



Appunti di Fisica _I

Secondo semestre

Termodinamica

Secondo principio

Sommario

Il tempo.....	1
Il secondo principio.....	3
Le formulazioni classiche del secondo principio.....	3
Clausius: Il passaggio del calore da un corpo piu' caldo ad un piu' freddo e' irreversibile.....	3
Lord Kelvin: La conversione di lavoro in calore e' irreversibile.....	4

Il tempo

Uno dei problemi fondamentali della nostra vita quotidiana e` che non possiamo mai ritornare indietro nel tempo per rifare qualche operazione che ci è sembrata sbagliata. Il tempo quindi a differenza delle coordinate spaziali sembra avere una direzione fissata.

Eppure il moto di una particella elementare, per esempio in un campo di forze, si svolge senza nessuna preferenza per la direzione del tempo.

Immaginate infatti di realizzare un film di un sasso in moto e poi di proiettarlo su di uno schermo in presenza di un folto pubblico. Maliziosamente o no, iniziate la proiezione dal *fondo della pellicola* e al termine domandate agli amici del pubblico se hanno notato nulla di strano. Ebbene il moto apparirà a tutti i presenti più che plausibile, come dire, il film appare come la proiezione di un evento naturale e ripetibile nella realtà.

La proiezione mostra il sasso in una successione di punti descritti dalla stessa equazione oraria, quella ottenuta risolvendo $F=ma$, semplicemente facendo *correre il tempo in senso contrario* ($t=-t$) a quello per noi naturale.

Tuttavia noi, ancorati alla nostra realtà, percepiamo la successione dei punti come un moto all'indietro reale generato da condizioni iniziali diverse da quelle da noi prima imposte: è come se il moto fosse stato fissato usando le condizioni corrispondenti allo stato del sasso a fine corsa, ma con la *velocità cambiata di segno*. Il mobile, infatti nella realtà, con queste nuove condizioni iniziali percorrerà la traiettoria nel senso contrario esattamente, come visto nel filmato! ed una eventuale sua nuova ripresa, proiettata all'inverso, ci apparirà una copia esatta della prima... e tutto sembra ritornare al suo posto.

Quante volte abbiamo risolto problemi di gravi che cadono o descrivono parabole, sfruttando questa simmetria? Allora quello che conta è invertire il segno della velocità per generare il moto indietro, mentre l'energia cinetica, quadratica in v , non può risentire del segno!

Ma per cambiare il segno della velocità si può invertire il senso di percorrenza della traiettoria, mandando ogni spostamento elementare ds in $-ds$ (come sembra accada nel film proiettando i fotogrammi all'inverso) o cambiano semplicemente il segno del tempo, visto che "v" è il rapporto spazio/tempo!

D'altra parte la stessa equazione $F=ma$ è di per se stessa insensibile alla direzione del tempo; l'accelerazione è quadratica in dt !



Dunque possiamo affermare che quello che vediamo nello schermo, ripetibile nella nostra realtà, potrebbe bene essere stato prodotto filmando il moto in un mondo dove il tempo corre in senso opposto.

Diremmo che il mondo e quello con il tempo invertito sono l'uno lo specchio temporale dell'altro, quindi simmetrici rispetto alla variabile tempo.

Ma tutti gli eventi in natura sono simmetrici sotto il cambio di segno del tempo?

La legge della dinamica $F=ma$ è invariante per inversione temporale e allora mi domando se per ogni evento reale e complesso, sono in grado di realizzare un evento in natura simile a quello che vedo sullo schermo proiettato all'inverso?

Purtroppo no! A parte poi il nostro invecchiare che già ci angoscia... ma non lasciamoci angosciare...

- Pensate ad un bicchiere di cristallo che cade in terra e si rompe in mille pezzi... se andate a proiettare l'evento all'indietro virtualmente lo ricomponete, ma nessuno vi crederà. Anche il sasso di prima, se si fosse fermato contro un muro frammettendosi e se anche questa parte della pellicola fosse stata proiettata all'inverso, avresti avuto reazioni ben diverse dal vostro folto pubblico!

