

**Le Stelle**

Collana a cura di Corrado Lamberti

---

**La musica del Big Bang**  
**Come la radiazione cosmica di fondo**  
**ci ha svelato i segreti dell'Universo**

Amedeo Balbi

leStelle

 Springer

AMEDEO BALBI  
Dipartimento di Fisica  
Università di Roma "Tor Vergata"  
[www.fisica.uniroma2.it/balbi](http://www.fisica.uniroma2.it/balbi)

Edizione a cura di:  
Springer-Verlag Italia  
Via Decembrio, 28  
20137 Milano  
[springer.com](http://springer.com)

Gruppo B Editore  
Via Tasso, 7  
20123 Milano  
[www.lestelle-astronomia.it](http://www.lestelle-astronomia.it)

Springer fa parte di  
Springer Science+Business Media  
© Springer-Verlag Italia 2007

ISBN 978-88-470-0612-6 Springer-Verlag Italia  
ISBN 978-88-893-0820-2 Sirio

Quest'opera è protetta dalla legge sul diritto d'autore. Tutti i diritti, in particolare quelli relativi alla traduzione, alla ristampa, all'uso di figure e tabelle, alla citazione orale, alla trasmissione radiofonica o televisiva, alla riproduzione su microfilm o in database, alla diversa riproduzione in qualsiasi altra forma (stampa o elettronica) rimangono riservati anche nel caso di utilizzo parziale. Una riproduzione di quest'opera, oppure di parte di questa, è anche nel caso specifico solo ammessa nei limiti stabiliti dalla legge sul diritto d'autore, ed è soggetta all'autorizzazione dell'Editore. La violazione delle norme comporta sanzioni previste dalla legge.

L'utilizzo di denominazioni generiche, nomi commerciali, marchi registrati ecc., in quest'opera, anche in assenza di particolare indicazione, non consente di considerare tali denominazioni o marchi liberamente utilizzabili da chiunque ai sensi della legge sul marchio.

Foto nel logo: rotazione della volta celeste; l'autore è il romano Danilo Pivato, astrofotografo italiano di grande tecnica ed esperienza

Immagine di copertina: un'immagine della radiazione cosmica di fondo, che ricostruisce lo stato dell'Universo circa 380 mila anni dopo il Big Bang. I diversi colori rappresentano lievissime variazioni nella temperatura e nella densità dell'Universo primordiale. (NASA/WMAP)

Progetto grafico della copertina: Simona Colombo, Milano

Riprodotta da copia camera-ready fornita dall'Autore

Stampa: Grafiche Porpora S.r.l., Segrate

*Stampato in Italia*

Springer-Verlag Italia S.r.l., Via Decembrio 28, I-20137 Milano

# PREFAZIONE

Questo libro racconta la storia straordinaria della cosmologia, che negli ultimi quarant'anni è diventata a pieno titolo una scienza basata su misure e osservazioni.

È un libro che non solo gli astrofili dovrebbero leggere, ma anche gli astronomi professionisti e soprattutto i giovani studenti e ricercatori, perché tratta un argomento fra i più complessi con estrema chiarezza e semplicità, e con grande rigore scientifico. L'autore mostra come la fisica che sperimentiamo nella vita di tutti i giorni possa spiegare anche fenomeni avvenuti quasi 14 miliardi di anni fa, eventi che hanno lasciato tracce debolissime, che pure ci permettono di ricostruire l'evoluzione dell'Universo a partire da una frazione infinitesima di secondo da quello che chiamiamo il Big Bang. Leggendo questo bel lavoro, ci si rende davvero conto di come l'astrofisica e la cosmologia siano una mirabile palestra di fisica, in cui tutti i campi di questa scienza trovano applicazioni nell'interpretazione di ciò che osserviamo dell'Universo.

La prima osservazione di grande importanza cosmologica la dobbiamo a Edwin Hubble, negli anni '20 del secolo scorso. Studiando gli spettri di quelle che allora venivano chiamate "nebulose", egli cercava di capire quale fosse la loro vera natura: nubi di gas o ammassi di stelle come la Via Lattea? Oltre a scoprire che alcune nebulose erano effettivamente nubi di gas, mentre altre, specie quelle di forma regolare, a spirale, sferiche o el-

littiche, erano grandiose famiglie stellari, poeticamente indicate come universi-isole, prima che venissero battezzate semplicemente “galassie”, l’astronomo americano scoprì la legge che è a fondamento della moderna cosmologia e che porta il suo nome: tutte le galassie hanno una velocità di allontanamento da noi che cresce proporzionalmente alla loro distanza.

