

FRANCESCO LUCCHIN

## RECENTI SVILUPPI IN COSMOLOGIA. L'UNIVERSO E L'UOMO \*

### 1. Introduzione

La moderna Cosmologia è indubbiamente una scienza affascinante perché si pone l'ambizioso scopo di scoprire l'origine, l'evoluzione e la struttura su grande scala dell'universo. È una scienza in rapidissima evoluzione, sia dal punto di vista osservativo (ad esempio è del 1992 la misura del livello di anisotropia della radiazione di fondo da parte del satellite COBE), che modellistico (universo inflazionario, scenari di origine delle galassie in modelli di universo dominati da materia oscura, proprietà dell'universo primordiale, ...). Anche per tale ragione la Cosmologia è di non facile divulgazione. Le pagine seguenti vorrebbero offrire una visione né banalmente divulgativa né strettamente tecnica della moderna concezione dell'universo.

Prima di illustrare i recenti sviluppi nel campo della Cosmologia, verranno dati nel paragrafo 2 una breve descrizione della struttura su grande scala dell'universo e nel paragrafo 3 alcuni accenni sulle teorie della fisica moderna che descrivono le interazioni fondamentali. Come vedremo infatti i recenti progressi in Cosmologia sono da attribuire essenzialmente alla stretta connessione che si è venuta a creare fra tale disciplina e la fisica delle particelle elementari, diventata sempre più importante soprattutto a partire dalla fine degli anni '70. Nel paragrafo 4 sarà presentato brevemente il cosiddetto modello standard dell'universo, con i suoi successi e i suoi problemi, mentre nei paragrafi 5 e 6 vedremo come i recenti sviluppi risolvano, anche se a volte solo qualitativamente, tali difficoltà. Si accennerà poi nel paragrafo 7 agli scenari sull'origine delle strutture cosmiche (galassie, ammassi di galassie, struttura su grande scala dell'universo), al momento il problema più complesso della ricerca cosmologica. In conclusione, nel paragrafo 7, sarà accennato alla complessa relazione uomo-universo secondo il moderno Principio Antropico Cosmologico.

\* Conferenza tenuta il 21 febbraio 1997 nell'Odeon Olimpico.

## 2. La struttura su grande scala dell'universo

Il risultato più rilevante dell'analisi della struttura su grande scala dell'universo è la scoperta che l'universo nell'intervallo che va da qualche decina di kpc (kiloparsec:  $1 \text{ kpc} = 10^{-3} \text{ Mpc}$ ; il Megaparsec, Mpc, è la tipica unità di lunghezza di Cosmologia, pari a  $3 \times 10^{18} \text{ km}$ , percorsa dalla luce in tre milioni di anni circa; la velocità della luce è di  $300.000 \text{ km/sec}$ ), scala delle galassie, fino a circa  $100 \text{ Mpc}$ , scala dei superammassi, è costituito da addensamenti: galassie, gruppi, ammassi, superammassi. Solo su scale molto maggiori di  $100 \text{ Mpc}$  la distribuzione della materia è omogenea ed isotropa, come è messo in evidenza soprattutto dal bassissimo livello di anisotropia della radiazione di fondo.

L'elemento fondamentale della «tessitura» dell'universo sono le *galassie*, aggregati di stelle e gas con massa che va da  $10^7 M_{\odot}$  ( $1 M_{\odot}$  è la massa del Sole, una stella di massa media, pari a circa  $2 \times 10^{30} \text{ kg}$ ), per le galassie nane, fino a  $10^{12} M_{\odot}$ , per le galassie giganti: la nostra galassia, la Via Lattea, ove si trova, un po' in periferia, il Sole con il suo sistema planetario di cui fa parte la Terra, ha una massa di circa  $10^{11} M_{\odot}$ . La scoperta che tali sistemi stellari erano strutture al di fuori della Via Lattea avvenne negli anni '20; tale scoperta aprì la strada ad Hubble che, nel 1929, formulò la sua famosissima legge sull'espansione dell'universo. Le galassie possono essere classificate da un punto di vista morfologico: ci sono le galassie ellittiche, caratterizzate da una forma sferoidale; le galassie a spirale, costituite da un nucleo centrale molto brillante ed alcuni bracci a spirale entro un disco appiattito ed esteso (la nostra galassia è una tipica spirale); le galassie S0, una classe intermedia tra le ellittiche e le spirali; le galassie irregolari, come la Grande Nube di Magellano, visibile nell'emisfero australe.

Più della metà delle galassie fanno parte di gruppi o di ammassi. I *gruppi di galassie* possono contenere qualche decina di membri: esempio tipico è il Gruppo Locale, costituito da una ventina di galassie, di cui la nostra galassia e quella di Andromeda sono i membri più preminenti; la massa dei gruppi è di circa  $10^{13} M_{\odot}$ . Gli *ammassi di galassie* contengono da qualche centinaio fino a qualche migliaio di galassie ed hanno una massa che può arrivare fino a  $10^{15} M_{\odot}$ . A loro volta gli ammassi si aggregano in strutture più grandi, spesso appiattite o filamentari, i *superammassi di galassie*, come il Superammasso Locale, di cui fa parte anche il Gruppo Locale, incentrato attorno all'ammasso della Vergine; essi hanno una massa dell'ordine di  $10^{16} M_{\odot}$ ; esistono ormai cataloghi con qualche decina di superammassi.

Tra i superammassi vi sono regioni enormi quasi prive di galassie; i *grandi vuoti*, di diametro di qualche decina di Mpc; recenti osserva-

zioni sembrano indicare che i grandi vuoti sono circondati da strutture più o meno sferiche («bolle»), costituite da filamenti e «shell» di galassie, alle intersezioni delle quali si troverebbero i superammassi: su grande scala l'universo presenterebbe quindi una sorta di struttura cellulare.

