

# PUO' L'ORDINE NASCERE DAL CASO?

## CHI HA PAURA DEL II° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA?

Dott. Prof. Marco Rosa-Clot

(Professore ordinario di Fisica, Università di Firenze)

### 1 – Introduzione

Il saggio Laotsu scrive “ Tao genera uno, una fenera due, due genera tre, tre genera tutte le cose”. Con questa citazione Fang Li Zhi e Li Shu Xian (in *Creation of Universe*” World Scientific 1993) affrontano il problema della creazione dell’Universo. Parole non molto diverse da quelle a noi più note: “In principio era il Verbo e il Verbo era Dio e il Verbo era presso Dio ed ogni cosa venne fatta dal verbo”. In entrambi i casi si parte da un grande principio ispiratore, un momento iniziale unificante per poi proporre scissione, diversificazione, moltiplicazione, evoluzione. Lo schema è identico: dal semplice nasce la complessità, le strutture organizzate, gli astri, la vita, l’uomo. Questo stesso schema viene proposto in modo autonomo in molte culture e periodi diversi (bast pensare alla cosmogonia greca o ai miti degli aborigeni australiani), ma cozza contro una scienza recente, figlia della rivoluzione industriale: la termodinamica o in particolare il II principio. Il secondo principio della termodinamica, ad un’analisi superficiale, appare banale ed ovvio. Nella formulazione di Clausius recita:

*Il calore fluisce spontaneamente da un corpo più caldo ad uno più freddo e mai viceversa.*

Questa ovvia empirica ha tuttavia conseguenze tutt’altro che banali e in particolare porta alla definizione dei processi irreversibili come misura “termodinamica” del tempo, un tempo ben diverso da quello incontrato nello studio della meccanica. Il tempo della meccanica è un parametro, una grandezza di segno arbitrario, che può scorrere avanti o indietro senza alterare o violare alcuna delle leggi note. Il tempo della termodinamica porta in sé il concetto di irreversibilità, di corrente unidirezionale, di freccia orientata e in ultima analisi di morte, meta finale a cui tendono tutte le strutture esistenti. La grandezza che fissa lo scorrere unidirezionale del tempo è l’entropia (etropè), la nuova funzione della termodinamica proposta da Clausius nel fondamentale articolo del 1865. Come il tempo scorre in una certa direzione e i secondi scanditi dall’istante iniziale non possono che aumentare, così aumenta inesorabilmente l’entropia di qualsiasi sistema isolato in particolare l’Universo.

Prima ancora, nel 1854 Helmotz, in una celebre lezione, introduce il concetto di “morte termica” dell’Universo (Warmetode). Questa parola ha una fortuna incredibile e segna profondamente il pensiero scientifico e filosofico della seconda metà dell’ottocento. Non si tratta solo di una moda culturale che trova terreno fertile negli atteggiamenti decadenti a cavallo del secolo; la morte termica pone in discussione l’impostazione evoluzionistica e l’ipotesi che vi possa essere un percorso naturale verso strutture sempre più organizzate. Non solo dal disordine non nasce l’ordine, ma addirittura il Caos non può che aumentare e l’universo evolve verso sistemi di disordine crescente e verso la situazione statisticamente più probabile: massima entropia, minimo ordine. Oggi, forti della teoria termodinamica dell’informazione e del teorema di Shanon, aggiungiamo: informazione nulla. Sappiamo infatti che ogni informazione si paga in termini di ordine, di energia ed in ultima analisi di diminuzione di entropia di un sistema. Siamo quindi di fronte ad una contraddizione fra una visione teorica positiva e confermata apparentemente da osservazioni empiriche ( l’universo ci appare organizzato, la vita un miracolo, l’ordine di

oggi ben superiore a quello del bing bang) e una legge fondamentale della fisica: ogni sistema tende verso il massimo del disordine, la minima informazione, la massima entropia. Lo scorrere del tempo è questo!

## 2 - L'espansione cosmica e l'equilibrio dell'universo.

Una risposta possibile a questa contraddizione, vero e proprio paradosso della fisica e della conoscenza, sta in una visone più generale del problema. Poniamoci la domanda: che cos'è l'universo (scritto con u minuscolo!)? e diamoci la risposta un po' sintetica, ma sufficientemente precisa: *l'universo è un insieme di materia (particelle) e radiazione (fotoni) in rapida espansione, dominato dalla forza di gravitazione universale*.

