

# Dalle stelle all'universo

## Nascita della cosmologia moderna



Luciano Mandelli  
Marco Giammarchi  
Lino Miramonti



Milano University Press



Luciano Mandelli, Marco Giammarchi, Lino Miramonti

# **DALLE STELLE ALL'UNIVERSO**

**Nascita della cosmologia moderna**

Milano University Press

*Dalle stelle all'universo. Nascita della cosmologia moderna* / Luciano Mandelli, Marco Giammarchi, Lino Miramonti. Milano: Milano University Press, 2023.

ISBN 979-12-80325-81-5 (print)

ISBN 979-12-80325-85-3 (PDF)

ISBN 979-12-80325-87-7 (EPUB)

DOI 10.54103/milanoup.65

Questo volume e, in genere, quando non diversamente indicato, le pubblicazioni di Milano University Press sono sottoposti a un processo di revisione esterno sotto la responsabilità del Comitato editoriale e del Comitato Scientifico della casa editrice. Le opere pubblicate vengono valutate e approvate dal Comitato editoriale e devono essere conformi alla politica di revisione tra pari, al codice etico e alle misure antiplagio espressi nelle Linee Guida per pubblicare su MilanoUP.

Le edizioni digitali dell'opera sono rilasciate con licenza Creative Commons Attribution 4.0 – CC-BY-SA, il cui testo integrale è disponibile all'URL:

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>



 Le edizioni digitali online sono pubblicate in Open Access su:  
<https://libri.unimi.it/index.php/milanoup>.

© Gli Autori per il testo, 2023

© Milano University Press per la presente edizione

Pubblicato da:

Milano University Press

Via Festa del Perdono 7 – 20122 Milano

Sito web: <https://milanoup.unimi.it>

e-mail: [redazione.milanoup@unimi.it](mailto:redazione.milanoup@unimi.it)

L'edizione cartacea del volume può essere ordinata in tutte le librerie fisiche e online ed è distribuita da Ledizioni ([www.ledizioni.it](http://www.ledizioni.it))

La casa editrice si è adoperata per verificare il copyright sulle immagini riprodotte.

Dove questo non fosse stato possibile o fosse errata l'indicazione, è disponibile a riconoscere i diritti a seguito di eventuali legittime richieste.

# Indice

Preambolo	9
Capitolo 1	
Cosa vediamo sopra di noi: stelle, nebulose e galassie	11
1.1 Dove stanno le galassie?	15
1.2 Omogeneità e Isotropia	17
Capitolo 2	
L'Universo si espande	19
2.1 Come misuriamo la velocità e la distanza di una galassia?	20
2.2 Perché diciamo che lo spazio si espande?	25
2.3 Come cambia l'Universo nel tempo?	27
Capitolo 3	
La prova decisiva del Big Bang	31
3.1 La danza tra protoni, elettroni e fotoni	33
Capitolo 4	
Come si espande lo spazio?	39
4.1 Una nuova luminosissima candela	40
4.2 Hubble aggiornato	43
Capitolo 5	
Il motore dell'espansione	47
5.1 Torniamo ad Einstein	47
5.2 Le geometrie dello spazio	50
5.3 Cosa c'è tra le galassie	53
5.4 Due nuovi attori: la materia e l'energia oscura	54
5.5 Il puzzle si compone	59
Capitolo 6	
Il film dell'evoluzione del Cosmo	63
6.1 Dall'epoca della ricombinazione al Big Bang	65
6.2 Il tic-tac dell'orologio del cosmo non è sempre uguale	68
6.3 L'Universo come una bomba H	70

Capitolo 7	
Domande imbarazzanti	73
7.1 Dove sta l'antimondo?	73
7.2 Euclide aveva ragione	75
7.3 Un Universo ovunque uguale	75
7.4 Quanto è grande l'Universo?	78
Capitolo 8	
I primissimi istanti	79
8.1 Il modello dell'inflazione	79
8.2 L'origine delle disomogeneità	83
8.3 L'inflazione e il Bosone di Higgs	86
8.4 Stringhe, Universi Tascabili e Multiversi	88
Epilogo	91
Appendice A	
Atomi per tutti	93
Appendice B	
Luce e radiazione elettromagnetica	99
B1 – Proprietà delle onde	99
B2 – Le onde elettromagnetiche	100
B3 – Le onde elettromagnetiche come quanti di energia	102
B4 – Lo spettro del corpo nero	103
B5 – Lo spettro della luce del sole e delle stelle	105
B6 – L'effetto Doppler e il Redshift	105
Appendice C	
Il mondo delle particelle elementari	107
C1 – I costituenti	107
C2 – Le forze	110
C3 – Il Bosone di Higgs	111
Ringraziamenti	113
Lista delle illustrazioni	115

Gli stessi dei vennero dopo la creazione.  
Quindi chi può sapere davvero come nacque la creazione?  
Chi sa quale fu la sua origine?  
*Rg Veda 1500 a.C. circa*

Ora noi qualche cosa sappiamo.  
In questo libretto cerchiamo di spiegarvelo.



# Preambolo

In una calda sera d'estate eravamo andati sulle Prealpi lombarde a rilassarci osservando il cielo con il telescopio di una associazione di astrofili. Dopo avere osservato quel meraviglioso gioiello che è Saturno e gli ammassi nella costellazione di Perseo, ce ne stavamo sdraiati nell'erba ad ammirare quel brulicare di puntini luminosi che stavano sopra di noi. Contemporaneamente commentavamo che, in fin dei conti, quello che vedevamo era quasi nulla rispetto alla realtà che ci circondava e che, anzi, la visione era ingannevole, dal momento che le ultime scoperte scientifiche disegnavano un Cosmo dominato da ben altri elementi: materia ed energia oscure. Un signore, che stava nei pressi, tese l'orecchio a quello che dicevamo, si mostrò interessato e incominciò a porci una grande quantità di domande sul come e sul perché. Non senza emozione, sentivamo che la sua curiosità non era solo scientifica, ma rifletteva la necessità profonda di comprendere l'origine e l'essenza di tutto quello che ci circonda, nella speranza di potersi avvicinare un giorno anche al senso del tutto.

Per rispondere, almeno in parte, a questa profonda esigenza dell'essere umano e con la convinzione che sia un preciso dovere degli uomini di scienza trasmettere alla società notizia dei progressi compiuti, abbiamo scritto questo saggio dove raccontiamo come, nell'ultimo secolo, scoperta dopo scoperta, lo schema dell'Universo che gli uomini si erano fatti nel passato sia andato in pezzi e come un quadro completamente diverso, affascinante e per certi versi anche inquietante, sia gradualmente emerso.

Nella parte iniziale trattiamo di come si sia giunti alla prova che il "nostro" Universo non è statico ed immutabile, ma si espande e ha avuto inizio in un tempo molto lontano. Discutiamo poi le caratteristiche dell'espansione, illustriamo le informazioni che ci giungono da una "fotografia" dell'Universo scattata solo 380.000 anni dopo l'inizio e infine di come l'espansione richieda la presenza di una energia "oscura".

Nell'ultima parte gettiamo, con cautela, uno sguardo sulle attuali ipotesi e teorie dei primissimi istanti del tutto, e della sconcertante possibilità che il nostro Universo sia solo uno dei tanti.

Invitiamo allora il lettore a salire sull'ottovolante, in un percorso che parte dall'origine dell'Universo, per arrivare a come è oggi e a quel che pensiamo sarà in futuro. Partiamo prima di tutto da una domanda solo apparentemente banale: cosa vediamo in cielo?



# Capitolo 1

## Cosa vediamo sopra di noi: stelle, nebulose e galassie

Alla fine del XVII secolo, grazie alle argomentazioni che diedero fuoco alle polveri della rivoluzione copernicana, alle osservazioni di Galileo Galilei ed alla formulazione delle leggi del moto e della gravità di Isaac Newton, si era giunti ad un'ottima comprensione di come i pianeti orbitino intorno al sole. Capire, però, cosa e dove fossero le stelle, si rivelò un'impresa molto più ardua. Le stelle, anche se osservate con l'aiuto di un buon telescopio, ci appaiono senza dimensione, semplici punti luminosi e come "congelate" in configurazioni immutabili, le costellazioni, che vediamo muoversi solo per effetto della rotazione terrestre. Per questo si riteneva che quanto sta sopra di noi fosse immutabile e quindi in un certo senso eterno. Uno dei primi a porsi la domanda di cosa fossero e dove si collocassero le stelle fu Newton. Il grande scienziato inglese immaginava che le stelle fossero composte da una materia "luminosa" diversa dalla materia "opaca" presente sulla terra, e ipotizzava che anch'essa dovesse essere soggetta alla legge di gravità. Questa ipotesi lo condusse a porsi l'intrigante domanda di come l'insieme di questi corpi potesse stare in equilibrio e lo portò ad ipotizzare l'esistenza di un Universo infinito. Nell'inverno del 1662, in una lettera indirizzata al vescovo Richard Bentley, scriveva<sup>1</sup>:

mi sembra che se la materia del nostro sole e dei pianeti e tutta la materia dell'Universo fosse uniformemente distribuita nei cieli, e ogni particella risentisse di una naturale gravità verso tutto il resto, e l'intero spazio attraverso cui questa materia fosse distribuita fosse finito, la materia ai bordi di questo spazio dovrebbe per gravità andare verso la materia interna e per conseguenza cadere nel centro dello spazio e lì comporre una grande massa sferica. Ma se la materia fosse uniformemente distribuita attraverso uno spazio infinito, non potrebbe mai collassare in una massa; ma una parte potrebbe condensarsi in una parte e qualche altra in un'altra, in modo da fare un numero infinito di grandi masse, distribuite a grandi distanze una dall'altra nello spazio infinito.

Newton ipotizzava quindi che le stelle non occupassero un posto su una sfera con al centro il sole, come ancora diffusamente si riteneva nel XVII secolo, ma che si distribuissero in uno spazio infinito e forse eterno, cui diamo il nome di Universo. In un certo senso possiamo dire che questa fu la prima idea scientifica di Universo mai concepita.

---

1 Original letter from Isaac Newton to Richard Bentley, dated 10 December 1692; 189.R.4.47, ff. 4A-5, Trinity College Library, Cambridge, UK <http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/view/texts/normalized/THEM00254>

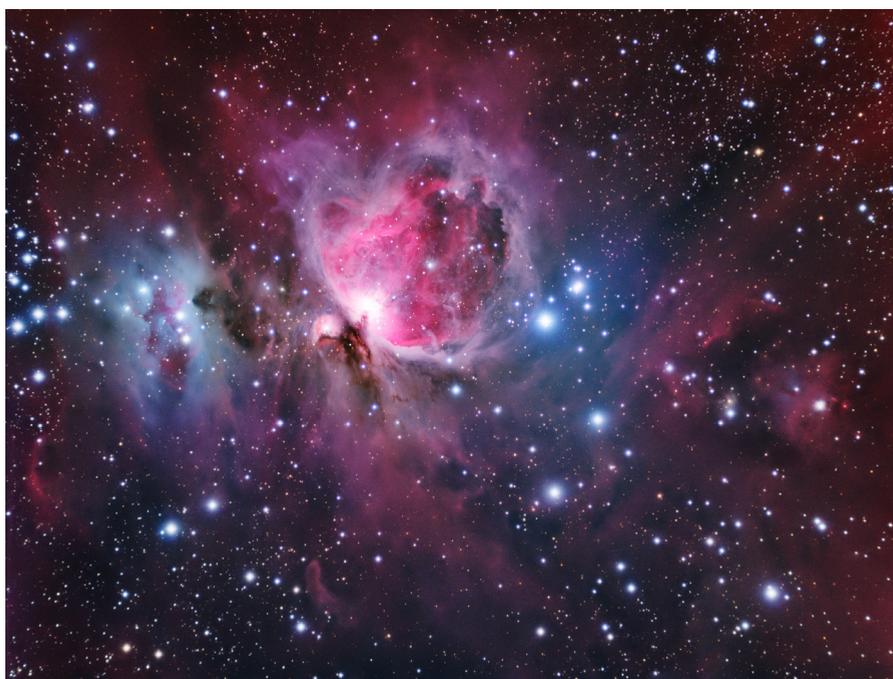
I secoli successivi hanno visto lo straordinario sviluppo di quella che oggi è definita *Fisica Classica*, ossia l'elaborazione delle leggi del moto, dell'ottica, dell'elettromagnetismo e del calore. A queste avrebbero poi fatto seguito le grandi rivoluzioni della Relatività Speciale e Generale, e della Meccanica Quantistica.

Nel campo dell'astronomia, la costruzione di telescopi di sempre maggiori dimensioni ha permesso di scoprire sistemi come le stelle doppie e triple che ruotano una attorno all'altra, gli ammassi stellari, le stelle di luminosità variabile e degli oggetti di forma indistinta e dall'aspetto lattiginoso: le nebulose. L'illustrazione di questi sistemi esula dallo scopo di questo saggio, che ha l'ambizione di descrivere quello che oggi sappiamo della natura e dell'evoluzione dell'Universo nel suo complesso. I sistemi elencati rappresentano dei "dettagli locali" e noi non ne parleremo, facendo eccezione solo per le nebulose.

Newton, nel 1676, mostrò come la luce del sole sia formata dalla sovrapposizione di vari colori, quello che vediamo con l'arcobaleno quando i raggi illuminano le goccioline d'acqua dopo un temporale. Gli studi successivi hanno permesso di capire come, dalla scomposizione della radiazione luminosa in colori, ovvero nelle diverse lunghezze d'onda che la compongono, si possa risalire alle proprietà, quali composizione e temperatura, della sorgente che la emette. Il lettore interessato a qualche modesto approfondimento di come gli atomi assorbano o emettano della radiazione può trascorrere un po' di tempo nella lettura delle appendici A e B. Il fatto che dallo studio della radiazione si possano dedurre le proprietà della sorgente fornisce un formidabile strumento agli astrofisici. È così, infatti, che abbiamo capito come il nostro sole sia un corpo costituito principalmente da idrogeno, con una temperatura superficiale di circa 5800 K, e che quei puntini luminosi che ammiriamo in cielo sono altrettanti soli che ci appaiono come punti per via della loro lontananza. Scopriamo quindi che la materia luminosa di Newton è materia ordinaria a temperatura elevata. A pensarci bene, è un risultato di grande impatto, una nuova rivoluzione copernicana. L'astro attorno al quale orbitiamo e da cui riceviamo luce e calore, considerato nei secoli anche un Dio, non è unico nell'Universo: come lui ve ne sono miliardi che illuminano altrettanti mondi, gli esopianeti.

Tra i sistemi osservati nel cielo, abbiamo ricordato le nebulose. Come suggerisce il nome esse appaiono all'osservatore come sorgenti di luce biancastra spesso senza contorni definiti e di dimensioni e luminosità ampiamente variabili. I primi a studiare e catalogare questi oggetti furono, nel XVIII secolo, lo scienziato francese Charles Messier ed il fisico tedesco naturalizzato britannico William Herschel. Di nebulose lo scienziato francese ne aveva catalogate più di un centinaio; ancora oggi le nebulose più importanti sono contrassegnate con la lettera M seguita dal numero che l'oggetto celeste ha nel catalogo di Messier. Herschel, da parte sua, dimostrò una notevole capacità nella realizzazione di telescopi a riflessione e nel 1776 ne realizzò uno fornito di uno specchio di sei metri di diametro; equipaggiato con questa artiglieria pesante, lo scienziato iniziò ad esplorare l'intero

cielo visibile dall'Inghilterra allo scopo di osservare il maggior numero possibile di nebulose. Aiutato dal fratello e dalla sorella, in due decenni di lavoro portò ad oltre 2500 il numero delle nebulose note. Queste osservazioni stimolarono naturalmente la domanda sulla loro natura: chi sosteneva fossero costituite da qualche sorta di fluido luminoso diffuso (oggi diremmo gas), chi invece, come lo stesso Herschel, riteneva fossero costituite da insiemi di stelle. Solo osservazioni più accurate e l'analisi spettroscopica della luce hanno permesso di stabilire che tutti e due i tipi di sistemi sopra ipotizzati si realizzano in natura, e di dividere le nebulose in due categorie distinte, che nulla hanno in comune tra loro. La prima categoria, che ancora oggi chiamiamo delle *nebulose* è costituita da grandi nubi di gas, i cui atomi eccitati emettono luce secondo il meccanismo descritto nell' Appendice A. Queste nubi sono quanto rimane di stelle esplose al termine della loro vita e sono la culla di nuovi soli. Si trovano nella Via Lattea e sono relativamente vicine a noi. Un esempio molto noto e visibile anche a occhio nudo si trova nella costellazione di Orione ed è mostrato nella figura 1.



**Figura 1.** La nebulosa di Orione fotografata con un piccolo telescopio.

La seconda categoria comprende sistemi dai contorni più definiti, che emettono una luce come quella emessa da un insieme di stelle, e non come quella emessa da un gas. Si tratta di insiemi di stelle, miliardi di stelle: quelli che oggi chiamiamo *galassie*. La più nota e facile da osservare, perché la più vicina a noi, è

la galassia di Andromeda, dal nome della costellazione in cui si trova (nota anche col nome di M31 dal catalogo di Messier). È osservabile anche ad occhio nudo o con un piccolo telescopio e ci appare come una piccola conformazione biancastra apparentemente simile ad una nebulosa; se però utilizziamo un buon telescopio e facciamo una lunga esposizione fotografica la vediamo come in figura 2, ovvero molto diversa da una nube di gas. In Andromeda, stelle, gas e polveri si raggruppano a formare un grande disco sottile, e ruotano attorno al centro dove si trova un buco nero, una regione in cui la densità di materia è così elevata che neppure la luce può sfuggire all'attrazione gravitazionale. La distanza di Andromeda dal nostro pianeta è di 0,77 Mpc (2,5 milioni di anni luce)<sup>2</sup>, molto maggiore di quella delle stelle che osserviamo nel cielo e delle nebulose che non superano i 100 mila anni luce. In Andromeda si raggruppano oltre 100 miliardi di stelle.



**Figura 2.** La Galassia di Andromeda. È la galassia più vicina a noi, dista dalla terra 775 kpc (2,5 milioni di anni-luce) ed ha un diametro di 67 kpc (220 mila anni luce).

Il nostro sistema solare fa parte di una galassia, simile a quella di Andromeda, e occupa una posizione a distanza intermedia tra centro e bordo. Quando osserviamo il cielo nella direzione del disco galattico, vediamo sovrapporsi una grande quantità di stelle che ci appaiono ad occhio nudo come una striscia luminosa.

<sup>2</sup> Il parsec è una unità di misura delle distanze e corrisponde a  $30,8 \times 10^{12}$  km (30,8 migliaia di miliardi di chilometri). Un'altra unità di misura delle distanze è l'anno luce, la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un anno e corrisponde a  $9,46 \cdot 10^{12}$  km. Un parsec corrisponde a 3,261 anni luce (a.l.). Le abbreviazioni k, M e G di fronte a una unità di misura corrispondono rispettivamente a mille, un milione ed un miliardo di volte l'unità di misura considerata. Ad esempio 1 Mpc indica un milione di parsec.

Si tratta di quella che chiamiamo Via Lattea, nome che diamo alla nostra galassia, e che, secondo la mitologia classica, nacque dalle gocce del latte uscite dal seno di Era mentre stava allattando il figlio Eracle. Basta rivolgere un modesto cannocchiale verso la Via Lattea, come già aveva fatto Galileo, per osservare che quella striscia biancastra e lattiginosa è costituita da migliaia di stelle. Per dare un'idea delle dimensioni e delle distanze coinvolte notiamo che, se la Via Lattea, con i suoi 32 kpc (104 mila anni luce) di diametro, fosse ridotta alle dimensioni di un compact disc, Andromeda, il cui diametro è di circa 67 kpc (220 mila anni luce), sarebbe grande poco meno di un vecchio disco di vinile, ed i due dischi si troverebbero ad una distanza di circa 3 metri l'uno dall'altro, in mezzo il vuoto.

La conclusione, per certi versi un'altra rivoluzione copernicana, è che le stelle che vediamo a occhio nudo o con un binocolo, non sono distribuite uniformemente nell'Universo ma si raggruppano in agglomerati di centinaia di milioni di soli: le galassie. L'Universo a noi visibile comprende circa cento miliardi di galassie. Anche se i Sith, nell'epopea di guerre stellari, avessero conquistato tutta la Via Lattea sconfiggendo gli Jedi, non avrebbero conquistato che una goccia insignificante nell'oceano dell'Universo.

## 1.1 Dove stanno le galassie?

Le galassie non sono rare, anzi; oggi si stima che nell'Universo a noi visibile ne esistano centinaia di miliardi. La figura 3 ne mostra una grande quantità, in una immagine ottenuta con il telescopio spaziale James Webb.

Nella figura le conformazioni di forma allungata – se ne possono contare a decine – sono galassie. Come si distribuiscono nello spazio, in modo più o meno uniforme, come le stelle in cielo, oppure in agglomerati?

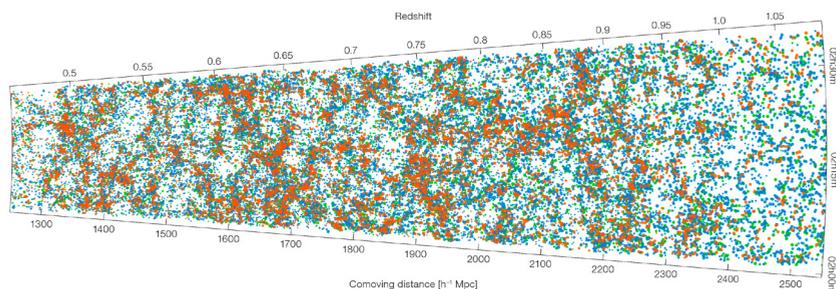
Oggi siamo in grado di conoscere la posizione di molte decine di migliaia di galassie ed il risultato è sorprendente. La figura 4 mostra la distribuzione delle galassie in una piccola porzione del cielo australe ( $5^\circ \times 5^\circ$ ) come compilata dal progetto VIPERS che raccoglie i risultati di svariate osservazioni cosmologiche.



**Figura 3.** La prima fotografia rilasciata dal telescopio spaziale James Webb mostra una infinitesima regione di cielo popolata da migliaia di lontanissime galassie che appaiono tipicamente come minuscole ellissi. La zona di cielo fotografata è piccolissima, equivalente a quella di un granello di sabbia tenuto alla distanza di circa un metro dall'osservatore.

L'asse verticale indica la posizione nel cielo mentre gli assi quasi-orizzontali sono indici della distanza delle galassie da noi. Poiché, come discuteremo, osservare le galassie lontane è equivalente ad osservare l'Universo nel passato, man mano che nella figura 4 ci spostiamo a destra osserviamo come era la distribuzione delle galassie nel passato fino a quando l'Universo aveva 7 miliardi di anni, circa metà della sua attuale età.

Si vede facilmente come la distribuzione non sia uniforme e come presenti filamenti, ammassi e anche zone quasi vuote.



**Figura 4.** Distribuzione di decine di migliaia di galassie in una piccola regione del cielo australe compilata dal progetto VIPERS. Le galassie mostrate in rosso sono quelle misurate al Very Large Telescope dell'ESO in Cile. L'asse verticale indica la latitudine galattica della zona di cielo studiata mentre gli assi quasi-orizzontali (equivalenti) sono indici della distanza da noi. In particolare l'asse superiore indica il redshift  $z$ , quantità che definiremo nei prossimi capitoli, mentre l'asse inferiore definisce la distanza in Mpc da cui ci giunge la luce a prescindere dalla espansione dello spazio.

Fatto particolarmente rilevante è che questa tipologia di strutture si riproduce, sempre simile, in ogni parte del cielo, osservazione che porta alla elaborazione di due principi, apparentemente semplici, ma di importanza fondamentale nella costruzione del nostro modello di Universo: l'Universo è omogeneo e isotropo.

## 1.2 Omogeneità e Isotropia

Il primo principio, l'*Omogeneità*, asserisce che l'Universo è uguale in ogni punto, e che quindi la terra, o meglio la Via Lattea, non occupa nessuna posizione privilegiata. Il secondo, l'*Isotropia*, afferma che l'Universo ci appare lo stesso, indipendentemente dalla direzione in cui puntiamo il telescopio. Senza dimostrarlo, sottolineiamo che le due affermazioni sono indipendenti; e cioè potrebbe esserci un Universo omogeneo ma non isotropo e viceversa.

