

Il concetto di energia

Esperimento e teoria

Leggi di conservazione

- ◆ Legge fondamentale della dinamica:

$$\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$$

- ◆ Se $\mathbf{F} = 0$, $\mathbf{p} = \text{costante}$

→ *conservazione della quantità di moto*

- ◆ Primo esempio di *legge di conservazione*:
esiste una quantità, per ogni sistema fisico, che in determinate circostanze rimane invariata nel tempo

- ◆ Tipico caso: collisioni

A quali condizioni?

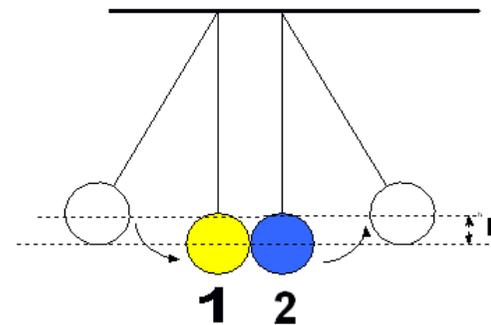
- ◆ Per un sistema qualsiasi, la quantità di moto totale è conservata quando la forza esterna totale è nulla (se valgono anche alcune altre condizioni sulle forze interne fra le parti del sistema)
- ◆ Conseguenza delle leggi di Newton
- ◆ Simile: conservazione del *momento angolare* (moti rotatori)
- ◆ *Non indipendente dalle leggi di Newton!*
- ◆ *Validità molto generale in meccanica (praticamente per ogni tipo di interazione)*
- ◆ *Apparenti violazioni quando si considerano fenomeni elettromagnetici*
- ◆ *In realtà OK se si tiene conto di*
q. di m. del campo e.m.
ridefinizioni relativistiche

Lavoro meccanico

- ◆ Forze: agiscono nello spazio e nel tempo
- ◆ Effetto globale di una forza che agisce per un certo tempo: *impulso* = $\int \mathbf{F} dt \approx F \Delta t$
- ◆ Effetto globale di una forza che agisce su un certo percorso: *lavoro* = $\int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \approx F \Delta s$
- ◆ Concetti utili perche' spesso non siamo interessati alla traiettoria dei corpi, ma a caratteristiche globali del loro moto

Una sera, alla Royal Society,...

- ◆ Nel 1666, a una seduta della *Royal Society* di Londra, un esperimento curioso
- ◆ La boccia n. 1 si ferma, mentre la n.2 riparte ogni volta con velocità uguale a quella che aveva la n.1: per altro, la conservazione della quantità di moto non fissa le velocità di 1 e 2 dopo l'urto



← *se le bocce sono elastiche*

C'e' qualcosa sotto!

◆ Oltre alla quantita' di moto, qualcos' altro sembra restare invariato nel sistema

◆ Leibnitz definisce:

$$\underline{vis\ viva} = mv^2$$

In seguito, chiamata **energia cinetica** e ridefinita come

$$T = 1/2 mv^2$$

quantita' non indipendente da **p**

◆ Huygens: T_{tot} e' conservata se l'urto e' elastico

◆ Inoltre, teorema delle forze vive: L e T sono interscambiabili

◆ *Ma attenzione:*

*la conservazione di **p** non implica*

*la conservazione di **T**!*

◆ *Es: nell'esperimento di prima, sostituiamo una delle palle con un'altra di stucco, cosi' che restino attaccate dopo l'urto*

$$P_{tot} = m_1 v \\ = (m_1 + m_2) v'$$

$$T_{tot} = 1/2 m_1 v^2 \\ \neq 1/2 (m_1 + m_2) v'^2$$

Energia potenziale

- ◆ En.cinetica: evidentemente varia da un istante all'altro durante il ciclo
- ◆ Osservazione fondamentale: la posizione della palla varia anch'essa durante il ciclo. L'altezza max h puo' anche venire raggiunta lavorando contro la forza di gravita', spendendo il lavoro
$$L = mg h$$
- ◆ Questo porta a considerare che *L possa essere scambiato con qualcos'altro, oltre che con T*
- ◆ Qualcos'altro: *en.potenziale*
- ◆ *Caso limite: attriti $\rightarrow 0$*
- ◆ *Allora il moto e' ciclico*
- ◆ *Poiche' il moto e' ciclico, anche l'energia cinetica e' periodica*
- ◆ *Quando l'en.cinetica aumenta, la posizione si abbassa, e viceversa*
- ◆ *L si puo' scambiare anche con U, en.potenziale, che dipende dalla posizione*
- ◆ *Nell'esperimento, l'en potenziale e' anch'essa periodica*

Energia totale: conservata!