### 3. Le interazioni fondamentali

Lo studio dei processi fisici mette in luce l'esistenza di un grande numero di forze: peso, forze elettriche, attrito, forza muscolare, ... Tuttavia un'analisi approfondita dei fenomeni permette di ricondurre tutte le forze a solo quattro *interazioni fondamentali: gravitazionale, elettromagnetica, debole e forte.*

#### L'interazione gravitazionale

L'*interazione gravitazionale* è responsabile dell'attrazione dei corpi da parte della terra e del moto dei corpi celesti. Anche la dinamica dell'universo su più grande scala (galassie, gruppi, ammassi di galassie...) è regolata essenzialmente dalla gravità, descritta dalla *legge di gravitazione universale di Newton*, che esprime la forza di attrazione tra due corpi. Nel 1915 Einstein formulò una complessa teoria della gravitazione, la *Relatività Generale*, spinto essenzialmente dall'esigenza di estendere alla teoria della gravità le proprietà della *Relatività Ristretta*, da lui formulata nel 1905, teoria rivelatasi essenziale nella descrizione dei fenomeni elettromagnetici. La Relatività Generale ridà con estrema precisione i risultati previsti dalla semplice teoria newtoniana, salvo in casi particolari, come ad esempio in presenza di campi gravitazionali molto intensi (buchi neri) o nella descrizione della dinamica globale dell'universo. Più avanti sarà delineata la filosofia che sta alla base della teoria di Einstein.

#### L'interazione elettromagnetica

Verso la fine del secolo scorso i fenomeni relativi all'ottica, all'elettricità e al magnetismo trovarono una descrizione unitaria nell'ambito della teoria di Maxwell. Alla base di tale teoria sta l'*interazione elettromagnetica*, che interessa le particelle cariche elettricamente (come il protone e l'elettrone) o con proprietà magnetiche (come il neutrone, che è elettricamente neutro). La *teoria maxwelliana* aprì la via alla formulazione della *Relatività Ristretta*: il complesso dei fenomeni elettromagnetici infatti può essere descritto in una forma autoconsistente solo da un punto di vista relativistico. Il più noto esempio di interazione elettromagnetica è la forza elettrostatica tra due particelle cariche,

simile formalmente alla forza newtoniana tra due masse: la forza è molto più intensa di quella gravitazionale e può essere anche repulsiva se le cariche sono dello stesso segno.

È utile ricordare schematicamente cosa prevede la *Relatività Ristretta*:

- 1) rispetto ad ogni sistema di riferimento la luce viaggia con la stessa velocità,  $c = 300.000 \text{ km/sec}$ , la massima possibile;
- 2) la massa  $m$  è una forma di energia, secondo la nota formula  $E = mc^2$ ;
- 3) l'estensione degli intervalli spaziali e temporali non è assoluta, ma dipende dalla velocità dell'osservatore.

Gli enormi progressi avvenuti nei primi decenni di questo secolo nella comprensione della fisica molecolare, atomica e nucleare, non sempre descrivibili nell'ambito della teoria maxwelliana, sono stati possibili con l'introduzione della *Meccanica Quantistica*. Attualmente tutti i fenomeni elettromagnetici sono perfettamente descritti nell'ambito della teoria quantistica detta *Quantoelettrodinamica* (QED). Secondo tale teoria l'energia elettromagnetica è emessa o assorbita solo per quantità discrete, o «quanti», detti fotoni, particelle prive di massa e di carica elettrica. La teoria di Maxwell è sostanzialmente contenuta nella QED. Ad esempio la forza elettrostatica tra due particelle cariche è dovuta, da un punto di vista quantistico, ad un incessante reciproco scambio di fotoni, che sono da interpretare come i «vettori» (veicoli messaggeri) delle interazioni elettromagnetiche.

La QED descrive fra l'altro anche fenomeni di annichilazione e materializzazione di particelle. Per ogni particella (protone  $p$ , neutrone  $n$ , elettrone  $e$ , ...) esiste una antiparticella (antiprotone  $\bar{p}$ , antineutrone  $\bar{n}$ , positrone  $e^+$  ...), con massa uguale ed eventuale carica elettrica opposta. Nella reazione di annichilazione una coppia particella-antiparticella sparisce dando origine a fotoni di energia pari all'energia originaria. Esiste anche la reazione inversa, per la quale due fotoni di energia adeguata spariscono per materializzare una coppia di particelle. Dal punto di vista quantistico il vuoto, cioè l'assenza di particelle, deve essere considerato come una sorta di magma effervescente, ove incessantemente coppie di ogni tipo si materializzano e rapidamente si annichilano. Le proprietà del *vuoto quantistico* sono essenziali in molti processi che avvengono nell'universo primordiale, come ad esempio il processo inflazionario, come si vedrà più avanti.

### L'interazione debole

L'*interazione debole*, che interessa le particelle dette *leptoni*, regola alcuni processi nucleari di grande rilevanza anche in ambito astrofisico. Esistono tre «famiglie» leptoniche, ognuna costituita da due parti-

celle, una carica e una neutra: sono le famiglie aventi come particella carica rispettivamente l'elettrone  $e$ , il muone  $\mu$  ed il tau  $\tau$  e come particella neutra i rispettivi neutrini ( $\nu_e$ ;  $\nu_\mu$ ;  $\nu_\tau$ ). Si è sempre ritenuto che i neutrini siano privi di massa; tuttavia recenti risultati, in realtà molto controversi, di alcuni esperimenti sembrano attribuire al neutrino elettronico una piccolissima massa, dell'ordine di  $5 \times 10^{-5}$  della massa dell'elettrone  $m_e$ . In tal caso i neutrini avrebbero una notevole rilevanza cosmologica, in quanto costituirebbero la cosiddetta *materia oscura*, che, come si illustrerà più avanti, domina la dinamica dell'universo e delle strutture cosmiche.

La teoria delle interazioni deboli, formulata alla fine degli anni '60, prevede che esistano tre particelle che svolgono il ruolo di «vettori» (come i fotoni lo sono nel caso delle interazioni elettromagnetiche): tali particelle sono i «bosoni intermedi»  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z_0$ , di massa quasi cento volte quella del protone. L'esistenza di tali particelle è stata confermata sperimentalmente nei laboratori del CERN a Ginevra nel 1983. La teoria prevede inoltre che le interazioni elettromagnetiche e le interazioni deboli diventano indistinguibili se le relazioni tra particelle avvengono al di sopra di una energia critica, detta *energia della rottura della simmetria elettrodebole*, dell'ordine di 100 GeV (1 GeV è l'energia posseduta da una particella di un gas alla temperatura di circa  $10^{13}$  °K; come è noto le temperature in gradi Kelvin, °K, sono pari alle usuali temperature in gradi centigradi aumentate di 273). Per tale motivo la teoria prende il nome di *teoria delle interazioni elettrodeboli*.