Il lettore ha tutto il diritto di restare perplesso. Normalmente siamo infatti circondati da una grande disomogeneità e anisotropia. Sulla terra viviamo su un pianeta solido, ma basta innalzarsi per una decina di chilometri per trovare l'aria rarefatta e poi il vuoto, per non parlare delle condizioni che troveremmo sul sole o addirittura al centro della Via Lattea. Similmente guardando in direzioni diverse vediamo sistemi diversi. In una direzione osserviamo il sole, in un'altra la luna, in un'altra ancora Giove o Venere o Marte. Anche la forza di gravità cui saremmo soggetti cambia da punto a punto, ad esempio sulla superficie di Giove è tre volte superiore a quella sulla terra, per non parlare poi del centro della nostra galassia, ove risiede un buco nero, mentre a metà strada tra la Via Lattea e Andromeda saremmo nel vuoto. Siamo molto lontani dall'osservare un Universo omogeneo.

Anche considerando dimensioni maggiori e facendo riferimento alla figura 4, l'abitante di una galassia che si trova in un punto di accumulo vedrebbe qualche cosa di diverso da un abitante di una galassia collocata in una zona a bassa densità. E allora? Il fatto rilevante è che la struttura generale mostrata in figura 4 si ripresenta simile in tutte le parti dell'Universo ed in qualunque direzione vengano puntati i telescopi. Le proprietà di omogeneità e isotropia sono valide se mediate su grandi dimensioni. Vogliamo dire che se osserviamo un volume di Universo con dimensioni tipiche di 200 milioni di anni luce (o superiori), notiamo che esso ha un numero e una popolazione di galassie equivalente a quello di un qualsiasi altro volume simile nel cosmo; non importa dove si trovi (omogeneità) e indipendentemente dalla direzione di osservazione (isotropia). In seguito, quando tratteremo della Radiazione Cosmica di Fondo (CMB; Cosmic Microwave Background) vedremo come il principio di omogeneità ed isotropia trovi nel passato una straordinaria e precisa conferma.

Indubbiamente questa descrizione può apparire complessa: in fondo, quando guardiamo il cielo stellato, ci appaiono costellazioni diverse in direzioni diverse. Chi non ha ammirato Cassiopea o i Gemelli? Le Pleiadi o Antares? Ma per apprezzare l'Universo intero dobbiamo andare molto oltre, dobbiamo andare molto più distanti. Fino a considerare tutta la nostra Galassia, e fino a immaginarla come un puntino, e tutte le galassie come gli innumerevoli puntini della figura 4. In altre parole, per capire l'Universo dobbiamo andare oltre. Oltre le Stelle. E di molto.

## Capitolo 2

# L'Universo si espande

Ancora agli inizi del XX secolo prevaleva l'idea che l'Universo fosse statico e sostanzialmente immutabile. Mentre gli Stati Uniti si trovavano ad affrontare una crisi economica e finanziaria epocale, un altro terremoto, questa volta di carattere scientifico, scuoteva il mondo.

Correva l'anno 1929 quando Edwin Powell Hubble pubblicava sui *Proceedings della National Academy of Sciences* l'articolo "*A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*"<sup>1</sup> in cui in un grafico, oggi convenzionalmente chiamato *diagramma di Hubble*, riportava la velocità radiale, cioè la velocità lungo la direzione in cui vediamo una galassia, in funzione della distanza per una ventina di "nebulose extragalattiche", più semplicemente galassie. Il risultato mostrava, inaspettatamente, che le galassie si allontanano da noi in contrasto con l'ipotesi che l'Universo fosse statico ed immutabile. Il diagramma di Hubble è mostrato in figura 5 utilizzando valori aggiornati di distanza e velocità<sup>2</sup>. Tutte le galassie si allontanano ed è facile notare che maggiore è la distanza da noi, maggiore è la velocità di allontanamento.

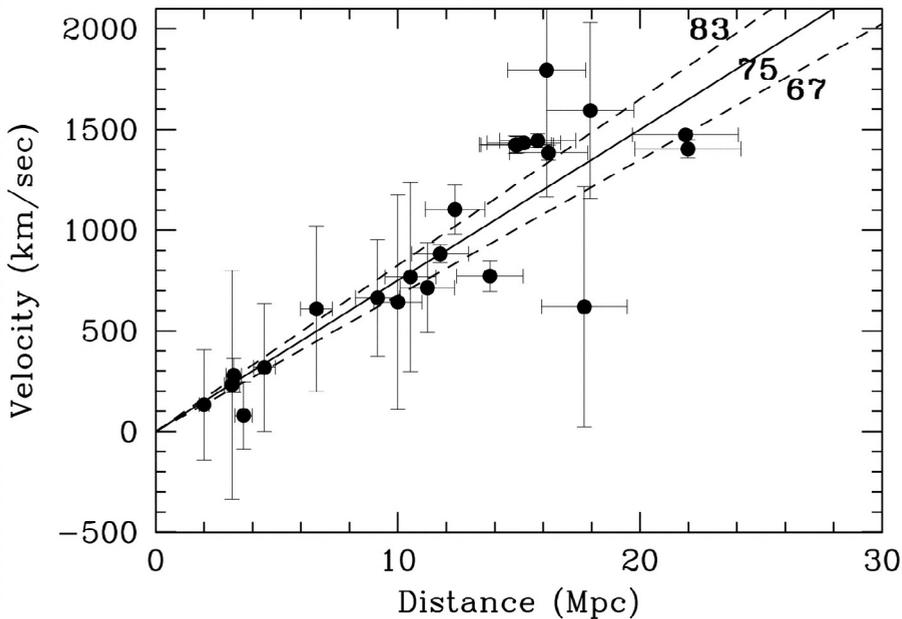
Possiamo dire che Hubble, al pari di Copernico e Galileo, è colui che nel secolo scorso rivoluzionò l'astronomia e la conoscenza dell'Universo. Nacque il 20 novembre 1889 in una cittadina del Missouri dove crebbe leggendo romanzi di fantascienza e praticando ogni sorta di sport, dal baseball al football, stabilendo persino il record dello stato dell'Illinois nel salto in alto. Per non contrariare il padre, il giovane Edwin scelse di studiare legge iscrivendosi all'Università di Chicago, dove conseguì il diploma nel 1910. Dopo aver insegnato spagnolo, matematica e fisica in una scuola superiore dell'Indiana, Hubble fece un salto ancora più alto, che lo portò ad esplorare le galassie; iniziò a studiare astronomia conseguendo il dottorato all'Università di Chicago.

Finita la Grande Guerra, il direttore dell'osservatorio di Mount Wilson, ritenuto allora l'osservatorio dotato delle apparecchiature più all'avanguardia, gli offrì di lavorare nel suo staff. Mount Wilson rimase per Hubble il punto di osservazione dell'Universo per il resto della sua vita.

---

1 Atti della Accademia Nazionale delle Scienze degli Stati Uniti Volume 15, Issue 3, pp.168,1929  
Articolo: "Una relazione tra distanza e velocità radiale delle nebulose extra galattiche".  
10.1073/pnas.15.3.168.

2 W.L.Friedmann et al. arXiv:astro-ph/0012376v1 Astrophys.J.553:47-72,2001.



**Figura 5.** Il diagramma di Hubble aggiornato con i dati più recenti ottenuti con il telescopio spaziale Hubble (HST). Più le galassie sono distanti da noi (asse orizzontale), più grande è la loro velocità di allontanamento (asse verticale). La velocità è proporzionale alla distanza  $v=H \times d$ , relazione che, nel grafico, è rappresentata da una retta. Il parametro  $H$  indica la pendenza della retta ed è chiamato *costante o parametro di Hubble*.

Nel 1949, Hubble ebbe un attacco di cuore, che gli impedì di tornare a passare le notti al telescopio. Morì quattro anni più tardi a causa di un'embolia cerebrale a soli 63 anni.

Malgrado gli innumerevoli riconoscimenti per la sua sensazionale scoperta, Hubble non fu insignito del premio Nobel per la fisica, in ragione del fatto che a quell'epoca gli astronomi non erano candidabili per il prestigioso premio: tale regola fu cambiata poco dopo la sua morte.

## 2.1 Come misuriamo la velocità e la distanza di una galassia?

Il lettore non particolarmente interessato ai dettagli sperimentali e disposto a credere che gli astronomi sappiano misurare velocità e distanza di stelle e galassie può accontentarsi di sapere che la distanza si misura utilizzando più metodi, che descriveremo in seguito, a seconda della lontananza dell'oggetto che si osserva e che la misura della velocità si ottiene utilizzando l'effetto Doppler. L'effetto, che prende il nome dal fisico che lo ipotizzò, permette di misurare

la velocità di una sorgente che emetta o rifletta delle onde. Oggi trova molte applicazioni, in astrofisica naturalmente, ma anche in medicina e meteorologia. Chi vuole saperne di più può continuare la lettura del testo e approfondire l'argomento nella appendice B.

Il lettore interessato ad approfondire i metodi di misura di queste due grandezze fondamentali può continuare con la lettura del presente paragrafo.

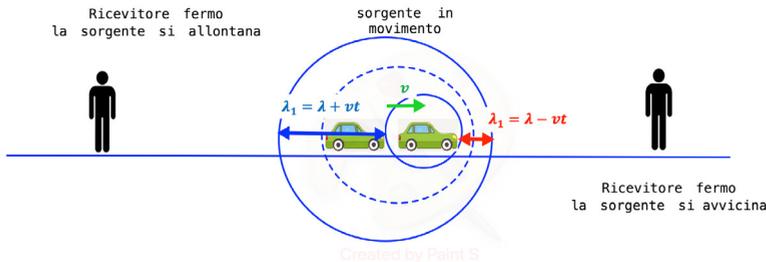
La grande importanza dell'effetto Doppler nei diversi campi della scienza si accompagna, sorprendentemente, alla scarsa notorietà del suo scopritore. Christian Andreas Doppler nacque a Salisburgo nel 1803 da una famiglia dedita a una florida attività di lavorazione del marmo e della pietra. Molto probabilmente sarebbe stato assorbito da questa attività se non ne fosse stato impedito dalla sua gracile costituzione. Ma da un male a volte ne deriva un bene, almeno per la conoscenza. Si dedicò agli studi di matematica e fisica, prima a Salisburgo e poi a Vienna. Dopo la laurea, Doppler ebbe molte difficoltà a trovare in Austria un incarico adeguato ai suoi interessi quando, ormai risoluto a partire per gli Stati Uniti, ottenne un posto di supplente in Matematica Superiore al Politecnico di Praga. Il pesantissimo carico didattico mal si adattava alla sua salute precaria, tanto che il famoso matematico Bernard Bolzano scriveva: «è difficile credere che l'Austria abbia un tale genio e invece di risparmiarlo per la scienza lo lasci morire sotto il giogo... purtroppo temo il peggio».

Nel 1842, al congresso della Società Boema di Fisica, Doppler presentò il lavoro che lo rese famoso: "Sulla luce colorata delle stelle doppie e di qualche altro astro celeste", in cui ipotizzava che la luce di una stella potesse modificarsi in funzione della sua velocità.

Sebbene le differenze nella luce emessa dalle stelle non potessero essere misurate a quel tempo, l'effetto equivalente fu rilevato per le onde sonore, mettendo a confronto le note musicali prodotte da musicisti che viaggiavano su un treno con quelle percepite da un altro gruppo di musicisti fermi in stazione. Per la verifica dell'effetto sulle onde luminose si dovette attendere il 1900. Ormai riconosciuto il suo valore di scienziato, fu nominato direttore dell'Istituto di Fisica di Vienna e ritornò in patria nel 1847. La sua salute iniziò a peggiorare rapidamente e nel 1852, sperando nei benefici di un clima più mite, si trasferì a Venezia dove morì nel 1853 per essere sepolto nel cimitero di San Michele. In riva degli Schiavoni vicino a San Marco una lapide lo ricorda.

Come detto, la misura della velocità radiale, cioè di quanto rapidamente una galassia si allontana da noi, si effettua utilizzando l'effetto Doppler. Se una qualunque sorgente di onde luminose o acustiche si avvicina a noi, la lunghezza d'onda osservata, ossia la distanza tra due creste, risulta inferiore alla lunghezza d'onda emessa dalla sorgente (le onde sono "comprese"). Se la sorgente, viceversa, si allontana, la lunghezza d'onda osservata risulta maggiore (le onde sono "stirate"). Nel caso di onde acustiche, l'effetto è facilmente osservabile, o meglio udibile. In figura 6 osserviamo due spettatori fermi, uno vede un'ambulanza

allontanarsi, e uno avvicinarsi. Il primo percepisce un suono più grave corrispondente a un'onda sonora con lunghezza d'onda maggiore di quella emessa, il secondo un suono più acuto con una lunghezza d'onda inferiore. Il lettore interessato ad approfondire l'argomento può fare riferimento all'Appendice B.



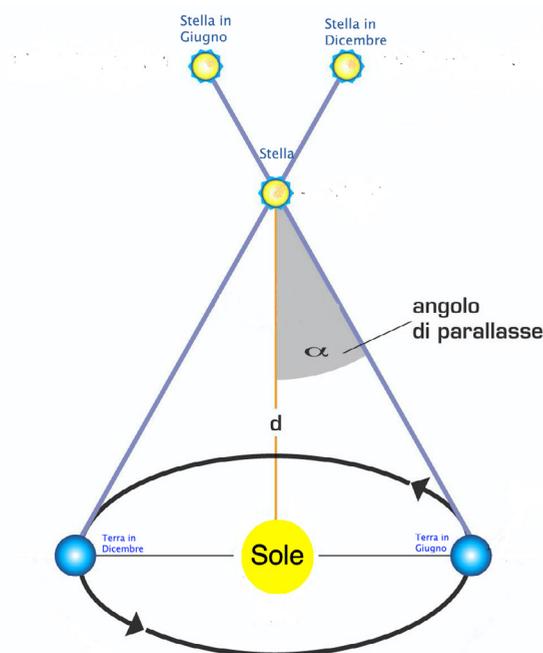
**Figura 6.** Effetto Doppler. Un'ambulanza emette un suono corrispondente ad una definita lunghezza d'onda  $\lambda$ . L'osservatore a sinistra che vede l'ambulanza allontanarsi percepisce un suono più grave cui corrisponde una lunghezza d'onda maggiore. L'osservatore a destra vede l'ambulanza avvicinarsi e percepisce un suono più acuto, con una lunghezza d'onda minore. I cerchi a tratto pieno rappresentano la posizione di due massimi consecutivi delle onde sonore. La loro distanza rappresenta la lunghezza d'onda. Nelle formule  $\lambda_1$  è la lunghezza d'onda udita,  $\lambda$  la lunghezza d'onda emessa dalla sorgente,  $t$  il periodo e  $v$  la velocità dell'ambulanza. La formula data in figura è valida solo se la velocità della sorgente è piccola rispetto alla velocità della luce.

Lo stesso fenomeno avviene con la luce. La luce è costituita da onde, nelle quali l'oscillazione è quella di un campo elettrico e magnetico, da cui il nome di onde elettromagnetiche. L'occhio umano è sensibile ad onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa approssimativamente tra  $0.4 \mu\text{m}$  (milionesimo di metro), a cui corrisponde il colore blu/viola, e  $0.7 \mu\text{m}$ , a cui corrisponde il colore rosso. Tutto ciò che è al di fuori di questo intervallo non è in grado di eccitare la retina del nostro occhio e risulta a noi invisibile. Molti animali riescono a percepire lunghezze d'onda maggiori, radiazione infrarossa, e lunghezze d'onda minori, radiazione ultravioletta.

Se una sorgente luminosa di una data lunghezza d'onda si allontana, un osservatore percepisce una lunghezza d'onda maggiore di quella emessa (spostamento verso il rosso) mentre se si avvicina percepisce una lunghezza d'onda minore (spostamento verso il blu). Lo spostamento è tanto più marcato quanto maggiore è la velocità di allontanamento o avvicinamento della sorgente. Si capisce, pertanto, come dalla misura di questi spostamenti della lunghezza d'onda rispetto alla lunghezza d'onda originale si ottenga la velocità con la quale si muove la sorgente.

La misura della distanza di sorgenti luminose è uno dei problemi più difficili che gli astrofisici hanno dovuto risolvere nel corso degli anni. Diverse metodologie sono state sviluppate nel tempo, in funzione della distanza degli oggetti celesti osservati.

Il primo metodo utilizzato è quello della “parallasse”: si tratta di un metodo geometrico, lo stesso che usano i geometri per misurare le distanze sulla terra. Un oggetto appare in direzioni diverse se guardato da due punti posti a una certa distanza, la “base”. Nota la base e misurata la differenza di angolo con cui si vede l’oggetto, si calcola la sua distanza. Per la misura di distanze astronomiche si utilizza come base l’orbita terrestre, la maggiore a noi disponibile, ossia si guarda l’oggetto celeste da misurare ad un certo momento dell’anno, e si ripete la misura sei mesi più tardi, quando la terra si trova dall’altra parte del sole a circa 300 milioni di chilometri dal punto in cui si era presa la prima misura (Figura 7). Si tratta, insomma, di una “triangolazione”, di un metodo trigonometrico. Sistemi di questo tipo hanno una gloriosa tradizione: nel 200 a.C. circa fu Eratostene il primo a misurare la circonferenza polare della Terra utilizzando la trigonometria<sup>3</sup>.



**Figura 7.** Metodo della parallasse. La distanza della stella viene calcolata grazie alla conoscenza del diametro dell’orbita terrestre ed alla misura dell’angolo (angolo di parallasse) con cui la stella è osservata da due posizioni opposte dell’orbita terrestre.

<sup>3</sup> Il valore ottenuto da Eratostene di 39375 km è inferiore al valore attuale di 39941 km di soli 566 km (1,4%).

Questo metodo ha permesso di valutare la distanza delle stelle non più lontane di qualche migliaio di parsec e quindi di esplorare solo un pezzettino molto piccolo della Via Lattea, che ha un diametro di circa 32 kpc (104 mila anni luce). Si noti che, nella figura 5, il diagramma di Hubble, le distanze delle galassie sono di decine di milioni di parsec (Mpc). La maggiore difficoltà sperimentale che si è dovuta superare per permettere le misure riportate nella figura 5 è consistita nel misurare la distanza di oggetti astronomici mille volte più lontani di quanto fosse possibile con il metodo della parallasse.

A questo fine si è utilizzato il metodo della “candela standard”. Supponiamo di avere una sorgente luminosa di cui conosciamo l'energia emessa in un secondo, ad esempio una lampadina, oppure, perché no, una candela. Chiamiamo questa grandezza la *Luminosità (Magnitudine) Assoluta* della sorgente.

Quando ci allontaniamo, la luce della sorgente ci apparirà sempre più debole. Poiché la legge con cui la luminosità della sorgente – chiamiamola *Luminosità (Magnitudine) Apparente* – diminuisce con la distanza, è nota, conoscendo la luminosità assoluta e misurando la luminosità apparente possiamo calcolare la distanza. Sembra tutto molto facile, ma il problema, in astrofisica, consiste proprio nel trovare e definire una sorgente di luminosità nota, la “candela standard”, da cui il nome del metodo.

Agli inizi del secolo scorso, l'astronoma statunitense Henrietta Swan Leavitt, mentre esaminava delle lastre fotografiche per catalogare le stelle in base alla loro luminosità apparente, notò l'esistenza di astri la cui luminosità apparente variava con regolarità durante un intervallo di ore o di giorni. Una delle stelle più note è la  $\delta$  della costellazione di Cefeo, da cui il nome di *cefeidi* dato a queste stelle. Di ancora maggiore rilevanza è il fatto che, dallo studio delle cefeidi osservate nella Grande Nube di Magellano, la cui distanza era nota, Leavitt fu in grado di determinare l'esistenza di una relazione tra il periodo di variabilità delle stelle e la loro luminosità assoluta. Poiché la misura del periodo con cui la stella cambia luminosità è relativamente semplice, dalla relazione tra il periodo e la luminosità si ottiene la luminosità assoluta della stella e dalla luminosità apparente si ottiene la distanza. Se due cefeidi hanno, ad esempio, lo stesso periodo di variabilità, ma una è 100 volte meno luminosa dell'altra, significa che si trova ad una distanza 10 volte maggiore. Dall'osservazione di cefeidi nella galassia di Andromeda si è ottenuta la prova incontrovertibile che Andromeda si trova a una distanza di 775 kpc (2,5 milioni di anni luce), molto al di fuori della Via Lattea.

Ormai i nostri lettori lo avranno capito: queste strane unità di misura delle distanze (parsec, anno luce) servono perché le distanze nell'Universo sono tali da fare vacillare la mente. Così remote, così distanti dalla nostra esperienza. Parliamo di galassie, di ammassi di galassie, laddove anche la stella più vicina a noi (Alpha Centauri, il suo nome) è a una distanza immensa. Pensate, siamo stati in grado di lanciare sonde nello spazio fin dal 1977, anno di partenza della

Voyager I, che ormai ha superato i confini del Sistema Solare e viaggia alla velocità di 18 km/s. E, nonostante questo, per raggiungere Alpha Centauri a soli quattro anni luce da noi, ci metterebbe ventimila anni

## 2.2 Perché diciamo che lo spazio si espande?

Torniamo alla figura 5, che, ripetiamo, indica la velocità di allontanamento da noi di alcune galassie, le nostre vicine di casa, almeno se confrontiamo la loro distanza alla dimensione dell'Universo a noi visibile. Parliamo di allontanamento perché la luce emessa risulta spostata verso il rosso o, come direbbero gli anglosassoni, “*redshifted*” (vedi Appendice B). La luce, per giungere a noi dalla più lontana delle galassie mostrata nel grafico (20 Mpc), impiega “solo” 65 milioni di anni, un tempo breve, se confrontato alla vita dell'Universo, o anche solo del nostro sistema solare, che si misura in miliardi di anni. Poiché la luce impiega un tempo finito per giungere fino a noi, guardando una stella o una galassia, la vediamo come era quando la luce è stata emessa. Quindi, un telescopio è anche una “macchina del tempo”. Studiando oggetti sempre più lontani vediamo l'Universo come era anni, milioni di anni o miliardi di anni fa. In figura 2 vediamo la galassia di Andromeda non come è ora ma come era 2,5 milioni di anni fa; se poi, nella galassia più distante mostrata nel grafico di Hubble, qualche forma di vita intelligente puntasse il proprio telescopio verso la Terra, vedrebbe il nostro pianeta come era 65 milioni di anni fa, e magari assisterebbe all'estinzione dei dinosauri.

Il grafico di Hubble mostra che la relazione tra la velocità e la distanza è una relazione lineare descritta dalla relazione:

$$V = H_0 \times D$$

dove  $V$  è la velocità di recessione di una galassia la cui distanza è  $D$ , e  $H_0$  è la *costante di Hubble*. Più una galassia è lontana e più la velocità con cui la vediamo allontanarsi aumenta. Studiando la relazione velocità-distanza per galassie sempre più lontane da noi, e quindi l'Universo come era molti anni fa, si è scoperto che il valore della costante di Hubble varia, e cioè che la “costante” non è una costante, ma dipende da quando la luce è stata emessa. Per questa ragione, al simbolo  $H$  si è aggiunto il suffisso “0”, per significare che il valore quotato nel diagramma di Hubble, è quello che corrisponde alle galassie più vicine. Nel suo andamento nel tempo è nascosta, come vedremo, la storia del Cosmo e le sorprendenti conclusioni teoriche raggiunte nell'ultimo ventennio.

L'osservazione che ogni galassia appare allontanarsi da noi comporta inevitabilmente la fine del concetto di Universo statico. Considerata l'idiosincrasia degli scienziati ad assegnare un posto privilegiato al nostro pianeta, o, meglio, alla nostra galassia, riluttanza sintetizzata nel principio di omogeneità ed isotropia,

che significato possiamo dare al fatto che *tutte* le galassie si allontanano da noi con una velocità proporzionale alla loro distanza? Questo fatto si spiega se comprendiamo che non sono le galassie che si muovono ma è lo spazio che si espande.

Nel discutere l'espansione dello spazio, molti testi divulgativi portano l'esempio della dilatazione di un pallone, esempio che qui brevemente descriviamo. Supponiamo di gonfiare un palloncino su cui abbiamo disegnato dei cerchi. Si intuisce facilmente che, dilatandosi, la superficie si espande, e ogni cerchio si allontana dagli altri. Ciascuno dei cerchi è fermo sulla superficie del palloncino; è la superficie che si dilata. Non esiste un cerchio privilegiato da cui tutti gli altri si allontanano. Se prestiamo attenzione, ci accorgiamo che la velocità di allontanamento tra due cerchi aumenta con la loro distanza. Se l'esempio del palloncino è facile da visualizzare, è anche fuorviante, in quanto la superficie del palloncino è a due dimensioni<sup>4</sup> e si dilata in uno spazio a tre dimensioni. Paragonare la dilatazione del palloncino alla dilatazione dello spazio porta, in cosmologia, a concetti errati quali un "dentro" e un "fuori" e alla inevitabile esistenza di un confine, mentre, invece, è lo spazio ad espandersi, e non esiste un dentro e un fuori. Per descrivere questo concetto, non proprio intuitivo, preferiamo ricorrere ad una diversa analogia. Immaginate un reticolato di tubature, del tipo che si usa nelle impalcature edilizie, che si estenda su grandi distanze in tutte e tre le dimensioni, anche all'infinito. Immaginate che ad ogni giunzione dei tubi ci sia una galassia; supponete ora che questa struttura si dilati in modo uguale in ogni direzione. Ogni galassia (nodo) vedrà le altre galassie allontanarsi, ma non esiste una galassia (nodo) privilegiata. Ognuna vede le altre allontanarsi in modo equivalente. Questo ci invita a pensare all'Universo come a un reticolo tridimensionale, potenzialmente infinito, di galassie in espansione.

