

# LA FRECCIA DEL TEMPO

Uno dei concetti più densi cogibili nel divenire delle cose

L'argomento proposto, oltre al fascino che emana non trascurabile in situazioni di apprendimento, toccando alcune strutture nevralgiche della conoscenza scientifica attuale, è ricco di riferimenti, sottigliezze ed implicazioni anche per la programmazione curricolare, portando all'attenzione degli insegnanti spunti focali di riflessione e discussione (anche sul metodo) nell'ambito delle discipline scientifiche.

## INTRODUZIONE

*“Il Tao genera uno, uno genera due, due genera tre, tre genera tutte le cose”* (Laotzu, oltre 4000 a.C.).

*“Il Verbo era nel principio e il Verbo era in Dio e Dio era il Verbo. Questo nel principio era in Dio. Ogni cosa fu creata per suo mezzo e senza di lui nulla fu fatto di ciò che è stato creato”* (Vangelo secondo S. Giovanni, fine del I° secolo).

Lo schema è lo stesso: si parte da un unico principio generativo, semplice ed unificante, per poi proporre scissione, diversificazione, moltiplicazione, evoluzione. Si procede dal semplice al complesso, al molteplice, al diversificato (Fang Li Zhi et al. “Creation of Universe”, World Scientific, 1993). Senza entrare nel merito, queste nozioni praticamente si ritrovano indipendentemente in molte cosmogonie antiche e in molti miti della creazione in ogni tempo ed ogni luogo. Se escludiamo i cieli chiusi delle culture fredde dove la freccia si ripiega in circolo (M. Eliade “Il mito dell'eterno ritorno”, Rusconi, 1975), il tempo segna ed elabora il processo di complicazione, di evoluzione, di cambiamento. Questo, insito nei miti e nel sacro, si ritrova in molti aspetti del fenomeno della vita, ma anche fra le pieghe del mondo inorganico. Il bimbo cresce, la pianta sviluppa, la vita evolve con infiniti tentativi divergenti, molti falliti, in strutture sempre più complesse e creative, certamente più ordinate, una di esse è la nostra specie. E se l'uomo si ritroverà isolato in piccoli gruppi, contro la tendenza attuale al mescolamento (per es., se riuscirà a colonizzare i pianeti), inizierà di nuovo a diversificare e la sua evoluzione continuerà e forse i limiti del senso comune, che accenneremo, troveranno soluzione (in una specie nuova?). E l'Universo, *un sistema isolato*, per molti uscito da una discontinuità, zona anomala e puntiforme (big-bang), non si sviluppa forse in nuove galassie, stelle, pianeti differenziandosi in composizione, temperatura e densità? Non si formano ancora oggi nuove stelle? Si tratta di un processo inventivo e creativo che permea e trascina (inesorabile freccia del tempo).

## LA FRECCIA DEL TEMPO IN MECCANICA E TERMODINAMICA

A fronte di questo mondo dove la riflessione umana scopre una freccia del tempo che costruisce, si sviluppano, in maniera indipendente e parallela, branche della fisica in particolare la meccanica che parlano un altro linguaggio, diverso e per certi versi contrario. Nell'ambito della scienza fisica tradizionale (comprendenti anche Relatività e Meccanica quantistica) si hanno grandi successi, ma solo nei territori del *tempo senza tempo* (Bergson) o del *non tempo* (Prigogine), all'interno di confini in cui hanno forza leggi che non distinguono il verso del tempo (assenza di freccia del tempo), cioè dove rimpiazzando t con -t non cambiano di forma (si pensi alla legge di Newton espressa da  $d^2 x/dt^2 = F/m$ ; dove grossolanamente nella variazione di  $t^2$ , t figura al quadrato). Questo

tempo reversibile ci permette in linea di principio di trattare il passato ed il futuro come il presente, potendo scorrere in avanti e indietro senza contraddizioni (assenza di freccia del tempo in meccanica).

Con la rivoluzione industriale si apre un nuovo capitolo della fisica: La Termodinamica. In Termodinamica apparve una freccia del tempo segnatamente di diverso stile, addirittura di verso opposto (dal diverso all'uniforme, dal complicato al semplice, dall'ordine al disordine, dalla vita alla morte). Fu Boltzmann a correggere il tiro contro il tempo reversibile della fisica e propose a chiarimento un famoso quanto drammatico esperimento pensato, come faceva Galileo, che qui ripresentiamo sotto forma di simulazione al computer. Esperimento ancora attuale, significativo e illuminante, anche sul piano didattico, per le numerose implicazioni e sottigliezze che nasconde. *L'ipotesi da mettere alla prova è che il fenomeno del non-tempo si presenti solo nell'evoluzione di sistemi costituiti da poche particelle, come nel caso delle leggi della Meccanica, ma non in Termodinamica dove i sistemi sono costituiti da un gran numero di particelle.*

**L'esperimento e l'algoritmo** - L'esperimento consiste nell'usare una scatola divisa in due scomparti da una parete intermedia con un foro centrale chiuso da uno sportello mobile. Poniamo alcune molecole nello scomparto di sinistra e altre in quello di destra. Tutte le molecole sono identiche e la loro densità è così bassa da poter trascurare le interazioni reciproche. Una volta aperto il foro, ogni molecola ha la stessa *chance* di percorrere un cammino che conduca nell'altro scomparto e quindi ogni molecola ha la stessa probabilità di essere la prossima a passare attraverso il foro. Nell'esperimento si conta il numero delle molecole nello scomparto sinistro ogni volta che una molecola entra od esce; si registra poi tale numero per poterne controllare la variazione. E' praticamente impossibile condurre l'esperimento con scatole e molecole reali, per cui mettiamo in atto un esperimento virtuale che simuli lo stesso fenomeno, costruendo un programma al computer, usando la tecnica dei numeri causali e l'algoritmo che andremo a descrivere.

