

IL PROBLEMA DELLA FRECCIA DEL TEMPO

Introduzione

Il problema della freccia del tempo, nella sua accezione più generale, può considerarsi complementare o comunque intimamente connesso al problema dell'irreversibilità. Se infatti l'irreversibilità constatata nella maggior parte dei processi naturali ha un carattere reale, allora le leggi fisiche che ne stanno alla base portano inevitabilmente il cosmo verso configurazioni sempre più lontane dallo stato iniziale ed inoltre sanciscono la non equivalenza delle due possibili orientazioni della direzione del tempo: verso un passato scivolato dietro le spalle e tuttavia attingibile per il tramite dei ricordi, oppure verso un futuro da stagliarsi innanzi alla fronte e tuttavia discernibile per il tramite delle previsioni. Se invece l'irreversibilità dei processi naturali ha un carattere apparente, allora il cosmo è destinato a ritornare, anche se nel corso di ere inimmaginabilmente lunghe, verso lo stato iniziale, e la non equivalenza delle due possibili orientazioni della direzione del tempo si rivela una pura convenzione dovuta alle circostanze, allo stesso modo della non equivalenza di due possibili orientazioni di una particolare direzione dello spazio (alto e basso) in presenza del campo gravitazionale, ad esempio, della Terra.

La contrapposizione fra le due alternative citate potrebbe ridursi alla contrapposizione fra un tempo *aperto* dove l'universo (oppure una sua particolare regione) non ritorna mai su se stesso ed ogni configurazione è unica e irripetibile, e un tempo *chiuso* dove l'universo (oppure una sua particolare regione) dopo cicli più o meno lunghi riprende ogni

configurazione assunta in precedenza.

In questa accezione, se la non equivalenza delle due possibili orientazioni della direzione del tempo, che caratterizza gli eventi naturali, è qualcosa di reale, che trova il suo fondamento nelle proprietà intrinseche dell'universo, come si concilia con il carattere assolutamente reversibile delle leggi del moto, che pure stanno alla base (almeno nei casi più semplici) di quegli stessi eventi naturali? Se viceversa la non equivalenza delle due possibili orientazioni della direzione del tempo è qualcosa di apparente, che deriva dai limiti naturali degli osservatori e in assenza dei quali verrebbe meno, come si concilia con il carattere manifestamente irreversibile dei processi termodinamici, che pure regolano l'evoluzione dell'intero cosmo?

In termini più elementari, un osservatore coevo e coeterno all'universo sarebbe in grado di stabilire, assistendo alla proiezione di una pellicola riprodotte un tratto arbitrario ma prefissato di evoluzione dell'universo, se la proiezione in questione riproduca gli eventi così come hanno avuto luogo oppure la pellicola stia girando a rovescio?

La risposta a tali domande costituisce, nella sostanza, la soluzione al problema della freccia del tempo.

La freccia del tempo informatica

Con il termine *freccia del tempo*²² ci si intende riferire ad ogni criterio che permetta di stabilire, assistendo alla proiezione di una pellicola riprodotte un tratto arbitrario ma prefissato di evoluzione relativamente a un sistema fisico assegnato, se la proiezione in questione riproduca gli eventi così come hanno avuto luogo oppure la pellicola stia girando a rovescio. La freccia del tempo può essere (stando alle attuali conoscenze) di tre tipi: informatica, termodinamica, cosmologica.

La freccia del tempo informatica²³ deriva dal fatto che relativamente

²²Tale denominazione è stata usata per la prima volta da Eddington (1928) nella sua proposta di interpretare il rapporto di successione relativamente a due stati di un sistema fisico assegnato in termini di variazione di entropia, vale a dire lo stato di entropia maggiore è quello successivo nel tempo.

²³Preferiamo parlare di freccia del tempo informatica anziché psicologica (termine

ad ogni apparato in grado di raccogliere un dato tipo di informazione e con memoria idealmente infinita, uno stato sarà successivo nel tempo ad un altro se e solo se la quantità di informazioni raccolte sarà maggiore²⁴. Così dall'esame di due fotogrammi (non necessariamente contigui) appartenenti ad una pellicola riprodotte, ad esempio, la nostra vita, siamo in grado di stabilire quale fotogramma corrisponda ad una maggiore quantità di ricordi e quindi se la pellicola abbia girato normalmente oppure a rovescio. Tuttavia, nonostante le apparenze, mediante la freccia del tempo informatica non si è in grado di stabilire se le due possibili orientazioni della direzione del tempo siano intrinsecamente non equivalenti, oppure se una tale non equivalenza sia qualcosa di illusorio, che deriva dai limiti umani e in assenza dei quali verrebbe meno. Cerchiamo di illustrare meglio questo concetto con un esempio.

Con riferimento ad un treno a velocità costante lungo un binario rettilineo in un paesaggio piatto senza altri punti di riferimento che i pali della linea elettrica, se i vetri dei finestrini sono chiusi un passeggero è in grado di fare le seguenti considerazioni: (i) i pali si succedono dalla fronte alla coda del treno; (ii) si ha informazione sui pali passati; (iii) si può ottenere soltanto previsione sui pali futuri. Sulla base di tali asserzioni, tuttavia, non si ha modo di stabilire se le due possibili orientazioni della direzione dello spazio relativamente al binario siano intrinsecamente non equivalenti, come i limiti naturali degli osservatori, simbolizzati dal finestrino chiuso nell'esempio riportato, indurrebbero a ritenere. Al riguardo, è importante osservare che: 1) se il finestrino fosse aperto, il passeggero entro certi limiti²⁵ potrebbe avere la stessa informazione sui pali ai due lati rispetto a lui; 2) se il passeggero si trovasse su un treno che percorresse la linea nel senso opposto a parità di altre condizioni, l'unica conseguenza sarebbe l'inversione di ruolo tra

usato da S. Hawking, vedasi bibliografia) o storica (termine usato da D. Layzer, vedasi bibliografia) in quanto la prima denominazione ci sembra di portata più generale.