### L'interazione forte

L'*interazione forte*, che interessa le particelle elementari dette *adroni*, come il protone, il neutrone ed i pioni, è responsabile ad esempio delle intense forze che tengono uniti i nuclei atomici. La teoria che descrive le interazioni forti è la *Quantocromodinamica* (QCD), anch'essa sviluppata negli anni '60. Pur non avendo avuto ancora conferme sperimentali confrontabili con quelle della teoria delle interazioni elettrodeboli, la QCD dà tuttavia un quadro soddisfacente dei fenomeni conosciuti. La teoria prevede che gli adroni sono costituiti da particelle più elementari, i quark: ad esempio tre per il protone e due per il pione. Come per i leptoni, anche per i quark esistono tre famiglie, ciascuna composta da due quark. I quark hanno, oltre la carica elettrica (che può essere solo  $1/3$  o  $2/3$  di quella dell'elettrone), anche una carica cosiddetta di «colore»: vi sono tre tipi di colore e ogni quark si presenta in ognuno dei tre «colori» possibili. I quark interagiscono tra loro tramite otto «bosoni vettori», i gluoni, che sono particelle senza massa. Al di sopra di una energia dell'ordine di 0.5 GeV esisterebbero solo quark liberi; al di sotto di tale energia i gluoni «incollano» (in

inglese *glue* è la colla) fra loro due o tre quark, in combinazioni diverse, a formare i vari adroni.

Negli anni '70 vennero formulate *Teorie di Grande Unificazione* (GUT), le quali prevedono la unificazione delle interazioni elettrodeboli e delle interazioni forti al di sopra di una energia critica, detta *energia della simmetria GUT*, dell'ordine forse di  $10^{15}$  GeV. Anche in questo caso le particelle, per le quali non avrebbe più senso la distinzione tra leptoni e quark, interagirebbero tramite «bosoni vettori»: a quelli fin qui incontrati si aggiungerebbero i bosoni *X*. Le teorie di grande unificazione non hanno avuto ancora alcuna conferma sperimentale.

È forse formulabile anche una *teoria di superunificazione*, nella quale alle interazioni elettrodeboli e forti siano unificate anche le interazioni gravitazionali? Fino ad ora sono state tentate varie strade in questa direzione, come ad esempio la *Supergravità* e, recentemente, la *Teoria delle superstringhe*, con scarsi successi. Una teoria che riuscisse a quantizzare la Relatività Generale costituirebbe sicuramente il primo passo, se non il decisivo, verso il traguardo della superunificazione, la quale sarebbe operante probabilmente a energie dell'ordine di  $10^{19}$  GeV, detta *energia di Planck*.

#### 4. Il modello standard di universo

La teoria che può descrivere la dinamica globale dell'universo è la *Relatività Generale di Einstein*. La filosofia che sta alla base di tale teoria è la seguente:

- 1) le coordinate spaziali e temporali, che descrivono il moto dei corpi, sono inscindibilmente connesse, a formare lo spazio-tempo;
- 2) in uno spazio-tempo vuoto una particella viaggia di moto rettilineo uniforme;
- 3) la presenza di energia (la massa, come in Relatività Ristretta, è un caso particolare di energia) determina un «incurvamento» dello spazio-tempo;
- 4) la particella, in tale spazio-tempo curvo, segue ben definite traiettorie «curve», dette «geodetiche»;
- 5) le equazioni della Relatività Generale descrivono come la distribuzione dell'energia incurva lo spazio-tempo.

La teoria di Einstein prevede pertanto che anche l'energia ha un effetto gravitazionale e che, di converso, anche particelle senza massa risentono dell'effetto di un campo gravitazionale.

Per descrivere l'universo dal punto di vista della Relatività Generale si devono necessariamente approssimare le sue proprietà con

modelli semplici, che possano essere risolti in maniera soddisfacente. Si assume usualmente un modello di universo omogeneo e isotropo, senza cioè posizioni o direzioni privilegiate. Tale approssimazione è suggerita dalle proprietà dell'universo su scale molto grandi, superiori a qualche centinaio di Megaparsec, quali la distribuzione spaziale delle galassie e degli ammassi di galassie e l'estrema isotropia della radiazione di fondo a 3 °K, come confermato dai risultati del satellite COBE. La proprietà di omogeneità e di isotropia dell'universo ha avuto ed ha un ruolo talmente importante in Cosmologia da essere codificata in un principio, il *Principio Cosmologico*. Come vedremo, agli inizi degli anni '80, tale principio ha trovato una giustificazione nell'ambito della teoria dell'universo inflazionario. Nella formulazione dei modelli cosmologici si assume inoltre che l'universo sia costituito da un «fluido»: attualmente da un «gas» di ammassi di galassie e, in tempi primordiali, da un gas di particelle elementari (quark, leptoni, fotoni, ...). Le equazioni di Einstein della Relatività Generale applicate ad un modello di fluido omogeneo e isotropo si riducono a due equazioni, dette *equazioni di Friedmann*, di semplice interpretazione newtoniana.

La prima equazione esprime il fatto che l'universo non può essere statico, ma si espande (o si contrae) in maniera globale ed isotropa: tale espansione (o contrazione) è via via più lenta (più veloce) a causa del fatto che le particelle di materia che costituiscono l'universo si attraggono reciprocamente.

La seconda equazione esprime la conservazione dell'energia (cinetica + potenziale) di una particella che partecipa all'espansione dell'universo.

Quando venne formulata la Relatività Generale era opinione generale che l'universo su grandi scale fosse sostanzialmente statico; la *legge di Hubble*,  $v = H_0 d$ , per cui due galassie molto lontane si allontanano l'una dall'altra con una velocità  $v$  proporzionale alla reciproca distanza  $d$  (la costante di proporzionalità  $H_0$  è detta *costante di Hubble*), fu scoperta infatti solo una decina di anni più tardi. Per ovviare a questo (presunto) difetto della teoria Einstein introdusse nelle sue equazioni un termine aggiuntivo, la *costante cosmologica*, ancora compatibile con la filosofia che stava alla base della sua teoria. Con un opportuno valore di tale costante, che rappresenta una sorta di forza repulsiva o di antigravità su scale cosmiche, egli poté ottenere infatti una soluzione cosmologica statica. La scoperta della espansione di Hubble, perfettamente compatibile con le equazioni originarie di Friedmann, convinse Einstein ad abbandonare l'ipotesi della costante cosmologica. Come vedremo, l'ironia della sorte ha voluto che, circa 60 anni dopo, uno dei più interessanti progressi della cosmologia teorica moderna, l'*universo inflazionario*, trovasse il suo fondamento sulla temporanea esistenza di

una sorta di «costante cosmologica», attiva soltanto, per particolari proprietà relativistiche delle moderne teorie delle particelle elementari (proprietà del vuoto quantistico), in una brevissima fase dell'universo primordiale.

