

GIANCARLO SETTI
TEMPO E UNIVERSO

1. *Preambolo*

Quando parliamo di tempo si possono intendere varie cose; io ne ho selezionate tre:

- La percezione del tempo
- Il tempo fisico
- Il tempo cosmico (o tempo universale)

Questi aspetti li tratterò brevemente per inquadrare un po' il problema e poi nell'ultima parte, parlerò dell'entropia dell'universo e quindi della cosiddetta freccia del tempo.

2. *La percezione del tempo*

Noi sappiamo che c'è un passato, un presente e un futuro e siamo anche sicuri che, mentre io sto parlando, stiamo scivolando nel futuro e lasciamo dietro il passato. Siamo coscienti (purtroppo!) dello scorrere del tempo, del suo fluire. Siamo in grado di viaggiare nel tempo, di collegare situazioni ed eventi del passato e di proiettarli nel futuro, di prevedere vari scenari e di pianificare le nostre azioni e reazioni. In un battere di ciglia scorre davanti agli occhi della nostra mente la nostra storia, o parti di essa, il presente e il nostro ipotetico futuro. Una specie di grande schermo aperto in pochi istanti sulla nostra vita. Per quanto assolutamente profano della materia, mi sembra di capire che non è ancora stato chiarito fino a che punto e in quale misura questa capacità della mente di viaggiare nel tempo sia confinata alla specie umana. Né tantomeno è chiaro come questa straordinaria capacità si sia generata e affermata nel corso dell'evoluzione della specie. In ogni caso a me sembra evidente che la percezione del tempo sia strettamente collegata alla coscienza basica che, secondo la medicina, nei vertebrati risiede nel midollo allungato, una struttura che si trova nella parte inferiore del cervello e lo collega alla spina dorsale. Per quanto ci riguarda, il vero problema è quello dell'autocoscienza, cioè la coscienza che abbiamo coscienza del tempo - anche altri animali potrebbero avere coscienza del tempo, ma noi abbiamo la coscienza di avere coscienza del tempo, e questo fenomeno non mi sembra sia stato ancora chiarito.

3. Il tempo fisico

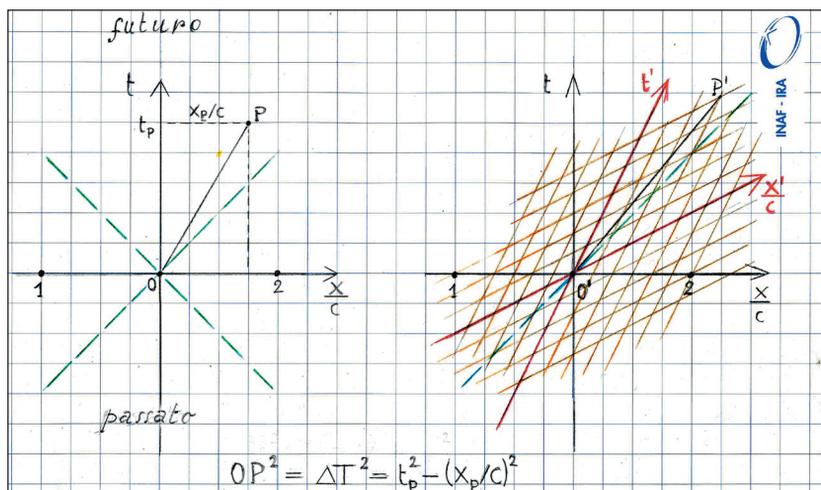
In fisica il concetto di tempo ha subito una profonda trasformazione all'inizio del secolo scorso con la *Teoria della Relatività Speciale* di Einstein (1905). Questa teoria si basava su due ipotesi fondamentali. La prima era un'estensione all'elettrodinamica del principio di relatività enunciato da Galileo Galilei per la dinamica dei corpi – le leggi della fisica sono invarianti passando da un sistema stazionario a uno qualunque in moto uniforme. In altre parole, due osservatori in moto uniforme l'uno rispetto all'altro non possono distinguere il loro stato di moto con esperimenti di fisica (è ben familiare la sensazione che sia la piattaforma della stazione a muoversi quando si è seduti in uno scompartimento di un treno in movimento). La seconda ipotesi riguardava la velocità della luce (un'onda elettromagnetica) nel vuoto che, in accordo con i risultati sperimentali, veniva assunta costante indipendentemente dallo stato di moto del sistema di riferimento, cioè dal moto relativo degli osservatori e della sorgente di luce, e dalla direzione di propagazione della stessa. Inoltre si assumeva la velocità della luce nel vuoto, normalmente indicata con la lettera c minuscola, come velocità limite di propagazione dei segnali, e quindi dell'informazione - nulla può andare più veloce della luce e occorre un'energia infinita per portare un corpo materiale, qualunque ne sia la massa, a questa velocità limite (la bolletta dell'energia elettrica utilizzata dalle macchine acceleratrici di particelle, quali quelle del CERN di Ginevra, è senza dubbio cospicua!).

La teoria della relatività speciale, che sfida il senso e l'intuizione comuni, è stata comprovata da moltissimi esperimenti e applicazioni. Per quanto riguarda il nostro discorso la rivoluzione introdotta dalla relatività speciale è tutta compresa nel problema della "simultaneità" degli eventi - mentre per un osservatore due eventi sono giudicati simultanei, per un altro osservatore, che si muove rispetto al primo di moto uniforme, questi eventi non risultano simultanei. Ciò è illustrato da un semplice esempio, proposto dallo stesso Einstein, noto come il *treno di Einstein*. Si consideri una persona su un vagone di un treno in movimento e in possesso di un'apparecchiatura disposta esattamente a metà della lunghezza del vagone e in grado di lanciare contemporaneamente due raggi luminosi da parti opposte ed esattamente nella stessa direzione. Viene premuto il pulsante, i due raggi di luce sono lanciati e la persona, che ha preso tutte le cautele per l'accuratezza delle misure, verifica che l'arrivo dei due raggi luminosi sulle opposte pareti avviene allo stesso istante data la costanza della velocità della luce (di cui si è detto prima) e la perfetta simmetria dell'assetto sperimentale. Viceversa, un osservatore fermo sulla piattaforma della stazione registra prima

l'impatto del raggio luminoso sulla parete posteriore e un istante dopo quello sulla parete anteriore, e questo perché a causa del moto del treno la parete posteriore è andata incontro al raggio luminoso a lei diretto, accorciandone un po' il tragitto, mentre quella anteriore si è spostata nello stesso senso del corrispondente raggio luminoso allungandone di un po' il tragitto da percorrere. Quindi la simultaneità degli eventi dipende dal moto relativo degli osservatori.

C'è un modo più tecnico che permette d'inquadrare il problema della simultaneità in modo rigoroso. Per fare ciò occorre riferirsi alla geometria dello spazio-tempo introdotta dal matematico russo/tedesco Hermann Minkowski pochi anni dopo la pubblicazione del lavoro di Einstein. Ogni evento in un dato sistema di riferimento (l'accensione di una lampadina, lo scoppio di un petardo, l'impatto di un raggio luminoso su una parete, del quale si è detto in precedenza, ecc..) è caratterizzato da quattro coordinate, tre spaziali per la posizione e una temporale per l'istante dell'evento. Quindi un evento generico è rappresentabile da un punto in uno spazio a quattro dimensioni, lo spazio-tempo di Minkowski appunto, nel quale la coordinata temporale viene trattata in modo del tutto analogo alle coordinate spaziali.