Se ci sono  $ns$  molecole a sinistra e  $nd$  a destra, la probabilità che la successiva molecola attraversi il foro sia una di sinistra è  $ns/(ns+nd)$ . Se estraiamo numeri ( $ui$ ) a caso da un insieme numerico costituito da un segmento di retta compreso fra 0 e 1, la probabilità che un numero estratto sia compreso fra 0 e  $ns/(ns+nd)$  è proprio uguale alla probabilità che il successivo passaggio dal foro sia da sinistra a destra. Infatti la probabilità di estrazione dall'intervallo 0-1 di un numero  $ui$  compreso fra 0 e  $ns/(ns+nd)$  è (casi favorevoli/casi possibili) la lunghezza del segmento  $ns/(ns+nd)-0$ , fratto quella del segmento totale 1-0. Così penseremo che passi dal foro una molecola da sinistra se il numero estratto è compreso fra 0 e  $ns/(ns+nd)$ ; se maggiore, da destra.

Non è fuori luogo far notare fra parentesi, anche per la trattazione che seguirà, come il senso comune abbia limiti in particolare nel trattare problemi di logica e di probabilità; esiste cioè una discontinuità netta fra senso comune e scienza (come già pensava Bachelard) tanto da far attribuire da autori moderni (Lewis Wolpert "La natura innaturale della scienza", Dedalo, 1996) a quest'ultima una "*natura innaturale*". Per cui non è facile tradurre, per es., discorsi di probabilità, per loro natura criptici e *silenziosi*, con il linguaggio *rumoroso* proprio del senso comune, quello verbale. Tale aspetto è stato recentemente evidenziato, in un ragionamento sulla difficoltà della divulgazione scientifica, anche dall'accademico Bellone, direttore della rivista Le Scienze (N.385

Settembre 2000). Il capire e far capire intuitivamente non è così scontato come prima si pensava e la maggior parte dei concetti scientifici acquisiti, e attraverso la divulgazione e attraverso anche la stessa scuola (e questo è grave, se si pensa ai dibattiti senza fine sul rapporto insegnamento-apprendimento), generalmente non si integrano nella cultura del senso comune; il senso comune con difficoltà si arricchisce: basta domandare ad uno di media cultura, che non abbia seguito un corso di studi specifico su quella materia, perché crede che la terra sia rotonda o perché sia essa a ruotare, ovvero chiedere di spiegare perché un sasso lanciato in alto lungo la verticale fa quello che fa! I grandi divulgatori della scienza presentano molto spesso articoli tanto trasparenti quanto banalizzati: provate a fare qualche conto, con le informazioni fornite da questi signori, se ci riuscite!

**Il programma di simulazione** – Il computer dovrà generare così numeri casuali compresi fra 0 e 1 (tramite la funzione RND del Qbasic); calcolare poi il valore attuale della frazione  $ns/(ns+nd)$  e confrontarlo col numero casuale estratto; se tale numero è minore od uguale alla frazione detta, si “muove” una molecola da sinistra a destra, diminuendo di uno il registro di sinistra, ns; altrimenti pensiamo entri una molecola da destra, aumentando di uno lo stesso registro. Il programma scritto in Qbasic di seguito riportato - Qbasic.exe si trova nel cd di windows 98, seconda versione, in X:\Tools\oldmsdos - costruisce il vettore ns(i) che contiene la serie dei numeri delle molecole contenute nel box di sinistra ad ogni passaggio, durante tutto l'esperimento. Tale serie di numeri viene anche memorizzata in un file as.dat, nel drive a, con un numero massimo di 4000 elementi. Per vedere come varia il numero delle molecole nel box di sinistra ogni volta che penso di muovere una molecola, è necessario fare il grafico del vettore ns(i) in funzione di i. Può essere fatto con Excel (ho usato Excel 5.0) che carica direttamente in una colonna i numeri dei files sequenziali, anche se dovremo però aggiustare i separatori delle cifre decimali (sostituzione di punti alle virgole). Si lascia al lettore interessato l'onere di ottimizzare il programma, di trovarne i limiti e superarli.

### REM Programma sulla freccia del tempo

```

CLEAR : CLS
'DEFDBL F, P
DIM ns(4000), P(4000), P1(4000), a(4000), f(4000), m(4000), q(4000)
RANDOMIZE TIMER
INPUT "Quanti passaggi ti interessano? (min 200; max 4000) ", n
REM Se superi ns=120, P va in overflow. Provare a usare DEFDBL.
INPUT "Con quante molecole vuoi lavorare? ", nt
INPUT "Quante molecole ci sono all'inizio nel box di sinistra? ", ns(1)
IF nt <= 35 THEN
    flg = 2: FOR i = 1 TO nt: a(i) = i: NEXT i
    IF nt = ns(1) OR ns(1) = 0 THEN P(1) = 1: GOTO 10
    GOTO fact2
END IF
IF nt = ns(1) OR ns(1) = 0 THEN P(1) = 1: GOTO 10
P1 = (nt / ns(1)) ^ ns(1): P2 = (nt / (nt - ns(1))) ^ (nt - ns(1))
P3 = SQR(nt / (6.2832 * ns(1) * (nt - ns(1))))
P(1) = P1 * P2 * P3
10 s = 0: s1 = 0
FOR i = 1 TO n - 1
    n1 = ns(i) / nt 'Probabilità che la molecola successiva esca da
sinistra'
    ns(i + 1) = ns(i) - s1
    ns(i + 1) = ns(i + 1) + n1
    s1 = s1 + n1
    P(i + 1) = P(i) * ((ns(i) / nt) ^ ns(i)) * ((nt - ns(i)) / (nt - ns(i + 1))) ^ (nt - ns(i + 1))
NEXT i