La legge di Hubble, insieme al termine Big Bang, si prestano ancora oggi a fraintendimenti e interpretazioni del tutto sbagliate. Chi è digiuno di astronomia si immagina infatti che ci sia stata una grande esplosione che scaraventò le galassie in tutte le direzioni e finisce col ritenersi al centro dell’Universo, come ai tempi di Tolomeo. In realtà, la legge di Hubble non ci dice che le galassie si muovono nello spazio fuggendo via da noi; invece, è lo spazio che si espande e che trascina con sé le galassie. La stessa espansione produce un allungamento di tutte le distanze e quindi anche della lunghezza d’onda della luce emessa dalle galassie: per questo, gli spettri di lontane galassie ci appaiono “spostati” verso lunghezze d’onda maggiori, ossia verso la regione del rosso nella banda visuale.

La scoperta dell’espansione dell’Universo, che, secondo il modello evolutivo del Big Bang, avrebbe avuto origine da un punto a temperatura e densità infinite, non fu ritenuta accettabile da molti insigni scienziati, in particolare da Fred Hoyle, Hermann Bondi e Tommy Gold, che, negli anni ’50 e ’60, sostennero l’ipotesi alternativa dell’Universo stazionario, secondo la quale l’energia dell’espansione si trasformava in energia di creazione della materia, in modo tale da mantenere costante la densità media dell’Universo. La disputa fra i sostenitori dei due modelli durò accanita fino alla metà degli anni ’60, quando venne effettuata la seconda capitale osservazione cosmologica: la scoperta della radiazione fossile, oggetto di questo libro, la cui esistenza era stata prevista nel 1948 da un sostenitore del modello evolutivo, George Gamow.

La scoperta di Arno Penzias e Robert Wilson, effettuata con un’antenna destinata in origine a studi tutt’altro che cosmologici, e precisamente per ricevere le trasmissioni dei primi satelliti artificiali, rappresentò la pietra tombale per il modello stazionario, perché testimoniava un passato ad altissima temperatura per il nostro Universo.

Di colpo, era diventato possibile calcolare temperatura e densità del Cosmo primordiale a partire dai valori che si osservano ai nostri giorni, e quindi ricostruire lo stato fisico dei primi istanti di vita dell'Universo, per scoprire che v'erano le condizioni necessarie perché dalla zuppa di particelle elementari si formassero protoni e neutroni, e poi si producessero le reazioni nucleari primordiali con formazione di idrogeno pesante (il deuterio), isotopi dell'elio e litio. Il confronto delle abbondanze calcolate di questi elementi che si formarono nei primi minuti con quelle effettivamente osservate oggi nell'Universo è tanto buono da costituire un'altra formidabile prova a favore del modello evolutivo.

Ma restava un interrogativo che lasciava perplessi i cosmologi: le osservazioni di Penzias e Wilson parlavano di un rumore perfettamente uniforme in tutte le direzioni. Eppure, l'Universo presenta grosse disuniformità, ammassi di galassie, galassie e stelle, grumi di materia separati l'uno dall'altro da enormi spazi praticamente vuoti. I semi di queste disuniformità dovevano essere presenti nella radiazione fossile, ma la strumentazione usata era troppo primitiva per rivelarli, e inoltre il rumore della nostra stessa atmosfera era una grave causa di disturbo.

Amedeo Balbi ci racconta i passi successivi della storia, la realizzazione da parte della NASA del satellite COBE che riesce finalmente a mettere in evidenza, nel 1992, la presenza di regioni più fredde e regioni più calde della media, che è di 2,7 gradi assoluti: per rendersi conto della difficoltà di queste misure, si tenga presente che più freddo o più caldo significa differenze di qualche centomillesimo di grado dal valore medio. COBE ci mostrò la "fotografia" dell'Universo bambino, la più remota immagine che possiamo osservare dell'epoca in cui, circa 400 mila anni dopo il Big Bang, il miscuglio di protoni, elettroni, particelle alfa diventò un gas neutro: protoni e particelle alfa attrassero a sé i loro elettroni, e i fotoni, che prima rimbalzavano avanti e indietro fra le particelle cariche, poterono propagarsi liberamente fino a noi.

