaia o «vada sprecata». Tuttavia, ciò non è vero.

L'energia meccanica che manca si è trasformata in energia interna dei corpi, che di solito è percepita come aumento di temperatura.

► Dove cade un grosso meteorite, si crea un cratere: le rocce sono spezzate, il terreno si è modificato e addirittura liquefatto per il forte calore che si è sviluppato durante l'urto.



► Quando un'automobile frena, i dischi dei freni si riscaldano a causa dell'attrito. Anche l'aria intorno alla ruota diventa un po' più calda durante la frenata.



Altre forme di energia

L'energia chimica è contenuta negli alimenti e nei combustibili, l'energia elettrica fa funzionare lampadine, computer e lavatrici, l'energia nucleare alimenta il Sole e le stelle...

DOMANDA

Se fai scivolare fra le dita una corda a cui è attaccato un sasso, avverti una sensazione di calore.

► Perché?

- L'energia potenziale del meteorite si è trasformata prima in energia cinetica, poi in rottura e deformazioni meccaniche e in energia interna del terreno dove è avvenuto l'impatto.
- L'energia cinetica dell'automobile si è trasformata in energia interna dei freni e dell'aria vicina.

L'energia interna di un corpo è la somma delle energie dei suoi atomi e delle sue molecole. Quindi, l'energia cinetica del meteorite si è trasformata in energia delle sue molecole e di quelle del terreno su cui è avvenuto l'impatto. L'aumento di energia di agitazione molecolare è percepito come aumento di temperatura e ha l'effetto di liquefare il terreno.

Se nel bilancio teniamo conto non solo dell'energia meccanica, ma anche di tutte le altre forme di energia, possiamo affermare che:

in un sistema isolato l'energia totale (meccanica, elettrica, nucleare, interna, ...) si conserva.

Questa affermazione è nota come **principio di conservazione dell'energia totale**. Non siamo assolutamente sicuri che continuerà a valere anche dopo le scoperte che si faranno in futuro, però è una legge sperimentale generale che finora si è sempre rivelata esatta e la quasi totalità dei fisici sono convinti che non sarà smentita neppure da nuove conoscenze.

Quale sarebbe il record di salto in alto sulla Luna?

L'atleta che sulla Terra ha stabilito il record di 2,45 m, sulla Luna potrebbe saltare più di 9 m. Su Giove, invece, non andrebbe oltre il metro e mezzo. D'altra parte, non sarebbe così facile prendere la rincorsa, poiché la superficie del pianeta non è solida ma costituita da materiali gassosi. Immaginiamo comunque che la superficie di Giove sia simile a quella terrestre e che la resistenza dell'aria sia sempre trascurabile.

■ L'accelerazione di gravità

Questi risultati dipendono dal diverso valore dell'attrazione gravi-

tazionale sui vari pianeti. Quando si stacca dal suolo, l'atleta ha una velocità iniziale v che è legata alla sua forza muscolare ed è indipendente dalla forza di gravità. In questo istante, egli ha un'energia cinetica pari a $K = \frac{1}{2}mv^2$, dove m è la sua massa.

Arrivato a un'altezza h , questa energia si è trasformata in energia potenziale, ossia mgh . Ponendo

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2,$$

si ricava che $h = \frac{v^2}{2g}$. L'altezza alla quale il saltatore arriva dipende dal-



l'accelerazione di gravità: più grande è g , più piccolo è il salto. Per trovare l'altezza alla quale arriva il saltatore, bisogna poi aggiungere ad h il livello dal quale parte il baricentro dell'atleta, che poniamo uguale a 1 m. L'altezza finale, espressa in metri, è quindi $h' = 1 \text{ m} + \frac{v^2}{2g}$. Anche per le altre discipline che coinvolgono salti o lanci si ottiene un risultato analogo: le distanze massime sono inversamente proporzionali all'accelerazione di gravità (tabella sotto).

PRESTAZIONI OLIMPICHE SUGLI ALTRI PIANETI

Pianeta	Accelerazione di gravità (m/s ²)	Salto in alto* Altezza (m)	Salto con asta* Altezza (m)	Lancio del peso Distanza (m)	Salto in lungo Distanza (m)
Mercurio	3,70	4,9	15	56	24
Venere	8,85	2,6	6,7	25	10
Terra	9,81	2,45	6,14	22,47	8,90
Luna	1,62	9,8	32	126	54
Marte	3,72	4,8	15	56	23
Giove	26,39	1,6	2,9	9,4	3,3
Saturno	11,67	2,2	5,3	19	7,5
Urano	11,48	2,2	5,4	19	7,6
Nettuno	11,97	2,2	5,2	19	7,3

* Dati calcolati ipotizzando la conservazione dell'energia e aggiungendo 1 m (altezza del baricentro del saltatore) al risultato. Elaborato da *Le Scienze* n. 290, ottobre 1992.

■ Per saperne di più: www.olympic.org (sito ufficiale delle Olimpiadi)

Salto in lungo

Un salto di 8,90 m sulla Terra sarebbe di 54 m sulla Luna e di 3,3 m su Giove.



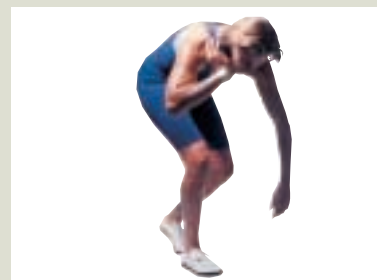
Salto con l'asta

Un salto di 6,14 m sulla Terra sarebbe di 32 m sulla Luna e di 2,9 m su Giove.



Lancio del peso

Un lancio di 22,47 m sulla Terra sarebbe di 126 m sulla Luna e di 9,4 m su Giove.



I concetti e le leggi

1. Il lavoro

Lavoro [work]

Misura l'effetto utile di una forza durante uno spostamento.

Angolo	Formula	Esempio: $F = 5 \text{ N}$, $s = 2 \text{ m}$
0°	$W = Fs$	$W = (5,0 \text{ N}) \times (2,0 \text{ m}) = 10 \text{ J}$
90°	$W = 0$	$W = 0$
180°	$W = -Fs$	$W = -(5,0 \text{ N}) \times (2,0 \text{ m}) = -10 \text{ J}$

joule (J)

Unità di misura del lavoro nel Sistema Internazionale.

