

# Il concetto di entropia

*Calore, fenomeni irreversibili e  
freccia del tempo*

# La termodinamica

- ◆ Disciplina “schizofrenica”
- ◆ Origini ingegneristiche, importante nelle applicazioni
- ◆ Studio di proprietà fondamentali, indagine su questioni molto generali
- ◆ Metodi generali ( $\leftarrow$  *astratti*), risultati generali
- ◆ Interpretazione e giustificazione: meccanica statistica

# Indagini sui fenomeni termici

- ◆ Ampia evidenza sperimentale, apparentemente separata dai fenomeni meccanici
- ◆ Calore interpretato come una forma di energia, di origini alquanto misteriose
- ◆ Infine, calore come en.cinetica dei moti molecolari disordinati
- ◆ Conservazione dell'energia, dedotta dalle leggi della meccanica, si estende anche ai fenomeni termici

# Meccanica e termodinamica

- ◆ Leggi meccaniche: valide sempre
  - ◆ Sistemi a molte particelle: difficile utilizzare leggi della meccanica
  - ◆ Descrizione riassuntiva: parametri macroscopici e loro evoluzione nel tempo
- ◆ *Atteggiamento meccanicista*
  - ◆ *Corpi macroscopici: ipotesi atomico-molecolare*  
→ *costituiti da molte particelle*
  - ◆ *Sensazioni su scala umana: macroscopiche*
  - ◆ *"Autonomia" dei parametri macroscopici: non si richiedono altre informazioni per descriverne l'evoluzione*

# Meccanica statistica

- ◆ *Maxwell*: teoria cinetica dei gas
- ◆ Ipotesi: caos molecolare
- ◆ Metodo statistico (*medie*) per ricavare le proprietà macroscopiche dalle leggi della dinamica microscopica
- ◆ I principio della termodinamica: conseguenza delle leggi della meccanica
- ◆ *Boltzmann*: estensione a tutti i sistemi fisici

# Gli stati di un sistema

- ◆ *Macro*-stato: descritto da  $p, T, V, U, \dots$
- ◆ *Micro*-stato: descritto da *posizione e velocita'* di tutte le molecole!
- ◆ Numeri in gioco:  $N_A \sim 10^{23}$  molecole !!
- ◆ *Impossibile* (e *inutile*) descrivere il sistema microscopicamente
- ◆ *Pressione, temperatura, volume, en. interna, ...*
- ◆ *Per un dato macro-stato, ci sono moltissimi micro-stati diversi*
- ◆ *Il peso statistico di un dato macro-stato e' proporzionale al numero di micro-stati*
- ◆ *Impossibile matematicamente*
- ◆ *Inutile perche' i processi macroscopici non sono sensibili allo stato microscopico*

# Le leggi della termodinamica

- ◆ I principio: *conservazione dell'energia* (gia' discusso)
- ◆ II principio: *in discussione oggi*
- ◆ III principio: *irraggiungibilita' dello zero assoluto* (non discusso)
- ◆ Indifferenti a dettaglio leggi microscopiche (*classiche* vs. *quantistiche*)

- ◆ *Perche' 3 principi?*
- ◆ *Riflettono il contenuto delle leggi di Newton. Ma:*
- ◆ *Quantita' di moto e momento angolare totali ( $\leftarrow$  vettori)  $\sim$  zero per corpi macroscopici*
- ◆ *Legge di conservazione dell'energia necessaria ma non sufficiente a spiegare i fenomeni termici*
- ◆ *Contenuto **extra** rispetto a meccanica?*

# Le macchine termiche

- ◆ Il lavoro (p.es. meccanico) può trasformarsi interamente in calore
- ◆ Può avvenire il contrario?
- ◆ Macchine termiche: trasformano  $Q \rightarrow L + Q'$
- ◆ *Efficienza = Lavoro fatto / Calore assorbito*
- ◆ Sempre  $< 1$
- ◆ Perché ?



# I cicli termici

- ◆ Una macchina termica, come minimo, lavora ciclicamente fra due temperature  $T_1$  e  $T_2$
- ◆ *Se la macchina e' reversibile* (←lavora fra stati di equilibrio vicini l'uno all'altro), il calore  $Q_1$ , assorbito a  $T_1$ , e' proporzionale a  $T_1$ , e quello  $Q_2$ , ceduto a  $T_2$ , e' proporzionale a  $T_2$
- ◆ Allora vale  $Q_1/T_1 = -Q_2/T_2 \rightarrow Q_1/T_1 + Q_2/T_2 = 0$
- ◆ In generale, sommando sul ciclo:  $\sum_i Q_i/T_i = 0$   
tenendo conto del segno dei contributi

# Il secondo principio

- ◆ *E' impossibile costruire una macchina termica il cui unico effetto sia quello di estrarre calore (da un serbatoio) e trasformarlo tutto in lavoro*
- ◆ Quindi: si ha sempre cessione di una frazione di calore a un altro serbatoio a temperatura piu' bassa
- ◆ Non c'e' una spiegazione evidente basata sulle sole leggi della meccanica (che per altro non sono violate da questo!)