Questa prima "fotografia" del COBE, però, era molto sfocata: i dettagli più minuti distinguibili avevano dimensioni angolari pari a circa  $7^\circ$ . Come se guardando il cielo non potessimo vedere distintamente dettagli che siano angolarmente più piccoli di 14

dischi lunari messi in fila uno accanto all'altro.

COBE aveva rappresentato un grande passo avanti, ma non bastava. La storia prosegue allora con le osservazioni da pallone da parte di due diversi esperimenti, BOOMERANG e MAXIMA, che erano molto meno costosi di un satellite, ma potevano osservare solo una ristretta zona di cielo, dato il tempo limitato di permanenza del pallone nella stratosfera. Però, a differenza di COBE, la loro vista era molto più acuta: loro ci hanno mostrato dettagli più piccoli di  $1^\circ$ . È incredibile la messe di informazioni che si possono ricavare da queste osservazioni, e, in seguito, da quelle fatte da un altro satellite, il WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) della NASA, dedicato a David Wilkinson, uno dei principali autori del progetto, scomparso prematuramente.

Da tutte queste "fotografie", ora molto più dettagliate, si deduce che l'Universo è piatto, obbedisce cioè alla geometria euclidea. Questo libro spiega chiaramente come si sia arrivati a questo risultato e quali sono le conseguenze: il contenuto dell'Universo è per il 4% normale materia barionica, quella di cui sono fatte le stelle, la Terra, noi stessi; per il 22% di quella misteriosa materia oscura che fa sentire la sua presenza per la sua forza di attrazione gravitazionale, ma che non emette alcun tipo di radiazione; il restante 74% necessario per raggiungere la densità critica che caratterizza l'Universo piatto è energia oscura, quell'energia che accelera l'espansione cosmica, che non sappiamo cosa sia e che siamo portati a credere che rappresenti l'energia del vuoto. Il vuoto fisico, infatti, è tutto un pullulare di particelle estremamente instabili che appaiono e scompaiono in frazioni infinitesime di secondo.

Altre informazioni sono contenute nell'immagine dell'Universo bambino, ma ancora non ci appaiono chiare. Strumenti ancora più raffinati sono necessari per estrarle tutte. Gli ultimi tre capitoli del libro spiegano in modo molto chiaro e dettagliato cosa si è potuto dedurre e cosa potremo ancora cercare per giungere a una migliore comprensione dei primi istanti di vita dell'Universo, della formazione delle prime stelle, e come tutte queste osservazioni siano una conferma di quella strana ipotesi *ad hoc*, che è detta *inflazione*, proposta nel 1981 dal fisico teorico Alan Guth per spiegare l'improbabile piattezza dell'Universo e la sua uniformità.

Di un bel libro si usa dire che si legge come un romanzo. In questo caso è davvero il romanzo della cosmologia, dei successi e degli insuccessi di una scienza che pretende di ricostruire avvenimenti lontani 14 miliardi di anni luce, avvenuti quando non c'erano né stelle né galassie, ma solo un'informe zuppa di particelle elementari. Una storia del ruolo giocato dall'immaginazione, dall'intelligenza, ma anche dalle scoperte avvenute per caso.

*Trieste, gennaio 2007*

*Margherita Hack*



# INDICE

PREFAZIONE (DI MARGHERITA HACK)	v
PROLOGO	1
1 LO SCENARIO	7
La grande fuga	8
Gravità estrema	15
Il peso di tutte le cose	21
Questione di forma	25
Per un pugno di numeri	31
2 PRIMA LUCE	37
Ma che caldo fa	38
Onda su onda	41
Stelle e forni	46
Alta cucina	50
Il lungo addio	54
Rumori fuori scena	60
Una prova scottante	66
3 SEMI COSMICI	71
Instabilità	72
Tutto liscio (o quasi)	76
I giganti del Cosmo	80
Via, più veloce della luce!	86
Caos primordiale	94
Il regno delle tenebre	98