```

```

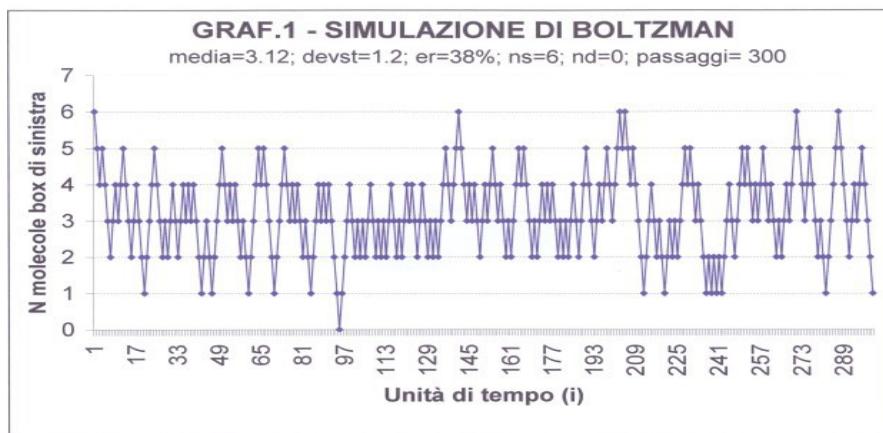
        IF RND <= n1 THEN ns(i + 1) = ns(i) - 1 ELSE ns(i + 1) = ns(i)
+ 1
        IF flg = 2 THEN
            IF nt = ns(i + 1) OR ns(i + 1) = 0 THEN P(i + 1) = 1:
GOTO 11
            GOTO fact
            END IF
        IF nt = ns(i + 1) OR ns(i + 1) = 0 THEN P(i + 1) = 1: GOTO 11
        P1 = (nt / ns(i + 1)) ^ ns(i + 1)
        P2 = (nt / (nt - ns(i + 1))) ^ (nt - ns(i + 1))
        P3 = SQR(nt / (6.2832 * ns(i + 1) * (nt - ns(i + 1))))
        P(i + 1) = P1 * P2 * P3
11   IF i > 100 THEN s = s + ns(i): s1 = s1 + (ns(i)) ^ 2
        NEXT i
        s = s + ns(n): s1 = s1 + (ns(n)) ^ 2: n2 = n - 100
        media = s / n2: devst = SQR((s1 - n2 * media ^ 2) / (n2 - 1)): er =
        devst / media
        PRINT "Media= "; media; "Dev. Standard= "; devst; "Err. relativo= "; er
        GOTO 12
fact: n2 = nt: GOSUB fact1: b = f
n2 = ns(i + 1): GOSUB fact1: c = f
n2 = nt - ns(i + 1): GOSUB fact1: d = f
P(i + 1) = b / (c * d)
GOTO 11
fact1: f(1) = 1
FOR j = 2 TO n2
    f(j) = a(j) * f(j - 1)
NEXT j
f = f(j - 1)
RETURN
fact2: n2 = ns(1): GOSUB fact1: c = f
n2 = nt: GOSUB fact1: b = f
n2 = nt - ns(1): GOSUB fact1: d = f
P(1) = b / (c * d)
GOTO 10
12 REM Perequazione di P(i)
INPUT "Ordine della media mobile con cui vuoi perequare P(i)= ", k
n3 = n - (k - 1)
FOR i = 1 TO n - (k - 1)
    q = k + (i - 1)
    m = 0
    FOR j = i TO q
        m = m + P(j)
    NEXT j
    m(i) = m / k
    NEXT i
    FOR i = 1 TO n3: P1(i) = m(i): NEXT i
    REM Ns va nel file ns.dat e contiene il N° di molecole nel box sinistro.
    REM P(i) va nel file P.dat e contiene il N° di stati microscopici.
    REM P1(i) va nel file P1.dat e contiene i P(i) perequati.
TYPE dat
ns AS INTEGER
P AS SINGLE
P1 AS SINGLE
END TYPE
OPEN "a:ns.dat" FOR OUTPUT AS #1
OPEN "a:P.dat" FOR OUTPUT AS #3

```

```

OPEN "a:P1.dat" FOR OUTPUT AS #2
FOR i = 1 TO n
PRINT #1, ns(i)
PRINT #3, P(i)
NEXT i
FOR i = 1 TO n3
PRINT #2, P1(i)
NEXT i
CLOSE #1
CLOSE #2
CLOSE #3
END
REM -> alla routine grafica.

```



**Le risultanze dell'esperimento e protocollo sperimentale** – Per ns=6 e nd=0, considerando 300 passaggi, si ricava il grafico GRAF. 1. Osservando questo grafico non è possibile individuare alcuna tendenza. Esiste una diminuzione di ns solo all'inizio (quando nd è zero), ma subito dopo il comportamento è in balia delle fluttuazioni. In vari casi ns torna al valore iniziale (tutte e sei le molecole nel box di sinistra). La media, calcolata sui valori di ns dopo i primi 100 passaggi, risulta 3.12 e la deviazione standard (devst) è relativamente elevata (1.2) tanto che il valore dell'errore relativo Er (devst/media), che rappresenta l'entità media delle fluttuazioni per molecola, è 0.384. Queste elevate fluttuazioni, più del 38%, cancellano la freccia del tempo, per cui il tempo risulta reversibile in accordo con la filosofia della meccanica tradizionale, come ipotizzato, lavorando con poche particelle.