◆ En. meccanica totale:
cinetica + *potenziale*

◆ Esistono sistemi fisici il cui movimento rispetta sempre una nuova legge di conservazione: l'en. totale non varia

◆ Idealizzazione: sistemi privi di dissipazione

◆ *Costante!*

◆ *Solita domanda: cosa e' "realmente" l'energia?*

Domanda non fisica

◆ *Solita risposta: non e' necessario "sapere cosa sia" per ragionarci su*

◆ *Feynman: Non e' comunque un concetto "concreto", come p.es. il numero dei cubi con cui gioca un bambino, che e' anch'esso conservato...*

Le leggi della meccanica...

...vengono quindi riespresse come leggi di conservazione di *quantita' di moto*, *momento angolare*, *energia*

◆ Problemi di dinamica: si possono spesso risolvere senza dover trovare la traiettoria dei corpi

◆ Questo naturalmente vale nei casi in cui non siano in gioco *forze non conservative*

Le leggi di conservazione sono in diretta connessione con le caratteristiche di simmetria del sistema fisico
Perche'?

Simmetria ↔ Invarianza
Invarianza ↔ Conservazione
Legame non ovvio nella formulazione elementare

L'energia meccanica

- ◆ Considerando i moti celesti: solo *gravitazione* (conserv.)
→ *l'en. meccanica totale dell'Universo e' costante*
- ◆ Atteggiamiento meccanicista porta ad estenderne la validita' al di fuori dei sistemi meccanici
- ◆ Da' base fisica alla vecchia idea filosofica del *Nulla si crea, nulla si distrugge*
- ◆ *L'energia non e' una proprieta' invariabile dei corpi*
- ◆ *Puo' essere scambiata fra corpi diversi in conseguenza di interazioni*
- ◆ *Tuttavia, se consideriamo un sistema "chiuso" (←isolato da altri corpi), l'en. meccanica totale e' costante*
- ◆ *Es. Sistema solare: "quasi" isolato → $E \sim \text{costante}$*

Gli attriti: quando E non si conserva

◆ Non tutte le forze che agiscono fra corpi macroscopici sono conservative

◆ Le forze di attrito sono un esempio di *forza dissipativa*

◆ Dove va l'energia meccanica mancante?

◆ *Forze di attrito*

Risultato di complesse interazioni, di natura elettromagnetica, fra le superficie dei corpi macroscopici

◆ *Nessuna forza dissipativa e" di natura fondamentale*

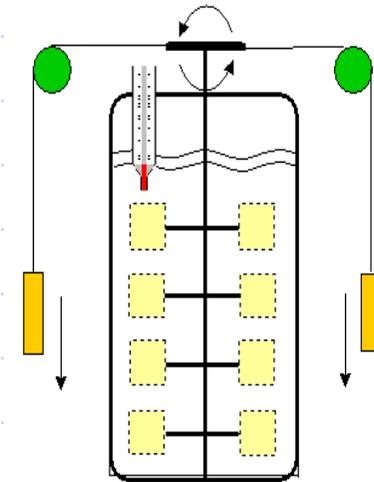
Sono forze "statistiche"

Lavoro e calore: Joule

- ◆ Ben noto: in presenza di attriti, il lavoro speso si traduce, almeno in parte, in calore
- ◆ Natura del calore non compresa per lungo tempo:

Prima considerato una specie di proprietà di ogni corpo (come la massa, ma interscambiabile)

Poi, soprattutto per merito di Joule, identificato come una forma di energia (← si può sfruttarlo per compiere lavoro, oppure ottenerlo dal lavoro stesso)