Avanzi nel microonde	105
4 MUSICA DELLE SFERE	113
Suoni e numeri	115
Sinfonie cosmiche	122
Ascoltare con gli occhi	127
Per picchi e per valli	134
5 ARMONIA SVELATA	143
In cerca dell'Eldorado	144
L'Universo visto dal pallone	147
Un mondo piatto	151
Qualcosa che sfugge	161
Espansionismo cosmico	164
Echi della creazione	167
6 TERRA INCOGNITA	177
Il lato oscuro del Cosmo	178
L'Universo e il pallone da calcio	186
Una nuova frontiera	194
Verso l'inizio	199
EPILOGO	209
RINGRAZIAMENTI	211
INDICE ANALITICO	213

*Ai miei genitori*

# PROLOGO

*Tutta la scienza è cosmologia.*

Karl Popper, *La logica della scoperta scientifica*

Ci sono domande che l'umanità si è posta fin dalla sua infanzia. L'Universo ha avuto un inizio? Se sì, quanto è vecchio, e cosa c'era prima? Finirà un giorno, o durerà in eterno? Che forma ha? Quanto è grande? Di che cosa è fatto? La storia del pensiero umano è costellata di miti affascinanti e di intuizioni geniali, con le quali, nel corso dei millenni, si è tentato di dare una soluzione a questi quesiti. Ogni popolo ha avuto le sue leggende, i suoi racconti sulla creazione del mondo, le sue speculazioni filosofiche, le sue credenze religiose. La scienza moderna, però, non si accontenta di spiegazioni fantasiose, per quanto suggestive. Oggi, le nostre teorie sull'Universo, costruite in base a deduzioni razionali, devono passare il severo vaglio delle osservazioni e degli esperimenti.

La cosmologia, la scienza che studia l'origine e l'evoluzione dell'Universo, ha dovuto superare enormi difficoltà prima di essere considerata alla pari con altre aree della fisica. Dapprima, non aveva modelli fisici e strumenti matematici adatti ad affrontare la complessità dei problemi che le si presentavano. In seguito, ha sofferto di una cronica carenza di dati sperimentali, cosa che rendeva praticamente impossibile mettere alla prova le speculazioni teoriche. In queste condizioni, pensare di poter rispondere con rigore ai tanti interrogativi sulla natura dell'Universo sembrava una pia illusione. Oggi, però, le cose sono

cambiate. Viviamo nell'epoca d'oro della cosmologia: un momento straordinario, in cui per la prima volta siamo in grado di comprendere l'Universo grazie alle armi dell'indagine scientifica.

Uno dei maggiori cosmologi viventi, James Peebles, ha paragonato la situazione di chi studia la vastità del Cosmo a quella di Tantalo. Secondo il mito, Tantalo era stato punito da Zeus per aver scoperto i segreti dell'ambrosia, il cibo che rendeva immortali gli dei. Condannato a soffrire la fame e la sete, fu immerso nell'acqua fino al collo, ma tutte le volte che tentava di berne, l'acqua si ritirava. Sopra il suo capo pendevano frutti invitanti e succosi, ma tutte le volte che provava ad allungare le mani per cibarsene, questi si allontanavano. Allo stesso modo, i cosmologi possono osservare gli oggetti celesti quanto vogliono, ma non li possono toccare. Questo è uno dei fatti che mette la cosmologia in una situazione di svantaggio rispetto agli altri campi della fisica. Se vogliamo studiare le caratteristiche di un materiale, possiamo procurarcene una certa quantità e analizzarla in laboratorio, sotto condizioni controllabili e riproducibili; possiamo inoltre ripetere l'esperimento un numero di volte pressoché arbitrario. Niente di tutto questo è consentito al cosmologo: egli ha a disposizione un solo Universo, può solo guardarlo per come è, e non può decidere le condizioni ambientali in cui si svolge la sua osservazione.

Inoltre, la materia di studio del cosmologo è per sua natura di difficile accesso. Scandagliare i remoti angoli del Cosmo, osservare la flebile luce proveniente da distanze al di là di ogni immaginazione, richiede strumenti sofisticatissimi, che solo di recente i progressi tecnologici sono stati in grado di mettere a disposizione per la prima volta. La storia della cosmologia, in misura forse ancor più drammatica che per altre scienze, è anche una storia degli strumenti necessari a osservare il mondo. La nostra idea dell'Universo si è andata plasmando nel corso dei secoli in funzione di ciò che riuscivamo a vederne. Dal cannocchiale di Galileo in poi, il Cosmo è diventato sempre più strano e più affascinante man mano che lo si osservava meglio.