Le due equazioni precedentemente descritte, oltre all'espansione dell'universo con legge del tipo di quella di Hubble, prevedono anche l'esistenza nel passato, a un tempo dell'ordine di  $10^{10}$  anni dal presente, di un istante in cui la distanza fra due punti qualsiasi dell'universo tende ad annullarsi. In tale istante, detto *big-bang* e assunto come tempo iniziale, diventano infinite la densità  $\rho$  e la velocità di recessione  $v$ . Quale significato fisico attribuire al *big-bang*? Come anche Einstein riconobbe, le equazioni della Relatività Generale non sono più adeguate a descrivere la evoluzione dell'universo quando, andando a ritroso nel tempo, si raggiunge il *tempo di Planck*, a  $10^{-43}$  sec dopo il *big-bang*, la densità ha un valore  $\rho_P \approx 10^{93}$  g/cm<sup>3</sup> (come è noto l'acqua ha una densità di 1 g/cm<sup>3</sup>!) e la temperatura un valore  $10^{32}$  °K. Il *big-bang* deve quindi essere considerato come un tempo di riferimento e non come uno stato fisico vero e proprio. Nell'epoca antecedente al tempo di Planck effetti quantistici sulla scala dell'intero universo modificano profondamente i risultati previsti dalla Relatività Generale; la teoria quantistica della gravità è attualmente ben lungi dall'essere fondata, ma già parziali correzioni quantistiche alla teoria di Einstein fanno prevedere che la singolarità del *big-bang* può essere evitata. L'attuale impossibilità di descrivere l'evoluzione dell'universo prima del tempo di Planck va spesso sotto il nome di *problema dell'origine dell'universo*.

Per quanto riguarda l'evoluzione futura, i *modelli di universo* descritti dalle due equazioni di Friedmann si dividono in due grandi classi. Nella prima i modelli sono caratterizzati dal fatto che l'energia cinetica di una generica particella relativa all'espansione dell'universo è maggiore o uguale alla sua energia dovuta all'attrazione gravitazionale (più precisamente al valore assoluto di tale energia) delle altre particelle. In tali modelli, detti rispettivamente *aperti* e di Einstein-De Sitter, l'espansione dura indefinitamente nel tempo. I modelli in cui il valore assoluto dell'energia di attrazione gravitazionale supera invece l'energia cinetica di espansione sono detti *chiusi*: dopo aver raggiunto un massimo di espansione ad un tempo successivo a quello presente  $t_0$ , in altrettanto tempo si contraggono fino a raggiungere una densità infinita (tale istante è detto *big-crunch*; sul significato fisico del tempo oltre il quale la densità supera di nuovo, durante la fase di contrazione, il valore  $\rho_P$  devono essere fatte però considerazioni analoghe a quelle fatte precedentemente per il *big-bang*). Si può dimostrare che il *parametro di densità* attuale  $\Omega_0 = \Omega(t_0) = \rho_0/\rho_{0c}$  ( $\rho_0$  è la densità totale,  $\rho_{0c} = 10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup> è detta densità critica) è minore, uguale o maggiore



ad uno rispettivamente nei modelli aperti, di Einstein-De Sitter o chiusi. Il semplice significato di questo risultato è il seguente: universi con densità maggiore di quella critica, per l'eccessivo effetto dell'autogravità, sono destinati, ad un certo punto, a veder bloccata la loro espansione e a collassare; quelli con densità minore od uguale si espandono indefinitamente, in quanto l'effetto dell'autogravità non è sufficiente a bloccare l'espansione.

Le due precedenti classi di modelli cosmologici si differenziano anche per le proprietà geometriche dell'universo. Nel primo caso lo spazio è infinito. Nel secondo caso lo spazio ha un volume finito e superficie laterale nulla; questa proprietà è dovuta alla particolare «curvatura» dello spazio e può essere illustrata mediante una analogia bidimensionale. Anche le superfici sono divise in «aperte» e «chiuse». Nel primo caso, ad esempio in un piano, cerchi di raggio via via maggiore sono racchiusi da circonferenze di perimetro via via maggiore. Invece la superficie di una sfera è chiusa; la superficie contenente un «polo» e limitata da un «parallelo» cresce con l'avvicinarsi del parallelo al polo opposto, mentre il perimetro dapprima cresce, per poi, superato l'«equatore», decrescere. Alla fine la superficie coincide con la sfera stessa e il relativo perimetro si è ridotto ad un punto: la sfera ha una superficie finita e un perimetro nullo.

## 5. Cosmologia e fisica delle particelle elementari

La scoperta della radiazione di fondo a 3 °K nel 1965 segna l'inizio della cosmologia moderna: da un approccio prevalentemente matematico, tendente a formulare i possibili modelli di universo, si passò ad una vera e propria cosmologia fisica, che mira a studiare i processi avvenuti nelle fasi primordiali del nostro universo, quando, secondo il modello dell'*hot big-bang*, per l'altissima temperatura esso era costituito da un plasma di particelle elementari di elevata energia e mutualmente interagenti.

La sinergia tra fisica delle particelle elementari e cosmologia si è andata successivamente approfondendo in quanto i processi fisici, che le *Teorie di Grande Unificazione*, se vere, prevedono avvenire ad altissime energie, potranno essere verificati in laboratorio solo in forma indiretta e marginale, mentre nei primissimi istanti dell'universo essi avrebbero svolto un ruolo determinante. Ad esempio la rottura della simmetria GUT sarebbe avvenuta a  $t_{GUT} \simeq 10^{-36}$  sec dopo il *big-bang*, quando la temperatura dell'universo era di  $10^{28}$  °K. Successivamente a  $10^{-2}$  sec, quando la temperatura è scesa a circa  $10^{15}$  °K, avrebbe avuto luogo la rottura della simmetria elettrodebole. Si può dire certamente

che l'universo nei suoi primi istanti è stato il vero laboratorio della fisica teorica e che il progresso nella comprensione dell'infinitamente piccolo (fisica delle particelle elementari) sarà sempre più collegato con quello dell'infinitamente grande (cosmologia).

Alla fase primordiale di rottura della simmetria GUT sarebbero collegati il processo di *bariosintesi cosmologica* ed una *fase di espansione inflazionaria dell'universo*. Dell'inflazione si parlerà nel prossimo capitolo.