Ma passiamo ad altri eventi, magari semplici, ma significativi.

- Lanciate una bilia su di un pavimento, per un po' corre, poi piano, piano si arresta a causa dell'attrito. Guardate il film all'indietro...una bilia che a causa dell'attrito aumenta la sua velocità fino a ritornarvi in mano! è improponibile, nessuno venderebbe per vero un evento così irrealistico!
- O una goccia di inchiostro in un bicchiere di acqua limpida, che fa? Piano, piano si espande e va distribuirsi in tutto il bicchiere intorbidando l'acqua. Al contrario...forse se lasciate il bicchiere torbido sul comodino per tutta la notte, sperate il mattino dopo di ritrovare l'acqua limpida e la goccia confinata in un piccolo punto del bicchiere? ma sarà....

Dunque nel moto elementare esiste questa bella simmetria rispetto al tempo, ma quando si considerano sistemi più o meno complicati, la simmetria sparisce, non funziona più!. E così stanno le cose nel mondo complesso della termodinamica.

Notiamo anche che se mettiamo due corpi di diversa temperatura in contatto termico ed isolati rispetto al resto, dopo un po' si stabilizzano ad una stessa temperatura intermedia. Come dire che una certa quantità di calore è passato dal corpo più caldo a quello più freddo. *Il contrario potrebbe essere possibile in un mondo simmetrico rispetto al tempo...ma purtroppo non è così.*

Infatti nessuno mai ci ha raccontato che due corpi di ugual temperatura, messi in contatto termico, abbiano diversificato nel tempo la loro temperatura relativa, uno scaldandosi e l'altro raffreddandosi! Nessuno mai ha notato che due corpi di differente temperatura, messi in contatto termico, abbiano aumentato nel tempo la loro differenza in temperatura trasferendo calore dal corpo più freddo a quello più caldo!

Dunque l'*irreversibilità macroscopica* del tempo è di casa anche nei fenomeni prettamente termodinamici ed in effetti scopriremo alcune delle più *interessanti conseguenze concettuali* studiando proprio le macchine termiche.



Ci sono altri infiniti esempi che potremmo discutere, non voglio tediarvi, ma notate che tutti hanno in *comune il fatto che sono eventi di trasformazioni irreversibili*. Non potrebbe essere altrimenti, infatti le trasformazioni *reversibili* per definizione possono essere invece percorse all'inverso!

Il secondo principio

Intanto dobbiamo decidere come spiegare quanto qui si è osservato!. Possiamo basarci

- sulle leggi della fisica e dimostrare che tutto va come va, sfruttando però la meccanica statistica (e si può fare!),
- oppure, come si fa in termodinamica classica, si enuncia un *principio fondamentale* che considerati i fatti sperimentali di sopra, assume assiomaticamente la direzione del tempo

Noi qui adotteremo il secondo approccio e formuliamo un secondo principio! del resto è quello storico.

In effetti il secondo principio fu enunciato in due forme, una da Clausius e l'altra di Lord Kelvin.

Le formulazioni classiche del secondo principio

(nota: il lavoro è qui e indicato con $L = \int F d\sigma = - \int P \Delta V$ come lavoro fatto dalle forze

esterne sul sistema, o $L_p = \int P \Delta V$ quando si vuole evidenziare il lavoro delle forze

di pressione verso l'esterno. Tuttavia ricorda sempre che $L = -L_p$ e di conseguenza il primo principio $\Delta U = Q + L = Q - L_p$)

Clausius essenzialmente propose un principio che stabiliva di fatto la *direzione del tempo* con parole tipiche della termodinamica. Oggi lo potremmo enunciare in forma più o meno moderna, così:

Clausius: *Il passaggio del calore da un corpo più caldo ad un più freddo è irreversibile*

Se ci pensi bene sta dicendo che il calore passa ("passa" dà la direzione del tempo!) spontaneamente e tranquillamente da un corpo più caldo ad uno più freddo, ma il processo derivato dal contatto termico di due corpi di differente temperatura è irreversibile poiché noi non siamo in grado di ripeterlo passo, passo all'inverso, mantenendo i corpi a contatto!. Se vuoi spostare il calore dal corpo freddo a quello caldo devi inventare una pompa di calore come descritta nel capitolo passato con una inevitabile spesa di lavoro esterno positivo sul sistema.