FIG.1. Sistemi di riferimento in moto uniforme relativo - Simultaneità degli eventi



Siccome è difficile immaginare uno spazio a quattro dimensioni, e ancor più darne una rappresentazione grafica, a scopo illustrativo in FIG.1 ci limitiamo a considerare un spazio-tempo di Minkowski a due dimensioni, una spaziale e una temporale, ben sapendo che le conside-

razioni che se ne traggono restano del tutto valide nello spazio quadridimensionale, anche se più complicato da visualizzare. Nella FIG. 1 (sinistra) è rappresentato un riferimento stazionario: in ascissa lo spazio unidimensionale \underline{x} con le distanze rispetto all'origine \mathbf{O} misurate per rapporto a \underline{c} (velocità della luce), cosicché le misure hanno le dimensioni fisiche di un tempo (conveniente in questo tipo di rappresentazione); in ordinata il tempo \underline{t} misurato dall'osservatore stazionario con il suo orologio. Se dall'origine \mathbf{O} viene lanciato un oggetto (pallina, proiettile, ecc..) con velocità \underline{v} , necessariamente minore di \underline{c} , nel tempo t_P esso avrà percorso lungo l'unica direzione possibile un tratto \underline{x}_P/c ($= t_P \underline{v}/c$) corrispondente al segmento \mathbf{OP} nel diagramma dello spazio-tempo bidimensionale. Qual è il significato di \mathbf{OP} ? Nella geometria euclidea varrebbe il ben noto teorema per cui il quadrato dell'ipotenusa è uguale alla somma dei quadrati dei cateti, in questo caso le coordinate del punto \mathbf{P} , ma nella geometria minkowskiana la situazione è completamente diversa. Infatti, il quadrato dell'ipotenusa è dato dalla differenza dei quadrati dei cateti, cioè:

$$(\mathbf{OP})^2 = t_P^2 - (\underline{x}_P/c)^2$$

e (\mathbf{OP}) ha il significato di tempo proprio del corpo in movimento con velocità \underline{v} , come sarebbe misurato da un orologio che si muove solidamente con esso. Si noti che il tempo proprio di un corpo in movimento è sempre inferiore al tempo misurato dall'osservatore stazionario, e la differenza diventa marcata per velocità prossime a quella della luce. Questo risultato è stato verificato in moltissimi esperimenti ed è alla base del ben noto "paradosso dei gemelli".

Se invece si considera un fotone (quanto di luce, $\underline{v} = \underline{c}$) la rappresentazione è lungo la retta bisettrice ($\underline{x}_P/c = t_P$) e il tempo proprio è nullo. Le bisettrici (righe blu nella FIG. 1) individuano due settori dello spazio-tempo bidimensionale: quello superiore comprende gli eventi futuri che hanno origine in \mathbf{O} , mentre quello inferiore comprende gli eventi del passato. L'ascissa individua gli eventi simultanei per l'osservatore stazionario al tempo $t=0$. In tempi successivi (o precedenti) risultano simultanei eventi che stanno sulla medesima retta parallela all'asse delle ascisse per ciascun valore assunto dalla coordinata temporale.

Si considerino due eventi spazialmente separati e simultanei registrati dall'osservatore stazionario in \mathbf{O} al tempo $t=0$. Siano essi gli eventi 1 e 2 (FIG.1) che, per semplicità rappresentativa, abbiamo assunto simmetrici rispetto all'origine (due lampadine, gli impatti del "treno di Einstein" sulle opposte pareti del vagone, ecc..). Consideriamo ora il punto di vista di un osservatore che si muove di moto uniforme nella

direzione positiva dell'ascissa e assumiamo che all'istante $t=0$ esso passi accanto all'osservatore stazionario. La geometria dello spazio-tempo bidimensionale dell'osservatore in moto proiettata nello spazio-tempo di quello stazionario risulta deformata come rappresentato nella FIG.1(destra). Il reticolo a quadrati si trasforma in uno a rombi, le rette delle due coordinate spaziali e temporali (t' , x'/c) formano un angolo acuto tanto più stretto quanto più la velocità del riferimento in moto si approssima alla velocità della luce: questa deformazione della geometria dello spazio-tempo è l'unica che preserva le distanze fisicamente rilevanti, e in particolare:

$$(O'P')^2 = (t_p')^2 - (x_p'/c)^2 = (OP)^2$$

cioè il tempo proprio di un corpo lanciato dall'osservatore stazionario ovviamente deve essere indipendente dal sistema di riferimento. I due assi coordinati tendono a chiudersi come un ventaglio sulla bisettrice, tanto più quanto più alta è la velocità relativa dei due osservatori, trascinando il reticolo di quadrati che così si trasformano in rombi. Al tempo $t'=0$, quando l'osservatore in O' incrocia quello stazionario in O , l'asse degli eventi simultanei x'/c passa sopra all'evento 2 e sotto all'evento 1, cioè per l'osservatore in movimento l'evento 2 fa già parte del passato mentre l'evento 1 deve ancora realizzarsi.

C'è una percezione diversa degli osservatori sul divenire degli eventi: mentre per l'uno un evento qualunque, ad esempio la decisione di far partire un razzo, fa parte del futuro incerto, per l'altro la decisione è già stata presa, cioè il razzo è già partito. È come se ci fosse un passato che si è cristallizzato e che interviene sull'osservatore ancora ignaro, una specie di scivolamento del passato nel futuro. Quindi non solo non vi è più uno spazio assoluto, perché questi sistemi di riferimento che si muovono uno rispetto all'altro di moto uniforme sono equivalenti per la descrizione del mondo fisico, ma neanche il tempo ha più un valore assoluto, un "presente" valido per tutti. Nelle parole di Minkowski «D'ora in poi lo spazio di per se stesso o il tempo di per se stesso sono condannati a svanire in pure ombre, e solo una specie di unione tra i due concetti conserverà una realtà indipendente». La geometrizzazione del tempo, implicita nella relatività speciale, sembra quindi condurre a una specie di congelamento degli eventi nello spazio-tempo, un aspetto del tempo fisico che appare in contrasto con la nostra percezione cosciente del fluire del tempo.

4. Il tempo cosmico (o universale)

Prima di tutto rivisitiamo la conoscenza attuale sullo stato dinamico dell'universo.