Per ns=60 e nd =0, considerando ancora 300 passaggi, si ricava il grafico GRAF.2. Osservando il grafico balza agli occhi un trend di diminuzione di ns con spostamenti prevalenti di particelle da sinistra a destra fino a 60-70 passaggi. Quando abbastanza particelle sono arrivate a destra e alcune trovano la strada del ritorno, si hanno piccole fluttuazioni sovrapposte al trend più o meno pronunciate man mano che ns oscilla intorno a 30 (ns=nd, la morte termodinamica del sistema). Il programma fornisce una media appunto di 31.9, una deviazione standard uguale a 2.89 e un Er=0.09; tale valore, pari al 9%, *almeno nel dominio del grafico*, non sembra cancellare in nessun modo la

freccia del tempo, per cui il processo è essenzialmente irreversibile. Il grafico GRAF.2 riassume anche la tendenza a passare spontaneamente da una situazione più ordinata (più differenziata: es., tutte le 60 particelle nel box di sinistra), ad una più indifferenziata, più disordinata (30 particelle per box), se consideriamo irrilevanti le fluttuazioni. Le particelle solo raramente ritrovano la strada del ritorno da una situazione sempre più omogenea. E' allora irreversibile questo passaggio dall'ordine al disordine. E' questo che individua la presenza di una freccia del tempo come prevista, se avessimo lavorato con molte particelle. Esiste una grandezza fisica di grande fascino, l'entropia, che aumenta di valore man mano che questo processo si esplica e quindi ad essa viene associato lo scorrere unidirezionale del tempo e la sua freccia. I due aspetti dell'ipotesi iniziale sembrano allora corroborati.



**Sintesi sull'entropia e sugli stati dinamici microscopici (spiegazione della freccia del tempo di Boltzmann)** – Ci sono diversi modi equivalenti di enunciare il 2° principio della Termodinamica. Ne sceglio uno certamente abbastanza criptico, dove però appare la grandezza *entropia* di cui vogliamo parlare. In una trasformazione reversibile, la variazione infinitesima di entropia  $dS$  (differenziale esatto della funzione di stato  $S$ ) è uguale al flusso di calore  $\delta Q$  che attraversa il sistema, fratto la temperatura assoluta  $T$  di questo flusso. Era forse più semplice partire da una enunciazione più comprensibile dal senso comune (per es., *Il calore fluisce spontaneamente da un corpo più caldo ad uno più freddo e non viceversa*) e poi dimostrare che questa coincideva con la nostra? L'intervento è più intuibile in partenza, ma molto meno dopo e avrebbe richiesto più spazio! Per il calcolo della variazione entropica è sempre possibile sostituire ad una trasformazione irreversibile, una o più reversibili fra gli stessi estremi. La variazione entropica così calcolata misura il grado di irreversibilità di una trasformazione ( $S_2 - S_1 > 0 \rightarrow$  trasformazione irreversibile; se 0, reversibile). Nel nostro esperimento, facendo il conto <sup>(1)</sup>,  $S_2 > S_1$  e la trasformazione è appunto irreversibile e l'entropia aumenta, come

già accennato. Nella interpretazione cinetico molecolare del 2° principio della Termodinamica, si ammette che in un sistema isolato abbiano luogo spontaneamente quelle trasformazioni che conducono il sistema verso stati di probabilità sempre maggiore, *anche se non sono le uniche possibili*. Gli stati macroscopici (per es., è uno stato: 5 molecole nel 1° box e 1 nel 2°, ovvero 3 e 3...) più probabili sono quelli che corrispondono ad un maggior numero di configurazioni microscopiche (nel nostro esempio, se le molecole sono distinguibili, le configurazioni, nel primo caso, sono solo 6, nel secondo caso, ben 20)<sup>(2)</sup>. Più alto è il numero di questi stati dinamici microscopici più omogeneo e meno differenziato è lo stato macroscopico corrispondente, che per questo appare più disordinato, e c'è più alta probabilità che il sistema nella sua evoluzione passi per questo stato. Il numero delle configurazioni o stati dinamici microscopici corrispondenti ad uno stato macroscopico o termodinamico (es., n1 particelle nel 1° box e n-n1 nel 2°) è calcolato tramite la formula:  $P=n!/[n1! (n-n1)!]$ <sup>(2)</sup>, che, data la difficoltà di calcolo dei fattoriali per un alto numero di particelle, applicando la formula di Stirling:  $n!=(n/e)^n * \sqrt{(2\pi n)}$  e operando algebricamente, si trasforma in  $P=(n/n1)^{n1} * [n/(n-n1)]^{n-n1} * \sqrt[n]{[n/(2\pi n1(n-n1))]}$ , più lunga ma più facile a lavorarci<sup>(3)</sup>. Il programma calcola e costruisce anche il vettore  $P(i)$  che contiene il numero degli stati dinamici microscopici per ogni stato macroscopico durante l'evoluzione del sistema: può essere “graficato” anch’esso e confrontato con gli altri: gli andamenti sono correlati. Lasciamo al lettore interessato il lavoro di fare ipotesi e controllarle e vederne le implicazioni. In questo contesto si ricava che l'entropia di un certo stato i è  $S(i)=K\log P(i)$ , dove K è la costante di Boltzmann e  $P(i)$ , detto *parametro di disordine*, è appunto il numero degli stati dinamici microscopici corrispondenti allo stato termodinamico i. Se vogliamo la probabilità di questi stati dinamici basta dividere  $P(i)$  per  $2^n$  che rappresenta, nel nostro esperimento, i casi possibili o *stati accessibili*<sup>(4)</sup>. Lo stato più probabile è quello con  $n1=n-n1$ , come risultava anche dal GRAF.2 (*stato attrattore dell'equilibrio*).