### **Il problema dell'asimmetria primordiale materia-antimateria**

È stato a lungo dibattuto il *problema della asimmetria primordiale materia-antimateria*. L'universo osservato è costituito essenzialmente di materia (sotto forma di barioni, cioè protoni e neutroni, e di elettroni), non di antimateria (antiprotoni, antineutroni e positroni); ci sono inoltre approssimativamente  $10^9$  fotoni della radiazione di fondo per ogni barione. Si potrebbe dimostrare che tale rapporto indica che primordialmente c'era una quasi perfetta simmetria tra materia ed antimateria: precisamente ogni  $10^9$  antiparticelle c'erano circa  $10^9 + 1$  particelle. I processi di annichilazione particella-antiparticella avvenute nel corso dell'evoluzione dell'universo hanno lasciato in vita solo il primordiale piccolissimo eccesso di materia, che si trova ora aggregata a formare le strutture cosmiche, e i fotoni prodotti dalle successive annichilazioni, che costituiscono ora la radiazione di fondo.

L'applicazione delle teorie di grande unificazione allo studio delle fasi primordiali dell'universo può forse fornire la soluzione al problema dell'origine della iniziale asimmetria materia-antimateria. Secondo tale modello di *bariosintesi cosmologica*, prima della rottura della simmetria GUT l'universo avrebbe contenuto in ugual numero particelle e antiparticelle di tutti i tipi previsti dalla teoria. Durante la fase di rottura però le condizioni dell'universo permettono il formarsi di una piccola asimmetria a favore della materia, tramite una catena di reazioni che trasforma degli antiquark in quark. Il valore della asimmetria previsto è molto incerto, a causa dell'incertezza con cui sono conosciuti vari parametri della teoria; è tuttavia un successo il fatto che tale valore non è incompatibile con quello desiderato.

### **Il problema della materia oscura**

Un'altra importante connessione tra cosmologia e moderna fisica delle particelle elementari è costituita dal *problema della materia oscura*. La dinamica delle galassie e degli ammassi di galassie mostra che la materia luminosa, quella che vediamo cioè al telescopio, è una piccola frazione (meno del 10%) della materia che globalmente è tenuta assieme in tali strutture dalla attrazione gravitazionale. Uno dei principali

problemi della moderna cosmologia è quello di scoprire la natura della materia oscura. Considerazioni di vario tipo sembrano indicare che tale materia sarebbe costituita solo in piccola parte da materia barionica (cioè protoni, neutroni ed elettroni); la maggior parte sarebbe di natura non barionica, come neutrini con una piccolissima massa o particolari particelle previste da alcune delle moderne teorie di grande unificazione. Se inoltre l'universo ha attraversato in tempi primordiali un periodo di espansione inflazionaria, la densità attuale dell'universo sarebbe, come vedremo, estremamente vicina a quella critica (e quindi  $\Omega_0$  estremamente vicino ad uno), circa una decina di volte più alta di quella indicata dalla dinamica delle strutture cosmiche: l'universo pertanto sarebbe completamente dominato dalla materia oscura, in tal caso di natura sicuramente non barionica.

Come vedremo, attualmente esistono due grandi scenari dell'origine delle galassie: nel primo si formerebbero inizialmente strutture su piccole scale, che poi per lenta aggregazione darebbero origine via via alle galassie e agli ammassi di galassie. Nel secondo invece si formerebbero dapprima protosuperammassi, dai quali in seguito per frammentazione si originerebbero le strutture su scale inferiori, ammassi, gruppi, galassie. Alla base di entrambi gli scenari sono opportune perturbazioni primordiali soprattutto nella distribuzione della materia oscura non barionica, la cui natura determina il verificarsi di uno scenario invece di un altro. L'origine di tali perturbazioni sarebbe da attribuire ad una fase primordiale di espansione inflazionaria.

## 6. Il modello di universo inflazionario

Il modello standard del *big-bang*, oltre a notevoli successi, presenta anche dei problemi: i più gravi, il problema dell'orizzonte cosmologico e il problema della piatezza dell'universo, sono paradossalmente connessi il primo alla assunzione del «Principio Cosmologico», fondamentale nella costruzione del modello, il secondo al successo, altrettanto fondamentale, rappresentato dalla concordanza dell'«età dell'universo»,  $t_0 \simeq 10^{10}$ , con l'età delle stelle più vecchie. Il modello di *universo inflazionario*, sviluppato agli inizi degli anni '80, risolve formalmente entrambi i problemi. Esso si basa su particolari processi che avverrebbero nelle primissime fasi dell'universo, come prevedono alcune teorie di grande unificazione.

Il *problema dell'orizzonte cosmologico* è costituito dal fatto che l'universo descritto dal modello standard del *big-bang*, a un qualsiasi istante della sua evoluzione, è caratterizzato da proprietà, nella media, identiche anche in regioni che distano tra loro più dell'«orizzonte co-

smologico», la distanza percorsa dalla luce a partire dal momento iniziale del *big-bang*: tali regioni pertanto non sarebbero ancora riuscite a connettersi da un punto di vista causale, dato che la velocità della luce è, come è noto, la massima possibile.

Il *problema della piattezza* (detto anche problema dell'età dell'universo) riguarda invece la scelta delle particolari proprietà che l'universo deve possedere in ere primordiali, ad esempio a un tempo  $t_i$  poco dopo il tempo di Planck, tali da assicurare ora le proprietà globali osservate. In particolare quale valore deve avere inizialmente il parametro di densità  $\Omega_i$  (definito in maniera analoga ad  $\Omega_0$ , con densità e densità critica relative al tempo  $t_i$ ) per far risultare ora una densità media vicina a quella critica e un'età dell'universo dell'ordine di  $10^{10}$  anni? Nel modello standard tale risultato è possibile solo se  $\Omega_i$  è scelto entro un intervallo di valori sbalorditivamente ristretto e vicinissimi ad uno. Una scelta diversa dal parametro di densità  $\Omega_i$ , al quale a priori tutti i valori sarebbero permessi, avrebbe dato origine a universi del tutto diversi, privi delle strutture cosmiche che caratterizzano invece il nostro.

Il modello inflazionario prevede che l'universo prima di  $t_i$  abbia avuto un opportuno periodo di espansione accelerata, come se a guidare l'espansione fosse una sorta di forza di antigravità repulsiva: durante tale fase la distanza reciproca tra due punti generici è aumentata rapidissimamente, determinando una specie di «gonfiamento» (*inflation* in inglese) dell'universo. Nel modello standard del *big-bang*, come si è visto, la espansione invece è sempre decelerata.