(1) *L'espansione dell'universo.*

Che l'universo sia in espansione è una conoscenza diventata di dominio comune, ma non sempre se ne afferra il significato fisico. La scoperta (1929) si deve all'astronomo americano Edwin Hubble: la velocità di recessione delle galassie aumenta all'aumentare della loro distanza da noi

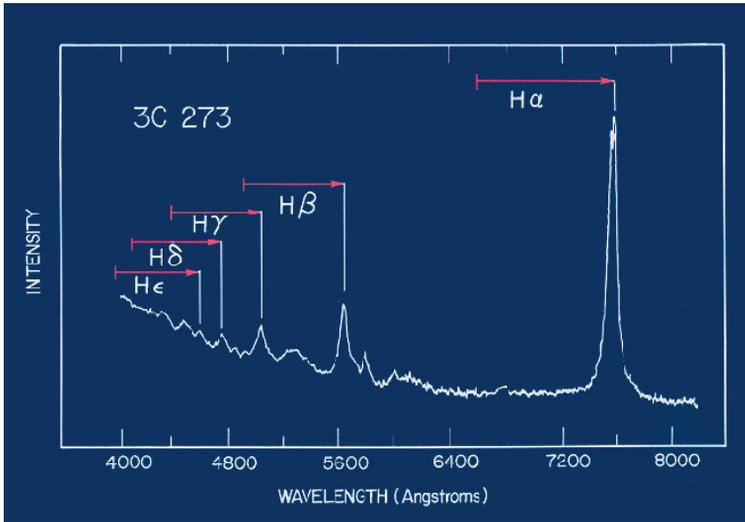
(Legge di Hubble) \rightarrow Velocità di recessione = $H_0 \cdot$ Distanza

dove la costante di Hubble H_0 (= 23.5 Km/sec/milione di anni luce, determinata recentemente con un'incertezza del 10%) rappresenta il ritmo attuale di espansione dell'universo. In realtà quello che Hubble aveva misurato, e che si misura, non era una "velocità", ma uno spostamento sistematico verso il rosso delle lunghezze d'onda (λ) delle righe spettrali nelle emissioni ottiche delle galassie. La percentuale dello spostamento verso il rosso, cioè a lunghezze d'onda più grandi, deve essere ovviamente la stessa per ciascuna delle righe emesse da una stessa galassia (Fig. 2) e, in analogia con l'effetto Doppler della fisica, è legata alla velocità di recessione dalla semplice formula:

$$z = \Delta\lambda / \lambda = V/c$$

dove con $\Delta\lambda$ si è indicato l'entità dello spostamento verso il rosso per ciascuna riga e con c la velocità della luce nel vuoto.

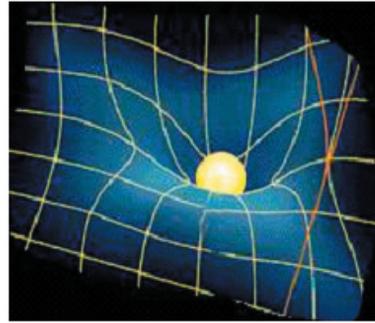
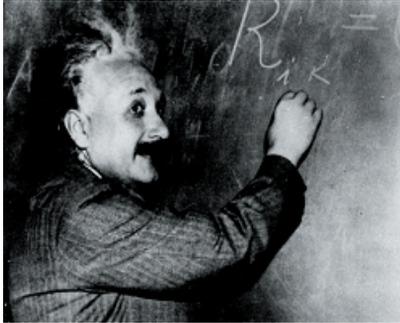
FIG. 2. Spettro ottico del quasar 3C 273 per il quale $z = 0.16$. Lo spostamento verso il rosso $\Delta\lambda$, indicato dalla lunghezza dei segmenti con freccia, cresce in proporzione alla lunghezza d'onda delle righe.



Il fatto straordinario è che la possibilità di un universo in espansione era stata prevista ben prima della scoperta di Hubble nell'ambito dei modelli di universo della *Teoria della Relatività Generale* di Einstein. Questa teoria geniale, che incorpora la relatività speciale, è stata formulata oltre un secolo fa (1916) ed è quella generalmente adottata per la descrizione della gravità. Se da un lato la teoria della relatività speciale ha fornito la chiave di lettura dei fenomeni elettrodinamici in presenza di velocità prossime a quella della luce, dall'altro la Relatività generale ha soppiantato la dinamica di Newton in presenza di forze ed effetti gravitazionali rilevanti. La relatività generale rappresenta quindi la teoria di riferimento per la descrizione dell'universo dove la gravità rappresenta la forza dominante. Qui l'aspetto rivoluzionario della teoria è stato quello di stabilire uno stretto collegamento fra le proprietà dello spazio-tempo e il contenuto di materia-energia dell'universo. [Si noti che all'energia corrisponde una massa equivalente data dalla ben nota formula $E = mc^2$ che si deriva dalla relatività speciale]. La distribuzione della massa determina la curvatura dello spazio (FIG.3), che a sua volta ne condiziona il movimento, in un rapporto di indissolubile interdipendenza. Così le onde elettromagnetiche, e quindi i raggi luminosi, seguono la curvatura dello spazio. Il concetto Newtoniano di

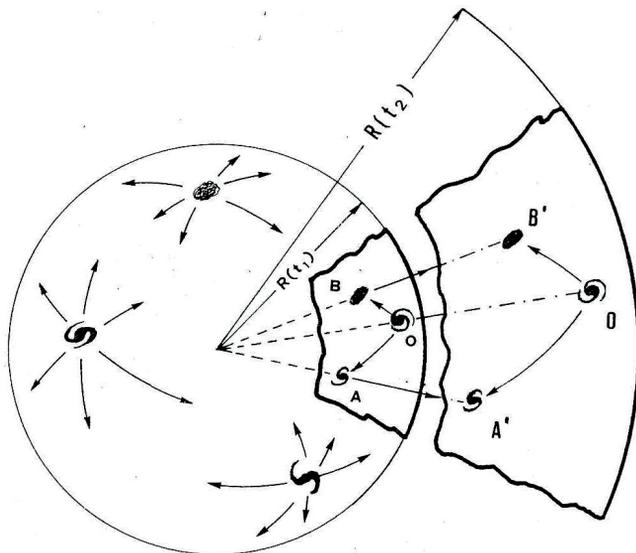
uno spazio assoluto indipendente dalla distribuzione della materia è completamente superato.

FIG.3 *Teoria della Relatività Generale (1916)* ⇨ *geometria dello spazio-tempo interconnessa con la distribuzione della materia-energia* ⇨ *modelli d'universo.*



Quello che rileva, come prima accennato, è che già nel 1919 un meteorologo e matematico russo (Alexander Friedmann) aveva risolto le equazioni della relatività generale per vari modelli d'universo ed aveva predetto la possibilità di un universo in espansione, anticipando di un decennio le osservazioni fondamentali di Hubble. A causa della difficoltà di una rappresentazione dello spazio-tempo quadridimensionale si ricorre al ben noto esempio della gonfiatura progressiva di un pallone la cui superficie identifica uno spazio rigorosamente bidimensionale, cioè non v'è nulla all'interno e all'esterno della superficie del pallone, mentre il raggio rappresenta un fattore di scala $\mathbf{R}(t)$ che dipende solo dal tempo t (FIG.4).

FIG. 4. Rappresentazione qualitativa di un universo bidimensionale (superficie sferica) in espansione. Il fattore di scala $R(t)$ aumenta con il tempo t e i segnali si propagano solo sulla superficie. Se le galassie (bidimensionali) sono distribuite in modo omogeneo, un osservatore ipotetico disposto in un punto qualunque della superficie avrà sempre la stessa immagine di un universo che si espande isotropicamente. La figura illustra anche la cinematica della legge di Hubble: dalla similitudine geometrica si ricava facilmente che le velocità apparenti di recessione delle galassie A e B nell'intervallo di tempo t_1, t_2 sono direttamente proporzionali alle loro distanze dall'osservatore in 0 [$V_A = (OA/OB) V_B$].