²⁴A rigore di termini, gli stati considerati devono essere separati da un lasso di tempo sufficientemente elevato da consentire la raccolta di nuove informazioni; in caso contrario, gli stati considerati apparirebbero coevi.

²⁵Vale a dire entro un raggio sufficientemente piccolo. Viceversa per distanze sufficientemente elevate si disporrebbe di informazioni sui pali passati, ma non sui pali futuri.

i pali passati e i pali futuri; 3) l'effetto relativistico della dilatazione dei tempi si può rappresentare nel modo seguente. Ammesso che il passeggero possa muoversi a qualsiasi velocità non superiore alla velocità della luce, che le porte di intercomunicazione possano aprirsi soltanto procedendo dalla testa alla coda del treno, e infine che questo sia sufficientemente lungo, il passeggero che si muovesse nel senso anzidetto, a velocità costante, vedrebbe i pali al suo fianco succedersi con frequenza tanto più bassa quanto maggiore è la sua velocità, fino a vedere sempre lo stesso palo quando la sua velocità fosse uguale e opposta a quella del treno.

Come, nell'esempio riportato, la freccia dello spazio relativamente al binario è un'illusoria apparenza conseguente al movimento del treno e all'impossibilità del passeggero di affacciarsi dal finestrino, così la freccia del tempo informatica potrebbe parimenti costituire un'illusoria apparenza dovuta allo scorrimento del cosmo nell'alveo di una quarta dimensione ed ai limiti naturali degli osservatori.

La freccia del tempo termodinamica

La freccia del tempo termodinamica deriva dal fatto che, relativamente ad ogni sistema fisico isolato, uno stato sarà successivo nel tempo ad un altro se e solo se l'entropia corrispondente sarà maggiore²⁶. Così dall'esame di due fotogrammi (non necessariamente contigui) appartenenti ad una pellicola riprodotte, ad esempio, il sistema solare, siamo in grado di stabilire quale fotogramma corrisponda ad una maggiore quantità di entropia e quindi se la pellicola abbia girato normalmente oppure a rovescio. Nell'ambito di una termodinamica fenomenologica, in quanto tale completamente avulsa dalla meccanica e quindi dalla teoria cinetica della materia, non v'è dubbio che alla crescita dell'entropia

²⁶A rigore di termini, almeno uno degli stati considerati deve corrispondere ad una configurazione del sistema lontana dall'equilibrio termodinamico (si pensi ad una bombola contenente gas situata in una camera stagna in cui è stato fatto il vuoto, poco dopo l'apertura del rubinetto della bombola); in caso contrario, vale a dire ad equilibrio termodinamico raggiunto, gli stati considerati apparirebbero coevi. Tuttavia un inconveniente di questo tipo viene meno, se si fa riferimento al sistema isolato costituito dall'intero universo.

faccia riscontro l'intrinseca non equivalenza delle due possibili orientazioni della direzione del tempo e lo stato di morte termica, amorfa coalescenza di tutte le masse ponderabili, costituisca l'ineluttabile destino dell'universo²⁷. D'altra parte, la validità delle leggi del moto non pregiudica il ritorno del cosmo (rappresentato semplicemente come un gas ideale) verso uno stato precedentemente assunto: al riguardo, basta infatti conferire ad ogni suo costituente una velocità uguale e opposta a quella effettivamente posseduta²⁸, oppure aspettare per un periodo sufficientemente lungo²⁹.

Queste due posizioni, apparentemente inconciliabili, trovano una spiegazione naturale nell'ambito di una termodinamica statistica, dove l'equilibrio termodinamico di un sistema fisico corrisponde allo stato

²⁷Con riferimento, ovviamente, alla concezione newtoniana di un universo statico e disomogeneo, con densità di materia massima al centro (identificato con il baricentro del sistema solare) e decrescente via via fino ad annullarsi all'estremo confine, oltre il quale è soltanto il vuoto. Si ricordi che il concetto di morte termica è stato formulato per la prima volta da Clausius e da Kelvin, intorno al 1852. Al riguardo, non ci sembra fuori luogo citare il pensiero di Boltzmann (1898, *Vorlesungen über Gastheorie*, vol. II, cap. VII, § 89, ed. J.A. Barth, Leipzig):

Così la termodinamica generale tiene per certo l'invariabile irreversibilità di tutti i processi naturali. Assume una funzione (l'entropia) i cui valori possono solo cambiare in una direzione (per esempio, possono solo aumentare) per ogni evento che ha luogo in natura. Così essa distingue ogni stato successivo del mondo da ogni stato precedente grazie al maggior valore dell'entropia. La differenza dell'entropia dal suo valore massimo, che è il fine di tutti i processi naturali, decrescerà sempre. A dispetto dell'invarianza dell'energia totale, la sua trasformabilità diventerà sempre più piccola, gli eventi naturali diventeranno sempre più confusi e ininteressanti ed ogni ritorno ad un precedente valore dell'entropia è escluso.

²⁸È questa la sostanza del paradosso della reversibilità, formulato da Loschmidt (1876-1877); per maggiori dettagli, si rimanda all'articolo "*Il problema dell'irreversibilità*", degli stessi autori (vedasi bibliografia). Qui vogliamo soltanto osservare che sostituire, per ogni costituente di un dato sistema fisico (nella fattispecie, l'intero cosmo), la relativa velocità con una uguale ed opposta, corrisponde a quello che nel linguaggio della microfisica è chiamato *inversione temporale*.