Uguale al lavoro compiuto da una forza di 1 N quando il suo punto di applicazione si sposta di 1 m (nella direzione e nel verso della forza):

$$1 \text{ J} = (1 \text{ N}) \times (1 \text{ m}).$$

2. La definizione di lavoro per una forza costante

Lavoro di una forza $\vec{F}$
durante uno spostamento $\vec{s}$

Prodotto della componente di $\vec{F}$ parallela a $\vec{s}$ e del modulo di $\vec{s}$
 $W = (\pm F_{\parallel})s$ (+ se $\vec{F}_{\parallel}$ ha il verso di $\vec{s}$, - se $\vec{F}_{\parallel}$ e $\vec{s}$ hanno versi opposti)

Il lavoro come prodotto
scalare

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s}$$

Formula goniometrica
del lavoro

Se si conosce l'angolo α tra i due vettori:

$$W = Fs \cos \alpha$$

3. La potenza

Potenza [power]

Rapporto tra il lavoro compiuto dal sistema e l'intervallo di tempo necessario per eseguire tale lavoro.

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

ESEMPIO

$$\text{Se } \begin{cases} W = 40 \text{ J} \\ \Delta t = 5,0 \text{ s} \end{cases} \Rightarrow P = \frac{40 \text{ J}}{5,0 \text{ s}} = 8,0 \text{ W}$$

watt (W)

Unità di misura della potenza nel Sistema Internazionale.

Uguale alla potenza di un sistema che compie il lavoro di 1 J in 1 s:

$$1 \text{ W} = (1 \text{ J})/(1 \text{ s}).$$

4. Energia cinetica

Energia cinetica
[kinetic energy]

Energia di movimento di un corpo.

Uguale al lavoro necessario per accelerare una massa m da ferma alla velocità v . Uguale anche al lavoro compiuto dalla massa m , a velocità v , quando viene fermata.

$$K = \frac{1}{2} mv^2$$

ESEMPIO

$$\text{Se } \begin{cases} m = 3,0 \text{ kg} \\ v = 2,0 \text{ m/s} \end{cases} \Rightarrow K = \frac{1}{2} \times (3,0 \text{ kg}) \times \left(2,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 6,0 \text{ J}$$

Teorema dell'energia cinetica

La variazione dell'energia cinetica di un corpo è uguale al lavoro compiuto su di esso.

$$K_f = K_i + W$$

Energia [energy]

La capacità di compiere un lavoro.

5. Forze conservative e forze dissipative

Forza conservativa

Il lavoro che essa fa nello spostamento da A fino a B non dipende dal percorso seguito durante lo spostamento. La forza-peso è conservativa.

Forza dissipativa

Forza non conservativa. La forza di attrito radente è dissipativa.

6. Energia potenziale gravitazionale (della forza-peso)

Energia potenziale
[potential energy]
gravitazionale

Capacità di compiere lavoro di una massa m a un'altezza h .

$$U = mgh$$

Lavoro compiuto dalla forza-peso quando la massa m passa dalla posizione iniziale a quella di riferimento (livello di zero).

ESEMPIO

$$\text{Se } \begin{cases} m = 5,0 \text{ kg} \\ h = 2,0 \text{ m} \end{cases} \Rightarrow U = (5,0 \text{ kg}) \times \left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \times (2,0 \text{ m}) = 98 \text{ J}$$

Livello di riferimento
dell'energia potenziale

Scelto in modo arbitrario.

7. La definizione generale dell'energia potenziale

Energia potenziale

Si può definire soltanto per le forze conservative.

Variazione di energia
potenziale di una forza $\vec{F}$
da A a B

Opposto del lavoro $W_{A \rightarrow B}$ fatto da $\vec{F}$ durante il passaggio da A a B .
 $\Delta U = U_B - U_A = -W_{A \rightarrow B}$

Energia potenziale in A

Differenza di energia potenziale tra A e il livello di riferimento R :
 $U_A = +W_{A \rightarrow R}$

8. Energia potenziale elastica

Energia potenziale
elastica di una molla

Uguale al lavoro compiuto dalla forza elastica quando la molla si riporta nella sua posizione di riposo (livello di zero).

$$U_e = \frac{1}{2} k s^2 \quad (k: \text{costante elastica della molla}; s: \text{deformazione})$$

ESEMPIO

$$\text{Se } \begin{cases} k = 100 \text{ N/m} \\ s = 0,20 \text{ m} \end{cases} \Rightarrow U_e = \frac{1}{2} \times \left(100 \frac{\text{N}}{\text{m}}\right) \times (0,20 \text{ m})^2 = 2,0 \text{ J}$$

9. La conservazione dell'energia meccanica

Caso della forza-peso

In assenza di attriti, l'energia meccanica totale (energia cinetica + energia potenziale) di un sistema soggetto alla forza-peso si conserva.

Sistema fisico isolato

Su di esso non agiscono forze esterne.

Caso generale

In un sistema isolato in cui agiscono soltanto forze conservative l'energia meccanica totale (cinetica + potenziale) si conserva.

10. La conservazione dell'energia totale

Non conservazione
dell'energia meccanica

La parte che manca si è trasformata in energia interna dei corpi, che di solito è percepita come aumento di temperatura.

Principio di conservazione
dell'energia totale

In un sistema isolato l'energia totale (meccanica, elettrica, nucleare, interna, ...) si conserva.



1. Il lavoro

1 **Completa la tabella.** Indica nella tabella se il lavoro è positivo, negativo o nullo.

LAVORO COMPIUTO DA:	NEGATIVO	ZERO	POSITIVO
una persona che scende le scale	x		
la forza-peso su una persona che scende le scale			
una persona che sale utilizzando la scala mobile			
la forza-peso sulla persona che sale con la scala mobile			
un'onda che solleva una barca			
la forza-peso su un aereo che sta frenando sulla pista di atterraggio			

2 Fra i banchi di un supermercato spingi un carrello per 10 m applicando una forza di 2,0 N parallela allo spostamento.

► Quanto lavoro compii? [20 J]

3 In un negozio di elettronica un addetto preleva da uno scaffale alto 195 cm un amplificatore stereo e lo deposita a terra, con un movimento regolare a velocità costante, compiendo un lavoro di -197 J .

► Qual è la massa dello stereo? [10,3 kg]

4 Per fare spazio, fai scivolare sul tavolo una pila di libri, senza sollevarla. La massa complessiva dei libri è di 4,5 kg.

