

3. L'energia

3.1 Partendo dall'esperienza empirica quotidiana

L'energia è una grandezza molto importante nella vita di tutti i giorni e di cui abbiamo una esperienza, per così dire, corporea, associata a varie sensazioni: il moto, lo stare caldi, il vedere e quindi luce, l'elettricità, l'energia muscolare e il "fare forza per" ottenere un qualche "risultato". L'ottenere un *risultato utile* è infatti delle caratteristiche dell'energia, che fa sì che l'energia abbia un ruolo così importante nella vita quotidiana.

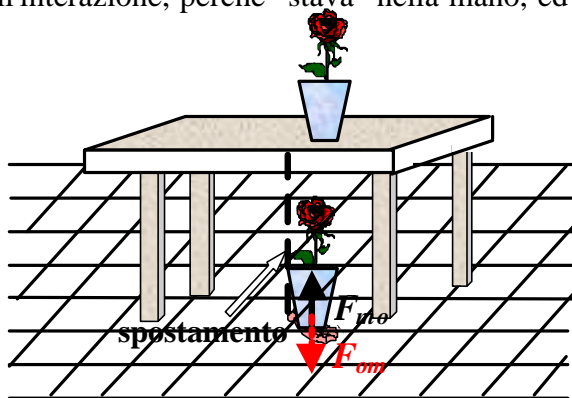
Le caratteristiche dell'energia, sulle quali è utile riflettere perché sono proprio quelle che la rendono una grandezza "utile ed economica", sono:

- l'energia è qualche cosa che "sta dentro" un corpo e perciò lo caratterizza,
- può assumere forme diverse,
- può passare da un corpo all'altro,
- può trasformarsi da una forma all'altra,
- può essere immagazzinata,
- passando o trasformandosi fa "cose utili",
- passando o trasformandosi si conserva,
- di conseguenza l'energia non si può creare né distruggere,
- tuttavia ci sono forme di energia "più utili" di altre,
- perché, passando e trasformandosi, l'energia "si degrada" in forme meno facilmente utilizzabili o meno interessanti,
- di conseguenza ci sono dei "costi energetici", legati al fatto che "costa" avere a disposizione energia in forma utilizzabile.

3.2 Da dove iniziare per giungere a una definizione "formale" dell'energia?

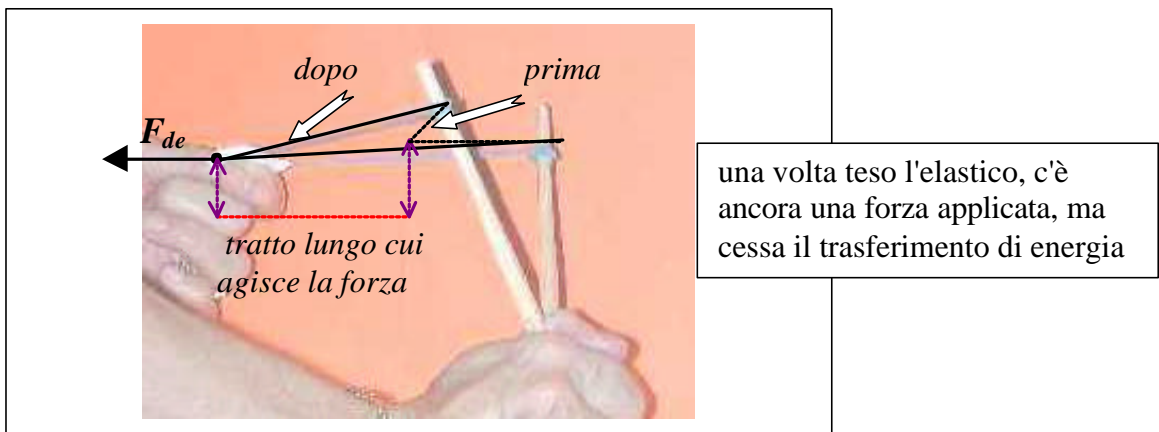
a) Iniziare dai concetti intuitivi di forza ed energia muscolare e dalla separazione fra i concetti di "forza" e di "energia". Forza ed energia sono entrambi concetti utili ed economici per descrivere l'interazione fra due corpi, ma descrivono caratteristiche dell'interazione completamente diverse; ad esempio, quando tiro un elastico o sollevo un oggetto o spingo un corpo con la mano