²⁹È questa la sostanza del paradosso della ricorrenza, formulato da Zermelo (1896); per maggiori dettagli, si rimanda all'articolo "*Il problema dell'irreversibilità*", degli stessi autori (vedasi bibliografia).

macroscopico più probabile e l'entropia è definita relativamente ad ogni stato macroscopico (anche lontano dall'equilibrio) in termini di probabilità di quello stesso stato³⁰. In particolare, con riferimento al sistema fisico costituito dall'intero cosmo (rappresentato semplicemente come un gas ideale), lo stato macroscopico più probabile corrisponde allo stato di morte termica, altrettanto inevitabile nel lontano passato quanto nel lontano futuro: un evento altamente improbabile ha allontanato l'universo dallo stato di equilibrio, per cui il ritorno a tale stato si rivela necessario e ineluttabile come pure, dopo un periodo sufficientemente ampio, una successiva dipartita, e così via. Al tempo *aperto* della termodinamica fenomenologica si contrappone un tempo *chiuso* dove passato e futuro sono equivalenti, almeno per ere sufficientemente lunghe³¹.

³⁰Ricordiamo che, nell'ambito della termodinamica statistica, l'entropia di un sistema fisico isolato è definita come:

$$S = k \log W + \text{cost.} \ ;$$

equazione formulata da Boltzmann nel 1896, dove k rappresenta la costante di Boltzmann, W la probabilità relativa allo stato macroscopico considerato, e la costante additiva si può esplicitare imponendo opportune condizioni al contorno.

³¹Più precisamente, con riferimento ad un minimo relativo di entropia in un sistema fisico isolato, la ricorrenza della configurazione avrà luogo in un tempo tanto più lungo, quanto più pronunciato è il minimo in questione (Fig. 4.15). La curva comprensiva della parte tratteggiata si riferisce ad un evento spontaneo (nella realtà, inosservabile), mentre la parte continua della curva si riferisce ad un evento provocato, ad esempio la diffusione, in una camera stagna in cui è stato fatto il vuoto, del gas contenuto in una bombola successivamente all'apertura del rubinetto. Al riguardo, non ci sembra fuori luogo citare il pensiero di Boltzmann (1898, *Vorlesungen über Gastheorie*, vol. II, cap. VII, § 88, ed. J.A. Barth, Leipzig):

Senza dubbio è il segno del tempo che costituisce la differenza caratteristica tra uno stato ordinato [caratterizzato da un basso valore dell'entropia] e uno disordinato [caratterizzato da un alto valore dell'entropia]. Se negli "stati iniziali" della rappresentazione meccanica del mondo, si rovesciano le direzioni delle velocità, senza cambiare il loro valore scalare o le posizioni delle componenti elementari del sistema e se si seguono gli stati del sistema all'indietro nel tempo, allora, presumibilmente, ci si imbatte prima in uno stato improbabile e si raggiungono poi degli stati sempre più probabili. Solo in quei periodi del tempo in cui il sistema passa da uno stato molto improbabile [caratterizzato da un valore molto basso dell'entropia] ad uno più

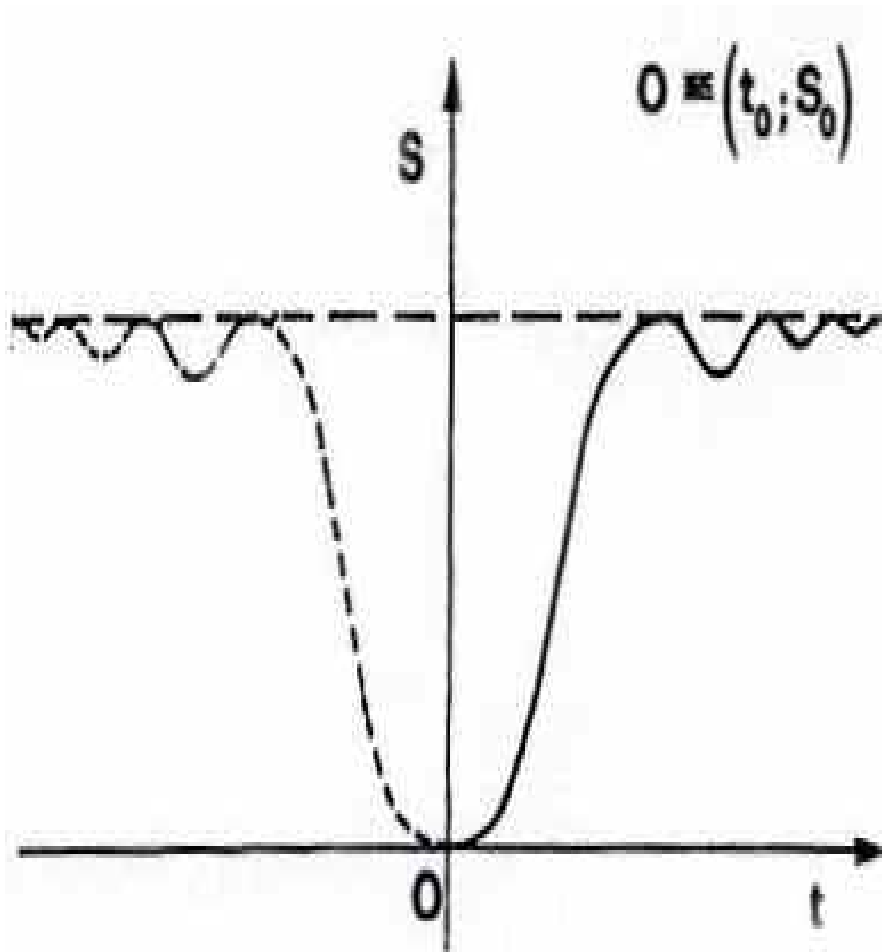


Figura 4.15 : Il carattere apparente della freccia del tempo termodinamica. Se si applicasse il paradosso della reversibilità ad un punto qualsiasi sulla parte continua della curva, rappresentante l'aumento dell'entropia in un processo irreversibile, si assisterebbe alla diminuzione dell'entropia dal valore massimo, corrispondente alla retta tratteggiata, al valore minimo, relativo all'istante iniziale, e quindi ad un nuovo aumento lungo la parte tratteggiata della curva. La simmetria globale della curva denuncia l'apparenza della freccia del tempo termodinamica.