► Qual è il lavoro fatto dalla forza-peso durante lo spostamento dei libri? [0 J]

5 Il bilanciere con cui si sta allenando un atleta pesa complessivamente 510 N. Viene sollevato fino a un'altezza di 60,0 cm dal petto e quindi abbassato. Supponi che il movimento sia esattamente verticale e a velocità costante.



► Quanto lavoro viene fatto dal ragazzo quando solleva il bilanciere?

► E quando lo fa abbassare? [306 J; -306 J]

6 Un'automobile di massa 1500 kg parte da ferma e accelera per 5 s percorrendo 75 m. Calcola:

► la forza esercitata dal motore dell'auto;

► il lavoro motore compiuto.

[$9 \times 10^3 \text{ N}$; $7 \times 10^5 \text{ J}$]

7 Uno studente solleva da terra il suo zaino che ha una massa di 5,2 kg fino a un'altezza di 163 cm, lo mette in spalla e raggiunge a piedi la sua scuola che dista 1,5 km.

► Calcola il lavoro totale compiuto dallo studente contro la forza-peso dello zaino. [83 J]

2. La definizione di lavoro per una forza costante

8 **Test.** Per calcolare il lavoro quando il vettore forza $\vec{F}$ e il vettore spostamento $\vec{s}$ non hanno la stessa direzione devo:

[A] moltiplicare la componente di $\vec{F}$ parallela a $\vec{s}$ per il modulo di $\vec{s}$.

[B] moltiplicare la componente di $\vec{F}$ perpendicolare a $\vec{s}$ per il modulo di $\vec{s}$.

[C] moltiplicare sempre il modulo di $\vec{F}$ per il modulo di $\vec{s}$.

[D] calcolare il prodotto vettoriale tra $\vec{F}$ e $\vec{s}$.

9 Un boscaiolo trascina una catasta di legna con una forza di 98,5 N inclinata di 30° verso l'alto rispetto all'orizzontale compiendo un lavoro di 848 J.

► Quanti metri ha percorso il boscaiolo con la catasta di legna? [9,94 m]

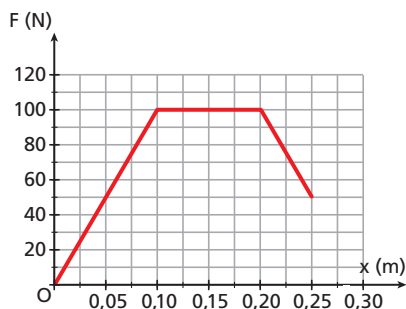
10 Un'auto che scende lungo una strada di collina frena per evitare un ostacolo. Il lavoro compiuto è di $-5,8 \times 10^5 \text{ J}$ e la forza impiegata è di $6,5 \times 10^3 \text{ N}$.

► Quanto vale il modulo dello spostamento compiuto prima di arrestarsi? [89 m]

11 Un bambino trascina uno zaino per 10,2 m compiendo un lavoro di 720 J con una forza inclinata di 45° verso l'alto rispetto all'orizzontale.

► Calcola la forza con la quale il bambino sposta lo zaino. [99,8 N]

- 12** Per trainare una slitta si ha a disposizione un cavo elastico. Il cavo inizialmente si tende, rimane in tensione mentre la slitta viene trainata, si accorcia in parte quando chi traina si ferma. In figura è riportato l'andamento della forza in funzione dello spostamento.



- Quanto lavoro compie, in totale, la forza esercitata dal cavo? [19 J]

- 13** Un operaio spinge una cassa di massa pari a 150 kg sul pavimento con una forza orizzontale di 240 N per 20,0 m. Il coefficiente di attrito dinamico fra la cassa e il pavimento vale 0,220.

- Qual è il lavoro compiuto dall'operaio sulla cassa?
 ► Qual è il lavoro compiuto dalla forza di attrito sulla cassa?
 ► Qual è il lavoro totale compiuto sulla cassa? [4,80 × 10³ J; - 6,47 × 10³ J; 1,67 × 10³ J]

3. La potenza

- 14** **Test.** La potenza di un sistema fisico è:

- A** una grandezza scalare uguale al rapporto tra il lavoro compiuto dal sistema e l'intervallo di tempo necessario per compiere tale lavoro.
B una grandezza vettoriale uguale al rapporto tra il lavoro compiuto dal sistema e l'intervallo di tempo necessario per compiere tale lavoro.
C una grandezza vettoriale uguale al rapporto tra la forza applicata e il tempo durante il quale essa ha agito.

- D** una grandezza scalare uguale al rapporto tra la forza applicata e il tempo durante il quale essa ha agito.

- 15** L'Italia, durante l'inverno 2002, ha importato energia elettrica dall'estero per una potenza media di 6300 MW.

- Quanta energia l'Italia ha importato, in media, in ogni giornata dell'inverno 2002?
 ► Quanta energia ha importato complessivamente dal 21 dicembre 2002 al 21 marzo 2003 (compresi)?

[5,4 × 10¹⁴ J; 4,9 × 10¹⁶ J]

- 16** Un'automobile è in grado di sviluppare una potenza di 33 kW.

- In quanto tempo compie un lavoro di 6,6 × 10⁴ J? [2,0 s]

- 17** Il motore di un furgone eroga una potenza totale di 80 kW. Per mantenere costante la velocità del furgone nonostante gli attriti con l'aria, fornisce una forza di 4,0 × 10³ N. Inoltre, una potenza di 15 kW è dissipata a causa degli attriti interni del motore.

- A quale velocità si sta muovendo il furgone? [16 m/s]

- 18**  The human heart in one day does a work of 1.94 × 10⁵ J.

- How much power does it develop? [2.25 W]

- 19** Una macchina percorre 50 km in 30 min grazie a un motore che sviluppa una potenza di 21 × 10³ W.

- Calcola la forza esercitata. [7,6 × 10² N]

- 20** Il cavallo-vapore, introdotto da James Watt, è un'unità di misura della potenza che non fa parte del Sistema Internazionale, e vale 7,452 × 10² W. Un motore sviluppa una potenza di 30 cavalli-vapore mentre solleva un carico di 2,0 × 10³ kg all'altezza di 15 m.