Tuttavia bisogna chiarire il significato del termine «universo» nell'ambito del modello inflazionario. L'espansione non necessariamente riguarda l'universo nella sua globalità: essa può interessare soltanto un «miniuniverso», cioè una piccola regione originariamente causalmente connessa (questa proprietà sta alla base della soluzione del problema dell'orizzonte cosmologico); tale «miniuniverso», enormemente «gonfiato» da un processo inflattivo di durata opportuna, ingloba ora, come una sua più o meno piccola parte, quello che noi chiamiamo il «nostro universo», vale a dire lo spazio attorno a noi entro l'attuale orizzonte cosmologico, cioè entro circa  $10^{10}$  anni-luce (l'anno luce è la distanza percorsa dalla luce in un anno, pari a circa  $10^{13}$  km), cioè la distanza percorsa dalla luce a partire dal *big-bang*. Tale spazio infatti è il solo che, in linea di principio, possiamo attualmente osservare e che, secondo il modello standard, ora è completamente connesso dal punto di vista causale. Come si è visto invece, a causa dell'espansione inflazionaria, lo spazio causalmente connesso è molto maggiore e coincide con il «miniuniverso» entro cui il «nostro universo» è contenuto.

Le proprietà dell'universo nella sua globalità non possono essere

descritte; probabilmente esistono moltissimi «miniuniversi». L'universo inflazionario realizzerebbe in tal caso una sorta di *principio copernicano assoluto*: non solo la terra o la nostra galassia non sarebbero al centro dell'universo, ma addirittura il nostro stesso «universo» sarebbe uno dei tanti miniuniversi appartenenti ad un più vasto «metauniverso», i quali in vari tempi e luoghi hanno subito un processo inflazionario.

Il problema della piattezza è pure risolto dall'espansione accelerata del «miniuniverso» durante la fase inflattiva. Tale espansione infatti avvicina rapidissimamente verso uno il valore del parametro di densità; con la espansione decelerata del modello standard si ha invece un effetto opposto. In tal modo, anche con un generico valore del parametro di densità all'inizio dell'inflazione, si può ottenere facilmente alla fine dell'inflazione un valore di tale parametro entro il ristrettissimo intervallo desiderato.

È da domandarsi però se è davvero possibile avere una espansione accelerata, ottenibile solo con una sorta di antigravità. Alcune teorie di grande unificazione prevedono che l'universo (il «miniuniverso»), a un tempo dell'ordine di  $10^{-36}$  sec dopo il *big-bang*, possa essere costituito essenzialmente dal «vuoto quantistico» in uno stato, per così dire, «eccitato» o instabile («falso vuoto»). Tale «vuoto» può essere descritto come una sorta di «fluido» con proprietà tali da avere un effetto di antigravità (come se si avesse una costante cosmologica), che determina l'espansione accelerata desiderata. Dopo un tempo dell'ordine di  $10^{-30}$  sec il «falso vuoto» decade nello stato normale («vero vuoto»), non più attivo dal punto di vista gravitazionale; tale processo segna la fine dell'inflazione e la nascita di una infinità di coppie di particelle. A questo punto l'universo, costituito ora essenzialmente da queste particelle, riprende a espandersi nel modo previsto dal modello standard.

Un ulteriore successo del modello inflazionario è il seguente: piccole fluttuazioni, sorte su scale microscopiche per effetti quantistici nelle fasi iniziali del processo inflattivo, sono riscalate, a causa dell'enorme «gonfiamento» dell'universo, al punto da interessare alla fine del processo scale cosmologiche di dimensioni comparabili con quelle ove ora si osservano le strutture cosmiche. È interessante notare che tale *spettro delle perturbazioni* ha caratteristiche simili a quelle che la cosmologia teorica, già agli inizi degli anni '70, aveva ipotizzato *ad hoc* per ottenere un quadro soddisfacente dell'origine delle strutture cosmiche (*spettro di Zeldovich*).

Ogni modello inflazionario, nel risolvere il problema dell'orizzonte cosmologico, «cura» anche il problema della piattezza con tale efficacia che il parametro attuale di densità  $\Omega_0$  sarebbe ancora estremamente vicino ad uno, in contraddizione con il valore  $\Omega_0 \simeq 0.1$  che l'analisi

delle proprietà dinamiche delle strutture cosmiche indica: la differenza sarebbe da attribuire a un fondo cosmico di *materia oscura non barionica*, della quale solo una parte si è aggregata assieme alla materia barionica a formare le strutture che osserviamo.

## 7. L'origine delle galassie

Come si è detto nel paragrafo 2 le galassie rappresentano i mattoni su cui è costruita l'architettura su grande scala dell'universo: gruppi, ammassi, superammassi.

La presenza di *materia oscura* è un elemento essenziale nello studio della dinamica dell'universo e delle strutture cosmiche; come vedremo, la natura di tale materia oscura è l'elemento chiave per la formulazione di teorie sull'origine della struttura su grande scala dell'universo. Il problema di tale origine, detta a volte anche *origine delle galassie*, è divenuto il problema centrale della moderna Cosmologia.

In tutte le moderne teorie sull'origine delle galassie, pur differenti per le ipotesi di partenza e il quadro generale, vi è uno schema di base comune, che può essere diviso in quattro fasi nel modo seguente.

### Le fasi dell'origine delle galassie

1) *Origine dello spettro primordiale delle perturbazioni*: processi fisici nelle fasi cosmologiche primordiali danno origine a piccolissime perturbazioni nella densità delle varie componenti dell'universo (materia barionica, materia non barionica, radiazione, ...) di ampiezza opportunamente distribuita tra le varie scale.

2) *Evoluzione lineare delle perturbazioni*: processi fisici, quali l'instabilità gravitazionale, la dissipazione acustica, la velocità di espansione dell'universo, l'accoppiamento tra varie componenti, ..., determinano una ben precisa *modulazione dello spettro* primordiale, che si presenta alla fine, al momento del disaccoppiamento tra materia e radiazione (a circa  $10^5$  anni dopo il *big-bang*), generalmente con un picco di potenza più o meno allargato su di una scala  $M_*$  e scarsa potenza sulle scale maggiori e, soprattutto, minori. Il valore di  $M_*$  dipende, come si vedrà, dal tipo di scenario di origine delle galassie che si analizza.