Le diverse rette tracciate sulla figura 5 mostrano l'andamento previsto per diversi valori della costante di Hubble:  $H_0 = 75 \text{ km/s/Mpc}$  rappresenta il valore che meglio descrive i dati. Non ci si lasci impressionare dalla unità di misura utilizzata dagli astrofisici. Essa è semplicemente il rapporto tra la velocità misurata in km/s e la distanza misurata in Mpc (milioni di parsec). Andromeda si trova a poco meno di un milione di parsec, e dovrebbe allontanarsi con una velocità di 58 km/s. Il lettore attento potrebbe contestare dicendo: ho letto su Wikipedia che Andromeda si *avvicina* con una velocità di 300 km/s. Corretto! Andromeda, infatti, presenta uno spettro spostato verso il violetto, ma allora, come la mettiamo con la legge di Hubble? Torniamo alla figura 4 che ci mostra la distribuzione delle galassie in una porzione di Universo, e supponiamo per magia di cancellare l'espansione dello spazio. Le galassie dovrebbero restare immobili, con tutte le

4 Il numero di dimensioni indica il numero di coordinate necessarie a definire un punto. Sul palloncino, come sulla terra (trascurando l'altezza sul mare), bastano due numeri: latitudine e longitudine. Diciamo che una sfera ha una geometria a due dimensioni. Lo spazio in cui viviamo ne ha tre: lunghezza altezza e profondità.

distanze tra di loro invariate nel tempo. Un Universo congelato! Tuttavia, ricordiamo che, a causa della forza gravitazionale, le galassie si attraggono mutualmente: ne risultano moti complicati e disordinati in ogni direzione, anche verso di noi, moti che chiamiamo *locali*. La Via Lattea si avvicina ad Andromeda ed entrambe si muovono verso l'insieme di galassie che si trovano nella direzione della costellazione Virgo, a sua volta attratta da un altro super-ammasso.

Riaccendiamo ora l'espansione dello spazio. Il moto di espansione, che di per sé fa sempre apparire le galassie allontanarsi, si somma a quello dovuto alle mutue attrazioni che, come detto, avviene in ogni direzione. Può accadere, come nel caso di Andromeda, che una galassia appaia avvicinarsi e non allontanarsi. Questo succede quando una galassia è vicina perché, come ci dice la legge di Hubble, la sua velocità di espansione è modesta. Quando parleremo di accelerazione della espansione discuteremo di galassie lontanissime, con una velocità di recessione confrontabile con quella della luce (300000 km/s), per cui la presenza di moti locali diviene trascurabile. Il parametro  $H_0$ , che misura la velocità di espansione attuale, è determinato studiando le galassie vicine e deve tenere conto dei moti locali, misura sperimentalmente non facile e che si riflette nel significativo errore con cui le velocità sono riportate nel grafico.

Per fare un altro esempio supponiamo di essere un osservatore sulla riva di un fiume e di osservare un natante che si allontana trasportato dalla corrente. Un alveare ha eletto come sua residenza un angolino della nave. Le api si muovono in ogni direzione alla ricerca di fiori, alcune giungeranno anche a riva, avvicinandosi all'osservatore. Ma prima o poi torneranno all'alveare e al loro moto si sommerà il moto del natante che inevitabilmente le allontanerà. Così le galassie si muovono disordinatamente, con moti dovuti alle reciproche attrazioni, ma a questi si somma un moto, dovuto alla dilatazione dello spazio, che le porta ad allontanarsi reciprocamente.

## 2.3 Come cambia l'Universo nel tempo?

Torniamo alla relazione di Hubble  $V = H_0 \times D$ , supponiamo, per pura ipotesi, che la velocità di espansione rimanga costante, e ragioniamo sul passato. Andando indietro nel tempo, lo spazio si contrae, la distanza tra le galassie ( $D$ ) diminuisce, il valore del parametro di Hubble aumenta, ed esiste un tempo in cui tutte le distanze si annullano. È naturale prendere questo tempo come l'inizio del tutto, il momento in cui l'Universo è nato. Si calcola facilmente che, per un valore di  $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}^5$ , l'Universo avrebbe avuto inizio circa 14 miliardi

---

5 Il parametro di Hubble non è calcolato solo da un grafico come quello mostrato in figura 5. L'interpretazione di molte diverse osservazioni dipende dal suo valore. In questo saggio si assume  $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$  come il valore che meglio si accorda con l'insieme delle osservazioni sperimentali.

di anni fa. Approfittiamo di questo esempio per dire che il fatto che la distanza tra due punti nello spazio diviene nulla non ci deve portare a concludere che l'Universo diventi piccolissimo, come a volte erroneamente si legge. Certamente oggi poco possiamo dire su quanto sia grande lo spazio ma, concetto su cui torneremo, è lecito affermare che un infinito che si contrae può rimanere infinito, e anche nei primi istanti lo spazio potrebbe essere stato infinito.

Facciamo un'altra ipotesi e supponiamo che il parametro di Hubble sia sempre stato costante ( $H=H_0$ ). Come conseguenza della legge di Hubble, quando diminuiscono le distanze diminuisce anche la velocità di contrazione. Il tempo di inizio si allontana sempre di più, in un'epoca infinitamente lontana. Dovremmo allora concludere che non vi è stato un tempo di inizio, nel senso che ciò che ci circonda esiste da un tempo remoto, praticamente da sempre.

Vediamo, quindi, come diversi valori del parametro di Hubble portino a conclusioni opposte sulla nostra origine. Un valore costante comporta che non ci sia stata un'origine, mentre, se aumentasse (andando indietro nel tempo) in modo da mantenere la velocità costante, l'Universo avrebbe avuto origine in un istante definito. Quale è la realtà delle cose? Solo la misura del suo valore nel corso del tempo lo può dire.

Le due ipotesi, sopra considerate alla stregua di divertenti esercizi, sono alla base di due diversi modelli del nostro Universo, e sono state oggetto di una disputa pluridecennale, nel secolo scorso. Cominciamo dall'ipotesi che il parametro di Hubble sia costante, con la conseguenza che l'origine dell'Universo sia avvenuta in un tempo infinitamente lontano da noi, e quindi non misurabile. Questa possibilità fu sviluppata in un modello di Universo, denominato "stato stazionario", dovuto a Bondi, Gold e Hoyle.

Hermann Bondi, un matematico e cosmologo austriaco di origini ebraiche, durante la Seconda Guerra Mondiale fu internato nell'isola di Man e poi in Canada come nemico interno. Qui conobbe l'astrofisico Thomas Gold, suo concittadino e compagno di sventure. I due furono rilasciati nel 1941 ed iniziarono a lavorare allo sviluppo del radar con il poliedrico Fred Hoyle. Nel 1948, i tre scienziati formularono la teoria dello stato stazionario, postulando il principio di *omogeneità perfetta*, che significa che l'Universo è lo stesso non solo in ogni luogo, ma anche in ogni istante della sua storia, in altre parole, immutabile. Perché no? Ma come la mettiamo con la densità di materia che inevitabilmente diminuisce con l'espansione dello spazio, e che nel passato doveva quindi essere molto superiore all'attuale? I tre cosmologi ipotizzarono che, mentre l'Universo si espande, nuova materia si crea, e si calcola che basterebbe la nascita di un atomo di idrogeno ogni anno in un  $\text{km}^3$  per mantenere la densità costante. Ma quale legge fisica sottintende alla creazione continua di materia? Non la conosciamo!

Nei diari di Fred Hoyle si legge<sup>6</sup>: «Forse è paradossale. Ma non è ancora più paradossale l'idea che un bel sacco di roba, l'intero Universo, sia nato in un attimo, dal niente? (...) Trovo più accettabile l'idea della creazione di un atomo di idrogeno all'anno che quella della nascita dell'Universo da un punto».

L'altro modello che abbiamo ipotizzato, e che porta a un Universo in evoluzione, prevede invece che tutta la materia sia stata originata in un istante, il momento del *Big Bang*. Una grande esplosione (o espansione) iniziale, a originare tutto quello che conosciamo. Le due visioni dell'Universo sono differenti: in un caso un Universo sostanzialmente immutabile e sempre con le stesse proprietà dappertutto mentre nell'altro – il caso del Big Bang – un Universo che un po' ricorda i racconti biblici, con un “primo istante” di partenza e una forte connotazione evolutiva: uguale dappertutto nello spazio ma in cambiamento nel tempo.

Per entrambi i modelli, vale sempre la domanda: in base a quale fenomeno il tutto, quello che Hoyle chiama “un bel sacco di roba”, può crearsi in un attimo? Anche in questo caso la nostra ignoranza è totale. Ironia della storia, il termine Big Bang fu introdotto da Hoyle, il fautore dell'ipotesi del modello di Universo stazionario.

Il metodo scientifico introdotto da Galileo e Newton, nel XVII secolo, ci indica la strada da seguire, e cioè che solo lo studio delle diverse conseguenze cui portano i due modelli di Universo e la loro convalida o confutazione sperimentale può dare la risposta che, come vedremo, sarà incontrovertibile e univoca.

---

6 St John's College Library Special Collections, University of Cambridge [http://www.joh.cam.ac.uk/library/special\\_collections/personal\\_papers/hoyle1/](http://www.joh.cam.ac.uk/library/special_collections/personal_papers/hoyle1/)



## Capitolo 3

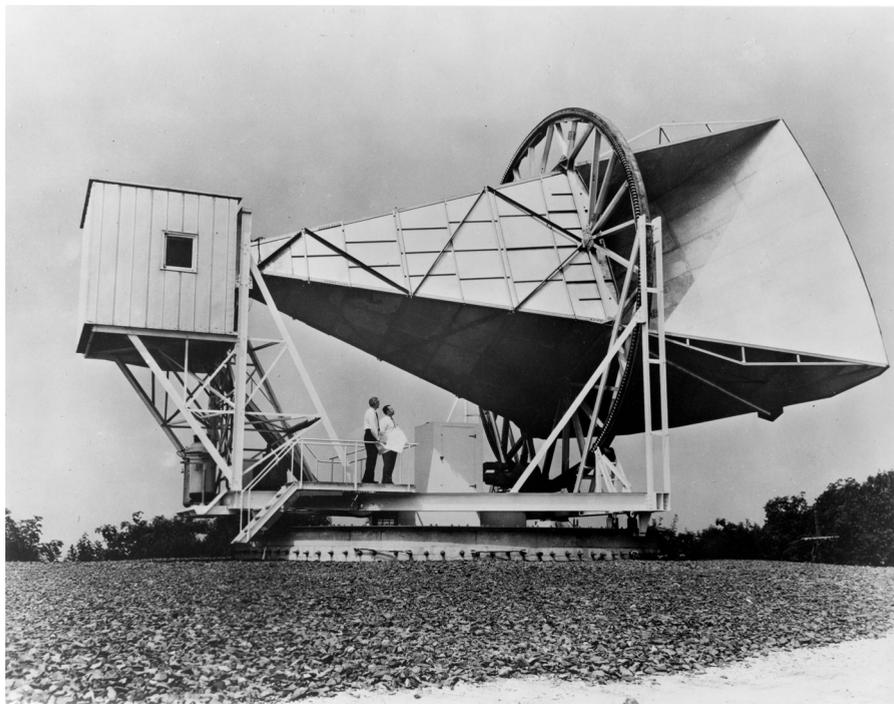
# La prova decisiva del Big Bang

Quale misura ci può fare capire quale dei due modelli di Universo è quello in cui viviamo? Il lettore può ipotizzare che, facendo il grafico di Hubble per galassie sempre più lontane, si possa capire se e come vari la costante di Hubble. Sfortunatamente, nella metà del secolo scorso, non si era in grado di effettuare questa misura per galassie la cui luce ha impiegato svariati miliardi di anni per giungere fino a noi. Si dia un'occhiata alla figura 3: anche osservandole con un grande telescopio, in questo caso il telescopio spaziale James Webb, le galassie lontane appaiono come piccole macchioline biancastre. Mentre la velocità di recessione è misurabile dall'effetto Doppler della luce, in queste piccole macchioline è impossibile identificare delle stelle cefeidi da cui determinare la distanza. Solo negli ultimi decenni si è riusciti a trovare un metodo con il quale misurare distanze così grandi.

Non è tuttavia questo tipo di osservazioni, che tratteremo nei prossimi capitoli, a permetterci di ottenere la prova decisiva di quale modello di Universo la natura abbia scelto. La risposta venne, quasi per caso, dall'utilizzo di uno strumento realizzato per migliorare la comunicazione tra la terra, i palloni stratosferici e i satelliti artificiali. La tecnologia della generazione e ricezione di onde elettromagnetiche con lunghezze d'onda tipiche delle microonde (Vedi figura 2B), non sensibili agli effetti dell'atmosfera, aveva fatto grandi progressi, stimolata dai militari interessati alla realizzazione del radar. Nei primi anni Sessanta, la Bell Telephone Company aveva messo a punto a Holmdel in New Jersey una antenna capace di captare onde elettromagnetiche con una lunghezza d'onda di 7,35 cm. Il ricettore, mostrato in figura 8, aveva la forma di un grande imbuto che ricorda quella dei corni usati negli alpeggi delle montagne svizzere per generare i potenti suoni che si trasmettono nelle vallate.

Due astrofisici, un trentenne ebreo sfuggito all'età di sei anni dalla Germania nazista e un suo collega che, come hobby, riparava televisori e radio, ottennero di utilizzare l'antenna e la puntarono verso il cielo. Si chiamavano Arno Penzias e Robert Wilson. I due, impegnati nella messa a punto di questa antenna, dovettero affrontare il problema della presenza di un fastidioso rumore di fondo, qualcosa che ricorda il brusio di una radio quando non si è sintonizzati su una stazione trasmittente o lo sfarfallio di uno schermo televisivo in assenza di segnale. In un primo tempo, pensarono che la causa del fastidioso rumore fosse dovuta al guano di piccione che ricopriva l'intera apparecchiatura, cui gli autori, più elegantemente, diedero il nome di "bianco dielettrico"; si rimboccarono le maniche e ripulirono l'antenna da cima a fondo. Malgrado gli sforzi, il rumore rimaneva persistente e inalterato... ed anche i piccioni, che avevano imbrattato

l'antenna, sembravano decisi a non traslocare dall'interno dell'apparecchiatura, diventando in questo modo dei perfetti capri espiatori per giustificare ogni problema tecnico. Stanchi della presenza degli indesiderati volatili i due ricercatori decisero di risolvere la faccenda una volta per tutte e in nome della scienza scacciarono i fastidiosi inquilini dalla loro amata dimora.



**Figura 8.** L'antenna di Holmdel in New Jersey con cui si rivelò la radiazione cosmica di fondo.

Penzias e Wilson rimasero stupiti quando si accorsero che il fastidioso rumore era ancora presente e praticamente invariato. Eseguiti tutti i possibili ed immaginabili controlli conclusero che il “rumore” captato era reale, proveniva indistintamente da ogni direzione ed era costante nel tempo, indipendente dal giorno o dalla notte, dall'estate o dall'inverno. Incomprensibile quindi che fosse generato da attività umane... o animali; l'unica spiegazione compatibile con le osservazioni era che provenisse dallo spazio. Nella breve pubblicazione sull'*Astrophysical Journal*<sup>1</sup>, i due scienziati non si sbilanciarono sull'origine del segnale rivelato limitandosi a citare in tre righe l'ipotesi avanzata dai cosmologi Dicke, Peebles, Roll e Wilkinson della vicina Università di Princeton in un articolo

1 A.A. Penzias and R.W. Wilson “A measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s” *Astrophysical Journal*, 142,414-419, 1965.

che precedeva di poche pagine quello dedicato all'osservazione dell'effetto. I cosmologi di Princeton, approfondendo l'ipotesi già avanzata da colleghi russi come George Gamow, ipotizzavano che, come conseguenza dei processi seguiti al Big Bang, nell'Universo fosse presente una radiazione elettromagnetica con lunghezza d'onda compresa tra il millimetro e alcuni centimetri, precisamente la regione delle microonde. Per verificare questa previsione, i ricercatori di Princeton avevano messo mano alla costruzione di una antenna capace di captare onde elettromagnetiche millimetriche. La radiazione captata dalla antenna Holmdel aveva tutte le caratteristiche del segnale da loro cercato. Per comprendere l'interpretazione data dal gruppo di Princeton dobbiamo fare una digressione su alcune conseguenze implicite nel modello del Big Bang.

### 3.1 La danza tra protoni, elettroni e fotoni

Secondo le leggi della termodinamica, quando un gas viene compresso, si scalda e, reciprocamente, quando si espande si raffredda. Oggetti come i frigoriferi ed i condizionatori funzionano grazie a questo principio. In questi elettrodomestici, un motore comprime un gas, il gas si riscalda ed il calore prodotto viene disperso nell'ambiente. Successivamente, il gas viene fatto espandere in una serpentina che in alcuni modelli possiamo osservare direttamente nella parete posteriore della cella frigorifera. L'espansione provoca il raffreddamento del gas e l'abbassamento della temperatura nello spazio dove teniamo le vivande.

Nell'Universo sono presenti materia e radiazione. La materia è costituita per il 75% da idrogeno e per il 25% da elio. Gli elementi più pesanti sono presenti in percentuali trascurabili. La radiazione consiste di onde elettromagnetiche, la luce delle stelle e delle galassie è un esempio. Per essere rigorosi e per completezza dobbiamo aggiungere i neutrini che però nella trattazione elementare che qui faremo giocano un ruolo minore. La materia e la radiazione sono l'equivalente del gas presente nel frigorifero.

Invertiamo la freccia del tempo e facciamo un velocissimo "rewind" della storia dell'Universo passato. Le galassie si avvicinano, si fondono, la temperatura della materia e della radiazione aumenta, gli urti tra gli atomi sono sempre più violenti, gli elettroni vengono strappati dai nuclei, e dovrà esserci un tempo in cui lo spazio è costituito da una massa molto calda e compatta di protoni, elettroni, fotoni (i quanti della radiazione elettromagnetica; vedi Appendice B). Un quadro ben diverso da quello postulato dal modello stazionario dove tutto è immutabile. Vediamo quindi che l'Universo è un po' come il gas di un frigorifero: se (andando indietro nel tempo) viene compresso, si scalda. Supponiamo, allora,

che il nostro salto all'indietro nel tempo ci porti ad un Universo caratterizzato da una temperatura di centomila gradi Kelvin<sup>2</sup>.

A questa temperatura l'Universo è costituito principalmente da protoni, elettroni e fotoni che interagiscono tra loro. Ogni tanto capita che un elettrone e un protone si uniscano, formando un atomo di idrogeno e liberando un fotone. Alla temperatura di centomila Kelvin, gli urti tra le particelle sono così violenti che alla formazione di un atomo di idrogeno segue, subito dopo, la sua disintegrazione. In queste condizioni è quindi corretto pensare lo spazio come saturato da un gas di protoni, elettroni e fotoni in continua interazione a una temperatura comune.

Riprendiamo a guardare il film dell'evoluzione dell'Universo, seguendo ora la freccia abituale del tempo. L'Universo si espande e, espandendosi, si raffredda; gli urti tra i componenti sono meno violenti, la formazione di idrogeno diviene più abbondante, mentre la sua disintegrazione più rara e pian piano si passa da un Universo costituito da particelle libere dotate di carica elettrica, ad un Universo di atomi, sottolineiamo neutri, di idrogeno e di fotoni. La temperatura alla quale avviene la formazione di idrogeno è di circa 3000 K.

Il modello di Universo che discuteremo più avanti fissa il tempo della ricombinazione a circa 380000 anni dopo l'inizio del tutto. I fisici sono in grado di calcolare che, al momento della ricombinazione dell'idrogeno, i fotoni erano cento milioni di volte più numerosi degli elettroni e dei protoni. I fotoni possono ora propagarsi liberamente nell'Universo perché non interagiscono con gli atomi di idrogeno che sono elettricamente neutri. Un ipotetico osservatore che, prima del tempo della ricombinazione sarebbe circondato da una fitta nebbia, vedrebbe il lento sorgere di una bellissima e luminosa alba. Un lentissimo albeggiare, in quanto il processo di formazione dell'idrogeno non è istantaneo ma ha impiegato circa settantamila anni; un tempo molto lungo per la nostra percezione del tempo, ma poco più di un batter di ciglia, se confrontato coi tempi cosmologici. Un processo simile avviene quotidianamente nel sole. Il sole è costituito da un insieme di elettroni liberi e di nuclei atomici elettricamente carichi, quindi opaco alla radiazione e per questa ragione noi non possiamo "vedere" il suo interno. Alla sua superficie, dove la temperatura è di 5800 K, avviene un processo analogo a quello descritto: gli elettroni e i nuclei si combinano a formare gli atomi, e la luce si trasmette liberamente attraverso gli strati superficiali della nostra stella per poi giungere fino a noi.

Nell'Universo, dopo la ricombinazione, mentre gli atomi di idrogeno si raggruppano attorno alle zone di maggiore densità, dando piano piano origine a

---

2 In fisica la temperatura è normalmente riportata in gradi Kelvin (K) e indicata con la lettera T. La corrispondenza con la temperatura (t) misurata in gradi centigradi (°C) è molto semplice:  $T(K) = t(^{\circ}C) + 273,15$ . Il punto di congelamento dell'acqua corrisponde quindi a 273,15 K. Le leggi della termodinamica stabiliscono l'esistenza di una temperatura minima, lo zero assoluto, che in gradi Kelvin corrisponde a  $T = 0$  K ed in gradi centigradi a  $t = -273,15$  °C.

stelle e galassie, cosa succede alla radiazione elettromagnetica rimasta dopo la ricombinazione dei protoni e degli elettroni?

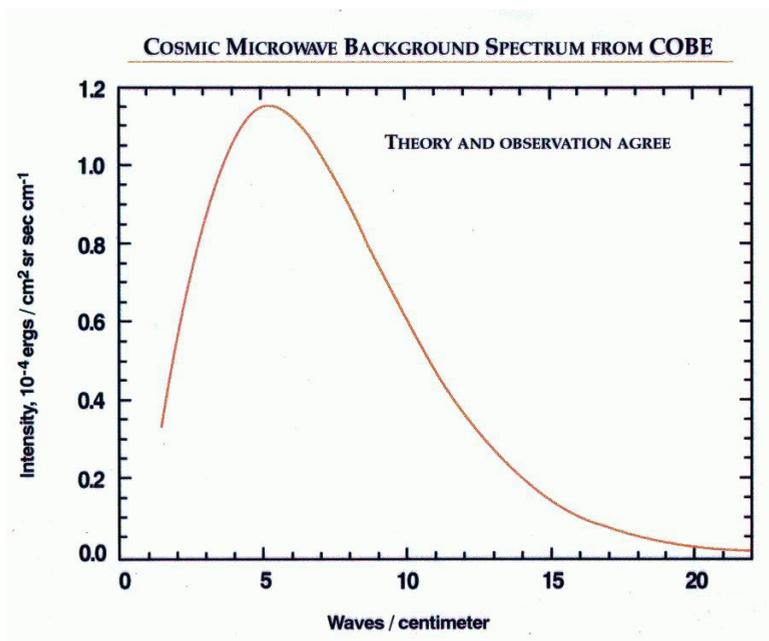
Per rispondere a questa domanda ricordiamo che un gas è costituito da molecole che, a causa dei continui urti, hanno velocità diverse. Se riportiamo in un grafico il numero di molecole con una certa velocità, otteniamo quello che chiamiamo lo spettro di velocità delle molecole. Esiste un valore medio della velocità, ma molte hanno un valore anche molto inferiore e altre superiore. Il valore medio e lo spettro dipendono dalla temperatura del gas.

Nella visione quantistica possiamo considerare la radiazione elettromagnetica come costituita da fotoni alla cui energia corrisponde una lunghezza d'onda definita. La radiazione elettromagnetica rimasta dopo la ricombinazione può quindi considerarsi un "gas" di fotoni. Anche in questo caso esiste uno spettro di energia e quindi di lunghezze d'onda cui si dà il nome di *spettro di corpo nero*. Più la temperatura del gas diminuisce, maggiore è il numero di fotoni con maggiore lunghezza d'onda. Il lettore interessato ad approfondire questo tema può riferirsi all'Appendice B, dove si trovano anche esempi di spettri di corpo nero a diverse temperature, che mostrano chiaramente quanto esposto.