Le conclusioni esposte non sono in contraddizione neppure con l'idea di un cosmo infinitamente esteso. Infatti in questa accezione è sufficiente concepire l'universo nel suo complesso in equilibrio termico, con regioni relativamente piccole³² che fluttuano notevolmente dall'equilibrio termico, nel senso sia di un allontanamento che di un avvicinamento, dove la durata di queste fluttuazioni è pure piccola³³. Pertanto, relativamente all'universo inteso nella sua globalità, le due possibili orientazioni della direzione temporale risultano intrinsecamente equivalenti alla stessa stregua delle due possibili orientazioni di una direzione spaziale; d'altra parte, in corrispondenza ad un generico mondo individuale, riesce possibile fissare una convenzione che permetta di discriminare il passato dal futuro, alla stessa stregua in cui, sulla superficie di un generico pianeta, riesce possibile fissare una convenzione che permetta di discriminare il basso dall'alto³⁴. In conseguenza del fatto che

probabile [caratterizzato da un valore più alto dell'entropia] gli stati cambiano nella direzione positiva del tempo in modo differente che in quella negativa.

e più avanti, a proposito della non equivalenza fittizia delle due possibili orientazioni della direzione del tempo:

Non si può asserire che questa conseguenza [la morte termica dell'universo] contraddica la nostra esperienza, anzi, essa sembra una plausibile estrapolazione della nostra attuale conoscenza del mondo. Eppure, con tutto il dovuto riconoscimento alla cautela che va osservata nell'andare oltre le conseguenze dirette dell'esperienza, va asserito che queste conseguenze non sono affatto soddisfacenti e che la scoperta di un modo soddisfacente di eliminarle sarebbe altamente desiderabile, sia che uno immagini il tempo come infinito o come un ciclo chiuso. In ogni caso dovremmo considerare l'univoca direzionalità del tempo offertaci dall'esperienza [la freccia del tempo termodinamica] come una mera illusione che proviene dal nostro punto di vista particolarmente ristretto.

³²Dello stesso ordine di grandezza dell'universo osservabile, denominate da Boltzmann *mondi individuali*.

³³Dello stesso ordine di grandezza dell'età del nostro mondo individuale al raggiungimento dello stato di morte termica, denominate da Boltzmann *eoni*.

³⁴E quindi le due possibili orientazioni di una qualsiasi direzione spaziale, atteso il fatto che tutte le possibili direzioni spaziali sono individuate dalle infinite rette passanti per il centro del pianeta.

ogni mondo individuale si trova, all'inizio del corrispondente eone, in uno stato altamente improbabile (in quanto è massimo l'allontanamento dall'equilibrio termico), qualsiasi osservatore è in grado di distinguere l'orientazione della direzione del tempo, da stati più probabili a stati meno probabili, dall'orientazione della direzione del tempo, da stati meno probabili a stati più probabili, e chiamerà la prima, *passato*, e la seconda, *futuro*³⁵.

³⁵Da queste considerazioni discendono implicitamente due conseguenze importanti: 1) l'inizio dei mondi individuali e degli eoni corrisponde al massimo allontanamento dall'equilibrio termico, e la fine al raggiungimento dell'equilibrio termico; 2) la presenza di osservatori non può essere anteriore all'inizio dei mondi individuali e degli eoni. Si vede quindi come Boltzmann abbia concepito la presenza degli osservatori vincolata all'allontanamento dall'equilibrio termico della fluttuazione destinata a diventare un mondo individuale, e pertanto una prima enunciazione di quello che attualmente viene denominato *principio antropico* e che a nostro avviso sarebbe più corretto denominare *principio entropico*. Al riguardo, non ci sembra fuori luogo citare il pensiero di Boltzmann (1898, *Vorlesungen über Gastheorie*, vol. II, cap. VII, § 90, ed. J.A. Barth, Leipzig):

Ci si chiede se l'irreversibilità del tempo, che l'esperienza rivela in tutti i processi naturali noti, sia coerente con l'idea di un universo illimitato; se l'apparente unidirezionalità del tempo sia coerente con una sua estensione infinita o con una sua natura ciclica.

Chi tenta di rispondere a queste domande nel senso affermativo deve usare come modello del mondo un sistema dove la variazione temporale è determinata da equazioni in cui le direzioni positiva e negativa del tempo sono equivalenti e per mezzo delle quali l'apparenza dell'irreversibilità sul lungo periodo è spiegabile da specifiche assunzioni. Ma è proprio quel che accade con la concezione atomistica del mondo.