In questo quadro interpretativo lo spostamento verso il rosso (sovente si usa per brevità il termine inglese *redshift*) delle righe spettrali delle galassie non è dovuto all'effetto *Doppler*, cioè a una velocità cinematica vera e propria con la quale esse si starebbero allontanando da noi, ma risiede nell'espansione dello spazio che dilata tutte le dimensioni, ivi comprese le lunghezze d'onda della luce nel corso della loro propagazione dalle galassie a noi. Nell'esempio del pallone si pensi alla propagazione di raggi luminosi sulla superficie mentre questa assume dimensioni sempre più grandi col passare del tempo: tanto più distante è la sorgente, tanto maggiore è la dilatazione subita dalle lunghezze d'onda della luce che ci pervengono (legge di Hubble). Così la velocità V di recessione che appare nella legge di Hubble può risultare anche più grande della velocità della luce, al limite infinita per oggetti all'orizzonte degli eventi percepibili, senza violare il dettame della relatività

speciale. In altre parole V non ha il significato usuale di velocità.

(2) *Il Principio cosmologico e il Tempo cosmico*

Alla base della nostra comprensione dell'universo c'è il principio cosmologico. Le considerazioni essenziali che portano a tale principio sono le seguenti:

- Un osservatore ipotetico, localizzato in un punto qualunque dell'universo partecipa al moto naturale di espansione. Nell'esempio dello spazio bidimensionale della superficie del pallone s'immagini di tracciare un sistema di coordinate, meridiani e paralleli come quelli necessari a individuare le posizioni sulla superficie della Terra - ciò che s'intende è che un osservatore generico rimane agganciato alle proprie coordinate mentre la superficie sferica si sta espandendo. Le velocità locali, ad esempio quelle delle galassie nei gruppi e ammassi di galassie, sono piccole rispetto alla "velocità" apparente dovuta all'espansione, altrimenti gli spostamenti verso il rosso (o verso il blu) delle righe spettrali dovuti ai moti locali (effetto Doppler) avrebbero confuso quelli sistemati dell'espansione e Hubble non sarebbe riuscito ad evidenziare l'espansione dell'universo.

- La distribuzione su grande scala della materia nell'universo appare altamente isotropa. Prima della scoperta della radiazione universale, sulla quale torneremo nel seguito, si sapeva che l'universo appariva isotropo entro l'1-2% dall'analisi della distribuzione delle galassie. Poi lo studio della radiazione universale, sulla quale torneremo più tardi, ha dimostrato che l'intensità di questa radiazione in tutte le direzioni, a sua volta strettamente legata alla distribuzione della materia, è altamente isotropa per 1 parte su 100 000.

- Dall'isotropia consegue che l'universo è spazialmente omogeneo, a parte irregolarità locali.

- L'Uomo, cioè la Via Lattea, non si trova in una posizione privilegiata o anomala dell'universo (principio Copernicano).

Da queste considerazioni discende il principio cosmologico alla base della cosmologia: la visione dell'universo nella sua interezza è la stessa qualunque sia la posizione di un osservatore che partecipa al moto naturale a un dato tempo.

Di "quale tempo" si tratta? Si suppone che ogni osservatore disponga di strumenti adeguati - un orologio, un goniometro per misurare gli angoli e un apparato per inviare e registrare segnali - e si deriva che lo spazio-tempo può essere suddiviso in una parte spaziale e in una parte temporale, il tempo cosmico (o universale) appunto. Siccome le distanze cosmologiche sono molto grandi, diciamo maggiori di 100 milioni di anni luce, e la velocità della luce è finita, l'analisi dei dati che ci

provengono dalle profondità dell'universo permette di studiarne lo stato a epoche di gran lunga precedenti quella attuale. Quindi l'astronomo si trova nella fortunata situazione di poter osservare se e in quale modo l'universo si è evoluto. Implicita nella formulazione del principio cosmologico vi è poi l'assunzione che la nostra conoscenza della fisica sia valida indipendentemente dalla posizione nello spazio e dal tempo. In particolare, la forma della legge di Hubble si applica a tutte le epoche, $\mathbf{D}(\mathbf{t}) = \mathbf{H}(\mathbf{t}) \mathbf{V}(\mathbf{t})$, anche se la costante di Hubble $\mathbf{H}(\mathbf{t})$, e quindi il ritmo di espansione dell'universo, può dipendere dal tempo cosmico \mathbf{t} .

5. *L'entropia e la freccia del tempo*

Sull'asse del tempo cosmico viene rappresentata la cronologia dell'universo. Questa è una nozione che appare maggiormente consistente con la nostra percezione cosciente del fluire del tempo, a differenza dello schema rigido dello spazio-tempo introdotto dalla relatività speciale, come illustrato in precedenza. Un passato dell'universo che possiamo tentare d'interpretare analizzando i segnali che arrivano dalla sua profondità, e un futuro che ancora si deve attuare. Una freccia temporale con la punta volta verso il futuro. Tuttavia, le leggi fondamentali della fisica sono simmetriche rispetto al tempo: se nelle equazioni che le descrivono si inverte il senso del tempo (in pratica cambiando il segno del tempo da \mathbf{t} a $-\mathbf{t}$) la struttura delle stesse non cambia. Si tratta quindi di capire come mai da leggi simmetriche rispetto al tempo possa scaturire una asimmetria temporale. In realtà c'è una legge un po' speciale che manifesta una asimmetria temporale ed è la seconda legge della termodinamica secondo la quale in tutti i processi naturali l'entropia di un sistema non diminuisce, aumenta o resta uguale nei cosiddetti processi reversibili.

Come noto, l'entropia è entrata nel linguaggio comune a caratterizzare lo stato di disordine di un sistema. Si possono fare molteplici esempi, ma mi limiterò a quello appariscente di un palazzo che crolla, per il quale è evidente il passaggio da un sistema ordinato ad uno completamente disordinato. Si ha a che fare chiaramente con un processo irreversibile, ma i processi elementari che si sviluppano durante il crollo sono regolati dalle equazioni della fisica che sono simmetriche rispetto al tempo. Da qui la natura un po' speciale della seconda legge della termodinamica, nel senso che la probabilità del processo inverso è ridicolmente piccola – la proiezione di una ripresa cinematografica del crollo invertendo la sequenza dei fotogrammi ci fa sorridere!

Ordine/disordine sono tuttavia termini del linguaggio piuttosto imprecisi. Ma l'entropia si può quantificare. Se si potesse ripetere il

crollo di un palazzo partendo dalle stesse condizioni iniziali (trascurando la dispersione del calore prodotto dall'energia cinetica del crollo) si troverebbe che le forme dei frammenti e la loro disposizione sul suolo sarebbero di volta in volta diversi: allo stesso stato di disordine (palazzo crollato) corrisponderebbero tanti microstati differenti, cioè tante possibilità di realizzazione, mentre ovviamente al palazzo corrisponde una sola possibilità di realizzazione. Quindi si può concludere che l'entropia di un sistema fisico aumenta all'aumentare del numero di microstati che possono realizzare la sua configurazione macroscopica (macrostato) nella quale si è evoluto. Lo stesso concetto applicato in modo rigoroso ai gas, che rappresentano anche la forma comune in cui la materia è distribuita nell'universo, porta a concludere che lo stato di massima entropia è quello raggiunto quando si stabilisce l'equilibrio termodinamico. La freccia del tempo viene convenzionalmente identificata con l'aumento di entropia.