Torniamo alla cosmologia. I fotoni presenti al momento della formazione dell'idrogeno (ricordiamo che ce ne sono cento milioni per ogni atomo) si propagano liberamente nello spazio, non interagiscono, né con gli atomi di idrogeno che sono elettricamente neutri, né con sé stessi. Mentre viaggiano indisturbati, come conseguenza dell'espansione dello spazio, si "raffreddano", la loro lunghezza d'onda aumenta e lo spettro, che corrispondeva a quello della radiazione emessa da un corpo nero con una temperatura di 3000 K (figura 3B), diviene quello di un corpo nero con una temperatura minore. I cosmologi stimavano che la radiazione rimasta dopo la ricombinazione dovesse oggi apparire come quella emessa da un corpo ad una temperatura di meno di 10 K (-263°C), cui corrispondono lunghezze d'onda comprese tra qualche centimetro e pochi millimetri. Il segnale rivelato da Penzias e Wilson, ad una lunghezza d'onda di 7.35 cm era compatibile con la radiazione di corpo nero con una temperatura di 3.5 K, e fu subito interpretato dal gruppo di Princeton come la testimonianza fossile della radiazione presente ai tempi della ricombinazione e prova a favore del modello del Big Bang. La scoperta della radiazione di fondo alla lunghezza d'onda di 7.35 cm era un ottimo indizio, ma solo la misura della intensità a più lunghezze d'onda poteva dimostrare che corrispondeva alla radiazione di un corpo nero. Alla temperatura di alcuni Kelvin la maggioranza dei fotoni ha una lunghezza d'onda di alcuni millimetri ed è sfortunatamente assorbita dalle molecole d'acqua presenti nell'atmosfera. Ironia della sorte, la maggioranza dei fotoni, che hanno viaggiato nello spazio per quasi 14 miliardi di anni, sono fermati dalla nostra atmosfera pochi istanti prima di giungere fino a noi. I successivi esperimenti confermarono, con misure a diverse lunghezze d'onda, che la radiazione era quella di un corpo nero a 3.5 K. Questi studi portarono, nel

1975, all'assegnazione del premio Nobel a Penzias e Wilson, i primi scopritori della radiazione.

La prima misura completa dello spettro della radiazione, da lunghezze d'onda di più centimetri a frazioni di millimetro, fu effettuata dall'apparato COBE (Cosmic Background Explorer), posto su un satellite messo in orbita a 900 km di quota nel 1989. Siamo molto lontani dall'atmosfera e la radiazione con lunghezze d'onda millimetriche giunge ai rivelatori senza impedimenti. L'accordo con lo spettro della radiazione emessa da un corpo nero con una temperatura di 2,726 K mostrato in figura 9 è spettacolare, anzi risulta essere la miglior radiazione di "corpo nero" trovata in natura data la precisione con cui riproduce la forma teorica.



**Figura 9.** Spettro della Radiazione Cosmica di Fondo misurato dall'esperimento COBE. La scala verticale indica l'intensità della radiazione. La scala orizzontale è proporzionale alla frequenza. La linea continua indica lo spettro predetto per una radiazione di corpo nero alla temperatura di 2,726 K. I dati sperimentali si sovrappongono alla predizione teorica in modo così perfetto da risultare praticamente invisibili.

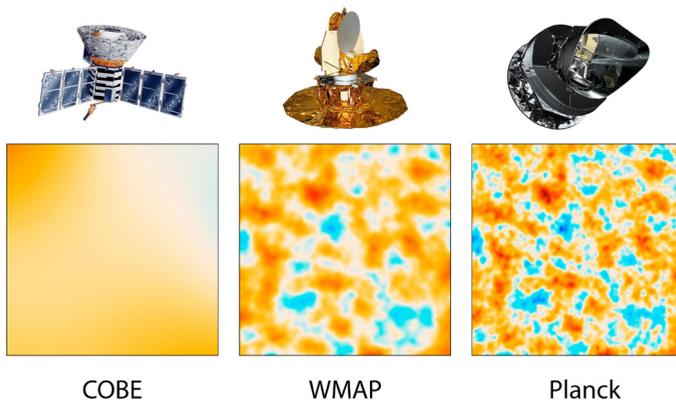
L'esistenza di quella che oggi universalmente chiamiamo *Radiazione Cosmica di Fondo* (CMB – *Cosmic Microwave Background*) è definitivamente comprovata, ed è la prova, la dimostrazione che l'Universo ha avuto un passato molto diverso dal presente, come ipotizzato dal modello del Big Bang. Il modello di Universo stazionario non fornisce infatti alcuna spiegazione plausibile dell'esistenza e delle

proprietà di questa radiazione. Se avessimo un termometro con cui misurare, con una inimmaginabile precisione la temperatura della radiazione di fondo, la vedremmo diminuire costantemente. E con la misura avremmo la percezione dello spazio che si espande attorno a noi.

I fisici, stabilita l'esistenza della CMB, sono passati al suo studio dettagliato. Come abbiamo detto le caratteristiche della radiazione sono le stesse in qualunque direzione del cielo si punti l'antenna, e corrispondono alla radiazione emessa da un corpo nero con una temperatura di 2,726 K. COBE misurò lo spettro della radiazione su tutta la volta celeste, con una risoluzione angolare (la capacità di uno strumento di vedere come distinti due punti di cielo vicini tra loro) di  $10^\circ$ , e rivelò piccole deviazioni della temperatura a seconda di dove si "guardasse". Lo spettro della radiazione è lo stesso in ogni direzione, ma la temperatura che si deduce presenta variazioni infinitesimali dell'ordine di una parte su diecimila, la quarta cifra decimale, a seconda della direzione del cielo da cui proviene.

La rivelazione della presenza nella radiazione cosmica di fondo di queste disomogeneità portò alla assegnazione del premio Nobel nel 2006 a John Mather e a George Smoot, attori principali del progetto COBE.

Come illustreremo nel paragrafo 8.2 il loro studio è talmente importante che ha motivato due nuovi esperimenti su satellite, caratterizzati da una risoluzione angolare migliorata: WMAP e Planck dell'Agenzia Spaziale Europea, operativi, rispettivamente, tra il 2001 e il 2010 e tra il 2009 e il 2013.

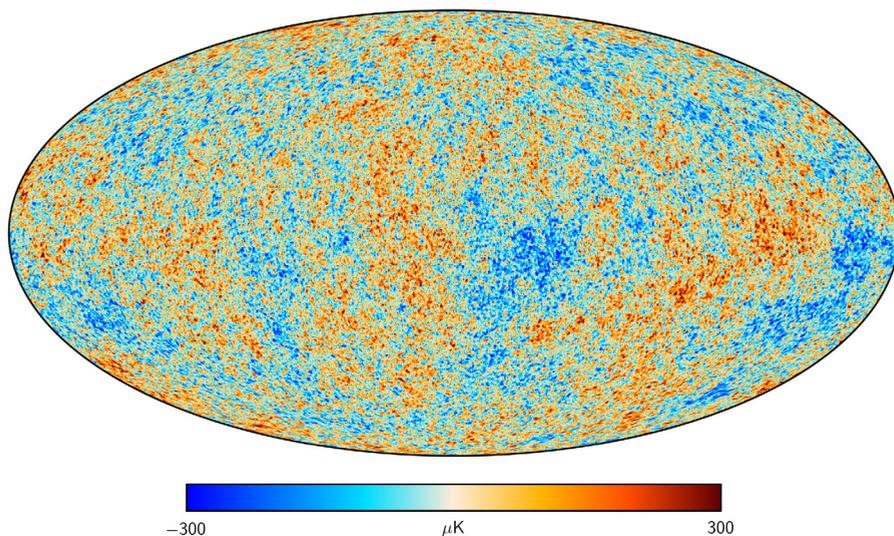


**Figura 10.** La figura mostra in forma cromatica le variazioni di temperatura misurate da COBE, WMAP e PLANCK in una stessa regione di cielo di  $10^\circ \times 10^\circ$ . Il progressivo miglioramento della risoluzione angolare è evidente.

La figura 10 mostra come il progressivo miglioramento della risoluzione angolare metta in evidenza il dettaglio delle variazioni di temperatura in una stessa zona di cielo di  $10^\circ \times 10^\circ$ . Le zone colorate di rosso indicano una temperatura superiore,

quelle colorate di blu inferiore rispetto alla temperatura media e si sottolinea che le massime variazioni sono di  $\pm 0,0003$  K. La figura 11 mostra le variazioni di temperatura su tutta la volta celeste misurate dall'esperimento Planck.

Alle disomogeneità di temperatura corrispondono variazioni nella densità della materia e della radiazione. I fotoni liberati al momento della ricombinazione, e che da allora viaggiano indisturbati nello spazio, ci danno la straordinaria fotografia di come la materia fosse distribuita nell'Universo circa 380.000 anni dopo il Big Bang. Sottolineiamo che a prescindere dalle infinitesime variazioni la temperatura è la stessa su tutta la volta celeste e con la temperatura la distribuzione della materia e della radiazione; il principio di isotropia e omogeneità trova, la sua miglior conferma. L'esistenza di infinitesimali non-uniformità è all'origine della ricchezza dell'Universo come lo conosciamo oggi; attorno ad esse la materia si è a poco a poco condensata dando origine alla distribuzione di galassie che osserviamo nella forma di quell'immensa ragnatela mostrata nella figura 4. Per questa ragione lo studio delle anisotropie riveste un ruolo fondamentale nella cosmologia moderna: esse sono il seme da cui matureranno un giorno stelle e galassie e inoltre le ipotesi che si avanzano sulla loro origine potranno, se confermate, gettare una luce su quell'evento che chiamiamo Big Bang.

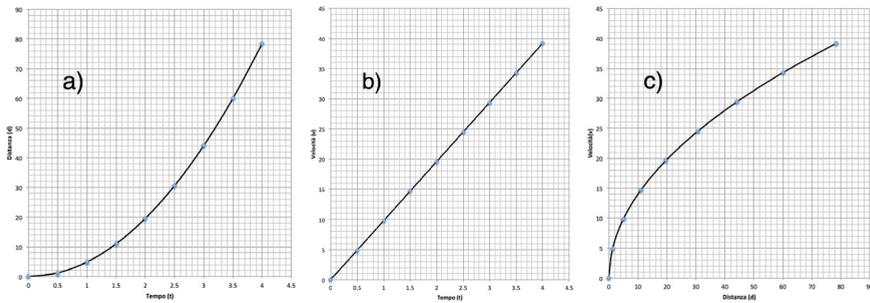


**Figura 11.** Misura della temperatura della CMB fatta dall'esperimento Planck dell'ESA (European Space Agency) su tutta la volta celeste. Con i diversi colori sono mostrate le differenze della temperatura rispetto al valore medio di 2,726 K. L'ellisse rappresenta tutto il cielo, il suo diametro maggiore corrisponde al piano galattico, dove cioè si trova la nostra Via Lattea, gli estremi dell'asse minore corrispondono a posizioni a  $\pm 90^\circ$  da esso, i "poli galattici".

# Capitolo 4

## Come si espande lo spazio?

Proviamo a seguire una leggenda che, in termini storici pare non avere fondamento, e facciamo come Galileo Galilei: andiamo con un amico a Pisa in Piazza dei Miracoli, saliamo sulla torre e stendiamo fino a terra una lunga striscia dove sono indicate in modo preciso le altezze dal suolo. Mentre noi lasciamo cadere verticalmente un corpo, ad esempio una sfera metallica di 10 cm di diametro, il nostro collaboratore, munito di un moderno cellulare, riprende il moto del corpo in “time-lapse”, a intervalli di tempo molto ravvicinati, diciamo un decimo di secondo<sup>1</sup>. Riguardando le immagini, siamo in grado di conoscere di quanto è caduta la sfera in funzione del tempo. Riportando i dati in un grafico, troviamo quanto mostrato in Fig.12a.



**Figura 12.** Cinematica del moto di un corpo che cade soggetto alla forza di gravità. a) distanza percorsa rispetto al tempo b) velocità in relazione al tempo c) velocità in relazione alla distanza. La linea continua rappresenta il risultato di un calcolo analitico che assume una accelerazione costante di  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

Possiamo anche elaborare i dati ottenuti con le fotografie per meglio comprendere il moto del grave. Possiamo, ad esempio, calcolare la velocità dividendo lo spazio percorso in un intervallo di tempo per l'intervallo temporale stesso. Troviamo quanto illustrato in figura 12b che mostra come la velocità aumenti e sia proporzionale al tempo passato dall'inizio della caduta. L'esercizio può continuare e, dividendo l'incremento della velocità per l'intervallo di tempo corrispondente, cui diamo il nome di accelerazione, troviamo che l'accelerazione cui il corpo è soggetto è costante ed uguale a  $+9,8 \text{ m/s}^2$ . Il segno più indica che l'accelerazione è rivolta verso basso e che il corpo cadendo, accelera cioè

1 Nel mostrare i risultati di questo esperimento immaginario supponiamo che l'aria non abbia alcun effetto significativo.

aumenta la velocità. La nostra sorpresa non può che aumentare se ripetendo l'esperimento con una sfera più piccola, diciamo di 1 cm di diametro, troviamo lo stesso risultato. Il moto del corpo, ed in particolare la sua accelerazione, non dipendono dal suo peso. Il risultato va contro l'intuizione, ma possiamo ripetere l'esperimento con corpi diversi e giungiamo alle stesse conclusioni.

Perché l'accelerazione di un grave sulla terra è costante e indipendente dalla massa di un corpo? Dovremo aspettare Newton con la formulazione delle leggi del moto e della gravità, per interpretare e capire questo risultato. E pazientare più di due secoli per averne, grazie al genio di Einstein, la ragione profonda.

Torniamo al nostro esperimento immaginario in Piazza dei Miracoli. Con i dati in nostro possesso possiamo anche costruire il grafico che mostra la velocità di caduta verso la distanza percorsa (Fig.12c) e notare che le variabili mostrate sono le stesse presenti nel diagramma di Hubble (Fig.5), dove, naturalmente, al moto del grave si sostituisce il moto delle galassie che, ricordiamo, non è propriamente un moto ma un allontanamento causato dalla espansione dello spazio. Notiamo anche che la galassia più lontana, presente nel grafico, è distante poco più di 20 Mpc (65 milioni di anni luce), una distanza molto piccola se confrontata con la dimensione del nostro Universo visibile. Un po' come se volessimo determinare il moto del corpo che cade dalla Torre di Pisa con i dati corrispondenti a una caduta di una decina di centimetri. Cosa non impossibile, ma molto difficile perché richiederebbe determinazioni molto precise della posizione del grave.

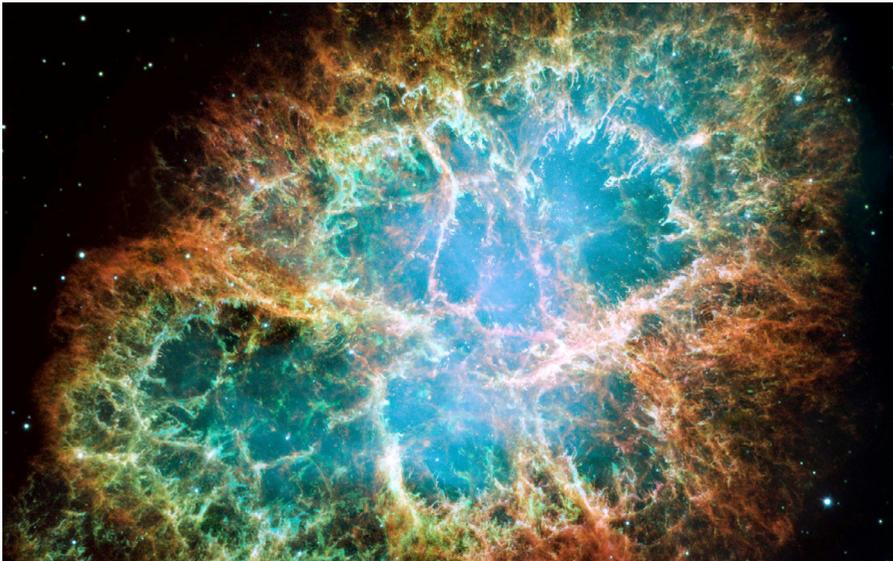
## 4.1 Una nuova luminosissima candela

Ricordando che un telescopio è anche una macchina del tempo, per determinare la cinematica dello spazio dal lontano passato ad oggi dobbiamo determinare la velocità e la distanza di galassie sempre più lontane. Ricordiamo al lettore che la velocità è misurata dallo spostamento verso il rosso della radiazione che osserviamo (effetto Doppler), mentre la distanza si ottiene dalla luminosità con cui ci appaiono un tipo particolare di stelle: le cefeidi. Queste stelle agiscono da sorgenti di luminosità note come fossero delle "candele standard". Osservando la figura 3, è facile convincersi dell'impossibilità di identificare stelle tipo cefeidi in quelle macchioline biancastre che sono le galassie lontane. Per estendere il grafico distanza-velocità a distanze maggiori dobbiamo disporre di "candele standard" con una luminosità molto maggiore. Precisiamo che la luminosità delle macchioline stesse non può essere utilizzata perché le galassie mostrano una grande varietà di dimensioni e forme, e quindi possono apparire con luminosità molto diverse anche se si trovano alla stessa distanza. Le galassie, in altre parole non sono delle buone "candele standard".

Ancora una volta, la molteplicità dei fenomeni presenti nell'Universo ci viene in aiuto.

Le stelle sono delle fucine nucleari dove elementi leggeri, quelli con pochi protoni e neutroni, si “fondono”, formando elementi più pesanti e liberando energia. La disponibilità di elementi leggeri, naturalmente, non è infinita ed alla fine della sua vita una stella o si spegne lentamente, come farà il sole, o esplose gettando nello spazio gli strati esterni e liberando in pochi secondi una quantità di energia equivalente a quella irradiata da miliardi di stelle. La figura 13 mostra l'immagine della materia proiettata nello spazio dall'esplosione di una stella la cui luce è giunta a noi nel 1054 e che viene normalmente catalogata come Nebulosa del Granchio.

Se l'esplosione avviene nella Via Lattea, come in questo caso, vediamo accendersi nel cielo una nuova luminosissima stella, visibile anche in pieno giorno, e da cui deriva il nome di *Stelle Novae* o *Supernovae* dato a fenomeni di questo tipo. La grande luminosità generata da questo tipo di esplosioni rende le supernovae identificabili anche in lontane galassie e quindi potenziali “candele standard”. Purtroppo, la luminosità cui danno origine varia dipendendo dalla massa e dalla storia passata della stella. Esiste però un tipo di supernovae, che gli astrofisici sanno identificare, per cui la luminosità è uguale, sempre la stessa. Questo tipo di esplosioni sono classificate come supernovae Ia (SN-Ia).



**Figura 13.** Fotografia della Nebulosa del Granchio, acquisita con il telescopio spaziale Hubble. L'immagine mostra la materia ad alta temperatura espulsa dall'esplosione della supernova SN-1054. Il numero indica l'anno dell'esplosione.

Un esempio di supernova SN-Ia, originata nella galassia NGC 4526, distante da noi solo 16,9 Mpc (55 milioni di anni luce), è mostrata nella figura 14.

A questo punto, c'è da superare un piccolo grande problema. Le supernovae sono fenomeni che avvengono raramente in una galassia, circa una volta ogni trent'anni, e ancora più raramente quelle di tipo Ia. Se vogliamo estendere il diagramma di Hubble con una statistica significativa, dobbiamo osservare contemporaneamente centinaia e centinaia di galassie, confrontare la loro immagine con quella ottenuta poche settimane prima, rilevare se in qualcuna di esse si è accesa una nuova luminosissima stella e studiarne le proprietà rapidamente per identificarla come SN-Ia. Strada non percorribile se le immagini sono ottenute con l'uso di lastre fotografiche. Nell'ultimo decennio del secolo scorso, lo sviluppo dei calcolatori, dei rivelatori elettronici e delle tecniche di riconoscimento delle immagini, ha reso possibile questa ricerca. Il metodo messo a punto da due gruppi di ricerca indipendenti: il "Supernova Cosmology Project" e lo "High-z Cosmology Team", consiste schematicamente nell'ottenere immagini digitali di ampie zone di cielo, confrontarle con quelle ottenute solo qualche settimana prima, identificare l'accendersi in qualche galassia di una nuova stella e darne immediatamente comunicazione agli osservatori astronomici che fanno parte della ricerca. Questi ultimi studiano le caratteristiche spettrali, la variazione della luminosità nei giorni e nelle settimane successive, identificando o meno la supernova come di tipo Ia. A questo punto, per determinare la distanza basta applicare il metodo della "candela standard" mentre per determinarne la velocità si utilizza l'effetto Doppler.



**Figura 14.** Immagine acquisita dal telescopio spaziale Hubble della Supernova SN 1994D (la macchia luminosa in basso a sinistra). L'esplosione è avvenuta nella galassia NGC 4526, visibile nell'immagine distante 55 milioni di anni luce da noi.

Un esempio di immagine di una galassia, ottenuta prima e dopo l'esplosione di una supernova, è mostrato in figura 15.

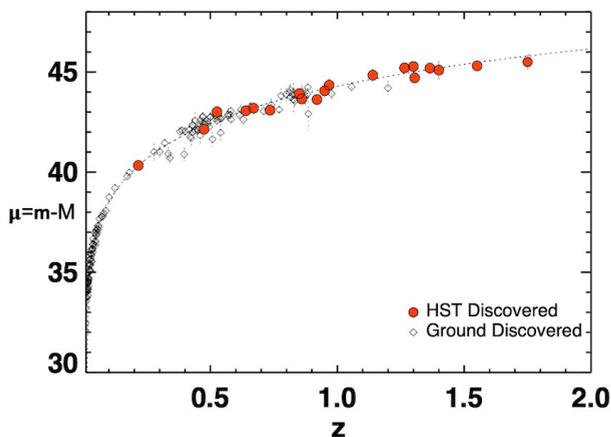


**Figura 15 a e b.** In una lontana galassia compare la supernova SCP/SN-L2, SN CL012Car, Caracalla. Le fotografie, ottenute con il telescopio spaziale Hubble, mostrano l'immagine della galassia prima, a sinistra, e dopo, a destra. L'esplosione della supernova è chiaramente visibile al centro.

Sembra abbastanza lineare e facile, ma se il lettore guarda la figura 3 dove le galassie più interessanti per la cosmologia, quelle più lontane, ci appaiono piccole e sfocate, potrà immaginare la difficoltà e l'impegno che questa ricerca comporta. Grazie alla perseveranza e al genio dei ricercatori coinvolti la ricerca ha avuto successo ed ha permesso l'identificazione di qualche decina di lontane supernovae.

## 4.2 Hubble aggiornato

La figura 16 mostra il grafico di Hubble con i dati disponibili fino al 2004. Il lettore ha tutto il diritto di restare confuso, perché avrà qualche difficoltà a confrontarlo con la figura 5. I grafici sono equivalenti, ma utilizzano variabili diverse. Quelle utilizzate in figura 16 sono direttamente collegate alle grandezze che vengono misurate nello studio delle supernovae.



**Figura 16.** Il “Diagramma di Hubble”<sup>2</sup> aggiornato con i dati ottenuti dallo studio delle supernovae Ia. I cerchi pieni sono le supernovae identificate e studiate con il telescopio spaziale Hubble, mentre i rombi rappresentano i dati ottenuti con telescopi a terra. Come discusso nel testo, l’asse orizzontale è un indice della velocità di allontanamento e l’asse verticale della distanza. Le variabili  $\mu$  e  $z$  sono variabili collegate direttamente alle quantità misurate: la luminosità delle supernovae e il loro “redshift”.

Il parametro  $\mu$ , la variabile utilizzata per l’asse verticale, è equivalente alla distanza ed è collegato alla luminosità con cui vediamo la supernova<sup>3</sup>. Maggiore è il parametro  $\mu$  e maggiore è la distanza. Ad esempio, a  $\mu=30$  corrisponde una distanza  $d=10$  Mpc, a  $\mu=31,7$   $d=22$  Mpc (la massima presente nel diagramma originale di Hubble), a  $\mu=40$   $d=1000$  Mpc, a  $\mu=45$   $d=10000$  Mpc. Facile realizzare che, quando l’incremento di  $\mu$  è  $+5$ , la distanza aumenta di dieci volte.