3) *Evoluzione non lineare delle perturbazioni*: dopo il disaccoppiamento tra materia e radiazione lo spettro relativo alla materia barionica rapidamente entra in una fase di crescita rapida (crescita non lineare). Si formano dapprima protostrutture di massa dell'ordine di  $M_*$ . La fase successiva, dove a seconda degli scenari prevalgono processi di coagulazione o di frammentazione, porta all'origine delle protostrutture che daranno origine poi a galassie, gruppi ed ammassi. Per le pro-

togalassie diventano importanti processi di ambiente, cioè l'interazione con le protogalassie vicine e con il gas del protoammasso cui appartengono; da tale dinamica si origina ad esempio la rotazione delle galassie a spirale.

4) *Origine delle strutture cosmiche*: in tempi dell'ordine di qualche miliardo di anni il collasso finale delle protogalassie e la formazione ed evoluzione delle stelle fanno acquisire all'universo la struttura su grande scala attualmente osservata.

I parametri principali che caratterizzano i vari scenari sono quelli globali dell'universo (parametro di densità  $\Omega_0$ , costante di Hubble  $H_0$ , rapporto fra materia barionica e non) e quelli dello spettro primordiale delle perturbazioni. I risultati degli scenari analizzati si devono confrontare poi con i dati osservativi: proprietà individuali delle strutture cosmiche (morfologia, composizione, età, ...), proprietà su grande scala dell'universo (distribuzione spaziale e velocità peculiari delle strutture cosmiche), proprietà della radiazione di fondo (isotropia e spettro).

### Gli scenari degli anni '70

I principali scenari degli anni '70, l'*isotermo* e l'*adiabatico*, lungi dal rivestire solo un interesse di tipo storico, sono importanti sia dal punto di vista metodologico che da quello strettamente tecnico: i moderni scenari di origine delle strutture cosmiche, quello di *Cold Dark Matter* (cioè Materia Oscura «Fredda») e quello di *Hot Dark Matter* (cioè Materia Oscura «Calda»), sono infatti simili rispettivamente a quello isotermo e a quello adiabatico.

Il modello di universo in cui sono sviluppati gli scenari degli anni '70 è costituito da due componenti: la materia barionica, con densità corrispondente ad un parametro di densità  $\Omega_b \approx 0.1$ , e la radiazione di fondo; la componente neutrónica, pur prevista, è inessenziale dal punto di vista cosmogonico, essendo (a quel tempo) i neutrini ritenuti senza massa. La differenza tra lo scenario isotermo e quello adiabatico consiste nella diversa natura dello spettro delle perturbazioni: nel primo la sola componente ad uscire perturbata da processi primordiali non meglio definiti è quella della materia, nel secondo anche la componente radiativa è perturbata con fluttuazione dello stesso ordine di quella della materia. Per quanto riguarda lo spettro, si ipotizza che l'ampiezza sia distribuita fra le varie scale in una forma caratterizzata da una sorta di invarianza di scala (spettro di Zeldovich).

Nel *quadro isotermo* la modulazione dello spettro enuclea una massa  $M_* \approx 10^6 M_\odot$ , corrispondente alla scala ove al disaccoppiamento tra materia e radiazione le forze di autogravitazione e le forze di pressione sono comparabili. In tal modo nel regime non lineare succes-

sivo si formano dapprima protonubi di massa  $M_*$  e poi, per una sorta di processo di coagulazione, strutture su scale via via sempre più grandi (galassie, gruppi, ammassi, ...); la maggior individualità delle galassie rispetto alle altre strutture sarebbe da ascrivere alla maggior rilevanza di processi dissipativi in esse avvenuti. Il quadro complessivo è detto di «clustering gerarchico», ove le protostrutture si formano per un processo che va dal basso verso l'alto (*scenario «bottom-up»*). La difficoltà subito messa in luce per tale scenario è relativa alla natura dello spettro primordiale: processi primordiali sembrano originare in maniera «naturale» perturbazioni adiabatiche e, con grosse difficoltà, perturbazioni isoterme.

Nel *quadro adiabatico* sono molto importanti nella fase di modulazione i processi dissipativi sulle perturbazioni dovuti alla forte interazione prima del disaccoppiamento tra materia e radiazione. La scala enucleata ha una massa  $M_* \simeq 10^{15} M_\odot$ , corrispondente alla minima scala che riesce a sopravvivere a questi processi dissipativi. In questo caso le prime strutture a formarsi hanno massa dell'ordine di quella degli ammassi e dei superammassi di galassie. Queste ultime si formerebbero poi per una sorta di processo di frammentazione. Il quadro che ne risulta vede formarsi le protostrutture cosmiche secondo un processo che va dall'alto verso il basso (*scenario «top-down»*). La difficoltà che alla fine degli anni '70 mise in crisi il precedente scenario fu il grado di anisotropia della radiazione di fondo da esso previsto, troppo elevato rispetto ai dati osservativi se lo spettro primordiale ha una ampiezza necessaria a che le galassie si formino non troppo tardi.

Gli anni '70 finivano così con un senso di impotenza: solo una prospettiva completamente nuova poteva dare forte impulso e nuova speranza alla ricerca sull'origine delle galassie. Fortunatamente non una sola, ma molte nuove prospettive si fecero strada in poco tempo, come abbiamo visto, in una sorta di rivoluzione che sta alla base dei maggiori successi della cosmologia attuale.

### **Gli scenari degli anni '80**

I modelli di origine delle galassie prospettati negli anni '80 sono caratterizzati dalla dominanza della materia non barionica nell'evoluzione dell'universo. Le particelle che costituiscono tale fondo cosmico possono avere attualmente una velocità di dispersione alta, come eventuali neutrini di massa dell'ordine di  $10^{-5} m_e$ , o bassa, come ad esempio certe particelle previste da alcune teorie di unificazione: nel primo caso, detto di *Hot Dark Matter* (l'attributo «calda» è dovuto all'alta dispersione di velocità), si verrebbero a formare dapprima strutture su scale degli ammassi di galassie e poi le strutture su scale inferiori per un processo di frammentazione; nel secondo caso, detto di *Cold Dark*



*Matter* (per la bassa dispersione di velocità), si formerebbero dapprima strutture su scale dell'ordine di  $10^6$  M. e poi, per una sorta di coalescenza, le strutture su scale superiori (come si è detto, scenari qualitativamente simili esistevano anche negli anni '70, caratterizzati dalla dominanza della materia barionica, nel caso che le perturbazioni primordiali fossero rispettivamente adiabatiche o isoterme). Nel corso degli anni '80 lo scenario Cold Dark Matter è andato via via guadagnando favore, per la sua capacità di predire risultati in discreto accordo con le osservazioni, specialmente per quanto riguarda l'isotropia della radiazioni di fondo, l'età delle galassie e le proprietà su grande scala dell'universo. Il modello, almeno nella sua versione standard, ha una certa difficoltà a spiegare l'esistenza sia delle strutture su grandissima scala, dell'ordine di 100 Mpc, nella distribuzione delle galassie e degli ammassi (i grandi vuoti, i lunghi filamenti, la struttura cellulare), sia delle alte velocità peculiari, di qualche centinaia di km/sec su scale dell'ordine di decine di Mpc.