Possiamo concepire il mondo come un sistema meccanico formato da un numero enorme di costituenti, con età immensamente alta, sicché le dimensioni di quella parte che contiene le nostre "stelle fisse" risultino molto piccole se paragonate all'estensione dell'universo, e gli intervalli di tempo che noi denominiamo "ere eterne" (eoni) analogamente siano molto piccoli se confrontati con l'età dell'universo. Allora nell'universo, che complessivamente è in equilibrio termico e quindi morto, si troveranno qua e là regioni relativamente piccole delle stesse dimensioni della nostra galassia (che chiameremo "mondi individuali"), che durante il tempo relativamente breve degli eoni, fluttuano notevolmente dall'equilibrio termico, quelle per cui la probabilità degli stati cresce [si avvicinano all'equilibrio termico] essendo altrettanto numerose di quelle per cui la probabilità degli stati decresce [si allon-

Le considerazioni esposte mostrano come, nonostante le apparenze, mediante la freccia del tempo termodinamica non si è in grado di stabilire se le due possibili orientazioni della direzione del tempo siano intrinsecamente non equivalenti, oppure se una tale non equivalenza sia qualcosa di illusorio, dettato dall'angustia dei mondi individuali e dalla brevità degli eoni, volte a mascherare ogni possibile inversione della freccia del tempo termodinamica. In effetti, prima dell'inizio dell'eone lo scorrimento del tempo dal passato al futuro corrisponde a transizioni da stati più probabili a stati meno probabili, mentre dopo l'inizio dell'eone lo scorrimento del tempo dal passato al futuro corrisponde a transizioni da stati meno probabili a stati più probabili, relativamente al sistema fisico costituito dal mondo individuale³⁶.

tanano dall'equilibrio termico]. Per l'universo intero nella sua globalità le due direzioni del tempo sono indistinguibili, come nello spazio non c'è un sopra e un sotto.

Tuttavia, come in una particolare regione della superficie terrestre chiameremo "basso" la direzione verso il centro della Terra, così un essere vivente in un particolare eone di un mondo individuale distinguerà la direzione del tempo verso stati meno probabili dalla direzione opposta: la prima essendo il passato o l'inizio, la seconda il futuro o la fine; grazie a questa terminologia, per ogni piccola regione isolata dell'universo si avrà sempre, al principio del tempo, uno stato improbabile. Questo modo mi sembra l'unico che permetta di concepire il secondo principio della termodinamica, la morte termica di ciascun mondo individuale, senza comportare un mutamento irreversibile dell'intero universo da uno stato iniziale determinato a uno stato finale definitivo.

³⁶Si potrebbe obiettare sulla validità di tali conclusioni osservando che esse si fondano su un quadro cosmologico oramai superato, tuttavia a nostro avviso ogni riserva viene a cadere in un ambito puramente filosofico. Infatti basta estendere la nozione di mondo individuale all'intero universo osservabile anziché limitarlo a un sistema solare o a una galassia, perché le considerazioni esposte continuino a valere, seppure nel contesto più ampio di una termodinamica quantistica relativistica ancora ben lungi dall'essere compiutamente formulata.

La freccia del tempo cosmologica

La freccia del tempo cosmologica deriva dal fatto che i costituenti dell'universo, purché sufficientemente distanti fra loro³⁷, si allontanano reciprocamente gli uni dagli altri. Così dall'esame di due fotogrammi (non necessariamente contigui) appartenenti ad una pellicola riproduttrice una regione di universo sufficientemente grande, siamo in grado di stabilire quale fotogramma corrisponda ad un minor valore del fattore di scala³⁸ e quindi se la pellicola abbia girato normalmente oppure a rovescio. Per poter stabilire il legame fra l'espansione dell'universo e l'intrinseca non equivalenza delle due possibili orientazioni della direzione del tempo, si rende necessario spiegare più in dettaglio le modalità con cui l'espansione stessa si effettua.

Partendo dall'assunto sperimentale dell'isotropia delle relazioni metriche (vale a dire, le proprietà dei corpi fisici si preservano inalterate in seguito a traslazioni e a rotazioni), considerazioni di geometria non euclidea mostrano che lo spazio tridimensionale in espansione assieme all'universo è caratterizzato in ogni suo punto dalla costanza di un parametro denominato *curvatura*, il cui valore può essere positivo, nullo, o negativo. L'analogo bidimensionale di uno spazio a curvatura positiva è dato da una superficie sferica, in quanto tale illimitata ma finita. L'analogo bidimensionale di uno spazio a curvatura nulla è dato da un piano, in quanto tale illimitato e infinito. L'analogo bidimensionale di uno spazio a curvatura negativa non può essere costruito, tuttavia si

³⁷Nella maggior parte dei casi, per galassie appartenenti ad ammassi diversi.

³⁸Con riferimento ad un'ipotetica griglia a maglie cubiche che si espande uniformemente con l'universo, il fattore di scala al generico istante, t , è definito come:

$$a(t) = \frac{R(t)}{R(t_0)} = \frac{1 + z_0}{1 + z} ;$$

dove R è il raggio della generica maglia cubica, t_0 un istante arbitrario ma prefissato, solitamente scelto in modo da rappresentare il momento presente, e z , z_0 , lo spostamento verso il rosso al tempo, t , t_0 , rispettivamente, dovuto all'allontanamento reciproco della maggior parte dei costituenti dell'universo, in seguito all'espansione cosmica, e del conseguente effetto Doppler, in base al quale le relative righe spettrali risultano spostate verso il rosso, ossia verso lunghezze d'onda crescenti, rispetto alle loro controparti dedotte dalle stesse righe spettrali ottenute in laboratorio. Il caso particolare in cui il tempo, t_0 , denoti il momento presente, corrisponde a $z_0 = 0$.

può pensare ad esso come ad una superficie simile ad una sella (dove però non esistono punti privilegiati), in quanto tale illimitata e infinita.

L'applicazione della teoria della relatività generale all'intero cosmo considerato come un sistema in espansione, fa dipendere la curvatura dello spazio tridimensionale ad esso associato dalla densità media di materia presente nell'universo e dal suo tasso di espansione (esprimibile mediante la cosiddetta costante di Hubble). Le attuali incertezze sulla determinazione sperimentale dei parametri citati non precludono alcuna possibilità circa il segno della curvatura, per cui ogni alternativa deve essere presa in considerazione. Sempre in base alla teoria della relatività generale, universi con curvatura negativa o nulla (densità media di materia sufficientemente bassa e/o tasso di espansione sufficientemente elevato) si dilatano sempre e per tale ragione si denominano *universi aperti*, mentre universi con curvatura positiva (densità media di materia sufficientemente elevata e/o tasso di espansione sufficientemente basso) si dilatano fino a raggiungere un massimo oltre il quale iniziano a contrarsi e per tale ragione si denominano *universi chiusi*.