Queste parole contengono in nuce la risposta al paradosso e la strada per una nuova visione del cosmo. Cominciamo ad osservare che l'espansione dell'universo è necessariamente adiabatica (senza scambio di calore con altri sistemi in quanto l'universo ingloba tutti i sistemi) e quindi è processo che porta ad un progressivo raffreddamento del sistema stesso. Tuttavia è semplice dimostrare che la legge di raffreddamento adiabatico delle particelle è ben diversa da quella dei fotoni. In particolare la temperatura dei fotoni varia con l'inverso del raggio

$$T_{\text{particelle}} \sim 1/R \quad (1)$$

Mentre quella delle particelle varia più rapidamente, secondo la legge:

$$T_{\text{particelle}} \sim 1/R^2 \quad (2)$$

Si noti che in queste formule R è il raggio dell'universo che si suppone aumentare linearmente nel tempo e quindi R potrebbe anche essere sostituito dal tempo stesso. In altre parole, se nel momento del bing bang l'universo era una palla calda di temperatura  $T_0$ , oggi l'universo è costituito da una radiazione termica di temperatura molto più bassa ( $T=2,7K$ : la famosa temperatura della radiazione cosmica di fondo) e da una materia mediamente ancora più fredda. Altro che morte termica, altro che secondo principio!! L'universo è fatto di due componenti e la loro differenza di temperatura va aumentando. Ovviamente questa violazione del secondo principio ha implicitamente un trucco: l'universo si è detto che è un sistema in rapida espansione, quindi non in equilibrio; quindi non si applicano i concetti usuali della termodinamica. In compenso le sue parti interagiscono anche a grandi distanze attraverso la forza di gravità. Quindi la gravità gioca un ruolo antagonista alla termodinamica: impedisce al sistema di essere in equilibrio ed accentua la disomogeneità tra una zona e l'altra del sistema stesso.

## 3 - Equilibrio gravitazionale e capacità termica negativa.

Per esplicitare questo ruolo della gravità studiamo il ben noto problema del moto di un satellite intorno alla terra. Un satellite in orbita circolare intorno alla terra deve avere una velocità tale che la forza centripeta coincida con la forza di gravità. Quindi:

$$mv^2 / r = GmM_t / r^2 \quad (3)$$

ne risulta una velocità pari a  $v^2 = GM_t / r$ , quindi un'energia cinetica pari a:

$$E_{\text{cin}} = GmM_t / (2r) \quad (4)$$

L'energia del satellite non è solo cinetica. Nel bilancio dell'energia meccanica dobbiamo tener conto anche dell'energia potenziale che vale

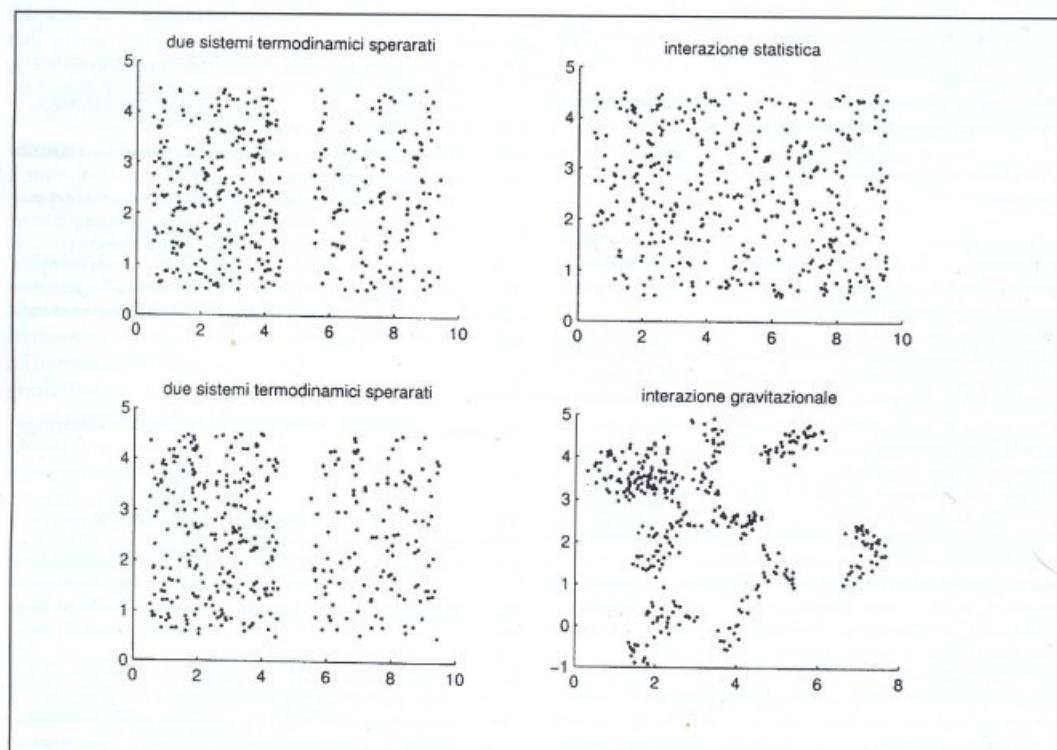
$$E_{\text{pot}} = -GmMt / r \quad (5)$$