- la forza che applico (F_{mo}) si manifesta solo nel momento in cui entro in interazione con l'altro oggetto e l'altro oggetto risponde applicando una forza uguale e contraria (F_{om});
- l'energia invece è qualcosa che c'era già prima dell'interazione, perché "stava" nella mano, ed è passata con l'interazione all'oggetto;
- la mano "perde" energia mentre l'oggetto ne acquista (se l'oggetto è stato sollevato acquista energia di posizione, se è stato spinto acquista energia cinetica, se è un elastico che è stato tirato acquista energia elastica);
- la mano "perde" energia perché deve lavorare contro la forza F_{om} , che è dovuta alla forza di gravità applicata al corpo, che a sua volta la applica alla mano, agisce in direzione contraria allo spostamento; l'oggetto invece acquista energia perché la forza applicata all'oggetto, F_{mo} , agisce nella direzione dello spostamento

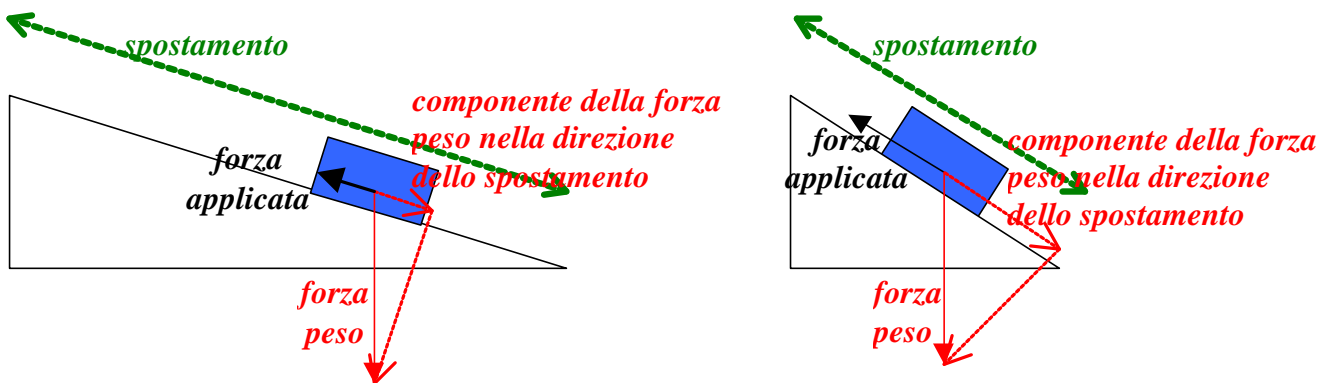


Ciò equivale, in termini formali, a iniziare dal concetto di *lavoro*. Il lavoro, come grandezza fisica, è definito come $F \times s$ ed è una grandezza "utile ed economica" perché rende subito conto del fatto che il "risultato utile" dell'applicazione di una forza non dipende solo dall'intensità della forza ma del tratto per cui la forza è applicata: ad esempio, applicare una certa forza, come sollevare un oggetto pesante per 1 metro, dà un risultato migliore (e costa più fatica) che applicarla per 20 cm. Il motivo di questo è legato al fatto che l'energia trasferita con l'applicazione della forza è pari al lavoro. È importante tenere conto che

- il lavoro non è "una forma di energia", ma è il "modo" (processo) con cui l'energia viene trasferita da un corpo all'altro mediante una forza; se non c'è uno "spostamento" non c'è lavoro e non si trasferisce energia;



- *lavori positivi e lavori negativi*: se la forza ha lo stesso verso dello spostamento, il lavoro è positivo e l'energia del corpo a cui la forza è applicata aumenta; se la forza ha senso opposto allo spostamento, il lavoro è negativo e l'energia del corpo a cui la forza è applicata diminuisce. Ad esempio, nel caso della figura, l'elastico acquista energia perché la forza F_{de} è diretta nello stesso verso dello spostamento, il braccio invece perde energia perché la forza F_{ed} è diretta nel verso opposto a quello dello spostamento
- *una proprietà importante del lavoro*: posso usare una grande forza per un piccolo spostamento oppure una piccola forza per un grande spostamento, ciò che conta è il prodotto dei due, perché determina il "risultato utile"



- *la misura dell'energia*: il lavoro permette di *misurare* l'energia che viene trasferita mediante la forza, perché si sa misurare la forza e si sa misurare lo spostamento: di qui si risale alla variazione di energia sia del corpo che ha ceduto energia che di quello che la riceve;

- *l'unità di misura dell'energia*: l'espressione del lavoro rende evidente che *l'unità di misura dell'energia* è il prodotto dell'unità di misura della forza per l'unità di misura della lunghezza, cioè nel SI il *joule*=newton · metro (J=Nm).

b) Iniziare dall'energia cinetica.