A questo punto, siamo in grado di analizzare il legame fra l'espansione dell'universo e l'intrinseca non equivalenza delle due possibili orientazioni della direzione del tempo. Nel caso di universi aperti, l'anisotropia del tempo è sancita dalla possibilità di distinguere il passato dal futuro: una pellicola che mostri la contrazione di una regione sufficientemente grande³⁹ gira sicuramente a rovescio, poiché una contrazione effettiva è esclusa dalle considerazioni precedenti⁴⁰. Nel caso di universi chiusi, la freccia del tempo cosmologica inverte il suo orientamento al raggiungimento del massimo grado di espansione, ma la freccia del tempo termodinamica continua a puntare nello stesso senso e quindi a

³⁹In pratica, di dimensioni di gran lunga superiori a quelle di un ammasso di galassie tipico.

⁴⁰Si deve inoltre osservare che recenti teorie proposte allo scopo di unificare le interazioni conosciute (forte, elettromagnetica, debole, gravitazionale) prevedono un tempo di vita finito anche se lunghissimo per la materia barionica (ad esempio, protoni e neutroni). Ciò implicherebbe che, in un universo aperto, da un certo momento in poi non esisterebbe più la materia così come oggi la conosciamo e pertanto sarebbe preclusa ogni possibilità di osservazione. In tali condizioni la morte termica dell'universo (intesa come stato finale di massima entropia), pur continuando l'espansione, sarebbe ineludibile e corrisponderebbe al decadimento di tutta la materia barionica.

sancire la possibilità di distinguere il passato dal futuro: una pellicola che mostri la contrazione di una regione sufficientemente grande gira a rovescio qualora si manifesti, ad esempio, nel senso di un'abbondanza relativa in metalli⁴¹ decrescente. Una situazione di questo tipo è rappresentata in Fig. 4.16, dove il continuum spazio-temporale viene schematizzato da una superficie a due dimensioni che è equivalente a quella di una sfera per zone sufficientemente lontane da due punti singolari; più precisamente, i *paralleli* su questa superficie rappresentano lo spazio tridimensionale relativo all'universo in espansione, i *meridiani* il tempo unidimensionale, e i *poli* le singolarità⁴² corrispondenti all'inizio dell'espansione (nord, ad esempio) e alla fine della contrazione (sud, di conseguenza). In tali condizioni, la freccia del tempo termodinamica risulta puntata dal nord al sud, e quindi si manifesta l'intrinseca non equivalenza delle due possibili orientazioni della direzione del tempo; al riguardo, tuttavia, si deve fare un'importante osservazione.

In assenza di una teoria che unifichi tutte le interazioni conosciute, non si può predire con esattezza quello che succederebbe in un universo chiuso al raggiungimento della massima espansione; non si può escludere pertanto che, in questa particolare situazione, la velocità di ogni costituente dell'universo (rappresentato semplicemente come un gas ideale) possa essere invertita⁴³, nel senso del paradosso della reversibilità di cui si è parlato nel paragrafo precedente.

In conseguenza di questo fatto, la freccia del tempo termodinamica

⁴¹Ricordiamo che, nel linguaggio dell'astrofisica, si denominano *metalli* tutti gli elementi più pesanti dell'elio, e per abbondanza relativa si intende il rapporto fra la massa o il numero degli elementi considerati e la massa o il numero di tutti gli elementi presenti nel volume in esame.

⁴²Ricordiamo che, in base alla teoria della relatività generale, un sistema fisico collassa in una singolarità quando la sua densità è talmente elevata da precludere l'emissione di segnali di qualsiasi tipo da parte del sistema considerato; in tale situazione, la teoria mostra che le proprietà dello spazio diventano molto simili a quelle del tempo in condizioni ordinarie e viceversa le proprietà del tempo diventano molto simili a quelle dello spazio in condizioni ordinarie. Attualmente si ritiene che nei nuclei delle galassie e delle stelle con massa sufficientemente elevata, dopo tempi sufficientemente lunghi si generino tali singolarità.

⁴³A rigore di termini, dovrebbero essere invertite la parità (scambio della destra con la sinistra) e la carica, come suggerito da osservazioni su un particolare tipo di particelle elementari, denominate K^0 . Per le rimanenti particelle elementari che si conoscono, tuttavia, è sufficiente la sola operazione di inversione temporale.