La validità della seconda legge della termodinamica è verificata in molteplici situazioni naturali e nell'esperienza quotidiana. La stessa esistenza della vita sul pianeta Terra, come già indicato da Ludwig Boltzmann (il grande fisico teorico austriaco del XIX secolo), dipende dal fatto che il Sole è una sorgente di bassa entropia. Data la generalità del fenomeno si ritiene che esso sia di natura cosmologica, cioè correlato con l'evolversi dell'entropia dell'universo. Appare quindi opportuno esaminare quanto abbiamo appreso sulla storia dell'universo e fino a che punto esso possa ritenersi il bacino di bassa entropia alla base della seconda legge della termodinamica.

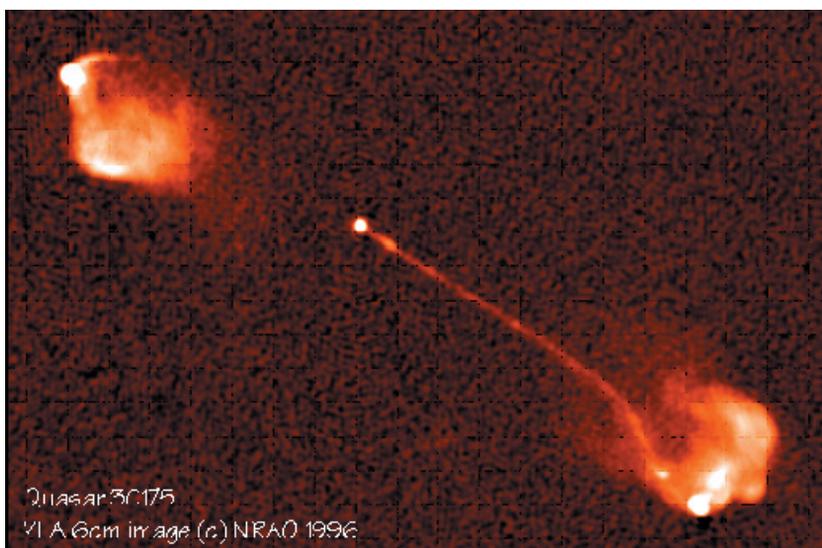
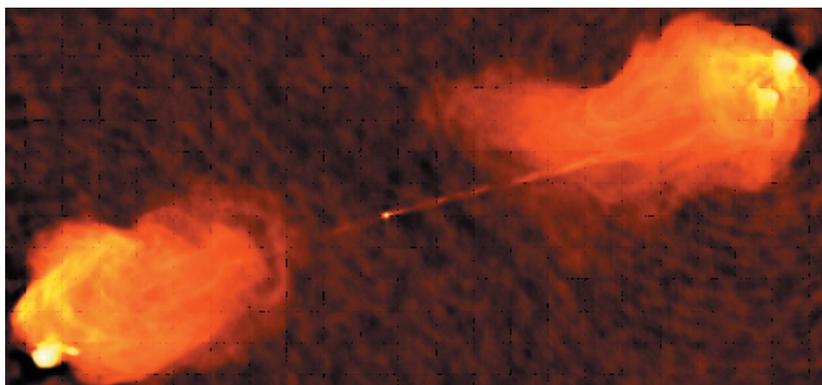
i) Breve storia del Big Bang

Una riflessione immediata porta alla possibile conclusione che se l'universo si sta espandendo rarefacendosi, nel passato le sue dimensioni dovevano essere molto più piccole e la densità di materia molto più grande, ed eventualmente tutte le galassie e le stelle dovevano essere compattate in un miscuglio gassoso ad altissima densità e temperatura. Da qui la ben nota ipotesi formulata nel 1931 dall'abbé Georges Lemaître, famoso astronomo e scienziato belga, dell'origine dell'universo dall'esplosione di un "atomo primordiale". Questa ipotesi si configurava quindi come una teoria evolutiva dell'universo, anche se i dettagli di questa evoluzione rimanevano oscuri.

La scoperta delle radio-galassie negli anni 1950 e dei *quasar* nel 1963 (Fig.5), oggetti di straordinaria potenza, e quindi osservabili anche se si trovano a grandi distanze, aveva aperto la possibilità di studiare le proprietà del cosmo in profondità. Si era trovato che le radio-galassie e i *quasar* erano molto più potenti e/o numerosi a epoche molto precedenti

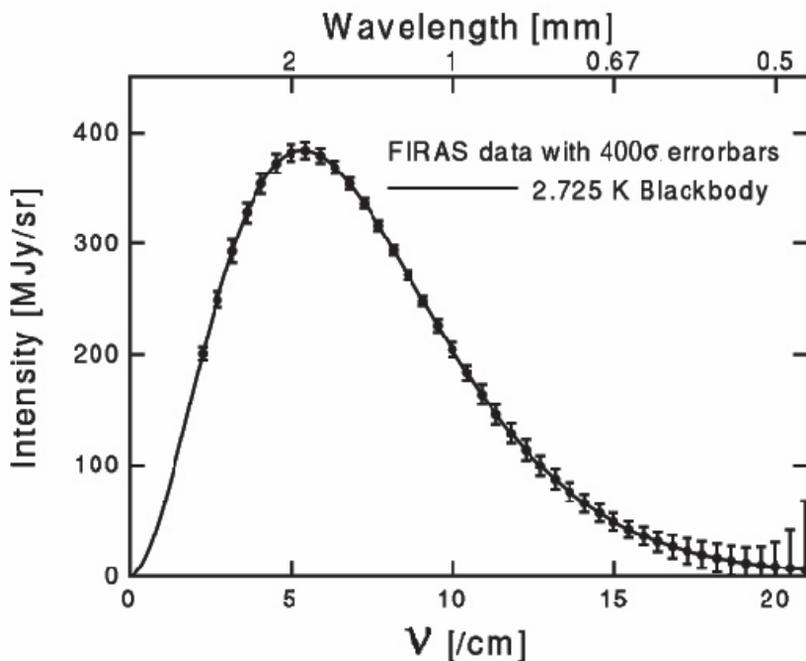
quella presente, una chiara indicazione di un universo in evoluzione come implicito nella teoria del *Big Bang*.

FIG.5. Immagini in falsi colori della emissione alle onde radio della radiogalassia Cygnus A (superiore) e di un quasar (inferiore). Le luminosità radio sono equivalenti alla potenza emessa da 1000 miliardi di stelle come il Sole. Le immagini mostrano in modo evidente che queste enormi quantità di energia sono prodotte nei nuclei galattici attivi (sedi di buchi neri super-massicci) e trasmesse su grandi distanze di centinaia/migliaia di anni luce da getti altamente collimati. (Le immagini sono state prese dalla Image Gallery del National Radio Astronomy Observatory, NRAO-USA).