Se questa è l'interpretazione giusta, la natura è segnata allora dalla storia, da un moto inesorabile verso una degradazione progressiva, una uniformità, un livellamento di tutte le differenze (temperatura, pressione, concentrazione), che conduce irreversibilmente ogni sistema isolato al suo stato di equilibrio di massima entropia, di massimo disordine e, per il teorema di Shanon, di minima informazione. Tale è la freccia del tempo di Boltzmann nel mondo, dovuta al fatto che esso, per qualche ragione recondita, non è uniforme, non è nel suo stato più probabile. Viviamo in un mondo “improbabile”. Il sale si scioglie nell’acqua, il calore diffonde verso luoghi più freddi, gli organismi, dopo un periodo di sviluppo, fioriscono e muoiono ed anche l’Universo procederà infine verso una inesorabile morte, mentre il tempo procede a neutralizzare le differenze.

**Un modo nuovo di “leggere” i risultati sperimentali (la freccia fittizia)** – La interpretazione delle risultanze sperimentali, come già Popper aveva accennato e Feyerabend precisato, non necessariamente è univoca. Ben presto infatti Boltzmann dovette tener conto delle critiche dei fisici della dinamica dove il divenire e l’eternità si identificano, i pendoli perfetti oscillano per sempre e per sempre il mondo ripulito procede mantenendo la propria identità. La sua immagine di riferimento è il GRAF.1 e indizi importanti le fluttuazioni del GRAF.2. *Là le fluttuazioni erano irrilevanti; qui costituiscono il racconto*. La freccia del tempo è un’illusione, questo nostro mondo che procede così rapidamente è un’illusione, l’irreversibilità è solo apparenza dovuta al

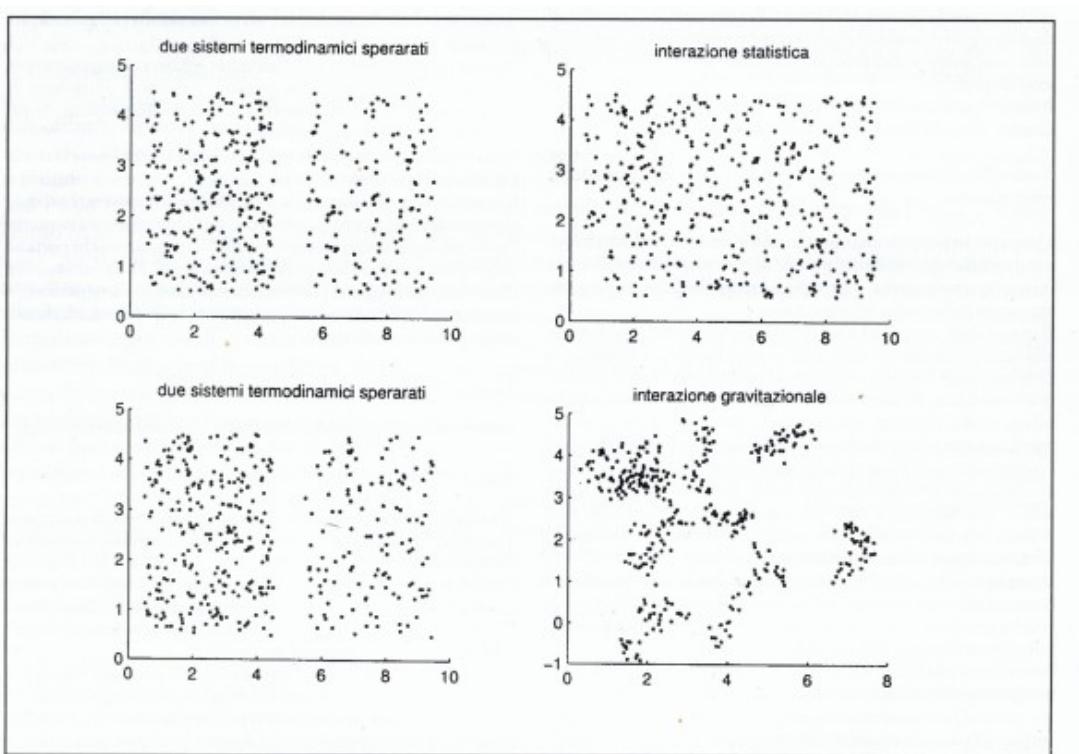
nostro modo grossolano ed approssimativo di misurare attraverso i processi di media; al di là di esso permane l'eternità delle leggi della Dinamica che governano “*un universo trasparente e comprensibile, purificato da tutto ciò che turba la vita degli uomini, la memoria nostalgica e il dolore del passato, il timore e la speranza del futuro*” (Ilya Prigogine e Isabelle Stenger, “Fra il tempo e l’eternità”, Boringhieri, 1989, pag.33). Teorie fondamentali contro teorie solo fenomenologiche: la freccia del tempo gioca solamente in una realtà “sporca”, grossolana, empirica. Non esiste di principio. Basta sapere aspettare, affermava Feynman: se le particelle sono 6, in poco tempo si ha di nuovo la situazione iniziale (GRAF.1); se sono 60 (GRAF.2) serve un tempo forse pari all’età del sistema solare; se sono tante quante quelle contenute in un litro di aria nelle condizioni standard (circa  $10^{20}$ ), sarà necessario un tempo fantascientifico <sup>(5)</sup>, ma il ritorno è assicurato, una fluttuazione riporterà tutte le molecole nel box di sinistra. Il ritorno spontaneo sarà estremamente improbabile, come improbabile è, nel lancio di n monete, il risultato di n “teste”, con n uguale ad uno dei valori nominati (casi favorevoli/casi possibili= $1/2^n$ ) e nessun “diavololetto”, inventato a cavallo dell’inizio del secolo (Bennett C. H. “Diavoletti macchine e il secondo principio”, Le Scienze n.233, 1988), riuscirà mai ad affrettare questo evento. E’ la presenza delle fluttuazioni intorno alla situazione di equilibrio che ci assicura che l’entropia può a volte diminuire. In un tempo lungo si potranno osservare anche gli stati più improbabili: improvvisamente potremmo vedere congelare un lago in piena estate, o ritornare le molecole di un gas nella zona da cui si era espanso o convogliare di nuovo un’onda nella sorgente ecc.. Per il teorema di Poincarè “una serie finita di particelle racchiuse in una scatola e soggette alle leggi del moto di Newton ritorna sempre necessariamente al suo stato iniziale ( o perlomeno ad uno stato molto vicino) dopo un periodo di tempo sufficientemente lungo.... La ciclicità dello stato del gas può essere ricondotta alla sottostante simmetria temporale delle leggi di Newton, le quali non distinguono il passato dal futuro.” (Paul Davis “I misteri del tempo”, Mondadori, 1996, pag. 30). Fu J. Loschmidt a dare il colpo di grazia: quando tutte le molecole acquisteranno contemporaneamente velocità di segno opposto, il sistema tornerà al suo stato iniziale, perché il moto molecolare, retto dalle leggi di Newton, è reversibile.