# L'entropia (I)

- ◆ La somma su tutto un *ciclo reversibile* delle quantità  $Q_i/T_i$  risulta nulla: la grandezza  $Q_i/T_i$ , dove  $Q_i$  è il calore scambiato *reversibilmente*, dipende quindi solo dagli stati iniziale e finale, *indipendentemente dalla reversibilità* del processo che li collega; si chiama *entropia*, e di solito la si indica con  $S$
- ◆ Si conclude quindi che c'è una grandezza caratteristica per ogni stato di un dato sistema, analoga all'en. interna, ma da essa indipendente
- ◆ Mentre il sistema evolve, la grandezza  $S$  varia; dal II principio segue :
- ◆ Se il processo è reversibile,  $\Delta S = \sum_i Q_i/T_i$
- ◆ Se il processo è irreversibile,  $\Delta S > \sum_i Q_i/T_i$

# Irreversibilita' macroscopica

- ◆ Fenomeni irreversibili
- ◆ Esiste una freccia del tempo per i processi a molti corpi
- ◆ Origine non chiara
- ◆ Possibile spiegarla senza ricorrere a ipotesi extra-scientifiche?



# La reversibilita' microscopica

- ◆ Fenomeni microscopici: *reversibili*
- ◆ Leggi fondamentali della meccanica: sempre valide se si inverte la direzione del tempo
- ◆ Idem per forze gravitazionali ed elettromagnetiche
- ◆ *Microscopico: processo che coinvolge poche particelle*
- ◆ *Significato: il processo inverso e' possibile quanto quello diretto*
- ◆ *Tempo newtoniano: parametro che concorre a descrivere eventi elementari, come una quarta coordinata*
- ◆ *Distinto da tempo psicologico: ha senso invertirlo*

# Esempio: $F=ma$

- ◆ L'equazione fondamentale della dinamica e' invariante per inversione del tempo
- ◆ Infatti: se  $t \rightarrow -t$ , allora  $\mathbf{v} \rightarrow -\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{a} \rightarrow \mathbf{a}$
- ◆ D'altra parte, forze *gravitazionali* ed *elettriche* restano invariate (nessuna delle due dipende dalla velocita')
- ◆ Forze *magnetiche*: piu' complicate, ma si vede che anch'esse restano invariate
- ◆ Se non cambia l'eq., non cambiano le sue soluzioni: quindi si avranno gli stessi moti, solo che si svolgono al contrario

◆ Ricordiamo:

$$\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$$

$$t \rightarrow -t \Rightarrow \mathbf{v} \rightarrow -\mathbf{v}$$

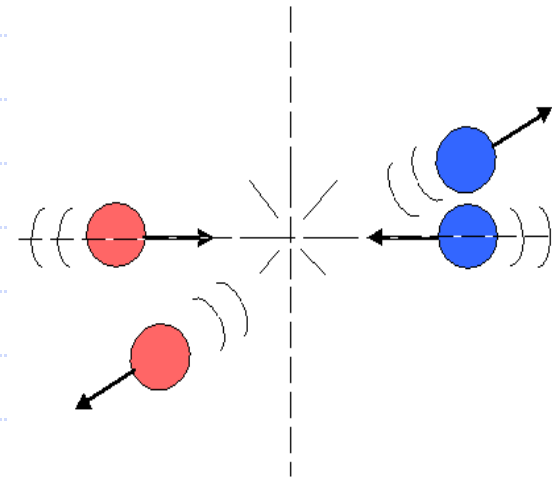
$$\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt = d^2\mathbf{r}/dt^2$$

$$t \rightarrow -t \Rightarrow \mathbf{a} \rightarrow \mathbf{a}$$

◆ Significato di inversione di  $t$ :  
usiamo un orologio che va all'indietro

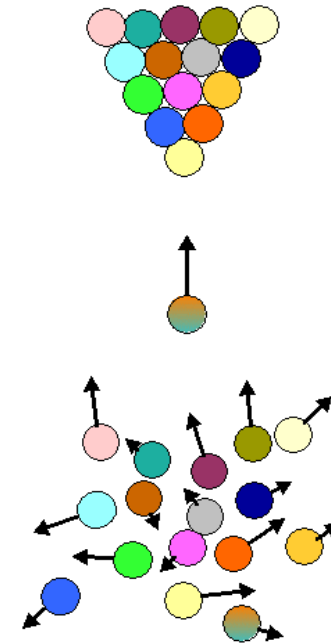
# Esempio: collisione fra due bocce

- ◆ Consideriamo il caso (ideale) di una collisione del tutto *elastica*
- ◆ Modo piu' diretto di vedere le cose: stato *iniziale* e stato *finale*
- ◆ Inversione di  $t$ : equivalente a scambiare stato iniziale e finale (*posizione* e *velocita'*)
- ◆ Se guardiamo il "film" dell'urto, ci sembra perfettamente naturale sia proiettato in *avanti*, sia *indietro*
- ◆ Le due versioni dell'urto sono entrambe perfettamente "naturali"