Ma la prova fondamentale a favore del *Big Bang* è stata ottenuta nel 1965 con la scoperta (fortuita) di una radiazione cosmica di fondo proveniente da tutte le direzioni. Per questa scoperta Arno Penzias e Robert Wilson, due giovani ricercatori dei Bell Laboratories (USA), sono stati insigniti del Premio Nobel per la Fisica. Una delle caratteristiche principali di questa radiazione, studiata in dettaglio dal satellite COBE della NASA, è quella di possedere un profilo d'intensità tipico dell'equilibrio termico, quello che tecnicamente viene chiamato in fisica uno spettro di corpo nero (FIG.6), con un massimo intorno a una lunghezza d'onda di 1mm cui corrisponde una temperatura di 2.7 gradi assoluti (cioè, $-270,3$ gradi Celsius).

FIG.6 Spettro della radiazione universale misurato dallo strumento FIRAS a bordo del satellite COBE della NASA.



Un'altra importante caratteristica è l'altissima isotropia spaziale: la temperatura è costante per 1 parte su 100.000 su tutta la volta celeste, il che implica una grande omogeneità nella distribuzione della materia. Questa radiazione, che pervade tutto l'universo (ci sarebbero circa 400

milioni di fotoni per metro cubo attorno a noi in assenza dell'assorbimento atmosferico), nonostante la sua temperatura così bassa (prossima allo zero assoluto) domina dal punto di vista energetico tutte le altre radiazioni prodotte e diffuse nello spazio dalle galassie e da altri oggetti energetici presenti nel cosmo. Queste caratteristiche impongono che la radiazione sia il prodotto delle prime fasi calde e dense dell'universo in condizioni di stretto equilibrio termodinamico fra materia e radiazione: il lampo (ritardato) del *Big Bang*. A causa dell'enorme espansione le temperature elevatissime presenti nella palla di fuoco primordiale sono diminuite fino a raggiungere il piccolo valore ora osservato. La radiazione cosmica di fondo, il vero marchio del *Big Bang*, ha fornito uno strumento fondamentale per l'indagine cosmologica ed ha contribuito a rendere questa disciplina del tutto simile alle altre per quanto concerne le strategie sperimentali e la possibilità di verifica dei modelli teorici. Un esempio tipico e di grande importanza è stato quello, come si dirà in seguito, della determinazione delle proprietà spaziali dell'universo.

Il *Big Bang* ha generato l'universo nel quale viviamo. Sovente il linguaggio comune non è adeguato a rappresentare la fenomenologia scientifica. Così, l'evento esplosivo iniziale non lo si deve prendere letteralmente nel senso di un'esplosione in uno spazio pre-esistente e con un centro ben definito. Lo spazio stesso è il risultato dell'esplosione, cosicché il materiale "esploso" occupa uniformemente lo spazio da esso stesso creato. Subito dopo l'evento esplosivo iniziale la palla di fuoco primordiale a temperature elevatissime si è rapidamente espansa raffreddandosi. Dopo appena 1/10.000 di secondo temperatura e densità del gas sono scese a valori tali per cui da quel momento in poi la fisica dei processi che avvengono nell'universo è ben conosciuta e calcolabile. Questo è un aspetto di fondamentale importanza ed è veramente straordinario, ma del tutto consistente con il principio cosmologico prima discusso, che le nostre conoscenze terrestri della fisica possano essere impiegate in queste fasi iniziali dell'universo.

Riassumiamo ora alcune tappe importanti dell'evoluzione dell'universo:

Dopo 100 secondi la temperatura è scesa a circa 1 miliardo di gradi, la densità del gas è inferiore alla densità dell'interno del Sole e si possono innestare rapidamente le reazioni nucleari che portano alla formazione degli elementi leggeri (idrogeno, elio, litio e loro isotopi, come il deuterio) nelle proporzioni relative che dipendono dalla mistura di protoni e neutroni, i costituenti della materia ordinaria. Gli elementi leggeri non sono altrimenti prodotti e resi disponibili come risultato finale della evoluzione delle stelle, e questa è una prova addizionale a favore del *Big Bang* caldo. (Il ferro contenuto nell'emoglobina

è il prodotto della fusione nucleare avvenuta all'interno di stelle sufficientemente massicce, e perciò di rapida evoluzione, che sono esplose come supernove e hanno riversato il loro contenuto nel mezzo interstellare prima della formazione del Sistema Solare dallo stesso. Invece l'elio, utilizzato in varie applicazioni tecnologiche, è il prodotto del *Big Bang*. Noi siamo figli delle stelle, ma il nostro antenato è il *Big Bang*). Questa fase, come si dirà in seguito, è cruciale per la determinazione della quantità complessiva di materia barionica, la materia ordinaria di cui noi e le stelle siamo composti.

Dopo circa 1000 secondi la nucleosintesi primordiale cessa e si apre una nuova fase in cui l'universo continua a espandersi raffreddandosi. Data l'alta temperatura il gas, composto prevalentemente da idrogeno con le percentuali dei nuclei degli elementi leggeri prodotti nella nucleosintesi primordiale, rimane altamente ionizzato, è distribuito uniformemente ed è in stretto accoppiamento termodinamico con la radiazione. Il gas è attraversato da onde acustiche (un po' come le onde che increspano la superficie dell'oceano), ma non si possono formare le strutture (stelle, galassie, ecc.) poiché la pressione elevata della radiazione impedisce la frammentazione gravitazionale del gas.

Dopo circa 380.000 anni dal *Big Bang* la temperatura, scesa a circa 3000 gradi, non è più in grado di mantenere il gas ionizzato: i nuclei atomici catturano gli elettroni circostanti e il gas diventa neutro (ricombinazione), gas e radiazione si disaccoppiano ed evolvono in modo indipendente. L'universo da opaco diventa trasparente. Il gas, non più impedito dalla pressione della radiazione, può finalmente frammentarsi in aggregati che per contrazione gravitazionale si condensano vincendo l'effetto contrastante dell'espansione dell'universo. È un processo lungo e complesso che in circa 100 milioni di anni conduce alla formazione delle galassie e degli ammassi di galassie, e all'interno di queste le stelle e i sistemi planetari. L'universo s'illumina e si attuano le condizioni per cui su un pianeta della Via Lattea, che ruota intorno a una stella abbastanza comune come il Sole, si possa realizzare la vita.

L'azione combinata dell'espansione e dell'attrazione gravitazionale locale ha portato l'universo fuori dall'equilibrio di temperatura. Le stelle e le galassie sono dei punti luminosi in un universo altrimenti buio e freddo. La gravità è alla radice del processo evolutivo che ha portato alla formazione del Sole e della vita.

ii) La geometria dell'universo.