### **ALCUNI “STRANI” PENSIERI SULLA FISICA DEI SISTEMI COMPLESSI (la freccia del tempo è una realtà)**

Nei sistemi complessi che evolvono in maniera non lineare si verificano spesso processi di retroazione di auto-rafforzamento. Piccoli cambiamenti possono sortire effetti drammatici, perché una retroazione a feedback positivo li può amplificare ripetutamente. Sono tali processi di retroazione non lineare i responsabili di una continua instabilità sempre più marcata fino all’apparizione improvvisa (*biforcazioni*) di nuove forme di ordine. Analogo matematico di questi anelli di retroazione è il processo non lineare di iterazione in cui una funzione opera ripetutamente su se stessa (vedere per es., F. Capra “La rete della vita”, Rizzoli, 1997, cap.6).

*Ma se è vero allora che bastano perturbazioni impercettibili, non rilevate neppure dagli strumenti più precisi, per disturbare pesantemente, a lungo andare, l’evoluzione di sistemi complessi, che significa la “irrilevanza delle interazioni reciproche”* (una delle condizioni iniziali del nostro esperimento)? A lungo andare non è forse possibile che la

situazione finale sia più ordinata e organizzata di quella iniziale, producendo, per es., alla fine, non un ritorno al passato nel tempo reversibile, ma una situazione fantasiosa a clusters con addensamenti di particelle solo in alcune zone dello spazio racchiuso dai due boxes? Non lo so, nel senso che non esiste risposta certa. Ma so per certo che i fisici della dinamica aspettano un ritorno del sistema al passato con diminuzione di entropia, in tempi dell'ordine di quelli calcolati da Czuber <sup>(5)</sup> e certamente un sistema complesso allontanandosi sempre più dall'equilibrio, come accennato, può fare cose imprevedibili quando raggiunge una biforcazione e di sicuro le particelle non troveranno più le loro traiettorie e la speranza di ritorno al passato. Allora sarà inutile aspettare! Il caso non gioca più da solo. Altrimenti si avrebbe una pura interazione termodinamica che porta all'equilibrio e alla morte (Boltzman), insieme ad un barlume di speranza di ritorno ma solo a livello di principio (fisici della dinamica). Insomma non si tratta più di attendere il ritorno delle 60 molecole nel box di sinistra come se il tempo fosse reversibile, o rassegnarci all'effetto drammatico della freccia Boltzmaniana, ma ci aspettiamo qualcosa di nuovo e imprevisto e la diminuzione entropica qui coinvolta acquista significati nuovi. Se le molecole verranno correlate in qualche modo *da anelli di retroazione multipli* descritti da equazioni non lineari, il sistema potrà allontanarsi dall'equilibrio sempre di più verso una serie di *biforcazioni* produttrici di ordine più elevato assolutamente imprevedibile. Non si tratta di un ritorno ma di una situazione creata ex novo impensabile e impensata, dove la diminuzione entropica crea e costruisce e il tempo di attesa non avrà niente a che vedere con quello calcolato da Czuber (freccia del tempo di Prigogine). Forse potrebbe essere la stessa gravità a giocare il ruolo di trasmettitrice dei messaggi interattivi nelle retroazioni. Sono conosciuti infatti comportamenti abbastanza anomali e apparentemente paradossali in meccanica dove agisce la gravità. Un satellite in orbita, se rallentato dai razzi o dall'attrito, perde quota ed energia, spiralizzando lentamente verso terra, aumentando di velocità <sup>(6)</sup>. Il paradosso sta nel fatto che il frenamento fa aumentare la velocità! In un sistema termodinamico molto più complesso, dove la temperatura è legata in qualche modo alla velocità media delle particelle costituenti il sistema ( $V^2=cost*T$ ), sottoposte a interazioni gravitazionali anche molto deboli, il paradosso è certamente più eclatante; forzando l'analogia, una sottrazione di energia gravitazionale porterebbe ad un aumento della velocità media e quindi della temperatura e viceversa. *Uno strano sistema a capacità termica negativa*, così viene chiamato dall'accademico Marco Rosa-Clot nel suo articolo “*Può l'ordine nascere dal caso?*” (Il Sillabario, N.1-1999), a cui in questa discussione facciamo riferimento. Sembra così che l'interazione gravitazionale applicata ad un sistema statistico possa competere con l'equilibrio termodinamico e se il sistema evolve abbastanza rapidamente da impedire continuamente il suo raggiungimento, anche se il sistema è totalmente isolato, “*nascono strutture organizzate di complessità ed ordine crescente; in particolare su scala globale si creano differenze di temperatura e di concentrazione in violazione al II° Principio*” della Termodinamica. Una simulazione al computer che lascia mescolare due sistemi di particelle a diversa densità, ciascuno in equilibrio, prevede ben presto una situazione di omogeneità statistica, come previsto dalla termodinamica, a meno che non introduciamo fra le particelle una interazione gravitazionale anche molto debole; in tal caso stranamente le particelle “clusterizzano” (M. Rosa-Clot, 1999) con aumento di temperatura sostanziando una freccia del tempo! Ma le forze di gravità non sono forse da considerare forze interne al sistema? (controntare con la precedente Fig.2).