Per una strana forma di compensazione, però, è proprio la vastità del Cosmo a fornirci uno strumento inaspettato per studiarne le proprietà. L'Universo è talmente grande che la luce stessa, che si propaga nello spazio cosmico alla massima velocità

consentita in natura (circa 300 mila chilometri al secondo), impiega tempi enormi per attraversarlo. Così, quando osserviamo un oggetto celeste, lo vediamo non com'è ora, ma com'era quando la luce che riceviamo ha lasciato la sua superficie. Quando guardiamo il Sole, lo vediamo com'era circa 8 minuti fa; quando guardiamo la stella più vicina al Sole, *alfa Centauri*, la vediamo com'era circa 4 anni fa; la galassia più vicina alla nostra, M31 in Andromeda, ci appare com'era circa due milioni e mezzo di anni fa, e così via. I cosmologi misurano queste enormi distanze proprio in *anni luce*, lo spazio che la luce percorre in un anno di cammino: 1 anno luce corrisponde alla enorme distanza di 9 460 miliardi di chilometri.

I cosmologi hanno quindi a disposizione una specie di macchina del tempo. Essi possono guardare l'Universo in differenti fasi della sua evoluzione e ricostruirne la storia, quasi come farebbe un archeologo osservando i fossili provenienti da epoche differenti. Cogliendo questa straordinaria opportunità, e perfezionandone l'uso con l'aiuto di strumenti sempre più sofisticati, la cosmologia ha cominciato a uscire dallo stato di scienza minore in cui versava fino all'inizio del XX secolo, per incamminarsi lungo un faticoso percorso che l'ha portata, negli ultimi anni, a diventare una delle aree di ricerca più avanzate e di maggior successo.

Oggi sappiamo, ad esempio, che l'Universo si espande ed evolve, e che ha raggiunto le sue condizioni attuali partendo da uno stato più semplice, in cui era molto più piccolo e denso di quanto sia oggi. Spingendo sempre più indietro nel tempo la descrizione fisica dell'Universo, si giunge a una situazione di densità e temperatura praticamente infinite, che ha avuto luogo circa 14 miliardi di anni fa, e che è ormai nota a tutti con il nome di *Big Bang*. Il modello cosmologico basato sul Big Bang è straordinariamente efficace nel descrivere l'evoluzione dell'intero Universo, e allo stesso tempo sorprendentemente semplice. Bastano una manciata di parametri per caratterizzare lo stato fisico del Cosmo su un arco temporale che va da una minuscola frazione di secondo dopo l'origine fino al presente. I punti fondamentali del modello cosmologico del Big Bang sono illustrati nel capitolo 1 di questo libro.

Nella loro incessante ricerca sulle origini dell'Universo, i co-

smologi hanno a un certo punto iniziato a chiedersi quanto lontano nello spazio, e quindi quando indietro nel tempo, essi potessero spingersi con le loro osservazioni. È possibile guardare direttamente il momento in cui l'Universo è venuto alla luce? Nelle sue primissime fasi di vita, l'intero Universo era incredibilmente caldo e luminoso. Inizialmente, la sua luce non poteva fare molta strada, ostacolata com'era dalla densa nube di materia che pervadeva il Cosmo. Ma dopo poche centinaia di migliaia di anni l'Universo è diventato trasparente, e la luce ha potuto finalmente diffondersi e viaggiare liberamente nello spazio. Oggi, dopo più di 13 miliardi di anni, una traccia dell'immenso bagliore iniziale continua a giungere fino a noi dalle più remote profondità del tempo e dello spazio. Sebbene di quella tremenda fiammata non sia rimasto nel frattempo altro che una fredda brace, possiamo ancora rivelarne la presenza. Essa pervade tutto lo spazio, si trova tutto intorno a noi, ovunque ci troviamo. Se sintonizziamo la nostra radio su un canale vuoto, circa l'un per cento del rumore che sentiamo è costituito proprio da questo segnale cosmico, il più distante e antico che possiamo ricevere nell'Universo. Questa testimonianza fossile del Big Bang si chiama *radiazione cosmica di fondo*, ed è la vera protagonista di questo libro. È un mezzo straordinario per ricostruire lo stato fisico dell'Universo nelle sue primissime fasi di vita. A una spiegazione dettagliata della sua origine e al racconto della sua scoperta è dedicato il capitolo 2.