La conservazione dell'energia

- ◆ Estensione della legge di conservazione dell'energia meccanica
- ◆ L' *energia termica* entra nel bilancio di ogni processo, inclusi quelli dissipativi
- ◆ Resta tuttavia oscuro che tipo di energia sia quella termica
- ◆ *Curiosita' del tempo (1850): che cosa e' il Sole?*
- ◆ Un paio di teorie:
 - palla di carbone ardente*
si conoscono massa, distanza e potere calorifico del carbone
→ *i conti non tornano*
 - massa che si contrae*
en. potenziale gravitazionale si trasforma in calore
→ *i conti non tornano*

Medici e fisici

- ◆ La legge generale di conservazione dell'energia fu proposta per primo da un medico, Mayer
- ◆ Studi sul metabolismo dei topi:
 $\text{cibo} + \text{ossigeno} \rightarrow \text{anidride carbonica} + X$
come in qualunque combustione
- ◆ Gli esseri viventi si comportano come macchine termiche

Il moto microscopico

- ◆ Ipotesi molecolare convalidata da molti indizi a meta' Ottocento
- ◆ Infine, interpretazione del calore come *energia di movimento*: quindi, p.es., trasferire calore a un volume di gas significa incrementare l'en. cinetica di tutte le molecole nel volume
- ◆ Moti molecolari *disordinati*: quindi il trasferimento di energia come calore non corrisponde a un trasferimento di quantita' di moto
- ◆ *T: scalare, >0*
- ◆ *p: vettore, val.medio nullo*

Perche' le forze dissipative...

- ◆ ...sono dissipative?
- ◆ In realta' non lo sono!
- ◆ L'en. meccanica "dissipata" si ritrova come *calore* trasferito
- ◆ Quando l'interazione coinvolge contemporaneamente molte particelle (\leftarrow *gradi di liberta'*) lo scambio di energia avviene in modo *disordinato*
- ◆ Tutto, o parte, del trasferimento di energia avviene *incoerentemente* per le molecole coinvolte
- ◆ *Es.: Moto di un corpo in un fluido viscoso*
- ◆ *All'interfaccia corpo-fluido ci sono interazioni molecolari*
- ◆ *Le molecole superficiali del corpo cedono energia per urto a quelle del fluido*
- ◆ *Il legame nel solido e' forte, l'effetto e' quindi quello di aumentare l'en. media nel fluido, facendo perdere energia di moto d'insieme al corpo*
- ◆ *Anche il corpo si scalda!*

La statistica

- ◆ Volendo semplificare un'idea un po' complicata:
E' facile (← *statisticamente favorito*) che avvenga il passaggio da una situazione ordinata a una disordinata: p.es., *da energia distribuita nelle oscillazioni molecolari di un solido cristallino a energia nel moto casuale delle molecole di un gas*
E' difficile (← *statisticamente sfavorito*) che avvenga il contrario
- ◆ La tendenza verso il disordine e' un fatto statistico, che non ha particolari significati metafisici

Peculiarita' dell'energia termica

- ◆ Caratteristica piu' importante: si trasferisce spontaneamente da un corpo all'altro
- ◆ Concetto di temperatura: misura dell'agitazione termica
- ◆ Temperatura: concetto ausiliario
- ◆ Limitazioni nel passaggio di energia termica
- ◆ *Ricordare: calore e' energia in transito fra corpi a temp. diversa*
- ◆ *Una volta transitata da un corpo ad un altro, e' parte dell'energia interna*
- ◆ *Non importa alla fine come e' cambiata l'en. interna, se per scambio di calore o effetto di lavoro*
- ◆ *II principio*

Conservazione universale

- ◆ Energia, una stessa quantità fisica che si presenta sotto diverse apparenze
- ◆ Il I principio: ipotesi scientifica che ha conseguenze filosofiche
- ◆ L'universo, e l'uomo, come macchine termiche
- ◆ Diverse forme di energia potenziale:
gravitazionale, elettromagnetica, chimica, nucleare,...
- ◆ Ognuna può trasformarsi nelle altre, in calore o in lavoro

Energia gravitazionale

- ◆ Tipico esempio: massa d'acqua ad alta quota
- ◆ En. pot. gravitazionale si trasforma in en. cinetica nella caduta a valle
- ◆ Poi trasformata in *lavoro* (es. mulino)
en.elettrica (es. dinamo)