**Figure 1** - Due modelli 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?

E' questo il modo in cui si formano le galassie e le stelle? Non c'è ancora la risposta. Ma a mio avviso qui si tratta davvero di cose strane, se l'espansione dell'universo è necessariamente adiabatica, senza scambio di calore con l'esterno - un sistema esterno se esiste deve essere compreso nell'universo che, per definizione, ingloba tutti i sistemi - per cui l'aumento di entropia è inesorabile e la morte termica certa per il II° principio della termodinamica! Non mi sembra neppure si tratti del semplice mantenimento di uno stato stazionario tenuto lontano dall'equilibrio con bilanciamenti fra neg-entropia e entropia, come spesso si legge. Come a dire: si riesce a ritardare la morte termodinamica mantenendoci lontani dall'equilibrio col "cibarsi" di ordine fornito dall'esterno (sistema aperto). "...se talvolta 'il disordine degenera in ordine', tutto ciò è... un'apparenza di ordine a spese di un disordine ancora maggiore prodotto nell'ambiente circostante. I sistemi viventi hanno perciò bisogno, per mantenere le loro strutture, di un flusso continuo di entropia negativa dall'ambiente esterno e di cedere a questo un'ancora maggiore quantità di entropia positiva" (Strutture dissipative). "Sistemi lontani dall'equilibrio producono strutture, purchè vengano mantenuti lontano dall'equilibrio. Il flusso di energia provoca fluttuazioni nella struttura dissipativa. Questa si riorganizza tendendo ad un livello più alto di complessità.". (E. Tiezzi "Fermare il tempo", Cortina editore, 1996, cap.3, pag.36). Qui si tratta invece di un *sistema isolato* che non scambia niente con l'esterno; eppure, forse con la mediazione della gravità che ora ostacola

l'equilibrio ora attiva sistemi a capacità termica negativa, nasce una freccia del tempo inesorabile e creatrice, dal semplice al complesso, non verso il passato ma verso il futuro, al di là di tutte le critiche precedenti, una freccia che sembra rimandare a quella di cui parlano il mito e il sacro, accennata all'inizio. A mio avviso è plausibile che sia l'azione di questa freccia la responsabile della strana improbabilità dello stato attuale nel nostro universo, già accennata, di cui Boltzman si meravigliava; stato troppo ordinato, troppo lontano dall'equilibrio, effetto di una diminuzione eccezionalmente rara di entropia, altrimenti inspiegabile, così lontani ormai dalla sua origine (circa 15 miliardi di anni). Comunque le sensazioni di stranezza e le perplessità di interpretazione nascono tutte da un trucco: non si può argomentare con le regole usuali della Termodinamica in sistemi lontani dall'equilibrio! C'è bisogno di una nuova fisica. Infatti "...La discussione è aperta, ha risvolti teorici e formali molto complessi ed appassiona fisici ed epistemologi: non aspettiamoci una rapida conclusione. Ma esistono poi risposte definitive?" (M. Rosa-Clot, 1999).

*Muovendomi lungo un ramo di iperbole, l' Universo nel suo complesso è più vicino alle nubi, alle albe e tramonti, ai mari in tempesta, alle chiome degli alberi, ai vortici dei cicloni, agli occhi delle donne a primavera, piuttosto che alle strutture dei cristalli!* Stephen Wolfram, come il grande Galileo, che 'inventò' una nuova dinamica per sostenere e 'pubblicizzare' la Cosmologia Copernicana, sta lavorando ad una 'teoria generale del Tutto'. Nei prima anni del 2000 ha pubblicato il grande libro della sua vita "A NEW KIND OF SCIENCE", più di mille pagine di migliaia di algoritmi e loro outputs nel suo potente linguaggio, MATHEMATICA (versioni 4.X - 6.X). E' un primo, a mio avviso, geniale tentativo per dare uno sbocco alle teorie fisiche della complessità, oggi in voga, che altrimenti devono rassegnarsi (nonostante gli entusiasmi) all'inconoscibile, ovvero a scoprire con delusione dove sta andando la Natura solo dopo che si è connotata in esperienza. L'idea è che alcune parti del 'programma universale', irriducibili fino in fondo al razionale delle geometrie e della fisica (se non sbaglio, le previsioni più rosee nell'evoluzione di sistemi naturali complessi, con la fisica del Caos, non superano un mese o due) siano riducibili ad un gruppo di algoritmi (insieme di istruzioni in sequenza), una specie di programmi al computer! Il LIBRO non contiene né una formula matematica né una formula fisica! Wolfram sembra pensare al Cosmo come un Ente simile ad un enorme Computer (anche se, forse, non riducibile ad esso) che programma se stesso e la sua evoluzione, in un linguaggio simile od analogo al suo software MATHEMATICA, che, addirittura, sa elaborare questi algoritmi con una velocità molto superiore della Natura stessa, con un riflesso inimmaginabile sulle previsioni del futuro!

"*Siamo il fiume che invocasti, Eraclito. Siamo il Tempo*", dalla poesia L'Artefice di Borges.