L'eventuale scoperta, nell'ambito della fisica delle particelle elementari, di un candidato effettivo per la materia oscura, come, in ambito cosmologico, i continui progressi nell'analisi della isotropia del fondo cosmico di microonde (il satellite COBE ha misurato per la prima volta l'anisotropia su scale angolari dell'ordine di 10 gradi, corrispondenti a scale lineari dell'ordine di  $10^3$  Mpc) e delle proprietà su grande scala dell'universo, potranno permettere, nel corso dei prossimi anni, di discriminare meglio tra i vari scenari cosmologici e di arrivare forse ad un quadro organico dell'origine e dell'evoluzione delle strutture cosmiche, come già esiste da decenni per quanto riguarda le stelle.

## 8. L'universo e l'uomo

Lo scopo di questo paragrafo non è quello di elucubrare sulla possibile esistenza di altre civiltà simili alla nostra in sistemi planetari di altre stelle nella nostra galassia od oltre: sull'argomento, da decenni discusso in numerosi congressi scientifici, esistono svariati articoli e libri. La conclusione è che si stima che solo nella nostra galassia esistano attualmente qualche centinaio di civiltà con una tecnologia paragonabile a quella dell'uomo, capaci quindi di scrutare il cielo con i telescopi e mandarvi messaggi radio. Da parte di noi terrestri esistono da tempo collaborazioni scientifiche internazionali, che si prefiggono di intercettare e mandare messaggi «intelligenti» da e verso il cosmo per mezzo dei grandi radiotelescopi. Ma quali messaggi, con quale linguaggio, a quale lunghezza d'onda, in quale direzione del cielo? Que-

ste sono le difficoltà di principio (per non parlare di quelle tecnico-finanziarie) che rendono l'avventura di trovare civiltà extraterrestri forse tecnicamente impossibile.

Per concludere questa breve carrellata sulla moderna concezione dell'universo in questo paragrafo vengono invece dati dei cenni sul cosiddetto *Principio Antropico Cosmologico*. Nell'introdurre il modello standard di universo si è discusso dell'importanza del *Principio Cosmologico* nella costruzione dei modelli di Friedmann. Tale principio può essere considerato lo sviluppo del *Principio Copernicano*, in quanto asserisce che su grandi scale tutte le posizioni spaziali sono equivalenti. Si è visto anche come il *Principio Cosmologico* sia alla base del problema dell'orizzonte cosmologico, risolto nella moderna visione cosmologica dal modello di universo inflazionario. È il caso a questo punto di menzionare un principio cosmologico alternativo – il *Principio Antropico Cosmologico* – che cerca di esplorare la connessione tra la struttura fisica dell'universo e lo sviluppo in esso della vita intelligente.

Ci sono molte versioni di tale principio: il *Principio Antropico Debole* pone in rilievo che la nostra esistenza mostra che noi occupiamo una sorta di posto speciale nell'universo. L'esistenza dell'uomo infatti implica che il nostro universo deve aver avuto condizioni iniziali tali da far sorgere effettivamente la struttura su grande scala, le galassie, le stelle e, attorno a certe stelle, un sistema planetario come il nostro. In definitiva il *Principio Antropico Debole* sottolinea che, nell'interpretare i dati cosmologici, dobbiamo essere coscienti di tutti gli effetti di selezione, primo fra tutti la nostra stessa esistenza.

Completamente diverso è il *Principio Antropico Forte* e le sue varianti. Tale principio invoca un argomento teleologico, basato cioè su nozioni di «scopo» di «fine», per spiegare il fatto che l'universo sembra avere o aver avuto proprietà sintonizzate in maniera precisa per poter permettere lo sviluppo della vita. Ad esempio piccole variazioni di alcune costanti fondamentali della natura avrebbero determinato una fisica ed una chimica che non avrebbero consentito il sorgere della vita. Tali coincidenze nella «scelta» delle costanti fondamentali per la costruzione dell'universo sembrano ad alcuni così stringenti che solo una spiegazione finalistica può essere accettata. Tuttavia anche nell'ambito del *Principio Antropico Debole* può essere trovata una spiegazione a tali coincidenze: in molti modelli di universo inflazionario infiniti «miniuniversi» sono disgiunti ed hanno tutte le possibili combinazioni delle costanti universali; in alcuni i valori delle costanti sono adatti al sorgere della vita. Chiaramente il «nostro» universo è uno di questi miniuniversi con proprietà, per così dire, antropiche.

Lo stato del *Principio Antropico Forte* è molto controverso. È però interessante notare tuttavia che, dopo secoli di aderenza al *Principio*

*Copernicano* ed ai suoi sviluppi, la Cosmologia attuale sembra ritornare verso una forma di *Principio Neotolemaico*, appunto il *Principio Antropico* nella sua formulazione forte, in cui l'Uomo è di nuovo posto al centro dell'Universo.

### **Bibliografia**

- J. Barrow-J. Silk, *La mano sinistra della creazione*, Milano, Mondadori, 1985
- J. Barrow-F.J. Tipler, *The anthropic cosmological principle*, Oxford, Clarendon Press, 1986
- P. Davies, *Superforza: verso una teoria unificata dell'universo*, Milano, Mondadori, 1985
- S. Hawking, *Dal big bang ai buchi neri*, Milano, Rizzoli, 1988
- L.D. Lederman-D.N. Schramm, *Dai quark al cosmo*, Bologna, Zanichelli, 1991
- G. Smooth, *Nelle pieghe del tempo*, Milano, Mondadori, 1994
- S. Weinberg, *Il sogno dell'unità dell'universo*, Milano, Mondadori, 1993
- J.D. Barrow-F.J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford, Clarendon Press, 1986