# Controesempio: carambola

- ◆ Biliardo americano: 1 boccia contro 15
- ◆ Giriamo il film del primo tiro
- ◆ Ora lo proiettiamo all'indietro
- ◆ Non ci sembra piu' un processo naturale!
- ◆ Quindi: il processo ha *qualcosa* che lo rende riconoscibile dal suo inverso
- ◆ Il processo e' *irreversibile*



- ◆ *Il film proiettato all'indietro mostra un processo che viola qualche legge della meccanica?*
- ◆ *No: tutte le leggi conservazione sono soddisfatte!*



# Il significato di irreversibilita'

- ◆ Differenza fondamentale fra i due casi: numero di bocce coinvolte negli stati iniziale e finale
- ◆ Trattiamo le bocce come ideali, gli urti come elastici
- ◆ Nondimeno, il processo diretto consiste in una "dissipazione": en. cinetica di una sola boccia si suddivide in quella di 15 bocce
- ◆ Il processo inverso consiste in una "antidissipazione": l'en. cinetica di 15 bocce si somma in quella di una sola

◆ *Ci sono moltissimi modi in cui puo' avvenire la suddivisione*

◆ *Ci sono pochissimi modi in cui si puo' realizzare la somma*

# Il confronto...

◆ ...indica quindi che in questo caso si determina *una totale asimmetria temporale* fra i due versi del processo

◆ Il processo e' di fatto *statisticamente* irreversibile

◆ Quindi: dalle *leggi deterministiche*, che sono invarianti per inversione temporale, derivano *leggi statistiche* che introducono una completa asimmetria temporale

◆ *L'esistenza di processi irreversibili si giustifica infine su base statistica*

◆ *Il processo inverso non avviene, non perche' dinamicamente impossibile, ma perche' statisticamente molto improbabile*

# L'entropia (II)

- ◆ Grandezza macroscopica caratteristica di ogni stato di un sistema fisico

- ◆ Significato microscopico?

- ◆ Boltzmann:

$$S = k \log w$$

$w = \text{no. di microstati}$

- ◆ Definizione ragionevole

Sistema diviso in 2 parti:

No. Totale microstati:  $w = w_1 * w_2$

Entropia totale:  $S = S_1 + S_2$

- ◆ *Es. Energia interna*  
*Grandezza macroscopica*  
*= Somma delle energie di tutte le molecole*

- ◆ *Definizione di  $w$  non rigorosa*

- ◆  *$w$  difficile da determinare*

- ◆  *$k$ : nuova cost. universale, collega termodinamica e meccanica*

# Entropia e disordine

◆ Sistema ordinato:  
pochi microstati per  
ogni macrostato

◆ Sistema disordinato:  
contrario

◆ Entropia: *misura del  
disordine*

◆ Sistema isolato:  
*l'entropia non può  
diminuire*

◆ *Esempio: gas perfetto*

*Espansione libera*

*Calore scambiato: zero*

*Lavoro: zero*

*V raddoppia*

*T non varia*

*En. interna non varia*

*Entropia aumenta*

◆ *Processo irreversibile*

*S cambia anche se  $\Delta Q=0$*

*$\Delta S$  definisce il senso del processo:  
se il gas si accumulasse  
spontaneamente in metà volume,  
 $\Delta S < 0$*

# Entropia e universo

- ◆ Universo: *sistema isolato*
- ◆ Nell'universo: *processi irreversibili*
- ◆ Quindi: *l'entropia dell'universo aumenta*
- ◆ Risultato assai profondo, ma:  
*perche'* ci sono processi irreversibili?

Domanda essenzialmente senza risposta...

# La freccia del tempo

- ◆ Si intravede una spiegazione
- ◆ Direzione unica per l'evoluzione temporale di sistemi macroscopici: *dovuta a sbilanciamento fra i pesi statistici di stato iniziale e finale*
- ◆ Evoluzione verso maggiore disordine *globale*
- ◆ Domanda finale: *come si spiega uno stato iniziale massimamente ordinato?*
- ◆ Non si conosce la risposta....
- ◆ *Diverse interpretazioni metafisiche, poco o niente fondate*
- ◆ *Teoria dell'evoluzione negata in base al II principio (malcompreso...)*
- ◆ *Condizione iniziale: cosa la determina???*

# Le altre frecce

## ◆ Freccia *interazioni deboli*

*Processi elementari: alcuni processi di decadimento non sono invarianti per inversione temporale, perche'?*

## ◆ Freccia *elettromagnetica*

*Radiazione elettromagnetica: solo soluzioni ritardate, quelle anticipate devono essere scartate, perche'?*

## ◆ Freccia *cosmologica*

*Big bang: solo processo di espansione, perche' ?*