La variabile  $z$  utilizzata per l’asse orizzontale, comunemente chiamata redshift, indica di quanto la lunghezza d’onda della luce osservata si è spostata per effetto Doppler verso il rosso<sup>4</sup>, ed è un indice della velocità con cui le galassie si allontanano. La velocità di 2000 km/s, la massima quotata nel grafico originario di

<sup>2</sup> A. G. Riess et al. The Astrophysical Journal, Volume 607, Number 2.

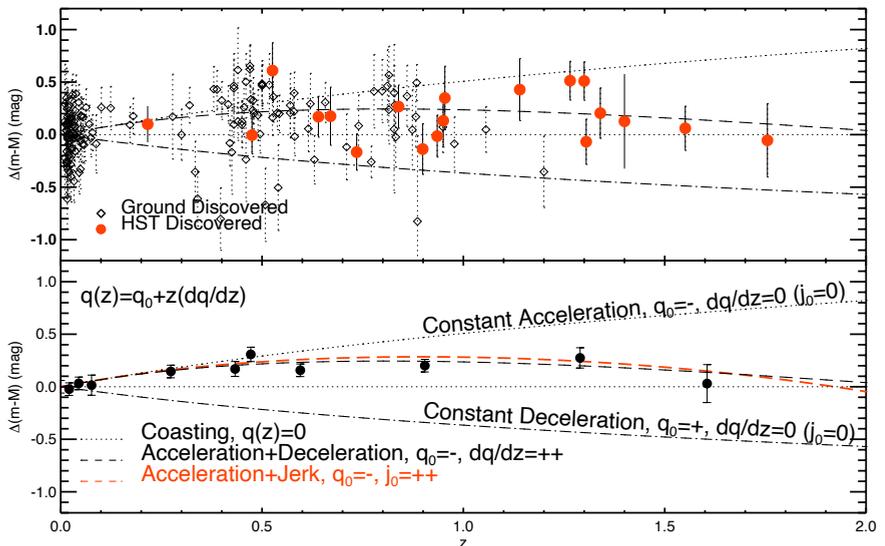
<sup>3</sup> Per chi vuole saperne di più. Il parametro  $\mu$  è collegato alla luminosità con cui vediamo la supernova utilizzando la scala introdotta dai greci. Ipparco classificava le stelle in sei gradi di brillantezza, dall’uno al sei. Alle più luminose assegnava il primo grado, e alle più deboli, percepibili dall’occhio umano, il 6. Ancora oggi nel mondo dello spettacolo, ma anche della scienza, usiamo l’espressione “stella di prima *grandezza*”. Noti il lettore che minore è la luminosità percepita, maggiore è il grado assegnato. Gli astronomi del XIX secolo ridefinirono la scala di Ipparco in termini rigorosamente matematici, ma rispettando la stessa convenzione. Alla luminosità così definita si dà il nome di *Grandezza (Magnitudine) Apparente (m)*.

Il parametro  $\mu$  è la differenza tra la magnitudine apparente delle supernovae e la *Grandezza Assoluta (M)*, definita dall’energia emessa dalla supernova rispetto a una sorgente di riferimento. Maggiore è il valore del parametro  $\mu$  e meno luminosa, quindi più lontana, è la supernova. Per il lettore che ha qualche familiarità con la matematica, la relazione tra distanza e  $\mu$  è  $d=10^{(\mu-25)/5}$

<sup>4</sup> Se  $\lambda_e$  è la lunghezza della luce emessa e  $\lambda_o$  quella della luce osservata  $z=(\lambda_o-\lambda_e)/\lambda_e$ .

Hubble, corrisponde a  $z=0,0067$ , valore troppo piccolo per essere identificato in figura 15, mentre a  $z=1$  corrisponde la velocità di 180000 km/s (il 60% della velocità della luce). La galassia più lontana, mostrata in figura 16, si allontana con una velocità del 77% di quella della luce. La popolazione di galassie studiate da Edwin Hubble si troverebbe raggruppata nell'angolino in basso a sinistra nella figura 16, quasi invisibile, a dimostrazione degli enormi progressi fatti dalle osservazioni.

Abbiamo quindi ottenuto per l'Universo il grafico velocità-distanza equivalente a quello ottenuto dal novello Galileo nel caso della caduta dei gravi a Pisa e mostrato in figura 11c. Possiamo, quindi, similmente a quanto fatto in Piazza dei Miracoli, studiarne la cinematica, cioè determinare la velocità e l'accelerazione dell'espansione dello spazio, anche se con una matematica un pochino più complicata perché ora lo spazio non è fisso ma si espande. A parte queste complicazioni tecniche, che lasciamo agli addetti ai lavori, l'analisi conduce a determinare le stesse quantità. La curva tratteggiata in figura 17, in ottimo accordo con i risultati sperimentali, indica il risultato dell'analisi cinematica e ci dice che in tempi lontani, quelli rappresentati dalle galassie con  $z > 0,5$  la velocità di espansione diminuiva, mentre, in tempi più recenti, ha iniziato ad aumentare. Come vedremo, questo risultato è completamente inaspettato, e vale la pena di argomentarlo più quantitativamente. Tuttavia, il lettore disposto a credere subito a questa sorprendente e inattesa conclusione che ha scombussolato il modello di universo elaborato fino a una trentina di anni fa, può andare direttamente alle ultime frasi del presente paragrafo. Il lettore che, invece, vuole verificare come i dati supportino questa affermazione, deve cimentarsi con la figura 17 e la sua didascalia.



**Figura 17.** L'asse verticale indica la differenza tra il parametro  $\mu$ , indice della luminosità apparente di una supernova e la sua luminosità se l'espansione fosse avvenuta a velocità

costante. L'asse orizzontale indica il redshift ( $z$ ). Figura superiore: valori per ogni singolo evento misurato. Figura inferiore: valori mediati su intervalli costanti dell'asse verticale. Se questo fosse il modo in cui avviene l'espansione, i punti si dovrebbero trovare sulla linea punteggiata parallela all'asse orizzontale. La linea punteggiata nella parte superiore del grafico indica l'andamento previsto se lo spazio si espandesse con una accelerazione costante. La curva linea-punto nella parte inferiore dà la previsione se l'espansione dello spazio decelerasse in modo costante. I dati sono ben riprodotti dalla curva tratteggiata che assume una accelerazione ( $z < 0,5$ ) ed una decelerazione ( $z > 0,5$ ).

La necessità di una decelerazione e poi di una accelerazione della espansione dello spazio per riprodurre i dati di figura 16 è ben rappresentata in figura 17.

Supponendo che lo spazio si sia sempre espanso con la velocità attuale, saremmo facilmente in grado di calcolare la velocità e la distanza di ogni galassia. L'asse verticale del grafico indica la differenza tra la distanza misurata delle galassie e la distanza cui si troverebbero secondo l'ipotesi appena fatta (questa differenza di distanze è espressa come una differenza di grandezze luminose).

Se, come ipotizzato, la velocità di espansione fosse stata sempre costante, tutti i dati si dovrebbero posizionare sull'asse orizzontale, in corrispondenza al valore zero dell'asse verticale (linea punteggiata in figura 17). Come si vede, i valori si discostano assumendo valori positivi. Le distanze misurate sono maggiori di quelle che si otterrebbero con una espansione costante, conseguenza del fatto che la luminosità misurata è minore di quella ipotizzata (ricordiamo che a una luminosità minore corrisponde una grandezza apparente maggiore). Nella stessa figura sono mostrate le previsioni corrispondenti, sia a una accelerazione costante (linea a punti), che ad una decelerazione costante (linea tratto-punto). Le distanze misurate sono in contraddizione con ambedue le ipotesi, e solo una iniziale decelerazione, rappresentata dalle galassie più lontane e quindi antiche ( $z > 0,5$ ), seguita da una accelerazione, rappresentata dalle galassie più recenti ( $z < 0,5$ ), le riproduce correttamente (linea a tratti). Vedremo, nel seguito, come si possa ipotizzare un modello di Universo che spieghi questo andamento.

Nel 2011 Perlmutter, Riess e Schmidt hanno ricevuto il premio Nobel per questa straordinaria e inaspettata scoperta.

Abbiamo già detto che un telescopio è anche una macchina del tempo e quindi viene naturale la domanda: quando, nel passato è avvenuta questa transizione? E poi quali sono i fenomeni che sottintendono a questo "curioso" comportamento? Perché l'espansione delle galassie decelera dopo il Big Bang e ora accelera? L'accelerazione continuerà in futuro? Domande intriganti ed eccitanti, ma per avere le risposte che la moderna cosmologia offre il lettore dovrà pazientare un po' e passare alla lettura del prossimo paragrafo: il motore dell'espansione.

# Capitolo 5

## Il motore dell'espansione

### 5.1 Torniamo ad Einstein

Le caratteristiche principali dell'espansione dell'Universo sono riconducibili alla gravitazione. La sua descrizione teorica ha un nome preciso: Relatività Generale, teoria concepita più di un secolo fa da Albert Einstein. Si tratta di una teoria difficile, anche per i fisici, sia dal punto di vista concettuale che da quello matematico, e noi ne discuteremo solo alcuni aspetti.

La Relatività Generale (RG) è una estensione della Relatività Speciale<sup>1</sup> e della gravità di Newton. Alla base della teoria è formulata l'ipotesi che lo spazio si "curvi" in presenza di corpi materiali, o meglio di energia<sup>2</sup> e che la forza di gravità, a differenza delle altre forze, ad esempio la forza elettrostatica, sia una conseguenza di queste deformazioni.

Quando percorriamo in auto una curva, sentiamo agire la forza centrifuga che tende a farci uscire dalla traiettoria. La forza che percepiamo è tanto maggiore quanto più il raggio della curva è minore. Se per incanto tutti gli appigli che ci vincolano all'auto sparissero, tutti i passeggeri, dagli adulti ai bambini che, si noti, hanno masse diverse, sarebbero proiettati fuori dall'auto con la stessa accelerazione. L'origine della forza di gravità è analoga, solo che la curva percorsa dall'auto è sostituita dalla curvatura dello spazio. Dopo tre secoli viene così spiegato perché tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione, indipendentemente dalla loro massa.

Ma cosa fa "curvare" lo spazio? La RG mette in relazione la geometria dello spazio con la densità di energia presente. Più c'è massa (o energia) e più lo spazio si "curva".

I calcoli compiuti utilizzando le equazioni della gravitazione di Newton e della Relatività Generale di Einstein danno risultati coincidenti quando la forza di gravità è "debole", ma si differenziano quando diviene più intensa. Nel caso del sistema solare, una piccola differenza tra misure sperimentali e i calcoli effettuati con le equazioni di Newton si manifesta nel caso di Mercurio, il pianeta più vicino al sole, dove la forza di attrazione gravitazionale è maggiore rispetto

---

1 La Teoria della Relatività Speciale considera come la misura di una lunghezza e di un intervallo di tempo diano risultati diversi se effettuati da osservatori in moto, uno rispetto all'altro, con velocità costante.

2 Ricordiamo che la massa dei corpi è equivalente ad una quantità di energia. L'equivalenza trova la sua espressione matematica nella più che celebre equazione di Einstein  $E = mc^2$  dove  $c$  è la velocità della luce. In questo saggio useremo massa o energia in modo equivalente.

agli altri pianeti. Le previsioni basate sulle equazioni di Einstein sono in miglior accordo con le osservazioni di quelle di Newton e hanno rappresentato la prima prova della validità della RG.

Anche la traiettoria della luce delle stelle viene modificata quando passa vicino al sole. Durante una eclisse totale le stelle che vediamo vicine al sole appaiono in posizioni leggermente diverse da quando sono osservate nel cielo notturno. Questo effetto, misurato dal fisico inglese A. Eddington, in occasione della eclisse del 1919 in Sao Tomè e Principe, nel Golfo di Guinea, fu una ulteriore conferma della validità della Relatività Generale<sup>3</sup>. Recentemente la rilevazione di onde gravitazionali prodotte dalla collisione di due stelle di neutroni o di due buchi neri e la ricostruzione del bordo di buchi neri al centro di lontane galassie hanno dato una ulteriore forte conferma della sua correttezza in situazioni in cui la curvatura dello spazio gioca un ruolo determinante.

Il primo ad applicare le nuove “equazioni del moto” all'Universo fu A. Friedmann, nel 1922. Il fisico russo, assunto il principio di omogeneità ed isotropia, di cui abbiamo ampiamente parlato, derivò una equazione che da lui prende il nome. Per rendere merito a questo straordinario scienziato, poco noto al grande pubblico, vogliamo ricordare qualche episodio della sua vita e della sua straordinaria ricerca.

Aleksandr Aleksandrovich Friedmann possedeva uno straordinario talento per le scienze matematiche, un vero fuoriclasse in materia. Nacque il 16 giugno del 1888 a San Pietroburgo da un padre ballerino e compositore e da una madre pianista. Nel 1906, terminato il ginnasio, si iscrisse ai corsi di fisica e matematica all'Università di San Pietroburgo dove seguì con interesse le lezioni sulle nuove teorie che stavano nascendo nella fisica: la relatività e la meccanica quantistica.

Con lo scoppio della Prima Guerra Mondiale, gli studi di Friedmann subirono un'interruzione; partì volontario come pilota aeronautico e, grazie alla sua temerarietà unita alle sue notevoli capacità matematiche, riuscì a bombardare con precisione chirurgica le truppe austriache asserragliate nella città di Przemysl, ricevendo così la più alta onorificenza militare russa, la Croce di San Giorgio. Finita la guerra, ottenne la cattedra di matematica all'Università di Perm, ma, poco dopo, nel 1920, fece ritorno alla sua amata San Pietroburgo, divenuta nel frattempo Pietrogrado.

Malgrado il lavoro frenetico Friedmann trovò il tempo di innamorarsi, anzi, di perdere letteralmente la testa per una giovane ricercatrice, Natalia Malinina, che sposerà nel 1922. In questi anni, il giovane sposo applicherà la teoria della Relatività Generale all'Universo intero. Questa la sua idea innovativa: studiare tutto l'Universo come un sistema governato dalla gravitazione, ovvero dalle leggi della Relatività Generale. Friedmann invierà i suoi studi, in cui trattava

---

3 Sugeriamo al lettore la visione del film: *Il mio amico Albert*, che tratta delle accese discussioni che avvenivano in ambito scientifico e della corrispondenza intercorsa tra i due fisici nel difficile periodo della Prima Guerra Mondiale.

della possibilità di un Universo in evoluzione, alla rivista *Zeitschrift für Physik*<sup>4</sup>. Il 18 settembre dello stesso anno, la rivista ricevette una nota da Einstein, il quale, senza mezzi termini, stroncava in dieci righe il lavoro di Friedmann, definendolo «matematicamente sbagliato»<sup>5</sup>. Un Universo che poteva espandersi o contrarsi sembrava un'eresia ai suoi occhi; Einstein voleva un Universo stazionario ed eterno.

Così scriveva Friedmann: «I tipi variabili di Universo sono una grande varietà di casi; ci possono essere situazioni di questo tipo quando il raggio di curvatura [...] cresce costantemente nel tempo; sono anche possibili casi in cui il raggio di curvatura cambia periodicamente». E così rispondeva Einstein: «I risultati che riguardano situazioni non stazionarie, contenuti nel lavoro di Friedmann, mi sembrano sospetti. In realtà risulta che la soluzione data non sembra compatibile con le equazioni di campo».

Ma uno scienziato con al petto la Croce di San Giorgio non si lascia intimorire facilmente; e così Friedmann scrisse direttamente al padre della relatività una lettera piena di calcoli dettagliati... ed il 31 maggio del 1923 Einstein inviò una nota<sup>6</sup> di sette righe alla rivista ammettendo il proprio errore e la correttezza dei risultati di Friedmann: «Essi (i risultati di Friedmann) mostrano che, oltre alle soluzioni statiche, ci sono soluzioni variabili con una struttura simmetrica». Consoliamoci, anche i grandissimi possono sbagliare! Si dovrà attendere fino al 1929, quando Hubble pubblica i suoi famosi risultati, per sapere che le soluzioni variabili sono quelle valide nel nostro Universo. Aleksandr Friedmann muore di tifo il 16 settembre del 1925, a soli 37 anni.

Se Friedmann va considerato il padre della cosmologia moderna, è giusto riconoscere anche i meriti di un sacerdote, Georges Lemaître, che lavorava all'Università Cattolica di Lovanio in Belgio. Anche Lemaître ebbe l'idea di applicare la RG all'Universo intero e giunse alle stesse conclusioni qualche anno dopo in modo indipendente. Nel 1927, quando Friedmann era già morto, Lemaître fu il primo a ipotizzare che una espansione di tipo cosmologico avrebbe potuto dar luogo a una recessione delle galassie<sup>7</sup>. Nasceva così grazie a Friedmann e a Lemaître la cosmologia moderna che con Hubble avrebbe avuto la sua verifica sperimentale.

L'equazione di Friedmann mette in relazione la velocità di espansione alla densità media di energia. Per il sistema Universo è equivalente all'equazione del moto di Newton. Come nella meccanica newtoniana a condizioni iniziali

4 A. Friedmann "On the curvature of space" *Zeitschrift für Physics*, 10,377-386, 1922.

5 A. Einstein Remarks on the work of A.Friedmann (Friedmann 1922) *Zeitschrift für Physics*, 11,326, 1922.

6 Nota ricevuta da *Zeitschrift für Physics* nel Maggio 1923.

7 Per questa ragione la IAU (international Astronomical Union) propone che la legge di Hubble sia più correttamente denominata legge di Hubble-Lemaitre.

differenti corrispondono moti diversi così nell'equazione di Friedmann, la dinamica dell'Universo, cioè la sua velocità di espansione – o perché no – di contrazione, dipende dalla densità e dal tipo di energia presente. Tanti tipi di Universo diventano teoricamente possibili.

## 5.2 Le geometrie dello spazio

Abbiamo già citata la curvatura dello spazio. Concetto impegnativo. I testi divulgativi di cosmologia spesso dedicano molte pagine a questo argomento. Anche se il problema della “curvatura dello spazio” è oggi superato, non possiamo esimerci dal chiarirne, anche se brevemente, il significato.

Lo spazio in cui viviamo, e quindi gli oggetti che ci circondano, ha tre dimensioni: altezza, larghezza e profondità. Per comprendere facilmente cosa si intende con curvatura e geometria dello spazio, iniziamo a considerare solo due dimensioni, quelle, ad esempio, con cui abbiamo a che fare quando disegniamo su di un foglio di carta. Sui banchi di scuola abbiamo imparato le regole della geometria, che ci permettono di calcolare perimetri, angoli e aree delle più svariate figure geometriche. Queste regole si basano sugli assiomi definiti più di due millenni fa da Euclide, la base di quella che oggi chiamiamo *geometria euclidea*. In tal senso, la superficie bidimensionale del nostro foglio è “euclidea” o “piatta”. Per esempio, se sul nostro foglio di carta disegniamo un triangolo, la somma dei suoi angoli interni è  $180^\circ$ , se il triangolo è un triangolo rettangolo vale il teorema di Pitagora, la superficie di un cerchio vale  $\pi r^2$  etc. Ma, attenzione, queste relazioni valgono solo se applicate al nostro foglio di carta ben steso su un tavolo “piano”, ovvero su una superficie piatta.

Prendete ora un palloncino e disegnate un grande triangolo. Osserverete abbastanza facilmente che la somma degli angoli interni è maggiore di  $180^\circ$ <sup>8</sup> e che la superficie di un cerchio è maggiore di  $\pi r^2$ . Le regole della geometria euclidea non valgono più, perché la superficie del pallone ha una curvatura. In questo caso diremo che la superficie ha una curvatura positiva. Esiste anche un altro tipo di superficie caratterizzato da una curvatura negativa. Quest'ultima nuova tipologia è rappresentata a due dimensioni da una superficie che ricorda una sella. I tre tipi di superficie sono rappresentati in figura 18.

Il lettore disposto a credere che la geometria dello spazio è euclidea, senza approfondire come si sia giunti a questa conclusione può passare direttamente alla lettura del prossimo paragrafo.

Osserviamo i triangoli disegnati sulle tre superfici di figura 18 e supponiamo di porci a un vertice e di osservare il lato opposto. Se la superficie è euclidea, il

---

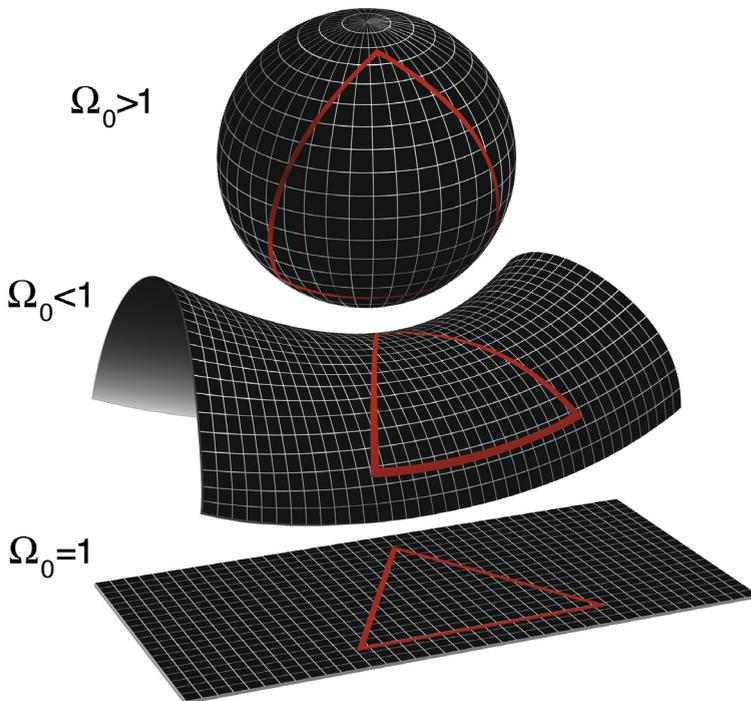
8 I triangoli sulla superficie sferica vanno tracciati usando archi di cerchio massimo, i percorsi più brevi tra due punti.

lato opposto sottenderà un certo angolo, ma se la curvatura è positiva, o negativa, osserveremo un angolo, rispettivamente, maggiore o minore.

Ancora una osservazione. Un lettore scrupoloso potrebbe obiettare che quando disegniamo sul tavolo, stiamo disegnando sulla superficie terrestre che non è piatta, ma quella di una sfera. Giusto. Ma quando le distanze considerate nel nostro disegno sono molto piccole rispetto al raggio della sfera, le correzioni introdotte dalla geometria di uno spazio curvo diventano trascurabili e si applicano le regole euclidee.

La stessa problematica si pone quando passiamo allo spazio, aggiungendo al nostro foglio una terza dimensione. Possiamo definire uno spazio "piatto", per cui valgono le leggi euclidee, ma anche uno spazio con curvatura positiva o negativa, anche se è molto più difficile immaginarli o rappresentarli.

Torniamo a noi e alla cosmologia. Se lo spazio a tre dimensioni è omogeneo e isotropo, come crediamo sia l'Universo su grande scala, le tre geometrie, di cui abbiamo appena detto, sono le geometrie possibili.



**Figura 18.** Rappresentazione di superfici caratterizzate da diverse curvatures. Sopra: Superficie con curvatura positiva,  $k=+1$ . In mezzo: superficie con curvatura negativa  $k=-1$ . In basso: Superficie piatta o euclidea  $k=0$ .<sup>9</sup>

<sup>9</sup> "L'equazione di Friedmann definisce il parametro di Hubble come dipendente dalla densità di energia e dalla geometria dello spazio. Le diverse geometrie sono caratterizzate dall'intero  $k$ :  $k=-1$  se la curvatura è negativa,  $k=+1$  se la curvatura è positiva e  $k=0$  se lo spazio è euclideo.

Come possiamo determinare la geometria dell'Universo? Misurando quantità che dipendono dal tipo di geometria. Un primo metodo consiste nel contare il numero di galassie in un determinato volume. Se il volume di una sfera varia con il cubo del raggio, come predetto dalla geometria euclidea, il numero di galassie osservate in ogni sfera deve variare con il cubo del raggio. Ad esempio, se nel volume di una sfera con un raggio di 1 Mpc ci fosse una galassia, in una sfera con 10 Mpc di raggio ce ne dovrebbero essere mille, in una di 100 Mpc un milione e così via. Se la geometria dell'Universo fosse differente, il conteggio sarebbe diverso.

Le osservazioni non sono semplici perché, oltre al problema della determinazione della distanza, più una galassia è lontana più bassa è la sua luminosità e quindi bisogna essere sicuri di non “perdere” quelle più lontane nel conteggio. Anni di osservazioni e la disponibilità di telescopi sempre più potenti hanno comunque portato alla conclusione che il numero di galassie aumenta con il cubo del raggio della sfera considerata e che, quindi, la geometria dello spazio favorita è euclidea.