Come si è detto, la radiazione cosmica di fondo ora osservata è quella che è stata liberata a una temperatura di circa 3000 gradi quando

l'universo da opaco è diventato trasparente. Essa porta le impronte della storia evolutiva del Big Bang e degli eventi fisici che hanno avuto luogo nella fase immediatamente precedente la sua liberazione. Quando si mappa la distribuzione della temperatura si trova che essa è altamente isotropa, ma con piccole fluttuazioni intorno al valor medio di 2.7 gradi assoluti. (Ritornando alla similitudine introdotta in precedenza, è come se improvvisamente la superficie increspata dell'oceano venisse congelata e noi andassimo a misurarne la distribuzione ed elevazione dei picchi ondosi). A queste fluttuazioni in temperatura corrispondono irregolarità nella distribuzione della materia, zone un po' più dense di gas che per successiva contrazione gravitazionale ed eventuale aggregazione potranno portare alla formazione delle strutture. Senza la presenza di queste irregolarità non si sarebbero formate le galassie e gli ammassi di galassie. Ma, ancor più importante, l'analisi della distribuzione angolare di queste fluttuazioni ha mostrato che la geometria dello spazio è Euclidea, cioè con curvatura nulla nel linguaggio della *Relatività Generale* o, come sovente viene detto, lo spazio è "piatto". Mentre la distribuzione delle irregolarità dipende da processi fisici in loco, la nostra misura della loro distribuzione angolare dipende dal modo in cui i segnali si sono propagati fino a noi, cioè dalla curvatura dello spazio. (In modo del tutto analogo si può scoprire la curvatura della superficie della Terra misurando l'angolo sotteso da un metro campione che viene progressivamente allontanato dall'operatore). Questo importantissimo risultato è stato ottenuto per primo nel 2000 dal gruppo condotto da Paolo de Bernardis dell'Università di Roma "La Sapienza" con l'esperimento BOOMERanG a bordo di un pallone ad alta quota in volo sull'Antartico, ed è stato successivamente confermato (2002) dalle misure ancor più precise effettuate con il satellite WMAP della NASA. Per la prima volta, dopo decenni di vani tentativi eseguiti con telescopi e radiotelescopi su varie classi di oggetti celesti, si è riusciti a determinare la geometria dello spazio. Secondo la Relatività Generale a questa geometria deve corrispondere una quantità di materia-energia che, mediata su tutto lo spazio, risulta in una densità critica equivalente a circa 6 atomi d'idrogeno per metro cubo. La solidità della materia che ci circonda non ci fa percepire il grande vuoto dell'universo!

iii) I nuovi ingredienti dell'universo

Abbiamo visto che gli elementi chimici leggeri sono il risultato della nucleosintesi primordiale che interviene dopo appena 100 secondi dall'esplosione iniziale. Fra queste ceneri nucleari del *Big Bang*, la percentuale di deuterio riveste un'importanza particolare poiché essa dipende in modo critico dalla densità della materia barionica, la

materia ordinaria di cui noi siamo fatti, presente nell'universo. Con le abbondanze osservate di deuterio e con i calcoli dettagliati della nucleosintesi primordiale si trova che la materia ordinaria fornisce solo il 4% della densità critica di materia necessaria a rendere la geometria dell'universo "piatta".

Dove e sotto quale forma si trova la materia necessaria alla realizzazione della geometria "piatta"?

La materia oscura. Da tempo, innumerevoli studi dettagliati della dinamica delle galassie e degli ammassi di galassie hanno dimostrato l'esistenza di un deficit di massa. La stessa Via Lattea, che ruota su se stessa con un periodo di circa 200 milioni di anni, richiede l'esistenza di una massa addizionale di materia, pari ad alcune volte quella misurata sotto forma di stelle, per bilanciare la forza centrifuga. Analogamente, gli ammassi di galassie, concentrazioni di centinaia o più galassie che comprendono gran parte della materia visibile dell'universo, per non sfaldarsi a causa dei moti caotici delle galassie e del gas intergalattico in essi contenuti richiedono la presenza di una massa gravitante addizionale pari a 6-7 volte quella visibile. Si è concluso che l'universo contiene una componente di materia di natura ancora ignota, che interagisce con la materia ordinaria sostanzialmente solo tramite la forza di gravità, e che rende conto per circa il 23% della densità critica. Questa materia oscura comprende una massa circa 6 volte superiore a quella della materia ordinaria.

L'energia oscura. La parte ancora mancante per chiudere il bilancio richiesto dalla geometria "piatta" è direttamente collegata alla recente scoperta di una accelerazione positiva del ritmo di espansione dell'universo. Una scoperta sorprendente poiché nel modello classico del *Big Bang* ci si aspetta che, al contrario, il ritmo di espansione venga progressivamente rallentato a causa dell'attrazione gravitazionale che l'universo esercita su se stesso (così come la velocità di un sasso lanciato in aria viene progressivamente rallentata dall'attrazione gravitazionale della Terra). La scoperta si basa sullo studio di un particolare tipo di violente esplosioni stellari, le supernove di "tipo Ia", la cui potenza è nota, cosicché l'intensità luminosa osservata ai telescopi dipende solo dalla loro distanza. Dall'analisi della luce emessa da campioni sufficientemente numerosi di supernove esplose in galassie poste a grandi distanze, due gruppi di ricerca internazionali hanno concluso (1998) che le luminosità osservate ai telescopi erano più deboli di quelle previste dai modelli classici del *Big Bang*, e quindi le distanze delle

corrispondenti galassie maggiori, con l'implicazione della presenza di un campo di forze repulsivo di natura ignota che contrasta e vince l'attrazione gravitazionale stirando le dimensioni dell'universo. A questo campo di forze repulsivo che permea tutto l'universo corrisponde una densità d'energia e a questa, secondo la relatività di Einstein, una densità di massa. L'incrocio dei dati porta all'importante conclusione che è proprio l'energia oscura quella che serve a sopperire il 73% necessario a chiudere il bilancio di massa richiesto dalla geometria "piatta" dell'universo.

iv) L'entropia dell'universo e i buchi neri

Abbiamo visto che fino all'epoca della ricombinazione, cioè per quasi un milione di anni dal *Big Bang*, lo spazio era riempito uniformemente da un gas completamente ionizzato (per la gran parte nuclei d'idrogeno, ma con una percentuale importante di nuclei di elio) in equilibrio termodinamico, e quindi in un massimo di entropia. L'espansione del gas è stata adiabatica (ovviamente non v'è uno spazio esterno con il quale trasferire energia!) e in tali condizioni la termodinamica c'insegna che l'entropia è rimasta costante. Quantitativamente si trova che l'entropia è proporzionale al rapporto fra il numero di fotoni della radiazione universale e il numero di barioni (inglobando in essi protoni e neutroni), un rapporto che resta invariato nel corso dell'espansione e vale circa un miliardo (10^9 fotoni/barione). L'entropia del *Big Bang* è sostanzialmente rappresentata dalla radiazione universale. Abbiamo però visto che l'equilibrio termodinamico del gas si rompe dopo la ricombinazione quando, per effetto delle forze gravitazionali in gioco, notevoli quantità di gas si condensano a formare le strutture osservate (stelle, galassie, ammassi di galassie). Questo porta ad un aumento globale dell'entropia dell'universo che si manifesta in tutta la sua drammaticità nella formazione dei "buchi neri", collassi gravitazionali estremi previsti dalla teoria della relatività generale quando la pressione esercitata dalla materia non è più in grado di supportare il proprio peso.