- Quanto tempo impiega? [13 s]

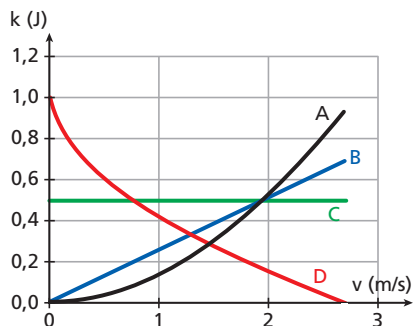
4. Energia cinetica

- 21** **Completa la tabella.** Nei casi seguenti l'energia cinetica aumenta, diminuisce o rimane costante?

SITUAZIONE	ENERGIA CINETICA		
	AUMENTA	È COSTANTE	DIMINUISCE
un sasso che cade	×		
una palla da calcio che rotola sul campo			
il cavallo di una giostra per bambini durante un giro			
un'auto in frenata			

- 22 Caccia all'errore.** «Il teorema dell'energia cinetica afferma che la variazione del lavoro compiuto su un corpo è uguale alla variazione dell'energia cinetica del corpo.»

- 23 Quesito.** Quale dei grafici della figura rappresenta l'energia cinetica in funzione della velocità per un corpo in caduta libera?



- 24** A car of mass of 1000 kg travels at a speed of 50 km/h.

► Calculate its kinetic energy.



[9.6×10^4 J]

- 25** Una palla di massa $m = 0,10$ kg, che viaggia alla velocità di 30 m/s, viene fermata.

► Calcola il lavoro compiuto dalla forza che ha fermato la palla. [-45 J]

- 26** Un'auto di massa 1000 kg accelera passando da una velocità di 72 km/h a una velocità di 144 km/h.

► Qual è il lavoro necessario per accelerare l'auto? [$6,0 \times 10^5$ J]

- 27** Andrea spinge da ferma sul pavimento la sua macchinina giocattolo di massa 0,50 kg per un tratto lungo 40 cm con una forza costante orizzontale di 1,2 N. Considera le forze di attrito trascurabili.

► Qual è la sua velocità finale? [$1,4$ m/s]

- 28** Lucia sta giocando sulla spiaggia a lanciare una biglia lungo una pista disegnata sulla sabbia. La biglia di massa 10 g viene frenata dalla forza di

attrito di $7,8 \times 10^{-2}$ N dovuta alla sabbia dopo aver percorso 55 cm.

► Calcola la velocità con cui è lanciata la biglia.

[2,9 m/s]

- 29** Un'automobile di massa 1000 kg viaggia nel traffico urbano a una velocità di 54 km/h. Davanti a lei il semaforo diventa rosso e l'auto frena e si arresta in 16 m.

► Qual è il valore della forza frenante?

[$7,0 \times 10^3$ N]

- 30** Un carrello da supermercato di massa 10,0 kg viene spinto per 2,00 m da fermo con una forza di 100 N. La forza di attrito con il pavimento è di 30,0 N.

► Quanto vale il lavoro compiuto dalla forza applicata al carrello?

► Quanto vale il lavoro compiuto dalla forza di attrito?

► Qual è la velocità finale del carrello?

[$2,00 \times 10^2$ J; $-60,0$ J; 5,30 m/s]

5. Forze conservative e forze dissipative

- 31 Quesito.** Quali fra le seguenti forze sono conservative e quali sono dissipative?

Forza-peso, forza di attrito radente, forza di attrito viscoso, forza di gravitazione universale, forza elastica.

- 32** Uno scalatore sta passeggiando lungo un sentiero di montagna con uno zaino di massa 18,2 kg. Affronta una salita alta 10,0 m rispetto al piano.

► Quanto lavoro compie lo scalatore per trasportare lo zaino? [$1,78 \times 10^3$ J]

- 33** Marcello va a studiare a casa di Sara che abita al secondo piano di un palazzo. La prima volta la raggiunge utilizzando le scale, la seconda volta preferisce prendere l'ascensore. Marcello pesa 640 N e il secondo piano si trova a 8,0 m da terra. Calcola il lavoro compiuto contro la forza-peso:

► da Marcello quando sale utilizzando le scale;

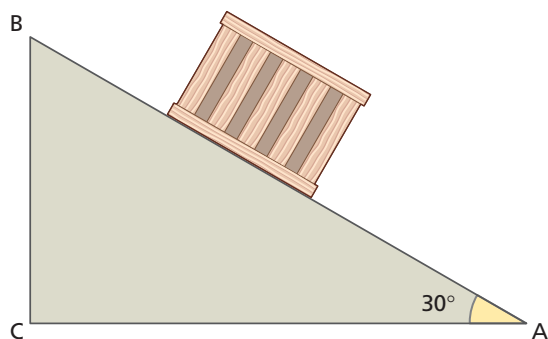
► dall'ascensore che trasporta Marcello in direzione verticale. [$5,1 \times 10^3$ J; $5,1 \times 10^3$ J]

- 34** In un parco di divertimenti Anna e Alice scivolano su una canoa lungo un percorso composto da tratto inclinato di lunghezza $l_1 = 7,2$ m e da un tratto rettilineo di lunghezza $l_2 = 5,1$ m. La forza di attrito nel primo tratto è di 564 N e nel secondo tratto è di 652 N.

► Calcola il lavoro compiuto dalle forze di attrito.

[$-7,4 \times 10^3$ J]

- 35** Una cassa di 10 kg deve essere spostata dal punto A al punto B. La figura mostra i due percorsi possibili: lungo un piano inclinato di 30° , di lunghezza 2,0 m e altezza 1,0 m, oppure passando per il punto C.



Calcola il lavoro compiuto per spostare la cassa da A a B:

- ▶ lungo il piano inclinato, trascurando la forza d'attrito tra il piano inclinato e la cassa;
- ▶ lungo il piano inclinato, considerando un valore del coefficiente di attrito pari a 0,2;
- ▶ sollevandola lungo la verticale da C a B.

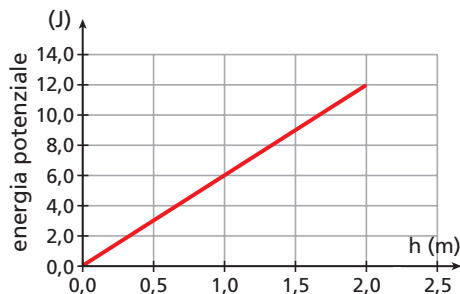
[98 J; 13×10^2 J; 98 J]

6. Energia potenziale gravitazionale (della forza-peso)

36 Vero o falso?

- a. La diminuzione dell'energia potenziale di un tuffatore è direttamente proporzionale alla lunghezza della caduta. V F
- b. Tutte le persone che stanno salendo con lo stesso ascensore aumentano la loro energia potenziale della stessa quantità. V F
- c. Per calcolare l'energia potenziale di uno scalatore bisogna usare come livello di riferimento la base della parete che sta scalando. V F

- 37** Nel grafico è riportata l'energia potenziale di una palla che è stata lanciata verso l'alto.
- ▶ Qual è l'altezza massima raggiunta dalla palla e quanto vale la sua energia potenziale?