Un'altra possibilità è verificare a quale geometria soddisfi un immenso triangolo cosmico. Facile a dirsi ma come troviamo un triangolo con i lati sufficientemente estesi da rendere la misura significativa? Nella figura 11, che riassume i risultati dell'esperimento Planck, i diversi colori indicano le minuscole variazioni di temperatura della radiazione in diverse zone dello spazio. A zone di diversa temperatura corrispondono zone di maggiore o minore densità nel plasma di protoni, elettroni e fotoni. In base a calcoli non proprio banali, gli astrofisici stimano una lunghezza caratteristica dipendente dalla distanza tra le zone di maggiore o minore densità. Oggi noi vediamo questa lunghezza caratteristica, come disporre di un metro di riferimento, separata da un angolo. È come se avessimo a disposizione un gigantesco triangolo di cui un lato è quello corrispondente a questa lunghezza e gli altri due lati sono quelli percorsi dalla luce in miliardi di anni per giungere fino a noi. L'angolo osservato è in accordo con il valore predetto dalla geometria euclidea, mentre sarebbe rispettivamente e significativamente minore o maggiore per un Universo con curvatura negativa o positiva.

In conclusione, le osservazioni degli ultimi decenni permettono di affermare che, su grande scala, la geometria dell'Universo è quella di uno spazio piatto, e che quindi si applica la geometria di Euclide. Localmente, tuttavia, in presenza di stelle e pianeti, lo spazio assume una curvatura. Secondo la Relatività Generale, lo spazio non è qualcosa di immobile ed inerte, ma ha una sua dinamica, si curva e si modifica in presenza di corpi materiali, facendo loro percorrere traiettorie definite e calcolabili. Se l'energia presente è particolarmente elevata, intrappola addirittura la luce, dando origine a un buco nero. Quando l'energia cambia bruscamente, come nella collisione di due stelle particolarmente massicce, lo spazio vibra, trema, dando origine a onde gravitazionali che si propagano alla velocità della luce. Queste onde, da qualche anno rivelabili in sede di dimostrazione sperimentale, sono vere e proprie increspature del tessuto dello spazio e del tempo.

### 5.3 Cosa c'è tra le galassie

Ricapitoliamo. L'equazione di Friedmann mette in relazione il parametro di Hubble con la densità media di energia presente nel cosmo e la geometria dello spazio, che d'ora in poi assumeremo euclidea.

Al valore attuale del parametro di Hubble ( $H_0$  70 km/s/Mpc)<sup>10</sup> corrisponde una densità di energia, cui diamo il nome di *densità critica*. La densità critica attuale è equivalente alla massa di 5,3 protoni/m<sup>3</sup>. Se l'equazione di Friedmann è corretta, in media, in ogni metro cubo di spazio, ci deve essere una energia equivalente a questo numero di protoni. Tanto o poco?

Se consideriamo che in un metro cubo di acqua esistono 6 10<sup>29</sup> protoni (600 miliardi di miliardi di miliardi di protoni) possiamo dire che l'Universo, confrontato con la densità presente sulla terra, è vuoto. A regioni come le stelle ed i pianeti, dove si concentra la materia, si alternano immensi spazi apparentemente vuoti.

Il metodo scientifico richiede una dovuta verifica di questa previsione: ci aspettiamo che le osservazioni confermino questo valore di densità di materia e radiazione nell'Universo. Partiamo da quello che sappiamo e vediamo. L'energia ci appare sotto forma di materia e radiazione. A priori, non sembrerebbe troppo difficile misurarne la densità e verificare se corrisponde alla densità critica.

Ma le cose non sono così semplici. Noi vediamo le stelle e le galassie dalla luce che generano e che giunge sino a noi, ma quale è la relazione tra la massa di una stella e la sua luminosità? Le stelle sono delle fucine nucleari che sintetizzano elementi leggeri in elementi più pesanti, producendo energia sotto forma di calore e di radiazione elettromagnetica. Questi processi sono oggi ben compresi, ma variano con la massa della stella e di conseguenza varia il rapporto tra la radiazione emessa e la massa. Esistono diversi tipi di stelle e calcolare la massa presente nell'Universo a partire dalla luce che giunge fino a noi non è semplice e ha rilevanti margini di incertezza. Questo conteggio ci dice che la massa delle stelle è approssimativamente lo 0,4% della densità critica. Anche considerando le "stelle nere", masse inerti che non producono più energia, le polveri e i gas che permeano le galassie, lo spazio intergalattico e i buchi neri presenti al loro centro, la densità di massa misurata è solo una percentuale molto bassa rispetto alla densità critica. L'Universo è molto più vuoto di quanto dovrebbe essere. Vale la pena di notare che, sorprendentemente, la maggior parte della materia ordinaria, vedi i prossimi paragrafi, non si trova nelle stelle e nei pianeti, ma nell'idrogeno e nell'elio presenti nello spazio tra le galassie sotto forma gassosa.

Si potrebbe ipotizzare che il valore dominante sia quello della radiazione. Al valore della radiazione che ci giunge dalle stelle e dalle galassie occorre aggiungere quello della radiazione cosmica di fondo da cui siamo circondati. Anche se può apparire

10 Attualmente c'è una vivace discussione su quale sia il valore del parametro  $H_0$ . Dallo studio delle supernovae lontane si deduce 74km/s/Mpc mentre l'esperimento Planck porta a un valore di 67 km/s/Mpc. In questo saggio utilizzeremo il valore di 70 km/s/Mpc.

sorprendente, l'energia trasportata dalla CMB, che non vediamo, è dominante rispetto a quella che ci giunge dalle stelle, ma è meno di un decimillesimo della densità critica. Trascurabile. La densità di energia non corrisponde a quella che dovrebbe essere se la geometria del Cosmo fosse piatta. Per questa ragione, fino a pochi decenni fa, si riteneva che la geometria dello spazio fosse la geometria "aperta".

In definitiva, seguendo il ragionamento fatto finora, i pezzi del puzzle che compongono il quadro dell'Universo non corrispondono: sembra che manchi qualcosa. Possiamo pensare che ci sia un qualche errore di fondo nella teoria che stiamo applicando, oppure che ci siano dei pezzi mancanti. Forse... qualche nuovo attore sul palcoscenico dell'Universo. Un attore che contribuisce alla densità di energia, ma che non ha la forma che ci aspettiamo.

## 5.4 Due nuovi attori: la materia e l'energia oscure

Invece di calcolare la densità di materia dalla luce che ci giunge dalle stelle e dalle galassie, possiamo calcolarla dagli effetti di attrazione gravitazionale che esercita. Consideriamo, come esempio il sistema solare. Il 99,8% della sua massa è concentrata nel sole. La nostra terra compie un giro completo attorno al sole in 365,2 giorni, su un'orbita approssimativamente circolare a una distanza media di 149 milioni di chilometri. Consideriamo ora Saturno, il pianeta gioiello del nostro sistema; la sua orbita dista dal sole 1400 milioni di chilometri e quindi, approssimativamente, dieci volte più lontano della terra. Se la sua velocità nel percorrere l'orbita fosse uguale a quella della terra, il suo anno corrisponderebbe a 10 anni terrestri. Invece, Saturno si muove più lentamente della terra, ed il suo anno, la sua rotazione completa attorno al sole, si svolge nell'arco di 26 anni terrestri.

Le leggi del moto e della gravitazione di Newton spiegano questo andamento: la velocità di corpi che gravitano in orbite circolari attorno a un centro diminuisce all'aumentare della loro distanza dal centro.<sup>11</sup> Consideriamo ora una Galassia, ad esempio, Andromeda (figura 2). La maggior parte della sua massa, che noi mettiamo in relazione alla luce che vediamo, si trova entro una certa distanza dal centro. Corpi che ruotano attorno alla galassia devono seguire la stessa legge dei pianeti nel sistema solare: la loro velocità deve diminuire con la distanza dal centro della galassia.

Nel 1970, gli astrofisici statunitensi Vera Rubin e Kent Ford<sup>12</sup> misurarono la velocità dei gas ruotanti attorno ad Andromeda e, sorprendentemente, trovarono

11 La legge che, per un'orbita circolare, definisce la velocità di un corpo in funzione della distanza e della massa attorno a cui ruota è semplice:  $v^2 = G \cdot M(R) / R$  dove  $G$  è la costante di gravitazione universale,  $M(R)$  la massa presente all'interno dell'orbita e  $R$  il raggio dell'orbita. Nel caso del sistema solare  $M(R)$  è la massa del sole.

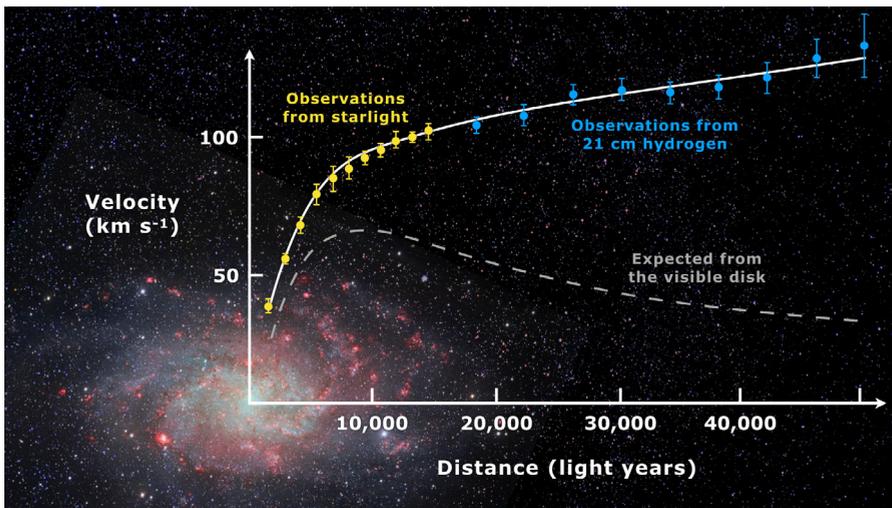
12 V. C. Rubin and W. K. Ford, Jr., "Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions", *Astrophysical Journal*, vol. 159, February 1970, p.379. Retrieved 29 March 2019.

che la velocità di rotazione, invece di diminuire, come mostrato dalla curva a tratti della figura 19, rimane costante, come mostrato dalla curva continua.

Questi risultati, dapprima accolti con scetticismo, furono confermati da Morton Roberts e Robert Whitehurst<sup>13</sup> qualche anno dopo. Questo andamento è in apparente contraddizione con la legge di gravità, perché si tratta di una velocità troppo alta. Ad esempio, se Saturno avesse una velocità più alta, il sole non sarebbe riuscito a trattenerlo e il pianeta si sarebbe perso nello spazio.

Ritenendo corrette le previsioni della legge di gravità, Rubin e Ford, per giustificare l'andamento della velocità di rivoluzione dei gas in funzione della distanza dal centro della galassia, avanzarono l'ipotesi dell'esistenza di un alone molto esteso e approssimativamente sferico di materia che non vediamo perché non genera luce: la *materia oscura*. La linea continua di figura 19 indica come sarebbe l'andamento della velocità di rotazione in presenza dell'alone di materia oscura. L'idea era quella di mantenere valida la legge di gravità, ma di ipotizzare che la forza gravitazionale fosse maggiore a causa della presenza di un inaspettato alone massivo che non siamo in grado di vedere.

Esiste anche un'altra evidenza di materia oscura. Nell'Universo ci sono zone in cui si concentrano molte centinaia di galassie, ammassi di galassie, tra cui si esercita una forte attrazione gravitazionale, il "collante" che le tiene unite.



**Figura 19.** Velocità di rotazione della materia (stelle, gas, polveri) attorno al centro della galassia M 33 in dipendenza dalla distanza dal centro. Linea tratteggiata: velocità predetta se la materia presente nella galassia fosse unicamente la materia visibile. Linea continua: velocità misurata.

13 M.S. Roberts and R.N. Whitehurst "The rotation curve and geometry of M31 at large galactocentric distances" *Astrophysical Journal*, Vol. 201, p. 327-346 (1975).

Il primo a studiare i moti delle galassie che si trovano nell'ammasso della costellazione Coma fu Fritz Zwicky, nel lontano 1930, definito eccentrico, scorbutico, arrogante e irascibile dai suoi colleghi, che però lo consideravano anche il più geniale ed acuto astrofisico del XX secolo.

Fritz Zwicky nacque in Bulgaria, allora parte dell'impero austro-ungarico, il 14 febbraio 1898. Laureatosi al Politecnico di Zurigo nel 1920, conseguì il dottorato in fisica nel 1922. Quando, nel 1925, ottenuta una borsa di studio per gli USA, gli venne chiesto in quale Università volesse recarsi, la sua risposta fu «dove ci sono delle montagne»; scelse Caltech a Pasadena ma, al suo arrivo, espresse il suo disappunto in quanto ciò che vedeva intorno a Pasadena «erano solo colline».

I contributi di Zwicky all'astronomia sono innumerevoli, ma è anche ricordato per il suo temperamento e caratteraccio. Amava l'arrampicata in montagna, in inverno approfittava delle giornate all'osservatorio di Mount Wilson per andare a sciare, era solito definire alcuni colleghi dell'osservatorio "spherical bastards" perché, diceva, tali fossero, da qualsiasi punto di vista li si osservasse. Per contro, si spese anche per molte opere benefiche e fu insignito nel 1949 dal presidente Truman della Presidential Medal of Freedom per meriti civili.

La velocità delle galassie misurata da Zwicky era così elevata che la forza di gravità non sarebbe stata sufficiente a tenerle unite e avrebbero dovuto disperdersi nello spazio sciogliendo l'intero ammasso. Poiché gli ammassi esistono da miliardi di anni, Zwicky ipotizzò che una grande quantità di materia, cui diede il nome di *materia oscura*, dovesse essere presente tra le galassie e all'interno di esse.

La sua osservazione non ebbe seguito immediato, ma fu ripresa molto più tardi e il grande astronomo è considerato il padre del termine e del concetto di materia oscura ampiamente utilizzati oggi.

La materia oscura è rilevata unicamente dalla azione gravitazionale che esercita. Nessuna altra forma di segnale ci giunge dall'alone che ipotizziamo circondi ogni galassia.

Ma da cosa è formata la materia oscura?

Per coerenza dobbiamo ipotizzare che sia una forma di materia che interagisce molto, molto debolmente con la materia ordinaria, diversamente vedremmo i prodotti di queste interazioni dai fenomeni elettromagnetici (luce, onde radio, raggi X, etc.) ad esse associati.

Se la materia oscura è costituita da un insieme di particelle, nessuna di quelle note e illustrate nella appendice C è un candidato proponibile. Non gli elettroni o i protoni, che, avendo carica elettrica, genererebbero luce, non i neutroni, che interagirebbero con la materia che normalmente "vediamo", non i neutrini, che, avendo pochissima massa e velocità vicine a quelle della luce non formano un alone attorno alle galassie. Particelle simili ai neutrini, senza carica elettrica e interagenti molto debolmente, ma con una massa significativa, sarebbero invece

candidati ideali. Purtroppo, di particelle come queste non si ha al momento evidenza nell'elenco delle particelle elementari.

Dopo la scoperta di Rubin e Ford, seguita da numerose altre indicazioni dell'esistenza della materia oscura, una parte del mondo scientifico si è mobilitata alla ricerca di questo nuovo Sacro Graal. Tale ricerca presenta due aspetti.

Da un lato la materia oscura potrebbe interagire con rivelatori installati in laboratori dedicati. Il movimento del nostro pianeta è infatti un "viaggio" all'interno dell'alone galattico di materia oscura, le cui particelle possono generare segnali in rivelatori dedicati, situati in laboratori sotterranei. I rivelatori devono essere schermati dalla radiazione cosmica che produce segnali in competizione con quelli cercati.

L'altro aspetto è quello della sua produzione in laboratorio utilizzando un acceleratore; se infatti la materia oscura è composta da un nuovo tipo di particelle, queste devono essersi generate in processi possibili solo alle altissime temperature presenti nei primi istanti di vita dell'Universo. È quindi naturale ricercarle nelle interazioni alla più alta energia cui possiamo sperimentare, quella al Large Hadron Collider (LHC) del Centro Europeo di Ricerche Nucleari (CERN). Normalmente, nel grande acceleratore, ospitato in una galleria di 27 km di circonferenza, fasci di protoni con una energia di 7 TeV (settemila miliardi di eV) vengono fatti collidere frontalmente. I temi di ricerca sono molteplici e uno dei principali obiettivi degli esperimenti è l'individuazione di particelle ancora sconosciute, tra cui i candidati a costituire la materia oscura. Le ricerche continuano anche se ad oggi sono state infruttuose.

Vi è anche qualche evidenza indiretta sulla esistenza della materia oscura. Quando abbiamo illustrato le proprietà della radiazione cosmica di fondo, abbiamo fatto notare come le piccole disomogeneità rilevate nella temperatura siano all'origine della formazione delle galassie e della loro distribuzione nello spazio. Oggi, gli astrofisici sono in grado di calcolare i tempi e i modi della loro formazione. Un buon accordo con le osservazioni si ottiene solo se si introduce nel modello la presenza di materia oscura "fredda", composta cioè da particelle con piccola velocità rispetto a quella della luce. Anticipiamo anche che l'accordo migliora se si include oltre alla materia una nuova forma di energia, quella presente in uno spazio "vuoto" e di cui parleremo tra breve.

Lo studio della velocità di rivoluzione della materia ordinaria attorno ai centri galattici ci insegna che la materia oscura deve avere una massa complessiva molto grande: da 10 a 40 volte superiore a quella della materia visibile che è di qualche percento della densità critica. Anche includendo la materia oscura, lo spazio dovrebbe avere una geometria "aperta" e non euclidea, in contrasto con l'evidenza sperimentale.

A priori, esiste anche una alternativa teorica. L'ipotesi dell'esistenza della materia oscura è basata sulla validità della legge della gravitazione. Questa legge è ben verificata su distanze tipiche del sistema solare, ma chi ci assicura che valga su distanze molto maggiori, come quelle che consideriamo nel caso di una galassia?

Alcuni fisici hanno avanzato proposte di termini correttivi nelle equazioni della Relatività Generale, attraverso cui giustificare le osservazioni senza ricorrere all'ipotesi della materia oscura. Ad oggi, la teoria di Einstein ha superato tutte le prove sperimentali cui è stata sottoposta, ragione per la quale, questa ipotesi è vista come sfavorita.

Il problema della natura della materia oscura rimane uno dei grandi problemi irrisolti della moderna cosmologia e, di riflesso, della fisica delle particelle elementari. Abbiamo però un problema ancora più serio della contraddizione tra geometria dello spazio e densità di materia.

Il modello del Big Bang assume che, all'istante iniziale, tutta la materia e la radiazione si siano generate con una grande velocità di espansione. Materia e radiazione sono soggette alla mutua forza di attrazione gravitazionale che, come è facilmente intuibile, dovrebbe portare a un rallentamento dell'espansione. La dinamica è analoga a quella che osserviamo quando lanciamo verticalmente un sasso. A causa dell'attrazione terrestre, la velocità del corpo diminuisce, il corpo decelera. Ritorniamo al capitolo 4 e alla analisi cinematica della espansione; il rallentamento dell'espansione si verifica nel primo periodo di vita dell'Universo, ma, a partire da una certa epoca e ancora oggi, l'espansione accelera, fatto inspiegabile a partire dalla descrizione di un Universo in cui sono presenti materia e radiazione. Come spieghiamo l'accelerazione?

Come già Newton, Einstein poneva il problema di come le stelle e gli altri corpi celesti restassero sostanzialmente immobili se soggetti alla forza di gravità che, inevitabilmente, li avrebbe dovuti attrarre verso un centro.

Per risolvere questo problema, il grande scienziato introdusse nelle equazioni della Relatività Generale un termine caratterizzato da un parametro, la *costante cosmologica*, il cui effetto è di bilanciare la gravità, rendendo così possibile un universo statico e immutabile.

Invece le osservazioni di Hubble portarono al crollo del concetto di Universo statico e resero questo termine inutile, tanto che lo stesso Einstein lo considerò come il più grave dei suoi errori. Nei decenni seguenti il termine corrispondente alla costante cosmologica fu dimenticato. Ora, però, sappiamo che l'Universo, non solo non è statico, ma che l'espansione accelera. Deve quindi esistere una forza che contrasta, anzi supera la forza attrattiva gravitazionale.

Riprendendo l'esempio del sasso lanciato verticalmente, è come se lo vedessimo accelerare anziché rallentare. Dovremmo dedurre che esiste una forza propulsiva che, da un certo momento, contrasta e supera quella di gravità.

La scoperta della accelerazione ha indotto a riconsiderare, nelle equazioni di Einstein, la presenza della costante cosmologica, che si riconduce alla esistenza di una densità di energia costante; fatto sorprendente ed in contrasto con l'esperienza quotidiana. Con la materia ordinaria è diverso. Se un volume, a parità di materia contenuta, raddoppia, la densità di materia si dimezza. Questa nuova forma di energia si comporta in modo opposto: se un volume raddoppia anche

L'energia in esso contenuta raddoppia. È come se lo spazio vuoto contenesse una sua energia. Concetto nuovo e sorprendente, anche se non del tutto, per i fisici delle particelle elementari.

Uno degli assiomi della meccanica quantistica è che per piccolissimi intervalli di tempo l'energia può non essere strettamente conservata. In ogni istante si possono generare dal nulla coppie di particella-antiparticella che, immediatamente dopo, si annichilano, scompaiono. Nulla c'era prima nulla c'è dopo, ma lo spazio ci appare come un continuo ribollire di particelle e antiparticelle che nascono e immediatamente muoiono. Si può valutare che a questo ribollire corrisponda una densità di energia che prende il nome di *energia del vuoto*.

Viene naturale interpretare questa forma di energia come corrispondente alla costante cosmologica, ma il calcolo porta a un valore di centoventidue ordini di grandezza superiore a quello che si deduce dalla cosmologia. Mai un disaccordo tra una indicazione teorica e una misura è stato maggiore. La natura dell'energia del vuoto rimane non compresa, e su questo problema si cimenteranno le prossime generazioni di scienziati. Si tratta di una delle sfide più affascinanti della scienza moderna, un autentico puzzle che si gioca tra il mondo quantistico dell'infinitamente piccolo e la costante cosmologica, prim'attore della dinamica dell'infinitamente grande, di tutto l'Universo conosciuto.

## 5.5 Il puzzle si compone

Come novelli Galilei avevamo studiato il moto di un corpo che cade dalla Torre di Pisa. Continuiamo nella fantasia e supponiamo ora di essere dei nuovi Newton che analizzano lo stesso moto. Se utilizzassimo le leggi della dinamica, il moto del corpo sarebbe in accordo con quanto misurato? La risposta è positiva, purché si assuma che, cadendo dalla torre, il corpo sia soggetto ad una forza costante e che la velocità iniziale del corpo sia nulla. Siamo passati, da una descrizione puramente cinematica del moto, alla sua comprensione in base a leggi fisiche, che hanno una validità molto più generale. Non ci si limita a descrivere il “come” (la cinematica), ma si vuole capire il “perché” (la dinamica).

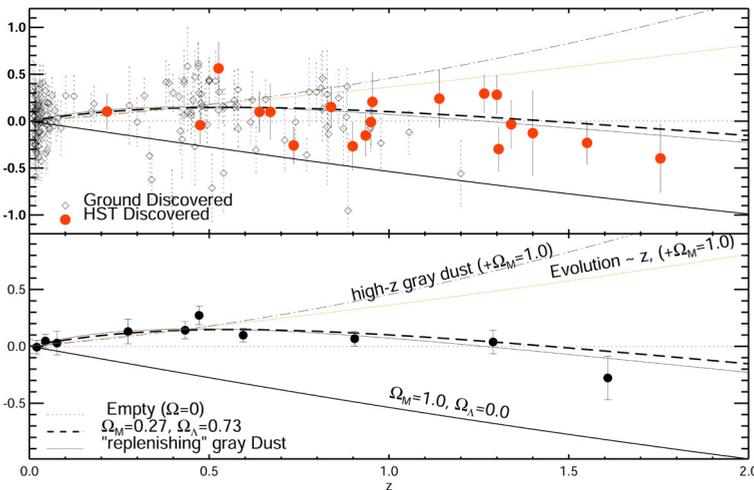
Tornando alla cosmologia, siamo in una situazione analoga. L'analisi cinematica ci ha mostrato l'esistenza di due epoche. Quella rappresentata dalle supernovae con un redshift minore di 0,5, da cui si deduce un aumento della velocità di espansione e quella con un redshift maggiore di 0,5, che indica un rallentamento. Possiamo giustificare questo andamento se le componenti di energia del Cosmo sono la radiazione, la materia (ordinaria ed oscura) e la ipotizzata energia del vuoto?