L'energia cinetica è percepita in generale come una proprietà che il corpo acquista quando viene messo in moto, che è diversa dalla quantità di moto e che viene comunicata al corpo mediante l'applicazione della forza, ma in modo diverso da quello della quantità di moto. Nell'esempio della figura, il calciatore

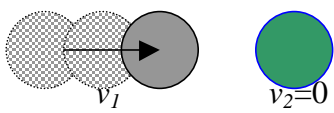
- comunica al pallone quantità di moto, grazie al buon contatto che le sue scarpe hanno con il suolo e che gli permette di scaricare sul terreno la quantità di moto che comunica al pallone
- comunica anche energia di moto, prelevandola non dal terreno, ma dalla propria energia muscolare!

Noi infatti sappiamo che la forza produce sia la variazione di energia cinetica che la variazione di quantità di moto, ma in modo diverso:

$$\vec{F} \cdot d\vec{t} = d\vec{p} \quad ; \quad \vec{F} \cdot d\vec{s} = dE_{cin}$$

Storicamente questo è stato il modo in cui si è scoperta l'importanza del concetto di energia. Infatti ci si è accorti che per descrivere completamente un corpo in moto non basta la quantità di moto ($p=mv$), ma occorre anche l'energia cinetica ($E=1/2 m v^2$).

Lo scoprì Huygens nel XVII° secolo studiando l'urto di due palline vincolate a muoversi lungo una retta:

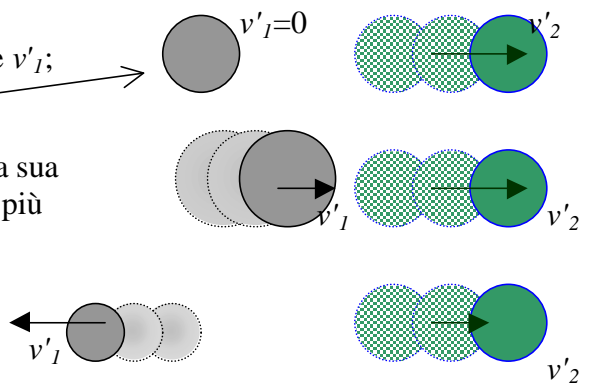


prima dell'urto:

- la palla 1 si muove con velocità v_1
- la palla 2 è ferma ($v_2 = 0$)

dopo l'urto:

- la conservazione della sola quantità di moto permetterebbe qualunque combinazione delle quantità di moto $m_1 v'_1, m_2 v'_2$, purché $m_1 v_1 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$
- invece si ha sempre un ben definito valore di v'_2 e v'_1 ; in particolare
 - se $m_1 = m_2, v'_1 = 0$ e $v'_2 = v_1$
 - se $m_1 > m_2, v'_1 > 0$ e $v'_2 > v'_1$: la palla 1 continua la sua corsa in avanti, ma è rallentata, la palla 2 corre più veloce della 1
 - se $m_1 < m_2, v'_1 < 0$ e $v'_2 > 0$: la palla 1 rimbalza indietro, quindi $v'_1 < 0$, la palla 2 corre in avanti con velocità tanto minore quanto maggiore è la sua massa



Huygens notò che, per spiegare il fatto che le quantità di moto dopo l'urto avevano dei valori ben precisi e non altri pure compatibili con la conservazione della quantità di moto, occorre assumere che c'è una conservazione aggiuntiva, oltre a quella della quantità di moto.

Per capirla, conviene esprimere la conservazione della quantità di moto calcolando la quantità di moto dp trasferita dalla palla 1 alla palla 2:

$$dp = m_1 v_1 - m_1 v'_1 \quad (1)$$

Nell'urto, la palla 1 *perde* una quantità di moto dp che *viene acquistata* dalla palla 2. L'altra grandezza che viene trasferita, conservandosi, dalla palla 1 alla palla 2 è il prodotto della quantità di moto dp per la media fra i valori delle velocità di ciascuna pallina prima e dopo l'urto:

$$dE = dp \frac{v'_1 + v_1}{2} = dp \frac{v'_2 + v_2}{2} \quad (2)$$

Sostituendo a dp il valore ceduto dalla palla 1 e quello acquistato dalla palla 2, si ottiene:

$$dE = \frac{m_1(v_1 - v'_1)(v'_1 + v_1)}{2} = \frac{1}{2}m_1v_1^2 - \frac{1}{2}m_1v'^2_1 = \frac{m_2(v'_2 - v_2)(v'_2 + v_2)}{2} = \frac{1}{2}m_2v'^2_2 - \frac{1}{2}m_2v^2_2$$

Nell'urto viene cioè trasferita anche un'altra grandezza, che oggi chiamiamo "energia cinetica", ma che inizialmente venne chiamata "forza viva": il corpo 1 perde energia cinetica, ma la stessa quantità di energia cinetica viene acquistata dal corpo 2.