Il Cosmo delle origini era il regno della semplicità: una specie di nebbia indifferenziata pervadeva tutto lo spazio, e ogni suo punto aveva condizioni di densità e temperatura pressoché identiche. Ma questa estrema uniformità era alterata impercettibilmente dalla presenza di minuscoli grumi, intorno ai quali la materia andava addensandosi in un processo lento, ma inesorabile. Da questi antichi semi cosmici hanno preso forma le gigantesche strutture che osserviamo nel Cosmo attuale: le galassie, gli immensi grappoli di galassie chiamati ammassi, e strutture ancora più grandi, ammassi di ammassi, che vanno formandosi ancora oggi. La nostra stessa esistenza, in fondo, è dovuta proprio alle lievi imperfezioni esistenti nell'Universo primordiale. Nel capitolo 3, illustrerò quello che sappiamo del modo in cui questi semi primitivi hanno avuto origine, e come abbiamo

potuto rivelarne l'esistenza dalle tracce che hanno lasciato nella radiazione cosmica di fondo.

Quando l'Universo era ancora pervaso da una nebbia di particelle che diffondeva il bagliore primitivo, e la materia cominciava ad addensarsi per formare le prime strutture cosmiche, ebbe inizio una straordinaria lotta tra forze contrapposte. La gravità spingeva la materia ad accumularsi sempre di più intorno ai semi cosmici, ma, proprio come avviene quando tentiamo di comprimere un gas, la pressione interna opponeva resistenza, costringendo la materia a riespandersi. Ciò diede vita a una specie di danza, un alternarsi di compressioni e rarefazioni del fluido cosmico. Queste periodiche oscillazioni erano del tutto simili a quelle che attraversano l'aria quando si propaga un suono: l'Universo primordiale diventò la sede di vere e proprie onde acustiche in viaggio da un punto all'altro dello spazio. Nel complicato sovrapporsi di queste onde, che i cosmologi possono oggi ricostruire osservando le lievi increspature rimaste impresse nella radiazione cosmica di fondo, è nascosta la chiave che può farci comprendere molti dei segreti del Cosmo. Come ogni strumento musicale produce un suo spettro caratteristico di frequenze, così i parametri che definiscono la natura del nostro Universo si manifestano conferendo un timbro inconfondibile alle onde acustiche primordiali. La caccia a questa "musica" del Big Bang ha impegnato i cosmologi in uno sforzo durato decenni. I capitoli 4 e 5 trattano diffusamente di questa affascinante impresa, e raccontano di come essa abbia finalmente avuto successo solo pochi anni fa.

Nel corso di questo libro, dunque, vedremo come, grazie allo studio minuzioso della radiazione cosmica di fondo, siamo oggi in grado, per la prima volta nella storia dell'umanità, di rispondere a domande fondamentali riguardo alla natura del Cosmo. Sappiamo che l'Universo si espande da quasi 14 miliardi di anni e forse continuerà a espandersi per sempre. Sappiamo che la grandiosa architettura di galassie che ne costituisce la struttura si è formata lungo miliardi di anni a partire da minuscoli semi primordiali. Sappiamo inoltre che la materia di cui è fatto il Cosmo è in gran parte di un tipo completamente diverso da quella di cui siamo fatti noi stessi, e che probabilmente bisogna mettere nel conto anche l'esistenza di un ulteriore tipo di energia



ancora più misteriosa. Ma così come non possiamo non rimanere sbalorditi dagli enormi passi avanti che la comprensione dell'Universo ha compiuto negli ultimi anni, allo stesso tempo non abbiamo il diritto di credere di aver esaurito tutte le domande. Ogni nuova risposta apre nuovi interrogativi. Ad alcune delle questioni irrisolte della cosmologia moderna è dedicato il capitolo 6.