L'equivalente delle leggi di Newton è l'equazione di Friedmann che mette in relazione la velocità di espansione alla densità di energia. Conoscendo come varia la densità dei componenti presenti nell'Universo con l'espansione, siamo in grado di trovare la legge dell'evoluzione dello spazio. Facendo ancora riferimento all'esperimento dalla Torre di Pisa, è come se conoscessimo la legge

della gravità e l'equazione di Friedmann fosse l'equivalente della legge del moto di Newton. Possiamo, quindi, calcolare velocità e accelerazione di recessione delle galassie in dipendenza della loro distanza e confrontare questi valori con le osservazioni sperimentali mostrate nella figura 16 e 17.

La previsione ed i dati sperimentali sono in ottimo accordo se la densità attuale di energia delle diverse componenti ha i seguenti valori: densità della materia 27%, densità di energia del vuoto 73%, mentre la densità radiazione è trascurabile.

Per il lettore che si è già cimentato con la comprensione della figura 17, possiamo discutere l'evidenza dell'esistenza dell'energia del vuoto. Assumiamo, per ipotesi, che l'Universo non contenga nessuna forma di energia, né materia, né radiazione, né energia di vuoto, sia cioè un Universo contenente il nulla, un universo "vuoto". Ipotesi certamente assurda, visto che esistiamo, ma che dal punto di vista della soluzione matematica dell'equazione può non essere così lontana dalla soluzione corretta, considerato che la densità di energia critica è solo di 5,3 protoni/m<sup>3</sup>. Senza la forza frenante della gravità e propulsiva dell'energia del vuoto, la velocità di espansione rimarrebbe costante, uguale al valore iniziale datole dal Big Bang; in questa ipotesi, non è difficile calcolare quali sarebbero velocità e distanza delle galassie. La figura 20 mostra gli stessi dati della figura 17, ma dandogli una interpretazione secondo la dinamica. L'asse verticale mostra la differenza tra la luminosità misurata, e quella calcolate secondo l'ipotesi dell'Universo "vuoto". Se questa ipotesi fosse corretta, le misure dovrebbero corrispondere ai calcoli e posizionarsi sulla linea orizzontale punteggiata.



**Figura 20.** I dati mostrati sono quelli presentati e discussi in figura 17. L'asse verticale indica la differenza tra il parametro  $\mu$ , indice della luminosità apparente di una

supernova e la luminosità che avrebbe se l'espansione fosse avvenuta a velocità costante. L'asse orizzontale indica il redshift ( $z$ ). Le diverse linee rappresentano tre diverse ipotesi sul contenuto in energia dell'Universo. Il simbolo  $\Omega$  indica la frazione dei componenti rispetto alla densità critica. La linea punteggiata rappresenta la previsione di un Universo vuoto, cioè in cui non è presente alcuna forma di energia ( $\Omega=0$ ). La linea piena in basso di un Universo contenente solo materia (normale e oscura;  $W_m=1$ ). La linea tratteggiata di un Universo con il 27% di materia ed il 73% di energia di vuoto. Le altre curve presenti nel grafico trattano di diverse tematiche nella interpretazione dei dati che non sono di interesse in questa trattazione semplificata.

Chiaramente, i dati si discostano da questo andamento. Senza ripetere quanto già detto discutendo la figura 17, ricordiamo che una differenza positiva nella scala verticale indica che la luminosità è inferiore rispetto a quanto calcolato e che, quindi, le galassie sono più lontane. Il gioco può continuare e si possono confrontare i dati con diverse ipotesi sulla composizione dell'Universo. Ad esempio, supponiamo, come creduto solo pochi decenni fa, che nello spazio ci sia solo materia (ordinaria e oscura) e che l'energia del vuoto sia assente. La previsione è mostrata dalla linea continua discendente; il disaccordo con quanto misuriamo è aumentato. Infatti, l'effetto frenante della gravità porta le galassie ad essere "più vicine" e non più lontane da noi come indicano i dati. Introduciamo nelle previsioni anche l'energia del vuoto e troviamo che la previsione si accorda con i dati (linea tratteggiata) se nell'Universo, oggi, sono presenti il 27% di materia (ordinaria ed oscura) e il 73% di energia del vuoto. L'accelerazione indotta dall'energia del vuoto porta le galassie più lontane di quanto previsto se l'Universo si espandesse a velocità costante. La presenza dell'energia di vuoto è essenziale per spiegare le osservazioni sperimentali.

I risultati più recenti, comprendenti anche quanto deducibile dallo studio della CMB confermano quanto dedotto dallo studio delle supernovae e indicano che l'Universo è composto dal 69% di energia del vuoto, dal 31% di materia (ordinaria e oscura), e dal  $4,2 \cdot 10^{-5}$  di radiazione.

Il puzzle si è composto ed il quadro che ci appare è strabiliante. L'energia del vuoto è oggi dominante e la materia, dove la componente oscura è maggioritaria, è solo il 31%. Come vedremo tra qualche pagina, la materia ordinaria con cui abbiamo a che fare ogni giorno e di cui siamo composti rappresenta, in termini di energia, solo il 4%, un valore molto marginale. In sostanza, viviamo in un Universo circondati da forme di energia che non vediamo e la cui profonda natura ci è ignota.

Il Modello di Universo sopra descritto, che abbiamo costruito pezzo per pezzo come un puzzle, è talmente consolidato che prende il nome di *Modello Cosmologico Standard*. L'equazione di Friedmann è la nostra guida e ci permette ricostruire, come in un film, l'evoluzione dell'Universo.

Conoscendo l'evoluzione possiamo in particolare calcolare con accuratezza il tempo in cui le distanze si annullano, e cioè l'età dell'Universo: 13,8 miliardi

di anni. Un dato scientifico generato dalla potenza teoretica della fisica moderna che ci consente di determinare l'età dell'Universo, un tempo estremamente remoto, il triplo dell'età del sistema solare. La scienza gioca davvero un ruolo importante nella nostra visione del tutto.

# Capitolo 6

## Il film dell'evoluzione del Cosmo

Guardiamoci il film dell'evoluzione del Cosmo. Conosciamo come la densità delle varie componenti: materia, radiazione ed energia del vuoto variano quando il volume cambia e conosciamo le densità attuali. Con l'equazione di Friedmann, che collega la velocità di espansione alla densità di energia, deduciamo le proprietà dell'Universo passato, cioè lo stato in cui si trovavano la materia e la radiazione. Nei primi istanti la temperatura e la densità erano altissime, per poi diminuire molto rapidamente permettendo la formazione dei primi nuclei atomici, la formazione dei primi atomi e in un lento processo la formazione delle prime stelle e delle galassie per giungere infine a noi. Inizieremo con una descrizione di come le diverse componenti si siano evolute. Il lettore non troppo interessato ad una descrizione quantitativa può passare, anche questa volta, direttamente alla lettura del paragrafo 6.1.

Per descrivere quantitativamente l'evoluzione, diventa tutto molto più semplice se scegliamo, come parametro, non il tempo ma il *fattore di scala*, che ora definiamo. Se lo spazio si contrae, la distanza tra due punti diminuisce. Una distanza che oggi vale ad esempio un metro nel passato era minore. Il *fattore di scala* che, per convenzione, oggi vale 1,0 ci dice quale era la lunghezza del nostro metro. Un fattore di scala uguale a 0,5 indica che il metro si era ridotto a 50 cm, un fattore di scala di 0,01 a 1 cm, e così via. All'inizio dell'Universo il fattore di scala assume valori piccolissimi e al valore zero si fa corrispondere il suo inizio. Guardando al futuro, poiché l'Universo si espande, la distanza che oggi è di un metro aumenterà, ed il fattore di scala assumerà valori maggiori di uno.

La figura 21 mostra come la densità<sup>1</sup> (asse verticale; espressa come numero di protoni per metro-cubo ( $p/m^3$ )) della energia del vuoto, materia e radiazione dipendono dal fattore di scala (asse orizzontale). Nel grafico la densità è indicata tra  $1$  e  $10^{20} p/m^3$  ed il fattore di scala tra  $10^{-6}$  e  $1$ . In questa scala, tecnicamente una scala bi-logaritmica, le diverse densità variano linearmente e sono rappresentate da rette: orizzontale quella dell'energia del vuoto (linea intera) e con diverse pendenze quella della materia (linea tratteggiata) e della radiazione (linea tratto-punto).

Possiamo pensare l'Universo come costituito da un fluido. Esempi di fluidi da cui siamo normalmente circondati sono i gas ed i liquidi. La figura 21 ci racconta come nell'Universo si siano evolute le varie componenti del fluido in termini di densità: guardiamola, iniziando dai valori più piccoli del fattore di scala ( $10^{-6}$ ).

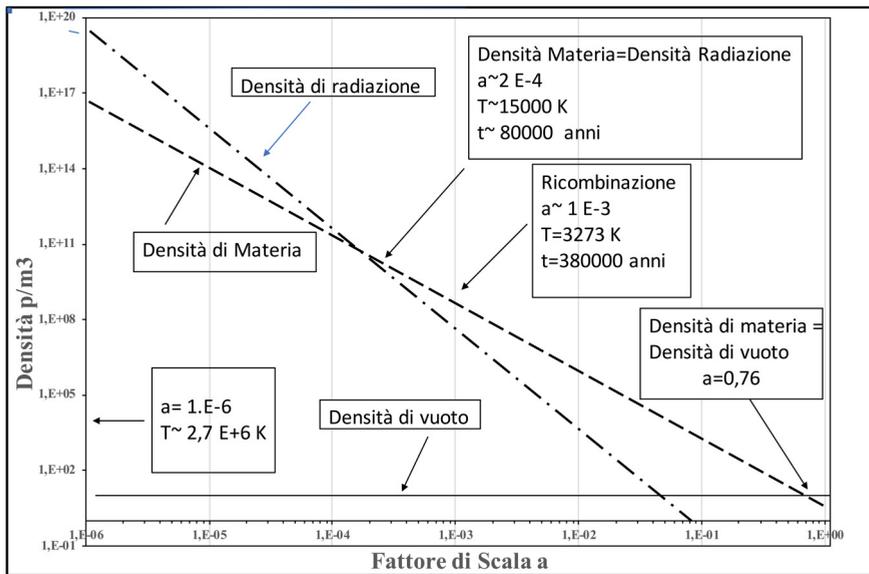
---

1 Secondo la teoria della relatività massa ed energia sono equivalenti e messi in relazione dalla nota relazione  $E=mc^2$  (la velocità della luce è indicata con il simbolo "c"). La massa di un protone corrisponde ad una energia di 938 MeV (milioni di eV). Nel grafico la densità di energia è indicata come numero di protoni/ $m^3$  ( $p/m^3$ ). La densità dell'acqua, ad esempio, corrisponde a  $6 \cdot 10^{29} p/m^3$ .

È trascorso circa un anno dal Big Bang, il fluido è composto, prevalentemente, da radiazione (fotoni e neutrini) la cui densità domina su quella della materia di quasi tre ordini di grandezza. L'energia del vuoto è trascurabile e la temperatura è di 2,7 milioni di gradi. L'Universo si espande e la densità di energia della radiazione diminuisce molto rapidamente. Quando il fattore di scala è approssimativamente  $0,0002$  ( $2 \cdot 10^{-4}$ ) radiazione e materia si equivalgono. Sono passati circa 80.000 anni dal Big Bang e la temperatura è di 15000 K. Da questo momento la densità di materia supera quella della radiazione e guida il gioco dell'espansione che continua a rallentare, perché l'energia del vuoto, che rimane costante, è sempre trascurabile.

Passano altri 300.000 anni e arriviamo all'epoca della ricombinazione che ha dato origine alla radiazione cosmica di fondo ed alla nascita degli atomi. Il fattore di scala, in questa epoca è approssimativamente  $0,001$  ( $10^{-3}$ ) e la temperatura è di 3.300 K. L'energia della radiazione, diminuita rapidamente, è ora solo il 20% di quella della materia.

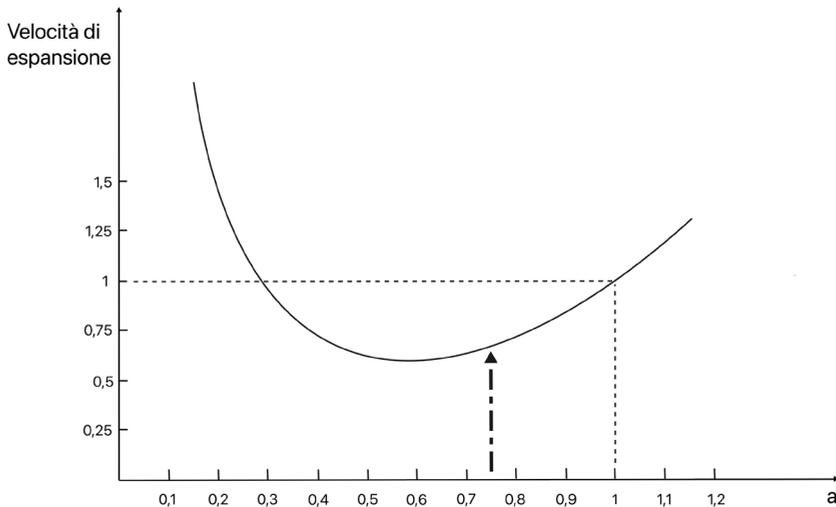
Avvicinandoci ulteriormente all'epoca attuale, la densità di materia diminuisce, quella della radiazione diviene minoritaria, mentre quella del vuoto, che non abbiamo finora considerato perché trascurabile, cresce di importanza e, circa cinque miliardi di anni fa, uguaglia quella della materia. A quel punto il fattore di scala è  $0,76$  e la temperatura, della radiazione, è di  $3,6$  K.



**Figura 21.** Densità (in unità di massa di protoni/ $\text{m}^3$ ) dell'energia del vuoto (linea intera), della materia (linea tratteggiata) e della radiazione (linea tratto-punto) in funzione del fattore di scala  $a$ . Nei rettangoli sono commentate le proprietà dell'Universo quando il fattore di scala era  $10^{-6}$ , quando la densità in energia della radiazione uguaglia quella in energia ( $a = 2 \cdot 10^{-4}$ ), al momento della ricombinazione ( $a = 10^{-3}$ ) e quando la densità in energia della materia uguaglia quella del vuoto ( $a = 0,76$ ).

Come cambia la velocità di espansione durante le varie epoche? Nelle fasi in cui l'energia del Cosmo è dovuta alla materia e alla radiazione, l'espansione rallenta con continuità a causa dell'azione frenante della forza gravitazionale, ma quando l'energia del vuoto diventa significativa le cose cambiano. Guardiamo la figura 22, che mostra come la velocità di espansione (in rapporto alla velocità attuale) varia quando il fattore di scala è compreso tra 0,3 e 1, un piccolo intervallo se confrontato all'intervallo coperto dalla figura 21, dove varia di un milione di volte.

Quando il fattore di scala è 0,3, la velocità di espansione è superiore all'attuale e sta diminuendo, ma quando il fattore di scala è 0,6, raggiunto un valore minimo, aumenta fino al valore attuale. L'energia del vuoto è dominante su quella della materia e l'Universo accelera l'espansione.



**Figura 22.** Andamento della velocità di espansione dell'universo, rispetto all'attuale, in funzione del fattore di scala. La freccia indica il valore quando la densità in energia della materia uguaglia quella del vuoto.

## 6.1 Dall'epoca della ricombinazione al Big Bang

Quando nel capitolo 3 abbiamo spiegato l'origine della radiazione cosmica di fondo (CMB) abbiamo detto che in un'epoca immediatamente precedente il cosmo era come immerso in una fitta nebbia, un fluido viscoso composto soprattutto da elettroni, protoni e fotoni. Le particelle dotate di carica elettrica (elettroni e protoni) impedivano ai fotoni di propagarsi indisturbati. La quasi totalità delle informazioni che ci giungono dal lontano Universo sono sotto la forma di radiazione elettromagnetica e quindi non possiamo "vedere" entro i

primi 380.000 anni. Gli anni su cui si concentrano molte delle nostre domande e curiosità sono nascosti alla nostra vista. Vi sono però particelle e onde che passano attraverso la nebbia e che contengono informazioni sui primi momenti: i neutrini e le onde gravitazionali.

L'Universo, come i fotoni dopo l'epoca della ricombinazione, è diventato trasparente ai neutrini circa un secondo dopo il Big Bang. Oggi, come è successo alla radiazione cosmica di fondo, i neutrini hanno una bassissima energia e non disponiamo di una tecnologia in grado di rivelarli. Ma mai dire mai: la loro rivelazione, che darebbe preziose informazioni, si prospetta come una bella sfida per le prossime generazioni di scienziati. Maggiori sembrano essere le speranze di rilevare, tra qualche decennio, le onde gravitazionali originatesi nei primissimi istanti. Sarà un grandissimo risultato e potrà riservare sorprese.

Per evitare fraintendimenti, chiariamo che i neutrini e le onde gravitazionali, di cui il lettore può aver letto recentemente sui giornali e sulle riviste scientifiche, sono il prodotto, in epoche più recenti, di cataclismi stellari generati in tempi successivi al disaccoppiamento della radiazione di fondo. Ci dicono molto sulle supernovae, le stelle di neutroni, i buchi neri e su altre curiosità cosmiche... ma non sull'infanzia dell'Universo.

Anche se, per ora, non possiamo "vedere" l'Universo alla sua nascita, possiamo, però, domandarci a quali conseguenze portino il modello cosmologico standard e le leggi della fisica che conosciamo. Abbiamo parlato di galassie che si allontanano, di una radiazione cosmica di fondo che non vediamo, ma come si origina la realtà più tangibile che ci circonda? Come nasce la materia, come si sono formati gli elementi chimici con cui abbiamo a che fare ogni giorno e di cui siamo noi stessi formati? Sono nati con il Big Bang o in processi successivi?

Le nubi di gas presenti tra le galassie sono formate per il 74% da idrogeno e per il 26% da elio<sup>2</sup>. Il deuterio è presente con poco più di un nucleo ogni centomila protoni, ed il litio con meno di un nucleo ogni miliardo di protoni. Gli elementi con i nuclei composti da un numero maggiore di protoni e neutroni sono assenti. È più che ragionevole supporre che la materia che compone queste nubi sia rappresentativa di quella originaria. La sua lontananza dalle galassie ha impedito o limitato ogni alterazione e contaminazione. Cosa ci dice il nostro modello di Universo? Andiamo indietro nel tempo, l'Universo si contrae e la sua temperatura aumenta.

La temperatura è la variabile che meglio definisce lo stato e le caratteristiche del fluido che compone l'Universo. A temperature inferiori a 0°C, ad esempio, l'acqua esiste nello stato solido, il ghiaccio. Quando la temperatura supera gli 0°C, il ghiaccio si scioglie e l'acqua diventa liquida e se poi supera 100 °C bolle,

---

2 Il nucleo dell'idrogeno è formato da un solo protone, quello di deuterio, da un protone e un neutrone, quello dell'elio, da 2 protoni e due neutroni, mentre, quello del litio, da tre protoni e tre neutroni. Qualche ulteriore informazione su come sono composti i nuclei degli elementi è data nella appendice A.

trasformandosi in vapore. A temperature ancora superiori gli urti molecolari spezzano il legame che lega gli atomi di idrogeno e di ossigeno. Se poi la temperatura raggiunge le migliaia di gradi gli elettroni esterni si staccano dagli atomi che acquistano una carica elettrica. Le variazioni di temperatura, quindi, determinano le enormi differenze di stato, che vanno dal ghiaccio all'insieme di atomi ionizzati ed elettroni liberi.

Cosa succede ai nuclei degli atomi di idrogeno e di elio quando la temperatura aumenta ulteriormente? Fino a quale temperatura conosciamo le proprietà della materia? Attualmente le temperature più elevate, realizzate in laboratorio, sono quelle che si ottengono nell'urto tra nuclei, al collisionatore LHC del CERN a Ginevra.

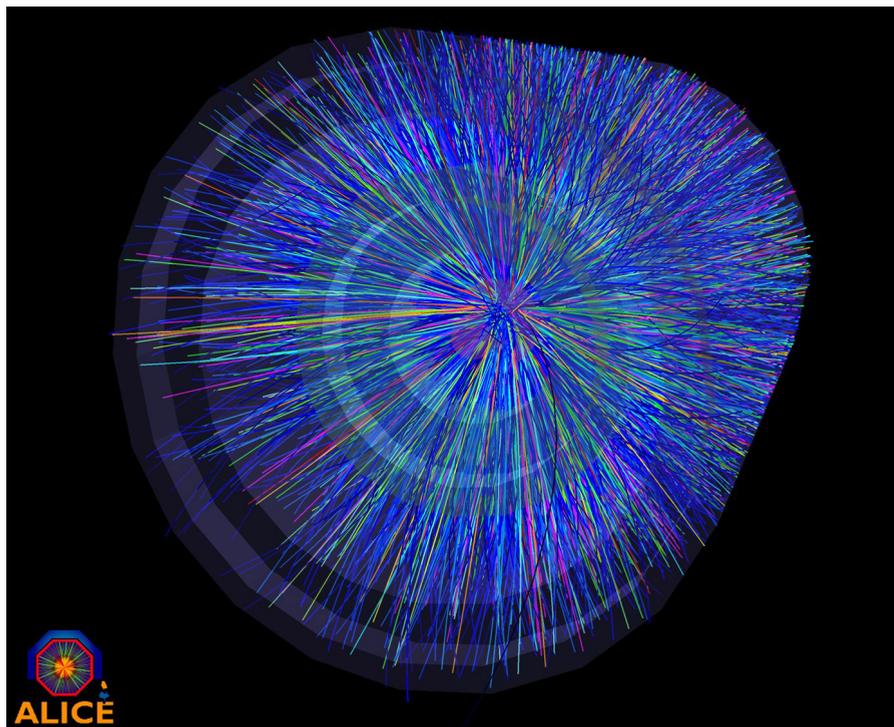
Normalmente in LHC i protoni collidono alla energia di 13,8 TeV, ma oltre ai protoni si accelerano nuclei atomici, ad esempio quelli del piombo, che sono stati fatti collidere alla fantastica energia di 1144 TeV. In condizioni normali in un nucleo di piombo sono raggruppati, come tante piccole sferette, 82 protoni e 126 neutroni. I quark ed i gluoni, la “colla” che tiene uniti i quark, rimangono confinati in queste sferette. Quando due nuclei di piombo, a questa energia, si scontrano frontalmente, gli urti sono così violenti che, presumibilmente, i quark ed i gluoni si fondono in un insieme continuo a cui i fisici danno il nome di *Plasma di Quark e Gluoni* (QGP – Quark Gluon Plasma).

In una piccola regione di spazio della dimensione di un nucleo si concentra una elevatissima energia e probabilmente si crea un nuovo stato della materia, con una temperatura dell'ordine di  $10^{12}$  K (mille miliardi di gradi). L'Universo era a questa temperatura un milionesimo di secondo dopo il Big Bang, ed era composto da un fluido, una “zuppa” di quark, gluoni, leptoni<sup>3</sup> e fotoni.

Nel collisionatore del CERN, questa bolla di energia si espande, si raffredda e si materializza in migliaia di particelle, più o meno stabili, che vengono rivelate dagli apparati sperimentali. La figura 23 mostra le tracce lasciate dalle migliaia di particelle elettricamente cariche prodotte in un urto tra ioni di piombo, nel rivelatore dell'esperimento ALICE.

---

3 I leptoni sono una famiglia di costituenti elementari la materia che interagiscono solo via l'interazione elettromagnetica e debole. Tra di essi si annoverano l'elettrone ed i neutrini. Per maggiori dettagli vedere l'Appendice C.



**Figura 23.** Tracce lasciate nel rivelatore ALICE dalle particelle prodotte nell'urto tra due nuclei all'acceleratore LHC del CERN.

Nell'Universo avviene un fenomeno analogo. A causa dell'espansione, il plasma si raffredda, i quark ed i gluoni si legano tra loro, dando origine a una varietà di particelle subnucleari. Quelle instabili, decadono e, dopo circa un secondo, sopravvivono solo i fotoni, i protoni, i neutroni, i neutrini, gli antineutrini, gli elettroni e i positroni, le anti particelle degli elettroni. Eureka! Conosciamo come era l'Universo alla sua nascita, tanto brevi ci sembrano  $10^{-6}$  secondi. Ma non è così, e ora cercheremo di illustrarne intuitivamente il perché.

## 6.2 Il tic-tac dell'orologio del cosmo non è sempre uguale

Un intervallo di tempo non ha un valore assoluto. Che si possa considerare lungo o breve, eterno o infinitesimo, dipende dal contesto a cui si applica. L'ora ed il giorno sono intervalli di tempo che ben scandiscono la nostra attività quotidiana, mentre gli anni misurano lo scorrere della nostra vita. A loro volta, il giorno e l'anno sono collegati al tempo della rotazione della terra attorno al suo asse e della rivoluzione attorno al sole. Se la rotazione e la rivoluzione del nostro pianeta fossero dieci volte superiori o inferiori, la nostra biologia e la nostra percezione di un intervallo di tempo sarebbero diverse.