- 38** Il K2, la seconda montagna della Terra, è alto 8616 m ed è stato scalato per la prima volta da una spedizione italiana nel 1954. Considera un alpinista di 80 kg sulla sua vetta.

▶ Calcolane l'energia potenziale rispetto al livello del mare.

(Simile al problema svolto a pag. 337)

[$6,8 \times 10^6$ J]

- 39** Osserva la figura dell'esercizio 37.

▶ Quanto vale la massa della palla? [0,61 kg]

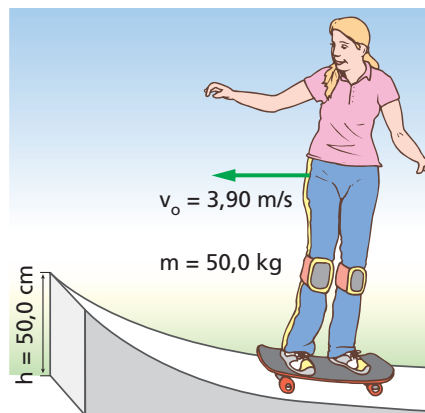
- 40** Uno scalatore che pesa $7,5 \times 10^2$ N porta in spalla l'attrezzatura necessaria e raggiunge un'altezza di 3 m sul livello del mare. Il lavoro compiuto durante la scalata è di $2,4 \times 10^3$ J.

▶ Qual è la massa della sua attrezzatura?

[5 kg]

- 41** Valentina, 50,0 kg, sale col suo skateboard su una rampa con la velocità iniziale di 3,90 m/s. L'altezza massima della rampa è 50,0 cm. Calcola:

- ▶ l'energia cinetica all'imbocco della rampa;
- ▶ l'energia potenziale gravitazionale (rispetto alla quota di base e con $g = 9,80 \text{ m/s}^2$) all'uscita della rampa;
- ▶ l'energia cinetica all'uscita della rampa;
- ▶ la velocità con cui esce dalla rampa.



[380 J; 245 J; 135 J; 2,32 m/s]

7. La definizione generale dell'energia potenziale

- 42** **Pensa come un fisico.** L'energia potenziale gravitazionale di un oggetto può essere negativa. Perché?

43 Vero o falso?

- a. È possibile calcolare la variazione di energia potenziale solo se il punto iniziale o finale è il suolo.

V F

- b.** Una palla scende cadendo dal punto *A* al punto *B*: la variazione di energia potenziale gravitazionale è negativa, poiché il vettore forza e il vettore spostamento hanno la stessa direzione e lo stesso verso. V F

- 44** Una mela di 400 g cade da un ramo alto 250 cm.
 ► Quanto lavoro compie la forza-peso sulla mela?
 ► Qual è il valore della variazione di energia potenziale?

[9,80 J; -9,80 J]

- 45** In un esercizio alla pertica, Fabio che pesa $6,4 \times 10^2$ N si arrampica fino a un'altezza di 4,0 m e poi scende a terra. Calcola la variazione della sua energia potenziale gravitazionale:
 ► nel tratto in salita;
 ► nel tratto in discesa;
 ► nell'esercizio completo.

[$2,6 \times 10^3$ J; $-2,6 \times 10^3$ J; 0 J]

- 46** Durante la ristrutturazione di una casa un sacco di calce di 30 kg viene sollevato dal primo piano posto a 3,1 m dal suolo al secondo piano posto a 6,1 m dal suolo. Scegliendo il suolo come livello di zero, calcola:
 ► l'energia potenziale del sacco al livello del primo piano;
 ► l'energia potenziale del sacco al livello del secondo piano;
 ► il lavoro compiuto dalla forza-peso per passare dal primo al secondo piano.

[$9,1 \times 10^2$ J; $1,8 \times 10^3$ J; $-8,8 \times 10^2$ J]

- 47** Una pallina di massa 1,0 kg è appesa al soffitto con una corda lunga 1,0 m. La stanza è alta 3,0 m. Calcola l'energia potenziale gravitazionale della pallina scegliendo come livello di riferimento:
 ► il soffitto;
 ► il pavimento;
 ► un punto nella stanza alla stessa altezza della pallina.

[-9,8 J; 19,6 J; 0 J]

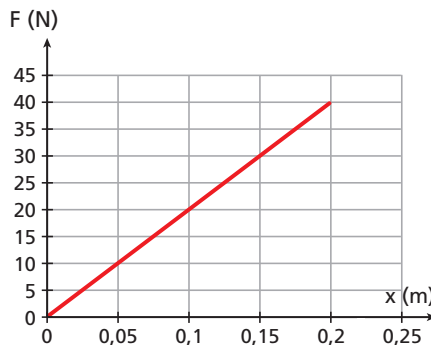
8. Energia potenziale elastica

- 48** Vero o falso? All'estremità libera di una molla appesa verticalmente viene agganciata una massa. La molla si allunga ed acquista energia potenziale elastica. Quali delle seguenti affermazioni sono vere?

- a.** Raddoppiando la massa l'allungamento raddoppia. V F
b. Raddoppiando la massa l'energia potenziale elastica raddoppia. V F

- c.** Raddoppiando la massa l'energia potenziale quadruplica. V F
d. Raddoppiando la massa la costante elastica raddoppia. V F

- 49** Il grafico mostra l'andamento della forza di una molla quando viene compressa.



- Quanto vale il lavoro della forza elastica quando la molla viene compressa da 0 a 0,15 m? [2,25 J]

- 50** Una molla di costante elastica $k = 52$ N/m viene accorciata di 5,0 cm.

- Calcola l'energia potenziale elastica accumulata dalla molla. [0,065 J]

- 51** Un barattolo di sapone liquido è provvisto di una pompetta a molla. Quando è compressa di 1 cm la molla acquista un'energia potenziale di 0,01 J.

- Quanto vale la costante elastica della molla? [$0,2 \times 10^3$ N/m]

- 52** Una molla, compressa da una forza di 500 N, si accorcia di 10 cm.