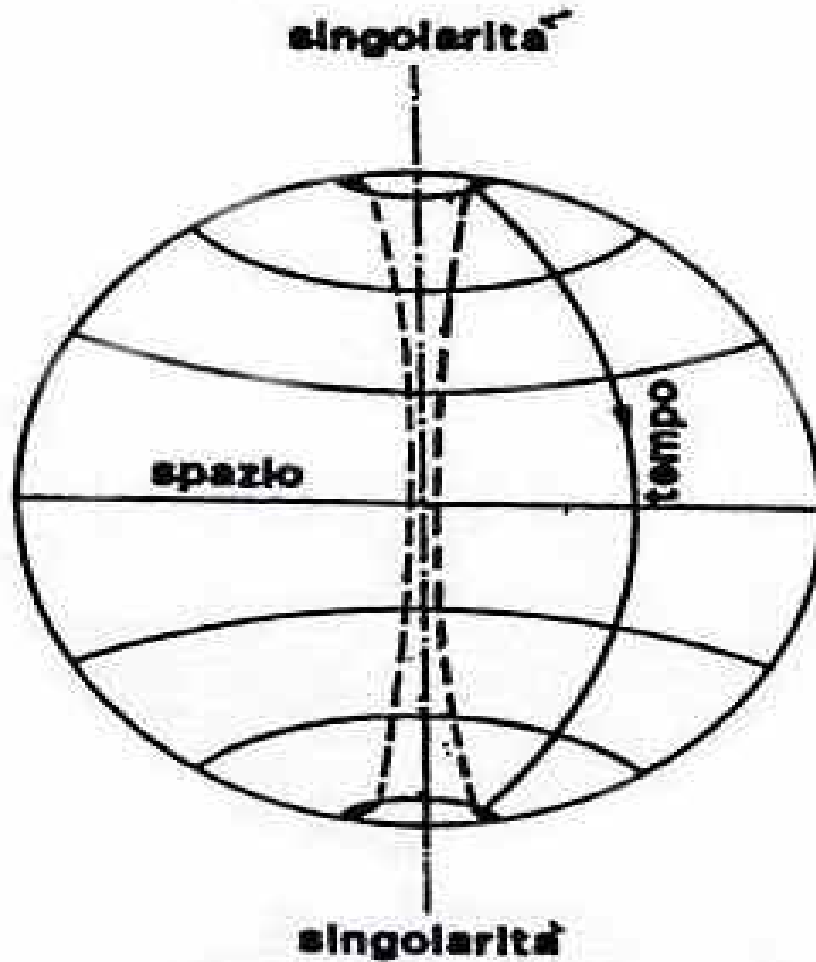


Figura 4.16 : Il continuum spazio-temporale per universi chiusi, rappresentato per il tramite di una superficie bidimensionale. I paralleli corrispondono allo spazio tridimensionale, i meridiani al tempo unidimensionale, i poli alle singolarità relativamente all'inizio dell'espansione (nord) e alla fine della contrazione (sud). Le due singolarità sono topologicamente connesse, dando luogo ad un tempo chiuso nel cui alveo il fiume eracliteo del cosmo scorre ritornando eternamente su se stesso.

si invertirebbe assieme alla freccia del tempo cosmologica, e ne discenderebbe la preclusione dal poter distinguere fra le due possibili orientazioni della direzione del tempo; nello schema di Fig. 4.16 il parallelo rappresentativo del cosmo e dello spazio tridimensionale ad esso associato, una volta raggiunto l'equatore corrispondente alla massima espansione, sarebbe *riflesso* nuovamente verso il polo nord anziché proseguire verso il polo sud. Equivalentemente, in termini più suggestivi, il cosmo anziché scorrere nell'alveo temporale in guisa del fiume eracliteo ritornando eternamente su se stesso, si frangerebbe sulla riva temporale in giusa dell'onda che eternamente avanza e recede; o ancora, usando un linguaggio più tecnico, il cosmo oscillerebbe, anziché ruotare, lungo la direzione temporale⁴⁴.

L'idea di un cosmo ciclico risulta fortemente in contrasto con recenti osservazioni, la cui interpretazione consiste nel ritenere che attualmente l'espansione dell'universo sia accelerata dalla presenza di una nuova componente, denominata *energia oscura*, che contribuisce a circa i tre quarti della densità cosmica. In tali condizioni, un'espansione senza ritorno sarebbe per l'universo ineluttabile, tuttavia non ci è dato di conoscere se le leggi della fisica si manterranno eternamente valide nell'attuale formulazione, oppure saranno suscettibili di mutamento, quando l'aspetto del cosmo sarà radicalmente cambiato rispetto a quello odierno. Nell'ultima alternativa, non si può escludere che l'universo torni a contrarsi, lasciando la porta aperta ad ogni possibilità discussa in precedenza.

Conclusione

Le considerazioni svolte nel precedente paragrafo mostrano come il problema della freccia del tempo, piuttosto che comportare la contrapposizione tra un tempo *aperto* dove l'universo non ritorna mai su se

⁴⁴A rigore di termini, un'alternativa di questo tipo si verificherebbe anche in assenza della connessione topologica fra le due singolarità nello schema di Fig. 4.16. In tali condizioni, l'applicazione del paradosso della reversibilità avrebbe luogo, anziché all'equatore in corrispondenza all'espansione massima, al polo sud in corrispondenza alla singolarità; successivamente, il parallelo rappresentativo del cosmo e dello spazio tridimensionale ad esso associato si muoverebbe in direzione opposta, dal polo sud al polo nord, e così via in una successione eterna di flussi e riflussi.

stesso ed ogni configurazione è unica e irripetibile, e un tempo *chiuso* dove l'universo dopo cicli più o meno lunghi riprende ogni configurazione assunta in precedenza, possa ricondursi alla contrapposizione fra un cosmo temporalmente *illimitato* a prescindere dall'unicità e dall'irripetibilità di ogni sua configurazione, e un cosmo temporalmente *limitato*⁴⁵.

Nella prima alternativa, la non equivalenza delle due possibili orientazioni della direzione del tempo, che caratterizza gli eventi naturali, è qualcosa di reale che trova il suo fondamento nelle proprietà intrinseche dell'universo e del continuum spazio-temporale ad esso associato; la distinzione tra il passato e il futuro è sancita dalla freccia del tempo termodinamica sempre puntata nella stessa direzione (almeno per tutte le ere compatibili con l'esistenza dell'osservatore). In questa accezione, è la peculiarità delle condizioni iniziali dell'universo che ha portato ad un mondo così come lo conosciamo; non sussiste contraddizione con il carattere reversibile delle leggi del moto in quanto un universo (rappresentato semplicemente come un gas ideale) le cui condizioni iniziali si ottenessero da quelle attuali per applicazione del paradosso della reversibilità, evolverebbe a ritroso attraverso le configurazioni precedenti fino a raggiungere lo stato di partenza.