La geometria dello spazio-tempo attorno a un buco nero viene completamente incurvata fino a rinchiudersi sullo stesso, cosicché materia ed energia, e quindi la luce, non possono più sfuggire rendendo l'oggetto invisibile all'osservazione diretta, un "buco nero" appunto. Per un oggetto che entra in un buco nero gli effetti distortenti dovuti alla gravità sono devastanti ed esso viene via via sgretolato nei suoi componenti più elementari. Si potrebbe qui ricordare il dantesco "lasciate ogni speranza o voi che entrate". La superficie di non ritorno (tecnicamente orizzonte degli eventi) nel caso semplice, ma rappresentativo, di

un collasso gravitazionale radiale è definita da una coordinata radiale (nota come raggio di Schwarzschild) il cui valore è proporzionale alla massa del buco nero. Ad esempio, un buco nero di massa pari a quella del Sole ha un raggio di Schwarzschild di 3 Km (1/250.000 il raggio del Sole!), mentre se si considera una massa pari a 100 milioni di volte la massa solare questa diventa un buco nero se contenuta all'interno di una sfera con un raggio pari a quello dell'orbita della Terra.

Per definizione un buco nero non è accessibile all'osservazione diretta, ma quello che si può investigare sono gli effetti prodotti sull'ambiente circostante. Orbene, in questi ultimi decenni l'applicazione di varie tecniche osservative da terra e dallo spazio hanno permesso d'individuare tutta una serie di oggetti "candidati buchi neri". In ultima analisi queste tecniche hanno permesso di porre limiti inferiori alle masse e, se del caso, limiti superiori agli spazi occupati da oggetti non altrimenti rivelabili, verificando così la corrispondenza fra massa e raggio di Schwarzschild prima accennata. In tal modo sono stati trovati buchi neri con masse di tipo stellare (tre o più masse solari conseguenti il collasso gravitazionale delle porzioni interne di stelle massicce al termine della loro evoluzione), un buco nero di circa un milione di masse solari nel nucleo della nostra Galassia e buchi neri ancor più massicci (100 milioni-un miliardo di masse solari) necessari a produrre le enormi quantità di energia emesse dai nuclei galattici attivi di molte galassie (come radiogalassie e quasar; FIG.5). È opinione comune fra gli astrofisici che gran parte delle galassie ospitino nei loro nuclei buchi neri di grande massa.

Avendo stabilito che esiste una solida evidenza sull'esistenza diffusa di buchi neri di masse varie, ciò che rileva per il nostro discorso sull'entropia dell'universo è la termodinamica dei buchi neri. In particolare, i buchi neri possiedono un'entropia che può essere calcolata con la formula di Bekenstein-Hawking. Nel caso di simmetria sferica l'entropia risulta proporzionale al quadrato della massa del buco nero, cosicché l'entropia per barione di un buco nero cresce al crescere della sua massa¹. Per un buco nero di una massa solare si trova che l'entropia per barione è undici ordini di grandezza superiore a quella della radiazione universale quando misurata nelle stesse unità (10^{20} /barione). Se immaginiamo, in accordo con quanto prima illustrato, che ogni galassia contenga almeno un buco nero massiccio di un milione di masse solari allora l'entropia, mediata su tutta la materia barionica presente nell'universo, è di circa 10^{21} per barione, con un enorme guadagno di entropia rispetto all'epoca in cui il gas era in equilibrio termico (10^9 foto-

ni/barione). Nella stima dell'entropia dell'universo Roger Penrose² si è spinto oltre ipotizzando che in un lontano futuro stelle e gas di ogni galassia verranno risucchiati nei rispettivi buchi neri centrali. Quindi l'intervento della gravità su scala cosmica sembra garantire un continuo e vigoroso aumento dell'entropia, un gradiente positivo congruente con la seconda legge della termodinamica e della apparente asimmetria temporale, nonostante la perfetta simmetria temporale delle equazioni fondamentali della fisica. Ma questo di per sé non spiega la seconda legge della termodinamica. Come sottolineato da Penrose, e a suo tempo intravisto da Boltzmann, il vero problema è quello di capire come mai la macchina "universo" sia stata avviata a così bassa entropia. Questo è stato illustrato da Penrose nell'ipotesi che l'espansione dell'universo, soggetto alla propria auto-gravità, venga rallentata fino ad azzerarsi a un tempo finito nel futuro, dopo di che il moto s'invertirebbe portando a un collasso gravitazionale inarrestabile – un corpo nero di massa uguale a quella di tutto l'universo che collassa alla singolarità finale dello spazio-tempo con un enorme aumento dell'entropia (calcolabile con la formula di Bekenstein-Hawking). Comparando l'entropia del *Big Bang* con quella di questo ipotetico collasso finale Penrose ha dedotto che il *Big Bang* si deve essere attivato con una precisione di una parte su una cifra mostruosamente grande (1 seguito da 23 zeri), e conclude che le condizioni peculiari del *Big Bang* iniziale non possono essere comprese in assenza di una nuova teoria (gravità quantistica) in grado di descrivere la singolarità iniziale dello spazio-tempo. Naturalmente si può obiettare che l'universo potrebbe espandersi per sempre, in accordo con l'attuale evidenza di un'accelerazione positiva del ritmo di espansione (della quale si è detto in precedenza), ma ciò non inficia la conclusione basilare di Penrose. In effetti possiamo ripeterne l'esercizio limitandoci all'entropia attuale dell'universo (10^{21} /barione per un totale di circa 10^{78} barioni presenti nell'universo); si deduce che la precisione con la quale si è attivato il *Big Bang* è stata di una parte su una cifra data da un 1 seguito da 99 zeri, il che non cambia qualitativamente la conclusione di Penrose.

6. Alcune considerazioni a chiusura

A fronte del formidabile problema posto dalla bassa entropia del *Big Bang* sono state avanzate varie proposte. Di quella avanzata da Penrose e altri, che sostanzialmente fa appello ad una nuova teoria fondamentale della fisica (ancora da scoprire) che incorpori la quantizzazione della gravità, abbiamo già accennato. Altri ipotizzano l'esistenza di una molteplicità di universi con caratteristiche fisiche diverse (i multiversi oggi tanto di moda), cosicché il nostro è quello in cui si sono verificate

le condizioni per lo sviluppo della vita così come la conosciamo. A mio avviso questa visione antropica, del resto già avanzata oltre un secolo fa da Boltzmann nel suo tentativo di comprendere la genesi della seconda legge della termodinamica, in realtà non spiega nulla, ma rimanda il problema alla verifica fisica della validità dei multiversi e delle teorie che ad essi conducono.

Fino ad ora ci siamo occupati dell'asimmetria temporale, e del suo significato in relazione alla simmetria delle equazioni fondamentali della fisica, senza accennare alla questione della simmetria o, viceversa, asimmetria del tempo. In effetti viene quasi spontaneo pensare che così come lo spazio anche il tempo abbia avuto inizio con il *Big Bang*. Ma questa non è una visione condivisa da tutti i fisici e cosmologi, e in effetti sono state avanzate alcune proposte teoriche volte a superare il problema della supposta singolarità iniziale tenendo conto degli inevitabili effetti quantistici. In particolare, Gabriele Veneziano e collaboratori hanno elaborato un modello, basato sulla teoria delle stringhe (ancora non provata), secondo il quale il *Big Bang* non coincide con lo zero del tempo, ma è il risultato di un "rimbalzo" da un precedente collasso gravitazionale, visto che le stringhe, oggetti ipotetici elementari che ubbidiscono alla meccanica quantistica, non possono essere compresse oltre un certo limite e in tal modo sarebbe evitata la singolarità. Secondo questo modello il tempo potrebbe estendersi infinitamente nel passato e nel futuro.