- ◆ *Come c'e' arrivata?*
A spese di altre forme di energia.
Ciclo dell'acqua = ciclo termico
- ◆ *Nella moderna teoria della gravitazione, l'en. gravitazionale puo' anche trasformarsi in radiazione (onde gravitazionali), di cui si cerca oggi l'evidenza*

Energia chimica

- ◆ Un'altra forma di energia potenziale
- ◆ Reazioni chimiche: trasformazioni fra sostanze
- ◆ Reazioni endo- ed eso-termiche
- ◆ Energia immagazzinata nei combustibili
- ◆ *Endo- : avvengono se si fornisce energia*
- ◆ *Eso- : avvengono spontaneamente, con rilascio di energia*
- ◆ *In ultima analisi, l'en. chimica e' di natura elettromagnetica (rottura e formazione di legami chimici, governati da forze elettriche fra le molecole)*

Energia elettromagnetica

- ◆ Configurazione statica di cariche libere o di correnti: contiene energia
- ◆ Si puo' dire che l'energia e' immagazzinata nel campo
- ◆ Puo' trasformarsi in lavoro sulle cariche, ma anche in radiazione
- ◆ *Cariche e correnti, se lasciate libere, si mettono in movimento*
- ◆ *Il campo statico contiene energia; anche il campo di radiazione trasporta energia*
- ◆ *Processi radiativi simili a processi dissipativi*

Energia nucleare

- ◆ Energia di legame di protoni e neutroni nei nuclei atomici
 - ◆ Fra nuclei, processi analoghi a reazioni chimiche
 - ◆ Fissione: disintegrazione di un nucleo pesante in frammenti piu' piccoli
 - ◆ Fusione: unione di nuclei leggeri (meccanismo che fornisce energia al Sole)
 - ◆ Entrambi processi **esotermici**
- ◆ *Energie molto piu' elevate di quelle dei legami molecolari ($\times 10^6$)*
 - ◆ *Fissione: avviene a temp. ambiente*
 - ◆ *Fusione: avviene ad alta temperatura*
 - ◆ *In entrambi i casi, fra i prodotti delle reazioni alcuni hanno energia cinetica elevata*
 - ◆ *Il processo fornisce calore*

Energia e massa

- ◆ *Energia cinetica*: dipende dalla massa
- ◆ *Energia potenziale*: non sempre dipende dalla massa
- ◆ Einstein 1905: questa non e' tutta la storia
- ◆ Massa ed energia sono differenti aspetti di una stessa entita', e possono trasmutarsi l'una nell'altra
- ◆ Si puo' creare energia spendendo massa, e viceversa (tuttavia rispettando altre regole di diversa natura)
- ◆ Fenomeni sperimentalmente ben verificati, caratteristici delle interazioni ad alta energia fra i costituenti elementari della materia
- ◆ Profonda revisione dei concetti base (spazio e tempo)

La costruzione di teorie fisiche

- ◆ Non costruiamo una teoria fisica nella quale l'energia non sia conservata
- ◆ Questo perché, fino ad oggi, non c'è indicazione sperimentale che questo avvenga
- ◆ Es.: effetto fotoelettrico
- ◆ Es.: il neutrino
- ◆ *Teorie fisiche: riassumono e interpretano i dati sperimentali*
- ◆ *Alcuni principi fondamentali, mai contraddetti dall'esperienza, devono essere rispettati in ogni teoria*
- ◆ *Casi contrari*
 - Bohr: inizi decadimento beta*
 - Hoyle: inizi cosmologia moderna poi abbandonate*

L'evoluzione dell'idea

- ◆ *Vis viva*, o en. cinetica: proprieta' del moto
- ◆ Energia potenziale gravitazionale: conservazione dell'en.meccanica
- ◆ Calore come energia termica: conservazione generalizzata dell'energia
- ◆ Energia nel campo elettromagnetico: energia nella radiazione
- ◆ Energia in altri campi fisici: il campo delle forze nucleari, forti e deboli
- ◆ Equivalenza massa-energia: sono interscambiabili