- Calcola l'energia potenziale elastica acquistata dalla molla. [25 J]

- 53** La molla di una bilancia pesa-persone, quando è compressa, si accorcia e mette in movimento l'indice sulla scala della bilancia. Camilla sale su una bilancia di questo tipo e legge il valore di 52 kg. La molla ha una costante elastica di $1,2 \times 10^3$ N/m.

- Quanta energia potenziale elastica ha accumulato la molla? [$1,1 \times 10^2$ J]

9. La conservazione dell'energia meccanica

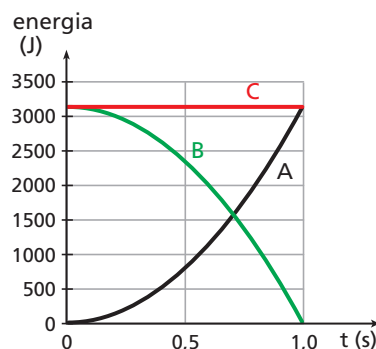
- 54** Vero o falso? All'estremità libera di una molla appesa verticalmente viene appesa una massa che allunga la molla e comincia a oscillare. Controlla se le seguenti affermazioni sono vere.

- a.** Nel punto di oscillazione più alto l'energia potenziale gravitazionale è massima. V F

- b. Nel punto di oscillazione più basso l'energia potenziale elastica è massima. ☐ V ☐ F
- c. Nel punto di oscillazione più basso l'energia cinetica è massima. ☐ V ☐ F
- d. Nel punto di oscillazione più alto l'energia potenziale elastica è minima. ☐ V ☐ F
- e. Durante tutta l'oscillazione la somma di energia cinetica ed energia potenziale gravitazionale è costante. ☐ V ☐ F

55 **Quesito.** Nel grafico sono riportati gli andamenti in funzione del tempo delle energie cinetica, potenziale e totale di un corpo in caduta libera.

► Associa ciascuna delle tre curve a una delle forme di energia.



56 **Completa la tabella.** Un ragazzo di massa 60,0 kg si lascia cadere in acqua da un trampolino alto 3,00 m. Calcola le quantità mancanti.

VELOCITÀ (m/s)	ALTEZZA (m)	ENERGIA CINETICA (J)	ENERGIA POTENZIALE (J)	ENERGIA TOTALE (J)
0,00	3,00		$1,76 \times 10^3$	
4,43	2,00			
5,42		881		
	0,00		0,00	$1,76 \times 10^3$

57 Un flacone di detersivo di massa 1,5 kg scivola dal bordo di una vasca da bagno con velocità iniziale di 1,1 m/s fino a raggiungere il fondo della vasca, scelto come livello di zero, a una velocità di 3,1 m/s.

► Calcola l'altezza della vasca.
(L'effetto dell'attrito è trascurabile.) [0,43 m]

58 Un carrello di massa 2,0 kg viene trainato lungo un binario rettilineo da una forza costante di 50 N per 10 m.

► Che velocità acquista? (Trascura l'effetto dell'attrito.)
► A che altezza arriverebbe se venisse lanciato verso l'alto con quella velocità?

[22 m/s; 25 m]

59 Un peso di massa 8,0 kg è appeso a un'altezza di 10 m dal suolo. Il filo che lo sostiene all'improvviso si rompe e il peso cade, in assenza di forze esterne.

► Quanto vale la velocità acquistata quando si trova a 4,0 m dal suolo?
► A che altezza si trova quando possiede una velocità di 6,0 m/s?

[11 m/s; 8,2 m]

60 Un peso di massa 0,200 kg è appoggiato su una molla verticale compressa di un tratto di 0,100 m.

La costante elastica della molla è $5,00 \times 10^3$ N/m e l'effetto dell'attrito è trascurabile. Quando la molla viene lasciata andare, il peso è spinto verso l'alto.

► Quanto vale l'altezza massima raggiunta dal peso?

(Simile al problema svolto a pag. 343)

[12,8 m]

61 Un fucile a molla è caricato e puntato verso l'alto. La molla, di costante elastica 20 N/m, è compressa di 20 cm e spara una pallina di 25 g. Supponiamo che gli attriti siano trascurabili.

► A che altezza dal punto di partenza arriva la pallina quando viene sparata?

(Simile al problema svolto a pag. 343)

[1,6 m]

10. La conservazione dell'energia totale

62 **Caccia all'errore.** «Un'automobile è in moto a velocità costante su un lungo rettilineo in pianura. L'energia cinetica e l'energia potenziale gravitazionale sono costanti, quindi non ci sono trasformazioni di energia.»

- 63** **Completa la tabella.** Nella tabella sono elencati alcuni dispositivi che trasformano l'energia. Indica la forma iniziale e quella finale dell'energia.

DISPOSITIVO	INIZIALE	ENERGIA FINALE
Centrale idroelettrica	Potenziale gravitazionale	Elettrica
Molla di una macchinina		
Ventilatore		
Centrale eolica		

- 64** Un pallone da pallacanestro, che ha massa $m = 0,600$ kg, viene lasciato cadere da fermo da un'altezza di 1,30 m. Rimbalza al suolo e risale fino all'altezza di 0,80 m.

► Quanta energia meccanica si è trasformata in altre forme per attrito con l'aria e nel rimbalzo?

[2,9 J]

- 65** David si lancia con il parapendio da una rupe alta 500 m sul fondo della valle. La sua massa complessiva (compresa l'attrezzatura) è pari a 90 kg. Nel momento in cui sta per atterrare la sua velocità è di 5,0 m/s.

► Quanta energia meccanica si è trasformata in altre forme?



Turkish Culture and Tourism Office in London, 2002

[$4,4 \times 10^5$ J]

PROBLEMI GENERALI

- 1** Un ciclista di 72 kg, su una bicicletta di 15 kg, sta procedendo alla velocità di 30 km/h, quando inizia a frenare costantemente e si ferma dopo aver percorso 5,0 m.

► Qual è il valore della forza esercitata dai freni?

[$6,0 \times 10^2$ N]

- 2** A Genova è stato costruito un sistema funicolare per collegare due vie della città poste a diverse altezze rispetto al livello del mare. L'ascensore percorre un tratto verticale lungo 70 m a una velocità di 1,6 m/s. L'ascensore ha una capienza di 23 persone, ognuna considerata di massa in media pari a 75 kg. Calcola:

► il lavoro compiuto dall'ascensore per trasportare un passeggero;
 ► la potenza sviluppata per trasportare la cabina a pieno carico dall'inizio alla fine della salita.