E si può anche dire che è *impossibile un ciclo in cui un sistema in contatto termico con due sorgenti a temperatura T_1 e T_2 ($T_1 < T_2$) realizzi il trasporto di calore dalla sorgente più fredda a quella più calda con un lavoro delle forze esterne negativo o nullo ($Q_1 > 0$, $Q_2 < 0$ e $L < 0$!).*

In breve



- Una macchina che fa passare il calore da una sorgente *calda ad una fredda* è una semplice macchina a ciclo nullo, *compatibile con il principio di Clausius*, ma irreversibile.
- Una macchina che fa passare il calore da una sorgente *fredda ad una calda* con contributo di lavoro esterno ($L > 0$) è una pompa di calore; è *compatibile con il principio di Clausius*.
- Una macchina che fa passare il calore da una sorgente *fredda ad una calda* senza il contributo di lavoro *positivo* esterno è *vietata dal principio di Clausius*. Questa macchina a lavoro nullo, se esistesse, *negherebbe* quanto detto al primo punto.

Esiste una seconda formulazione che risale, come la prima, a metà del '800, espressa da Lord Kelvin e che oggi si può enunciare, in chiave più o meno moderna:

Lord Kelvin: *La conversione di lavoro in calore è irreversibile.*

Sta dicendo che mentre si può convertire il lavoro in calore, non è invece possibile realizzare un ciclo reversibile completo in cui si possa trasformare completamente il calore in lavoro. Per esempio (ne puoi inventare mille altri!) un ciclo per convertire il lavoro completamente in calore potrebbe essere: una compressione isoterma reversibile di un gas in cui il lavoro è tutto *convertito* in calore ceduto alla sorgente (l'energia interna non cambia), seguito da una *espansione adiabatica irreversibile nel vuoto* (ricorda l'esperimento di joule qui il lavoro è nullo!) per ritornare al volume dello stato iniziale. Ma il ciclo opposto che potrebbe convertire il calore ceduto dalla sorgente completamente in lavoro è impossibile poiché l'inverso della espansione adiabatica irreversibile nel vuoto è semplicemente irrealizzabile, e così ha ragione Lord kelvin! (ricorda anche Joule)

Pensa poi a quanto si scaldano i freni della tua auto. Lì trasformi il lavoro completamente, ma irreversibilmente, in calore. Questo calore lo perdi poiché non riuscirai mai a recuperarlo per far correre ancora per un po' la tua auto; eppure quel calore lo hai pagato in benzina!

Segue anche il principio :

*Non si può realizzare un ciclo in cui il sistema assorba calore da una sola sorgente e lo converta in lavoro utile (fatto dalle forze di pressione $L_p > 0$).
Detto anche ciclo monoterme.*

In breve

- Una macchina in contatto con una sola sorgente *può trasformare integralmente il lavoro $L > 0$ ricevuto dall'esterno in calore $Q < 0$ ceduto alla sorgente*, ma è irreversibile
- Una macchina in contatto con una sola sorgente *non può trasformare integralmente il calore $Q > 0$ assorbito, in lavoro $L < 0$ verso l'esterno* (come dire una macchina ad efficienza 100%).

Con questa formulazione si esclude un *moto perpetuo di seconda specie*, e cioè è *impossibile ottenere lavoro utile dal calore di una unica sorgente*. Per esempio si potrebbe



pensare di sfruttare il calore immagazzinato in mare, visto che il primo principio energeticamente ce lo permetterebbe! (In verità sembra che Lord Kelvin sia partito proprio da questa osservazione per formulare il suo principio.)

Per completezza ricordo che il *moto perpetuo di prima specie*, quello in cui *una macchina dovrebbe produrre lavoro senza consumo di energia*, cioè con cicli termici in cui $Q=0$, è escluso dal primo principio della termodinamica.