Come si può ricordare la variazione di energia cinetica alle forze che agiscono durante il moto?

Dalla seconda legge della dinamica, sappiamo che la variazione della quantità di moto è il prodotto della forza F per l'intervallo di tempo dt in cui la forza agisce: $dp = F dt$. La media fra le velocità prima e dopo l'urto non è altro che la velocità media con cui il corpo si è mosso durante l'urto, quindi è pari al tratto s percorso dal corpo sotto l'azione della forza diviso per l'intervallo di tempo dt : $v_{1media} = v_{2media} = s/dt$.

Andando a sostituire nell'equazione 2, dobbiamo badare a quale corpo ci stiamo riferendo, perché la forza F_{12} applicata al corpo 2 è uguale e contraria alla forza F_{21} applicata al corpo 1; quindi:

$$dE_1 = F_{21} \cdot dt \cdot v_{1media} = F_{21} \cdot dt \cdot \frac{s}{dt} = F_{21} \cdot s$$

$$dE_2 = F_{12} \cdot dt \cdot v_{2media} = F_{12} \cdot dt \cdot \frac{s}{dt} = F_{12} \cdot s$$

Si ritrova così la relazione postulata prima tra forza, lavoro e variazione di energia. Inoltre appare chiaro che nell'urto c'è un trasferimento di energia cinetica da un corpo all'altro e non solo di quantità di moto.

Si ritrova anche il fatto che la variazione è positiva (l'energia aumenta) se lo spostamento è nella stessa direzione della forza, è negativa se lo spostamento è in direzione opposta.

c) Iniziare dall'energia "potenziale", cioè dalla capacità di fare lavoro.

È il modo classico con cui si inizia in molti libri di testo. Ad esempio, un oggetto che sta in alto, come l'acqua in una diga di montagna, possiede una energia potenziale, perché, cadendo, la forza di gravità moltiplicata per l'altezza di caduta produce un lavoro che farà trasformare l'energia potenziale in energia cinetica. Anche una molla carica possiede energia potenziale di tipo elastico: lasciata libera sposterà l'oggetto che la tiene compressa cedendogli energia cinetica.

Con gli studenti, il concetto di energia potenziale potrebbe essere introdotto, in modo meno astratto e successivamente all'introduzione dell'energia cinetica, come "energia di posizione" (che peraltro corrisponde al modo in cui storicamente si pensò all'energia potenziale) introducendo contemporaneamente le proprietà di *trasformazione*, di *immagazzinamento* e di *conservazione* dell'energia. Infatti, quando si osserva che un corpo che sale verticalmente verso l'alto e rallenta fino a fermarsi del tutto quando raggiunge il punto più alto, perdendo così energia cinetica, si può ipotizzare che questa energia non venga trasferita all'altro corpo che partecipa all'interazione (la Terra) ma rimanga dentro al corpo stesso, sotto una *forma diversa*, che chiameremo *energia di*

posizione. Quando il corpo ridiscende verso una posizione più bassa, la forza di attrazione terrestre ritrasforma l'energia di posizione in energia cinetica.

In queste trasformazioni l'energia non scompare, ma si conserva.

Se poi si riesce a trattenere il corpo nella posizione elevata, l'energia di posizione può essere utilizzata in un secondo tempo: nel frattempo rimane immagazzinata nel corpo come energia di posizione.

d) Iniziare da forme di energia diverse dall'energia meccanica, come l'energia termica, chimica, radiante (solare), elettrica, ecc. Per ognuna di queste occorre esaminare

- quali grandezze e relazioni fra grandezze vengono utilizzate per definire l'energia,
- come si stabilisce l'equivalenza fra questa forma di energia e le altre forme,
- quali fenomeni sono particolarmente efficaci per capire le proprietà di quella particolare forma di energia.