[$5,1 \times 10^4$ J; $2,7 \times 10^4$ W]

- 3** Uno sciatore di 80 kg affronta alla velocità di 50 km/h un dosso alto 3,1 m. Durante la salita, l'attrito con la neve e con l'aria trasforma $3,3 \times 10^3$ J della sua energia meccanica in altre forme di energia.

► Quanto vale la velocità dello sciatore quando raggiunge la sommità del dosso?

(Suggerimento: risolvi prima l'esercizio 41)

[7,0 m/s]

- 4** Un'automobile di massa 1200 kg passa da 30 km/h a 100 km/h in 180 s.

► Qual è il lavoro compiuto dal motore?
 ► Il lavoro del motore aumenta se la velocità di marcia aumenta in 60 s invece che in 180 s?

[$4,2 \times 10^5$ J]

- 5** Un bambino di massa 30,0 kg si sta dondolando sull'altalena. Le corde a cui è fissata l'altalena sono lunghe 2,00 m. Scegliendo come livello di zero la posizione più bassa che il bambino può assumere, calcola l'energia potenziale gravitazionale del bambino nelle situazioni seguenti:

► quando le corde dell'altalena sono orizzontali;
 ► quando le corde dell'altalena formano un angolo di $45,0^\circ$ rispetto alla verticale;
 ► quando le corde dell'altalena sono perpendicolari al terreno.

[588 J; 172 J; 0 J]

- 6** Un pattinatore scende lungo una discesa, percorre poi un tratto orizzontale di 10 m e risale lungo una salita. Parte da un'altezza di 4,0 m con una velocità iniziale di 4,2 m/s. Supponi che gli attriti siano trascurabili.

► A quale altezza arriva il pattinatore lungo la salita?
 ► L'altezza a cui arriva dipende dalla lunghezza del tratto orizzontale di raccordo?

[4,9 m]

- 7** Il carrello che trasporta le persone lungo la pista delle montagne russe ha la velocità di 90,0 km/h in un punto all'altezza di 20,0 m dal suolo.

► Quale sarà la sua velocità dopo essere sceso in un punto posto all'altezza di 11,0 m dal suolo? (Trascura gli attriti.)

[102 km/h]

QUESITI PER L'ESAME DI STATO

Rispondi ai quesiti in un massimo di 10 righe.

- 1 Illustra, nel caso più generale, come si calcola il lavoro compiuto da una forza costante lungo uno spostamento assegnato.
- 2 Definisci l'energia potenziale gravitazionale e poi generalizza la definizione al caso di una forza conservativa qualunque.
- 3 Dimostra la legge di *conservazione dell'energia meccanica*, precisando in quali condizioni è valida. Applica poi questa legge a un semplice esempio reale.

TEST

- 1 Forza e spostamento sono due grandezze vettoriali. Quando producono un lavoro non nullo?
 - A Solo quando sono parallele.
 - B Solo quando sono perpendicolari.
 - C Sempre, tranne quando sono parallele.
 - D Sempre, tranne quando sono perpendicolari.
- 2 Uno scatolone di massa m si muove di moto rettilineo uniforme per un tratto orizzontale s . Il lavoro W della forza-peso sullo scatolone è uguale a:
 - A 0 J, perché la forza-peso è equilibrata dalla reazione del piano sui cui si muove lo scatolone.
 - B 0 J, perché il vettore forza-peso è perpendicolare al vettore spostamento.
 - C mgs perché l'unica forza che agisce sullo scatolone è la forza-peso.
 - D $-mgs$ perché la forza-peso e lo spostamento non sono paralleli.
- 3 Una forza si dice dissipativa quando il lavoro compiuto nello spostamento da un qualsiasi punto A a un qualsiasi punto B è:
 - A nullo.
 - B positivo.
 - C negativo.
 - D variabile a seconda del percorso seguito.
- 4 Il lavoro compiuto dalla forza di gravità nel corso di uno spostamento da un punto A a un punto B può dipendere:
 - A dalla posizione di A .
 - B dalla velocità dello spostamento.
 - C dalla lunghezza del percorso.
 - D dalla forma geometrica del percorso.
- 5 Quale di queste frasi si riferisce a una forza conservativa applicata a una biglia?
 - A Il lavoro compiuto dalla forza dipende solo dall'accelerazione con cui la biglia si muove.
 - B Il lavoro compiuto dalla forza dipende solo dalla distanza fra il punto di partenza e il punto di arrivo.
 - C Il lavoro compiuto dalla forza dipende solo dalla rapidità con cui la biglia passa dal punto di partenza al punto di arrivo.
 - D Il lavoro compiuto dalla forza dipende soltanto dal tipo di percorso seguito dalla biglia.
- 6 Per fermare un corpo che ha velocità v occorre compiere:
 - A un lavoro nullo, purché lo si fermi istantaneamente.
 - B un lavoro pari all'energia cinetica posseduta dal corpo.
 - C un lavoro pari al doppio dell'energia cinetica posseduta dal corpo.
 - D un lavoro pari al quadruplo dell'energia cinetica posseduta dal corpo.
- 7 L'energia potenziale può essere introdotta:
 - A per tutte le forze.
 - B solo per la forza-peso.
 - C per tutte le forze conservative.
 - D per tutte le forze dissipative.
- 8 In un sistema dove agiscono forze conservative la variazione di energia potenziale tra due punti A e B è $\Delta U = U_B - U_A$. Possiamo scrivere:
 - A $\Delta U = -W_{A \rightarrow B}$.
 - B $\Delta U = W_{A \rightarrow B}$.
 - C $\Delta U = 0$ J perché le forze presenti sono conservative.
 - D che non siamo in grado di dire nulla su ΔU senza conoscere il cammino effettivamente percorso.
- 9 Al supermercato un ragazzo spinge il carrello della spesa. Quale forza compie un lavoro positivo sul carrello?
 - A La forza-peso del ragazzo.
 - B La forza-peso del carrello.
 - C La forza applicata dal ragazzo.
 - D La forza di attrito fra il pavimento e il carrello.
- 10 Il lavoro è negativo quando:
 - A il valore della forza è negativo.
 - B il valore dello spostamento è negativo.
 - C il corpo si muove in verso contrario alla forza applicata.
 - D la forza mette in movimento il corpo su cui essa è applicata.