Si noti che il valore dell'energia potenziale è negativo ed è esattamente il doppio dell'energia cinetica. Il bilancio complessivo è quindi :

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{pot}} + E_{\text{cin}} = -GmMt / r + GmMt / (2r) = - GmMt / (2r) \quad (6)$$

Come esempio specifico un satellite di 1 Kg a 1000 Km di quota ha un'energia totale  $E_{\text{tot}} = -54.3 \cdot 10^6$  Joule, mentre un satellite a 500 Km di quota ha solo  $E_{\text{tot}} = -58.2 \cdot 10^6$  Joule. L'energia è diminuita di  $3.9 \cdot 10^6$  Joule, ma la sua energia cinetica è aumentata di ben  $0.5 \cdot 3.9 \cdot 10^6$  Joule. In parole diverse se un satellite in orbita a 1000 Km di quota viene rallentato e frenato (o da razzi o dalla resistenza dell'aria residua a quelle quote), scende lentamente di quota verso terra, *perde energia ed aumenta la velocità del satellite!*

Questo è un ben noto paradosso meccanico, per altro perfettamente capito. Dal punto di vista termodinamico il paradosso è più complesso. Infatti poiché la velocità di un insieme di particelle è legata alla temperatura dalla legge  $v^2 \sim T$  si ha un *risultato paradossale*: in un sistema gravitazionale sottrarre energia porta ad un aumento della velocità media e quindi della temperatura; immettere energia porta ad una diminuzione della temperatura. Siamo qui in presenza di un fenomeno assolutamente inusitato: *un sistema a capacità termica negativa*. Cosa succede ora se si mettono in interazione due sistemi facendo predominare, come accade in natura, l'interazione gravitazionale rispetto ai processi molto lenti di equilibrio termodinamico? La risposta è illustrata in figura. Se l'interazione è puramente termodinamica e statistica il sistema va verso un equilibrio indifferenziato (la morte termica). Se il sistema è dominato dall'interazione gravitazionale si formano strutture "clusterizzate" (galassie, ammassi, etc.); *nasce un ordine!!!*



**Fig.1** - Due modi di interazione di sistemi: in alto a sinistra due sistemi di densità diversa, ciascuno in equilibrio vengono messi in interazione puramente statistica. La figura in alto a destra mostra il risultato della termodinamica: un equilibrio indifferenziato. Lo schema in basso a sinistra mostra la stessa situazione iniziale. L'evoluzione generata dall'interazione gravitazionale porta ad una situazione completamente diversa. Il sistema clusterizza! Sono nate così le galassie?

## 4 - Conclusione

Possiamo schematizzare così la discussione:

- la pura interazione termodinamica porta all'equilibrio e alla morte termica;
- l'interazione gravitazionale applicata ad un sistema statistico compete con l'equilibrio termodinamico;
- se il sistema evolve in modo sufficientemente rapido da non raggiungere l'equilibrio nascono strutture organizzate di complessità ed se il sistema evolve in modo sufficientemente rapido da non raggiungere equilibrio crescente;
- in particolare su scala globale si creano differenze di temperatura in violazione al secondo principio della termodinamica.

Naturalmente questi elementi sono solo una chiave interpretativa e aprono problemi più di quanti ne risolvano. Si noti che la gravità gioca un ruolo essenziale in due contesti diversi: la gravità da origine a calori specifici negativi, la gravità domina il cosmo su grandi distanze e impedisce che venga raggiunto l'equilibrio termodinamico. Questi due aspetti sono sicuramente connessi ma una interpretazione esaurente ed esaustiva del problema ad oggi non è ancora chiara. Resta il fatto curioso e stimolante che proprio la gravità che ha portato Einstein a detronizzare il tempo dal ruolo assoluto assegnatogli da Newton e a renderlo una particolare coordinata del nostro universo quadridimensionale, sembra oggi suggerire una nuova idea del concetto di direzione del tempo e di irreversibilità.

La discussione è aperta, ha risvolti teorici e formali molto complessi ed appassiona fisici ed epistemologi: non aspettiamoci una rapida conclusione. Ma esistono poi riposte definitive?

*(Dott. Prof Marco Rosa-Clot)*

Dipartimento di Fisica Università di Firenze