3.3 Le caratteristiche dell'energia

- a) *L'energia ha forme diverse e si trasforma da una forma all'altra.* Occorre analizzare come avviene la trasformazione, che cosa entra in gioco perché la trasformazione avvenga. In certi casi c'è un "dispositivo": ad esempio il circuito elettrico di un motore trasforma energia elettrica in energia di moto, il circuito elettrico di un ferro da stiro la trasforma in energia termica. In altri casi c'è una forza in azione che fa lavoro: ad esempio, per un pallone lanciato verso l'alto è la forza di gravità che fa un lavoro negativo perché agisce in direzione opposta allo spostamento e trasforma energia cinetica in energia di posizione. In altri casi la trasformazione è mediata dalla forma del dispositivo: ad esempio il cilindro di un motore a scoppio trasforma l'energia termica disordinata dei gas caldi in energia di moto ordinata del pistone mobile.
- b) *L'energia può trasferirsi da un corpo all'altro.* Anche per il trasferimento di energia occorre che ci sia qualche interazione affinché esso avvenga. Generalmente l'interazione avviene "per contatto", cioè a distanze molto piccole, esempio tipico è l'urto. Un tipo di trasferimento particolare è quello che avviene attraverso la radiazione, perché la radiazione viaggia anche nello spazio vuoto e a grandi distanze: è così che l'energia si trasferisce dal Sole alla Terra.
- c) *L'energia può essere immagazzinata.* È una delle proprietà importanti dell'energia, che fa sì che l'energia possa essere accumulata per poi essere usata dove e come serve. Essendo una variabile di stato, che si conserva in un sistema isolato, l'energia, una volta acquisita, resta nel corpo. Magazzini importanti di energia sono i combustibili o, in generale, le sostanze chimiche organiche ad alto "potere calorifico", ma è un magazzino di energia anche una diga piena di acqua in montagna, una nuvola, ecc.
- d) *L'energia si conserva.* Non è facile dimostrare che in una certa trasformazione o trasferimento l'energia si conserva. Dimostrazioni rigorose e precise si possono fare solo a livello microscopico. In fenomeni macroscopici è spesso un atto di fede in un principio di conservazione che viene usato per calcolare l'energia "dissipata", cioè quella che manca per fare tornare i conti: ad esempio nel rimbalzo di una palla elastica, che non torna mai esattamente all'altezza di partenza, o nella fermata di un oggetto in moto. Già nel XVII secolo Leibnitz, uno dei primi a credere in un principio di conservazione della "forza viva", sosteneva che, quando sembra che l'energia di moto di un oggetto sparisce, in realtà essa si trasforma in energia delle parti microscopiche che lo compongono (oggi diremo in energia termica, che non è altro che energia cinetica disordinata).

- e) *L'energia si degrada.* La degradazione dell'energia è legata al secondo principio della termodinamica, cioè al fatto che, nei fenomeni naturali, l'energia tende spontaneamente a distribuirsi su molti corpi, perché è *più probabile* che in una interazione in cui intervengono molti corpi ciascuno si prenda un po' di energia, anziché lasciare tutta l'energia a un solo corpo. Ciò fa sì che in una interazione in cui interviene l'*energia termica* (che è appunto l'energia che si distribuisce in modo disordinato fra molti corpi) una parte di energia rimanga sempre sotto forma di energia termica a bassa temperatura, che è sostanzialmente l'idea alla base del secondo principio della termodinamica.
- f) *I costi energetici.* L'energia che costa è quella che può "fare cose utili", cioè dare origine all'interazione

3.4 Energia, lavoro e potenza

La potenza è una misura dell'energia che viene trasferita o trasformata nell'unità di tempo. Per le "macchine" è la grandezza più significativa, perché dice la rapidità con cui quella macchina è in grado di trasferire o trasformare energia. È utile e significativo calcolare la potenza anche in fenomeni in cui la trasformazione o il trasferimento dell'energia non sono strettamente legati a una "macchina", ma per i quali è comunque rilevante il tempo in cui tale processo avviene.

L'unità di misura della potenza è il watt (simbolo W).

È significativo il fatto che, a partire dalla potenza, si sia costruita una unità di misura dell'energia, il wattora (simbolo Wh), che è più usata nella vita comune del joule, che è l'unità SI: un Wh è pari a 3600 J (un W erogato per 3600 s).

3.5 Esercizi

1. Discutete un fenomeno in cui siano chiare almeno tre diverse caratteristiche dell'energia (ad es. trasferimento, trasformazione, immagazzinamento, conservazione, degradazione, costi);
 - descrivete l'energia in gioco, con quali meccanismi dettagliati avvengono le trasformazioni o i trasferimenti;
 - discutete come si potrebbero misurare l'energia e le relazioni che la legano ad altre grandezze, come la potenza;
 - applicate tali relazioni all'analisi di qualche altra "situazione problematica".
2. Misurate, per un fenomeno di moto preso dalla vita di tutti i giorni, la variazione di energia mettendola in relazione con la forza applicata, e, se significativa, la potenza sviluppata, riportando esplicitamente i valori dei dati di partenza e i calcoli eseguiti.