11  The unit of measurement of power can be expressed as:

- ☐ A $\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$
- ☐ B $\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$
- ☐ C $\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3}$
- ☐ D $\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}$

12 Il livello di zero per il calcolo dell'energia potenziale gravitazionale di un corpo:

- ☐ A dipende dall'altezza da terra.
- ☐ B deve essere scelto nel punto più basso possibile.
- ☐ C può essere scelto in modo arbitrario.
- ☐ D dipende dalla massa del corpo.

13 Il lavoro di una forza elastica è:

- ☐ A l'area di un triangolo nel grafico forza-deformazione.
- ☐ B l'area di un triangolo nel grafico forza-tempo.
- ☐ C l'area di un rettangolo nel grafico forza-deformazione.
- ☐ D l'area di un triangolo nel grafico spostamento-tempo.

14 La legge di conservazione dell'energia meccanica totale afferma che, in presenza di sole forze conservative:

- ☐ A l'energia cinetica e l'energia potenziale sono sempre costanti.
- ☐ B la somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale è sempre costante.
- ☐ C l'energia cinetica e l'energia potenziale sono inversamente proporzionali.
- ☐ D il prodotto dell'energia cinetica e dell'energia potenziale è sempre costante.

VERSO L'UNIVERSITÀ

Comprensione del testo

«Si dice che “tutto quello che sale deve poi ridiscendere”. Naturalmente, come molti dei vecchi detti, anche questo non è esatto. Sappiamo, in base all'esperienza acquisita con i velivoli spaziali, che è possibile lanciare dei corpi in modo tale che abbandonino la superficie terrestre e non vi facciano più ritorno: per sfuggire all'attrazione gravitazionale esercitata dalla Terra sarà infatti sufficiente che essi raggiungano una velocità universalmente valida (avente sempre il medesimo valore per qualsiasi oggetto; se così non fosse,

le missioni Apollo verso la Luna sarebbero state molto più difficili; il progetto del velivolo spaziale, per esempio, avrebbe dovuto in qualche modo tener conto esplicitamente del peso di ciascun astronauta). Ed è il principio di conservazione dell'energia a essere responsabile dell'esistenza di una velocità di fuga universale.

Possiamo esprimere l'energia di qualsiasi oggetto che si trovi all'interno del campo di attrazione terrestre come somma di due termini. Il primo dipende dalla velocità dell'oggetto: quanto più celermente esso si muove, tanto maggiore è la sua energia di movimento, o energia cinetica (dal termine greco che significa movimento). I corpi in quiete non possiedono energia cinetica. Il secondo termine, indice dell'energia che può avere un oggetto posto in un campo gravitazionale, è denominato energia potenziale. Se un pianoforte a coda è sospeso con una corda a un'altezza di quindici piani sappiamo che ha la capacità potenziale di arrecare un gran danno. Più in alto si trova un oggetto, maggiore è la sua energia potenziale, perché più grandi potrebbero essere le conseguenze di una sua eventuale caduta.»

(Lawrence Krauss, *Paura della fisica*, Raffaello Cortina Editore)

1 Secondo quanto letto nel brano precedente, cosa permette di negare, come fa l'autore, l'assunto iniziale «tutto quello che sale deve poi ridiscendere»?

- ☐ A Il fatto che è un detto popolare e in quanto tale è falso.
- ☐ B L'esistenza di corpi che, a qualsiasi velocità, escono dall'atmosfera.
- ☐ C L'esistenza delle sonde spaziali.
- ☐ D L'esistenza della velocità di fuga dalla Terra.
- ☐ E L'autore sbaglia. L'affermazione citata è corretta.

2 Nota la velocità di fuga, secondo il testo da cosa è causata?

- ☐ A Dal fatto che l'energia gravitazionale è composta da due termini.
- ☐ B Dalla composizione dell'atmosfera.
- ☐ C Dalla conservazione dell'energia.
- ☐ D Dall'intensità della forza gravitazionale.
- ☐ E Dall'energia cinetica del corpo in fuga.

Test di ammissione

1 Con riferimento al lavoro $L = \vec{F} \cdot \vec{s}$ di una forza $\vec{F}$ il cui punto di applicazione si sposta di $\vec{s}$ possiamo dire che:

- ☐ A L è nullo se $\vec{F}$ e $\vec{s}$ sono ortogonali.
- ☐ B L è massimo se $\vec{F}$ e $\vec{s}$ sono paralleli e discordi.
- ☐ C L non può essere mai nullo.

☐ D L non può essere mai negativo.

☐ E L è nullo se $\vec{F}$ e $\vec{s}$ sono paralleli.

(Prova di ammissione al Corso di laurea in Medicina e Chirurgia, 2003/2004)

- 2** Un corpo puntiforme di massa M inizialmente in quiete, viene fatto cadere nel vuoto sotto l'azione della sola forza gravitazionale (si escludono quindi durante il moto urti o contatti) da una certa altezza h rispetto ad un piano orizzontale di riferimento. Quando il corpo arriva su tale piano, l'energia cinetica è:

☐ A maggiore dell'energia potenziale gravitazionale iniziale.

☐ B minore dell'energia potenziale gravitazionale iniziale.

☐ C uguale all'energia potenziale gravitazionale iniziale.

☐ D minore dell'energia cinetica iniziale.

☐ E uguale all'energia cinetica iniziale.

(Prova di ammissione al Corso di laurea in Odontoiatria e Protesi dentaria, 1999/2000)

PROVE D'ESAME ALL'UNIVERSITÀ

- 1** Una cassa di massa 95 kg, cui viene impressa una velocità iniziale di 3,5 m/s, scivola sul pavimento di un magazzino e si arresta dopo aver percorso 2,3 m.

► Quanto vale il lavoro fatto dalla forza di attrito?

► Supponendo che la forza di attrito sia costante determinarne il modulo.

► Determinare inoltre il coefficiente di attrito dinamico.

(Esame di Fisica, Corso di laurea in Scienze Biologiche, Università di Genova, 2004/2005)

- 2** Un pianoforte di massa 300 kg viene sollevato a velocità costante da una gru da terra fino ad un appartamento posto a 10 m di altezza. Sapendo che la gru opera alla potenza costante di 400 W, quanto tempo impiega a sollevare il pianoforte?

(Esame di Fisica, Corso di laurea in Scienze Biologiche, Università di Torino, 2001/2002)