Dott. Piero Pistoia

#### NOTE

(1) Consideriamo il nostro esperimento una espansione nel vuoto di un gas perfetto che raddoppia il suo volume. Allora, per il I° principio della Termodinamica,  $L=0$ ,  $Q=0$ ,  $\Delta U$  (variazione energia interna)=0 e  $\Delta T=0$ . Si tratta di una trasformazione irreversibile, quindi se vogliamo calcolarne la variazione di entropia è necessario sostituirvi una trasformazione reversibile qualsiasi con gli stessi estremi. Si considera come trasformazione sostitutiva una isotermia reversibile, che opera in modo completamente diverso, ma che porta dal volume  $v_1$  a  $2v_1$ . Poiché  $\delta Q=\delta L=pdV$  ( $\Delta U=0$  perché la temperatura è costante) e  $p=nRT/V$ ,  $dS=\delta Q/T=pdV/T = nRdV/V$ . Integrando fra  $v_1$  e  $2v_1$  si ottiene  $\Delta S=nR\ln 2 > 0$ .

(2) devo contare i modi in cui posso distribuire 6 elementi in gruppi di 5 (oppure di 1), se ogni gruppo differisce dagli altri per almeno un elemento. Si deve trovare cioè il numero delle Combinazioni di 6 elementi a 5 a 5, ovvero di 6 elementi a 1 a 1; in generale di  $n$  elementi a  $k$  a  $k$  ( $C_{n,k}$ ). Dalla matematica sappiamo calcolare questo numero:  $C_{n,k} = n!/[k!(n-k)!]$ . Così  $C_{6,5}=C_{6,1}=6$  e  $C_{6,3}=20$ .

(3)Forniamo alcuni suggerimenti:  $e^n$  al numeratore si semplifica con  $e^{n^2}e^{(n-n)}$  al denominatore; anche  $\sqrt{2\pi}$  si semplifica; a  $n^n$  al numeratore si sostituisce  $n^{n^2}n^{(n-n)}$ .

(4) Consideriamo una molecola entro un volume V diviso in cellette di volume v1. Il numero delle cellette è  $V/v_1=N_c$ . La probabilità che una molecola sia in una di quelle cellette di volume v1 è  $v_1/V$ , perchè i casi favorevoli sono 1 e quelli possibili  $N_c=V/v_1$ . Se consideriamo due molecole, la probabilità che ambedue si trovino contemporaneamente in una celletta è ancora casi favorevoli/casi possibili. I casi favorevoli sono ancora 1. Per i casi possibili, se pongo una delle molecole in una cella l'altra può occupare le altre N cellette (compresa quella in cui sta la prima); ma le posizioni possibili della prima sono ancora N, per cui i casi possibili sono  $N_c^2=(V/v_1)^2$ . Estendendo a n molecole, i casi favorevoli sono ancora 1 (tutte le n molecole in una cella) e i casi possibili  $N_c^n=(V/v_1)^n$ . Nel caso che  $v_1=1/2V$ , i casi possibili diventano  $(2)^n$  e la probabilità che tutte le molecole si trovino in una stessa cella è  $(1/2)^n$ .

(5) Come ha controllato sperimentalmente Czuber, quando in un sistema si fa un numero sufficientemente elevato di osservazioni N e in quel sistema un certo fenomeno ha una probabilità  $\pi$  di verificarsi, quel fenomeno si realizzerà circa  $n_v=\pi N$  volte. La probabilità che le n molecole del nostro esperimento tornino tutte insieme per es. nel box di sinistra, è (vedi nota 5):  $(1/2)^n$ . Per osservare il fenomeno pensiamo virtualmente di usare una cinepresa che faccia 10 fotogrammi al secondo. Se eseguiamo 1000 fotogrammi, sarebbe come osservare il fenomeno per 100 secondi. Così per n=6 (prima fase dell'esperimento):  $n_v=\text{numero di volte in 100 sec} = N\pi=1000/2^6$ , circa 16 volte in 100 secondi; ogni sei secondi circa tornerebbero tutte nel box di sinistra. Per n=60, ponendo  $n_v=1$ :  $1=X/2^{60}$ , si ricava X che è il numero dei fotogrammi per un solo ritorno di tutte le n molecole nel box di sinistra e dividendo per 10 ottengo i secondi. I secondi per il ritorno risultano circa  $10^{17}$ ; e poiché  $1\text{sec}=3.169 \cdot 10^{-8}$  anni, il numero degli anni che si deve aspettare per il ritorno sono circa  $4 \cdot 10^{17} \cdot 10^{17} \cdot 10^{-8}$  anni, quasi l'età del Sistema Solare.

(6)  $mV^2/r = GmM_T/r^2$  (forza centripeta=forza di gravità);  $V^2=GM_T/r$  e  $E_{cin}=GmM_T/(2r)$ ;  $E_{pot}=-GmM_T/r$  che, negativa (energia di attrazione), in valore assoluto è il doppio dell'energia cinetica; per cui  $E_{tot}=E_{pot}+E_{cin}=-GmM_T/(2r)$ . Il valore assoluto dell'energia totale è uguale all'energia cinetica e alla metà del valore assoluto dell'energia potenziale.

Se  $m=1 \text{ Kg}$  e  $r_1=1000 \text{ Km}$ , abbiamo:  $E_{tot1}=-GM_T(1/[2*(R_T+r_1)])$

Se  $m=1 \text{ Kg}$  e  $r_2=500 \text{ Km}$ , abbiamo:  $E_{tot2}=-GM_T(1/[2*(R_T+r_2)])$

In unità del Sistema MKS, che non esplicitiamo,  $GM_T=4 \cdot 10^{14}$ ;  $R_T+r_2=6.87 \cdot 10^6$ ;  $R_T+r_1=7.37 \cdot 10^6$ .

Poiché  $r_1 > r_2$ , l' $E_{tot2} < E_{tot1}$ ; facendo il conto l'energia totale, passando da 1000 a 500 Km, diminuisce di  $2 \cdot 10^6 \text{ J}$  e l'energia potenziale diminuisce del doppio. L'energia cinetica invece aumenta di  $2 \cdot 10^6 \text{ J}$ .