Nella seconda alternativa, la non equivalenza delle due possibili orientazioni della direzione del tempo, che caratterizza gli eventi naturali, è qualcosa di apparente che deriva dall'impossibilità di eseguire osservazioni su periodi sufficientemente lunghi, e che pure trova il suo fondamento nelle proprietà intrinseche dell'universo e del continuum spazio-temporale ad esso associato; l'equivalenza tra il passato e il futuro è sancita dall'inversione della freccia del tempo termodinamica e di quella cosmologica al raggiungimento della configurazione di massima

⁴⁵Più precisamente, la traslazione cosmica lungo una traiettoria temporale *aperta* implica l'unicità e l'irripetibilità di ogni configurazione, la rotazione cosmica lungo una traiettoria temporale *chiusa* implica il ritorno verso ogni configurazione assunta in precedenza (nell'ambito, in entrambi i casi, di una direzione temporale senza inversioni), e l'oscillazione cosmica lungo una traiettoria temporale *aperta* implica ancora il ritorno verso ogni configurazione assunta in precedenza (nell'ambito di una direzione temporale con infinite inversioni). Alla traslazione corrispondono necessariamente universi aperti, mentre alla rotazione e all'oscillazione corrispondono necessariamente universi chiusi.

espansione per l'universo, necessariamente chiuso. In questa accezione, sono i limiti naturali degli osservatori che hanno portato all'illusione di poter distinguere il passato dal futuro; non sussiste contraddizione con l'apparente irreversibilità dei processi termodinamici in quanto un osservatore, coevo e coeterno all'universo, si troverebbe ad assistere all'inversione della freccia del tempo termodinamica in qualsiasi sistema fisico, con conseguente evoluzione a ritroso attraverso le configurazioni precedenti, fino al raggiungimento dello stato di partenza.

Tuttavia giova osservare come il problema della freccia del tempo non sia soltanto un problema fisico, bensì anche e soprattutto un problema epistemologico e filosofico. Sotto questo aspetto, il quadro cosmologico di Boltzmann delineato in precedenza conserva inalterata tutta la sua potenza, purché si individui nell'universo osservabile un singolo mondo individuale lontano dall'equilibrio, e nel succedersi delle sue ere il decorso del relativo eone, nel quadro generale di un cosmo infinitamente più ampio e globalmente in equilibrio e di una termodinamica quantistica nell'ambito di una teoria che unifichi tutte le interazioni conosciute, a tutt'oggi ben lungi dall'essere stabilita. In questa accezione, seguendo il ragionamento di Boltzmann, vi sarebbe in media un ugual numero di universi (chiusi ed aperti) che si allontanano dall'equilibrio e che tendono verso l'equilibrio, la qual cosa porterebbe, in ogni caso, ad una differenza soltanto apparente fra le due possibili orientazioni della direzione del tempo, nel contesto più vasto di un cosmo così concepito.

In conclusione, nulla di sicuro si può ancora dire per quanto riguarda la soluzione del problema della freccia del tempo, se non che l'esistenza dell'osservatore appare garantita dalla transizione dell'universo da stati meno probabili a stati più probabili, vale a dire lo scorrimento del tempo dal passato verso il futuro.

Bibliografia

- Per un approfondimento del concetto di freccia del tempo:*
 Layzer, D.: 1976, *Le Scienze*, n. 92, p. 26.
 Hawking, S.: 1988, *L'Astronomia*, n. 77, p. 5.
 Gribbin, J.: 1991, *L'Astronomia*, n. 108, p. 5.

Per un approfondimento di carattere storico del secondo principio della termodinamica:

Dugas, R.: *La theorie physique au sens de Boltzmann*, ed. du Griffon, Neuchatel, Svizzera, 1959.

Kuhn, T.: *Alle origini della fisica contemporanea: la teoria del corpo nero e la discontinuità quantistica*, ed. Il Mulino, Bologna, 1981.

Per un approfondimento di carattere epistemologico del secondo principio della termodinamica: (il senso di talune citazioni ci appare, tuttavia, difforme dal contesto originale)

Giorello, G.: *Il tempo e la fisica dell'irreversibile*, in *Le frontiere del tempo*, ed. Il Saggiatore, Milano, 1981.

Per un approfondimento del concetto di irreversibilità:

Bertazzi, G., Caimmi, R.: 1990, *Il problema dell'irreversibilità*, in Caimmi, R.: *Il problema della misura: considerazioni sulla teoria degli errori*, ed. CUSL-Nuova Vita, Padova, 1990 (sesta edizione, 2000).

Per un approfondimento del concetto di probabilità:

Caimmi, R.: *Il problema della misura: considerazioni sulla teoria degli errori*, ed. CUSL-Nuova Vita, Padova, 1988 (sesta edizione, 2000).

Per un approfondimento della teoria della relatività generale:

Einstein, A.: *Relatività: esposizione divulgativa*, ed. Boringhieri, Torino, 1967.

Per un approfondimento dell'influenza della rivoluzione einsteiniana sui concetti di cosmo, spazio, e tempo:

Bertazzi, G., Caimmi, R.: *Cosmo, spazio, tempo: evoluzione e storia di tre concetti durante l'era scientifica*, ed. Sardini, Bornato in Franciacorta, Brescia, 1988.

Per un approfondimento sull'evoluzione dell'universo alla luce della teoria della relatività generale (si richiede una cultura universitaria e una preparazione specifica sull'argomento):

Zeldovich, J.B., Novikov, I.D.: *Struttura ed evoluzione dell'universo*,

ed. Editori Riuniti, Roma, 1982.