L'ora e l'anno non hanno lo stesso valore nel corso della vita di un uomo. Cosa intendiamo?

Immaginiamo di incontrare un uomo sulla quarantina, non lo abbiamo mai visto, forse di anni ne ha solo trenta e li porta male, oppure potrebbe essere un cinquantenne e dimostrarne di meno. La stima è certamente grossolana, ma possiamo essere sicuri che il signore in questione non è un adolescente né un anziano. Un'analisi più approfondita potrà rivelare l'età del signore con una precisione maggiore e dirci che si tratta di un trentottenne. Bene.

Se spingessimo ancora più a fondo la nostra indagine, scopriremmo che la sua età è di 38 anni e 4 mesi. Ora conosciamo l'età del nostro individuo con la precisione del mese: circa 38 anni e 4 mesi sono passati da quando il soggetto in questione ha messo piede su questo pianeta, il tempo trascorso dalla sua nascita. Se avessimo incontrato questa persona qualche anno addietro, non sarebbe stato molto diverso fisicamente, certamente più giovane, ma fisionomicamente molto simile.

Allo stesso modo, poiché l'Universo è nato 13,8 miliardi di anni fa, non ci aspettiamo una grossa differenza tra una fotografia dell'Universo scattata oggi e quella scattata un miliardo di anni orsono.

Se però avessimo conosciuto il nostro uomo parecchi anni prima, quando questi era bambino, i due anni di differenza li avremmo notati subito. Di sicuro, scorrendo l'album fotografico della sua infanzia, avremmo notato una netta differenza, nella sua fisionomia, tra la fotografia scattata il primo giorno di scuola e quella di gruppo scattata con i compagni in terza elementare. Sì, a quell'età, come si dice, si cresce in fretta.

E cosa dire della differenza di uno scatto fotografico di un neonato di pochi giorni ed una fotografia scattata mentre spegne due candeline il giorno del suo secondo compleanno? Chiunque stenterebbe a riconoscere che si tratti della stessa creatura. Ci stiamo banalmente dicendo che due anni di differenza, da piccoli, ci rendono sicuramente meno riconoscibili come la stessa persona, rispetto a due anni di differenza in età adulta. La differenza di età, insomma, ha un valore molto relativo.

Ma perché il nostro parallelo con l'evoluzione dell'Universo sia ancora più pregnante, considereremo il tempo umano, non dalla nascita, ma dal concepimento. Come appare un individuo, non ancora nato, in una ecografia? Il bambino che sta per venire alla luce, soltanto pochi mesi prima ci appariva nella forma di feto, più piccolo e non ancora completamente formato. Procedendo a ritroso nel tempo, avvicinandoci sempre di più al momento del concepimento, l'aspetto dell'essere umano cambia enormemente.

Così, se al momento della nascita, ossia a circa quaranta settimane dal concepimento, un feto pesa, tipicamente, un paio di chilogrammi, a venti settimane, il suo peso era dell'ordine di un paio di etti: il che significa che il suo peso è decuplicato, mentre è altrettanto vero che, alla decima settimana dal concepimento

l'embrione, che si appresta a trasformarsi in feto, era di circa due grammi, ossia cento volte inferiore al suo peso alla ventesima settimana.

In tal senso origine dell'Universo e concepimento di un essere umano sono eventi che manifestano una somiglianza. Intendiamo dire che, dall'istante zero alle successive frazioni di secondo, minuti, ore, giorni, avvengono, nell'Universo come nel feto umano, una molteplicità di fenomeni che ne cambiano completamente l'aspetto e, in un certo senso, il destino.

Il lettore ricorderà che il parametro di Hubble è funzione della densità di energia e misura la velocità di espansione. Nei primi istanti, la densità era elevatissima, e la velocità di espansione di molte grandezze superiore all'attuale. In un certo senso, il parametro di Hubble scandisce il tempo dell'Universo e un microsecondo, il tempo dall'origine è un intervallo di tempo molto lungo, se misurato con l'orologio della evoluzione cosmica.

### 6.3 L'Universo come una bomba H

Il tic-tac dell'orologio cosmico corre veloce. Come abbiamo detto, dopo che le particelle prodotte nel raffreddamento della zuppa di quark e gluoni sono decadute, nell'Universo erano presenti, oltre ai fotoni, i neutrini, gli elettroni, i positroni, i protoni ed i neutroni.

Siamo ancora dentro il primo secondo di vita dell'Universo; i neutroni ed i protoni sono presenti in ugual numero. Le interazioni con gli elettroni e i positroni li trasformano continuamente uno nell'altro. Ma la massa del neutrone è leggermente superiore a quella del protone<sup>4</sup> e quando la temperatura si abbassa la produzione di neutroni è sfavorita. Il rapporto tra neutroni e protoni passa rapidamente dalla parità al 20%.

I protoni e i neutroni si attraggono, cercano di legarsi tra loro e formare un nucleo con un protone ed un neutrone, il deuterio. Anche se si attraggono, il legame che li lega è relativamente debole, e gli urti con i fotoni, presenti in gran numero, li separano nuovamente. Ma dopo circa 300 secondi, la temperatura è attorno ai  $10^9$  K (un miliardo di gradi), gli urti sono meno violenti, i nuclei di deuterio resistono e diventano il ponte per una cascata di reazioni nucleari che porta alla formazione di elementi più complessi. I nuclei degli elementi contengono sempre dei neutroni e loro relativa carenza pone un limite alla quantità di elementi che si possono formare.

Una descrizione dettagliata delle reazioni nucleari che intervengono dopo la formazione del deuterio non rientra negli intenti divulgativo di questo testo. Basta dire che tali reazioni si concludono con la formazione di nuclei elio, il cui nucleo è formato da due protoni e due neutroni, cioè da quattro nucleoni<sup>5</sup>

4 La massa del neutrone è 939,55 MeV, quella del protone 938,26 MeV.

5 Con il termine nucleone si intende sia il protone che il neutrone.

e da piccolissime quantità di deuterio, litio e berillio. Il processo che, partendo dai protoni e dai neutroni, porta alla formazione di altri elementi si chiama *nucleosintesi* e quella che stiamo descrivendo, avvenuta nei primi minuti di vita dell'Universo *nucleosintesi primordiale*.

Oltre alla già citata carenza di neutroni, la nucleosintesi primordiale incontra ostacoli quasi insormontabili alla formazione di nuclei più complessi dell'elio. Il primo ostacolo consiste nel fatto che non esistono nuclei stabili con un numero di nucleoni uguale a cinque. Quando un nucleo di elio cattura un protone o un neutrone, il nuovo composto si disintegra immediatamente. Reazioni tra nuclei di elio e di deuterio possono superare questa barriera e, sebbene molto rare, si verificano, producendo quelle infinitesime quantità di litio e di berillio riscontrate nella materia intergalattica. Inoltre, nel tempo che scorre durante lo svolgimento di questi processi, i neutroni liberi<sup>6</sup> decadono, lasciandone sempre di meno a formare il deuterio. Lo spazio si espande e la sua temperatura si abbassa rapidamente; le interazioni tra i nuclei sono meno efficaci e quando la temperatura raggiunge  $10^8$  K (cento milioni di gradi) la nucleosintesi si arresta. Non più di dieci minuti sono passati dal Big Bang, ed il tipo di materia con cui si formeranno le prime galassie e le prime stelle è definito per sempre.

Le reazioni nucleari presenti nella nucleosintesi primordiale sono molto simili a quelle che si originano in una bomba termonucleare, definita anche bomba H o bomba all'idrogeno. In ordigni di questo tipo, una massa di deuterio e litio viene portata ad altissima temperatura e densità dalla esplosione di una bomba nucleare a fissione, del tipo di quelle esplose a Hiroshima e Nagasaki, per intenderci. Anche nella bomba H gli elementi leggeri si fondono formando nuclei di elio e liberando una grande quantità di energia, sfortunatamente distruttiva.

Durante la nucleosintesi primordiale l'Universo non "esplode" come in una bomba ma, poiché i nuclei sono, tutto sommato poco numerosi, l'energia liberata nella catena di reazioni provoca un aumento temporaneo della temperatura che viene compensato dalla continua espansione.

A questo punto ci si può chiedere: se la nucleosintesi si arresta con la formazione di nuclei di elio, come si originano gli elementi più pesanti come il carbonio, l'ossigeno, il silicio e altri che troviamo sulla terra? La risposta è: nelle stelle. Senza aprire un nuovo capitolo che ci allontanerebbe dal nostro tema principale, diciamo che nelle stelle, a temperature molto minori di quelle presenti nel periodo della nucleosintesi primordiale, la formazione di nuclei riprende. Questo grazie a reazioni molto rare che non hanno svolto un ruolo significativo nei primi minuti di vita dell'Universo. Ora però nel centro degli astri il tempo si misura in miliardi di anni, non in minuti, e gli elementi più pesanti hanno il tempo di formarsi. È grazie a processi di questo tipo che nel sole si genera l'energia

---

6 Il neutrone, quando non è in un nucleo decade in un protone, un elettrone ed un antineutrino. Se avessimo 1000 neutroni liberi in 21 minuti ne decadrebbero 500.

che ci scalda e illumina. Ma, se gli elementi pesanti si generano nel centro degli astri, come mai sono presenti sulla terra?

La risposta è ancora una volta sorprendente. La materia da cui si sono originati il sole ed i pianeti non è la materia che si è formata nei primi momenti, ma quella generata nella esplosione di una stella più antica. La materia proiettata nello spazio dall'esplosione ha dato origine al sistema solare ed è per questo che troviamo gli elementi pesanti anche sulla terra.

Senza questa concatenazione di eventi, sul nostro pianeta non ci sarebbero gli elementi che conosciamo e che hanno dato origine alla vita. Citando una canzone, possiamo dire che "siamo figli delle stelle"<sup>7</sup>. Riprendiamo il nostro discorso cosmologico. Abbiamo descritto come la conoscenza della fisica nucleare permetta di calcolare le percentuali di elementi che si formano nella nucleosintesi primordiale. Bene, ma come si confrontano con le percentuali misurate nelle nubi di gas presenti tra le galassie?

La formazione degli elementi primordiali è stata una frenetica corsa contro il tempo, caratterizzata da un delicato equilibrio tra il numero di protoni, neutroni e fotoni. Sì, anche i fotoni giocano un ruolo perché facilmente disintegrano i nuclei di deuterio appena formati, rallentando la nucleosintesi. Il miglior accordo con le percentuali di elio, deuterio, litio e berillio misurate nella materia intergalattica, si realizza quando i fotoni sono circa un miliardo di volte più numerosi dei protoni. Il numero di fotoni è noto, è quello della radiazione cosmica di fondo e possiamo calcolare con buona precisione il numero di protoni: in media ci sono 0,2 protoni ogni metro cubo. Ricordando che, dalla equazione di Friedmann e dal fatto che lo spazio è piatto, in un metro cubo è presente una energia complessiva, cioè inclusiva della materia e della energia oscura, equivalente a 5,3 protoni, deduciamo che solo il 4% (0,2 diviso 5,3) dell'energia dell'Universo ci appare nella forma della materia che conosciamo.

Ricapitolando, la composizione della materia, da cui poi dipende il funzionamento delle stelle e tutto quello che ne consegue, si è decisa e risolta nei primi dieci minuti di vita dell'Universo. Il fatto che il modello del Big Bang preveda la percentuale degli elementi primordiali è una straordinaria e ulteriore conferma della correttezza del modello, ma pone una ulteriore domanda: perché i fotoni sono un miliardo di volte più numerosi dei protoni? Quale è l'origine di questa enorme differenza?

---

7 Alan Sorrenti, Figli delle stelle, EMI, 1977.

# Capitolo 7

## Domande imbarazzanti

Abbiamo ripercorso la storia delle straordinarie scoperte sul nostro Universo: dall'espansione di Hubble alla presenza della radiazione di fondo (CMB), dall'abbondanza degli elementi nel cosmo alla espansione accelerata dello spazio. Questo percorso ha portato, al Modello Cosmologico Standard che include tutti i fatti sperimentali conosciuti in un quadro coerente.

Grandi successi certo, che però richiedono significative assunzioni. Infatti, come abbiamo sottolineato, l'accordo con i dati sperimentali si ottiene ipotizzando nel Cosmo l'esistenza di due componenti "oscure": la materia oscura e l'energia del vuoto che, tra l'altro, ne sono le principali componenti.

Allo stato attuale, l'ipotesi corrente è che la materia oscura sia formata da un tipo di particelle ancora sconosciuto e che non interagiscono con la radiazione elettromagnetica. Possiamo credere che prima o poi verranno scoperte tra quelle prodotte agli acceleratori o nella radiazione cosmica, ma dal momento che ad oggi ogni ricerca ha dato esito negativo, meglio essere cauti fino a quando non saranno identificate.

L'energia del vuoto, anche conosciuta come energia oscura, pur essendo la maggiore componente dell'Universo, è ancora più enigmatica e la sua natura, origine e proprietà ci sono ignote. L'unica caratteristica che conosciamo e che motiva la congettura della sua esistenza è che agendo come una forza repulsiva contrasta la gravità. Quale è la sua origine? Si evolve o è costante nel tempo? Ha una natura quantistica? Solo i futuri esperimenti di precisione sulla evoluzione dell'Universo potranno gettare un po' di luce.

Anche accettando la presenza delle componenti oscure, ci sono altre proprietà dell'Universo che pongono domande, magari più nascoste e sottili, ma non meno rilevanti, alle quali il Modello Cosmologico Standard non dà risposte: l'assenza di antimateria, la geometria euclidea e l'omogeneità dell'Universo.

### 7.1 Dove sta l'antimondo?

Cosa è l'antimateria? Le leggi e le osservazioni che descrivono il mondo delle particelle elementari ci dicono che accanto ad ogni particella ne esiste un'altra, con la stessa massa ma con proprietà opposte. Ad esempio, al protone che ha una carica positiva corrisponde l'antiprotone, in tutto e per tutto simile, ma con carica elettrica negativa, all'elettrone corrisponde l'antielettrone o positrone, e così via. Il fotone, che non ha carica elettrica, è l'antiparticella di sé stesso. L'antimateria ha le stesse interazioni e proprietà della materia e può costituire,

come verificato in laboratorio, antiatomi, anti-nuclei e potrebbe formare anti-stelle, anti-galassie e anti-mondi.

Uno dei postulati, o forse una delle ragionevoli congetture della cosmologia, è che all'inizio ci fosse una forma di energia "neutra", cioè priva di quelle proprietà di cui la carica elettrica è un esempio. Il problema sta nel fatto che, a quanto ne sappiamo, da una forma di energia si genera sempre una coppia particella-antiparticella. Ad esempio, un fotone, quanto di energia elettromagnetica, si può materializzare in un elettrone e in un positrone ma anche, se di alta energia, in un protone e antiprotone.

Se l'energia iniziale si è materializzata, in parti uguali, in materia e antimateria, dove è finita l'antimateria? Come mai noi siamo fatti di atomi, piuttosto che di anti-atomi? L'antimateria potrebbe essersi raggruppata in zone separate dello spazio e formare anti-galassie, anti-stelle, anti-pianeti. Non è impossibile, ma dovrebbero esistere zone di confine dove la materia e l'antimateria sarebbero in contatto generando reazioni inverse a quelle che le hanno create e liberando grandi quantità di energia. Ad esempio, gli elettroni e i positroni, con un processo che è l'inverso di quello descritto si annichilerebbero, dando origine a fotoni che dovremmo essere in grado di rivelare. Analogamente, protoni e antiprotoni, nuclei e antinuclei si annichilerebbero generando un gran numero di particelle. Nessuna evidenza di fenomeni di questo tipo è stata osservata. Come spieghiamo allora che viviamo in un Universo popolato di sola materia?

L'ipotesi più accreditata è che più o meno entro il primo secondo, quando l'Universo si trovava a temperature altissime e gli urti tra particelle avvenivano a energie superiori a quelle a cui si può sperimentare oggi nei nostri laboratori, si verificassero interazioni in cui materia ed antimateria non si generano in parti esattamente uguali<sup>1</sup>,

Supponiamo che, per ogni 1.000.000.000 (un miliardo) di protoni, si generino 999.999.999 antiprotoni, solo uno di meno. Esattamente lo stesso avviene per gli elettroni ed i positroni. Protoni e antiprotoni interagiscono, si annichilano, lo stesso fanno gli elettroni con gli anti-elettroni, dando origine a particelle che in gran parte decadono, lasciando, alla fine della catena, solo fotoni e neutrini. Ma non tutti i protoni si annichilano per via di quel piccolo sbilanciamento di "uno su un miliardo". Si viene così a generare un Universo di protoni (ma non di antiprotoni) e di elettroni (ma non di antielettroni), il tutto immerso nell'immenso mare di particelle neutre come fotoni e neutrini. È l'Universo di materia, e non di antimateria, che conosciamo.

---

1 Reazioni di questo tipo si verificano anche negli esperimenti eseguiti con gli attuali acceleratori, ma la asimmetria materia-antimateria misurata è minore di quanto necessario per spiegare i dati cosmologici.

## 7.2 Euclide aveva ragione

Un secondo enigma consiste nel fatto che la geometria del nostro Universo è euclidea o, in altre parole, che lo spazio è “piatto”. Come illustrato nel paragrafo “La curvatura dello spazio”, il tipo di geometria è definito dal parametro  $k$ . Riguardiamoci la figura 18, dove le diverse geometrie sono rappresentate in uno spazio a due dimensioni. A  $k=+1$  corrisponde una geometria chiusa, come una sfera, a  $k=-1$ , una geometria aperta e a  $k=0$ , una geometria euclidea. Nella forma più generale dell'equazione di Friedman è presente un termine che caratterizza la geometria. Nel caso di geometria euclidea ( $k=0$ ) questo termine si annulla. La stessa analisi che ci dà le componenti dell'Universo ci dice che questo termine è molto piccolo, compatibile con zero e minore di qualche millesimo ( $10^{-3}$ ), avvalorando l'ipotesi che lo spazio sia piatto.

Come una sfera si può gonfiare o rimpicciolire, rimanendo sempre una sfera, così il tipo di geometria dell'Universo non muta durante la sua evoluzione ( $k$  è una costante). Possiamo quindi concludere che l'Universo in cui viviamo è probabilmente euclideo e mettere un punto alla discussione.

Ma i fisici sono curiosi e anche un po' pedanti, e si fanno la domanda: perché, tra le tre geometrie possibili, viviamo in quella che a tutti gli effetti sembra euclidea? Vogliamo dire che il citato termine che vale un millesimo non potrebbe essere indice di una curvatura corrispondente, ad esempio, a  $k=1$ ? Non poteva esserci una discrepanza maggiore all'inizio che si è ridotta a causa della espansione? No, il contrario. Le equazioni ci dicono che, andando indietro nel tempo, con la contrazione il termine legato alla geometria diviene sempre più piccolo. Ad esempio, se supponiamo che oggi questo termine valga un millesimo (0,001), al tempo della ricombinazione varrebbe un centomillesimo (0,00001) e un microsecondo dopo il Big Bang  $10^{-22}$ , un valore così vicino allo zero da far sospettare di non essere casuale, anzi fortemente indicativo che il nostro Universo fosse piatto alla sua nascita. Ma perché?

## 7.3 Un Universo ovunque uguale

Un altro punto cui prestare attenzione è il fatto che l'Universo è omogeneo ed isotropo, cioè lo stesso (su grande scala) in qualunque luogo. Questo concetto, introdotto fin dall'inizio in questo saggio, ha trovato clamorosa conferma nella fotografia dell'Universo all'epoca della ricombinazione che ci mostra come la temperatura fosse la stessa ovunque. La massima variazione era dell'ordine di una parte su 10.000. Perché questo è un problema?

Facciamo un esempio. Quando Cristoforo Colombo e gli esploratori che vennero dopo di lui scoprirono il continente americano, trovarono molte cose in comune con il continente europeo, ma anche significative differenze. Le “etnie” umane che lo popolavano avevano costumi, credenze religiose e lingue

molto diverse da quelle europee. Anche il mondo animale e vegetale mostrava significative differenze. Per esempio, il cavallo era sconosciuto e non popolava le immense praterie del Nord America, mentre vegetali come la patata, il pomodoro ed il tabacco non crescevano in Europa. Gli uomini erano probabilmente arrivati nel continente americano passando dai ghiacci del Nord, i venti e gli oceani avevano trasportato forme di vita tra i due continenti, ma in un modo selettivo. La mancanza di scambi più intensi e continui ha avuto come conseguenza che la vita animale e vegetale si sia evoluta e sviluppata in modo, almeno in parte, indipendente.

Torniamo alla cosmologia e chiediamoci: in un dato tempo quale è nell'Universo la massima distanza tra due punti che hanno potuto scambiarsi informazioni? La risposta è semplice: quella percorsa in questo tempo dalla luce. L'Universo è nato 13,8 miliardi di anni fa e la massima distanza da cui ci giungono i fotoni è, approssimativamente, di quarantadue miliardi di anni luce. La massima distanza non corrisponde semplicemente all'età dell'Universo espressa in anni luce, perché, mentre la luce giunge fino a noi, l'Universo si espande e quando infine ci raggiunge, la distanza tra noi e la sorgente è aumentata. Questo aumento dipende dalla storia dell'espansione e il modello cosmologico indica un valore di 42 miliardi di anni luce. Da distanze maggiori nessun segnale ha avuto il tempo di arrivare. Questa distanza viene denominata *Orizzonte*, il punto oltre il quale non possiamo ricevere in alcun modo informazioni.

Come, a causa della curvatura della terra non possiamo vedere oltre una certa distanza, così oggi nel Cosmo non possiamo “vedere” oltre i 42 miliardi di anni luce. Però, come sappiamo che oltre l'orizzonte terrestre i mari, le pianure ed i monti continuano, non vi è ragione di dubitare che anche oltre l'orizzonte cosmico l'Universo continui con le stelle, le galassie e tutti i fenomeni a noi noti. Tra l'altro questa è una conclusione interessante dal punto di vista filosofico: ciò che esiste è maggiore di ciò che è osservabile.

Poiché l'orizzonte è definito dalla distanza che la luce ha percorso dal momento del Big Bang, andando indietro nel tempo, l'Orizzonte diviene sempre più limitato. Al tempo della ricombinazione (380.000 anni dopo il Big Bang) l'orizzonte valeva approssimativamente 0,4 Mpc (poco più di un milione di anni luce): noi ora lo vedremmo sottendere un angolo dell'ordine di  $1^\circ$ , due volte l'angolo con cui vediamo la luna piena.

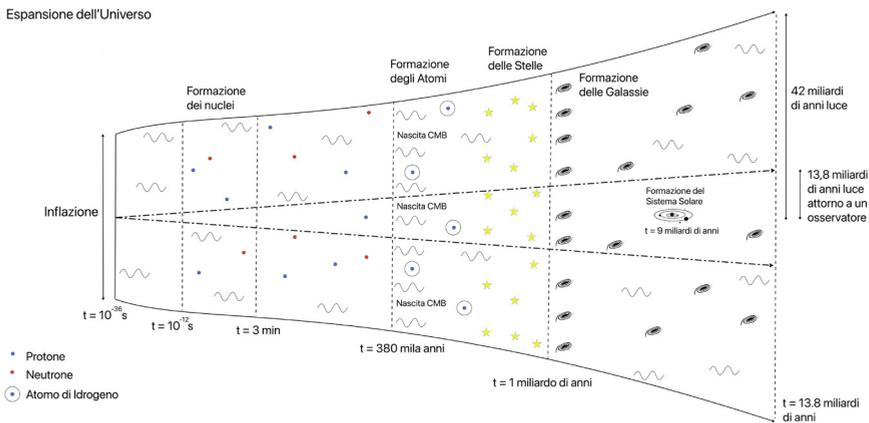
La materia compresa entro l'orizzonte interagisce e si porta alla stessa temperatura e densità, ma non esiste alcun motivo per cui oltre l'orizzonte densità e temperature siano le stesse.

Noi siamo immersi nella Radiazione Cosmica di Fondo che ci giunge da tutte le direzioni, proprio come fa la luce che ci arriva da un terso cielo azzurro. Guardiamo, ancora una volta, la figura 11, come fosse il cielo della radiazione di fondo. Come hanno fatto regioni lontanissime, addirittura agli antipodi, a uniformarsi alla stessa temperatura?

Se in due stanze termicamente isolate, cioè due locali, tra cui nessuno scambio di calore è possibile, troviamo la stessa temperatura, dobbiamo dedurre che la temperatura fosse la stessa quando le abbiamo chiuse. Nel cielo della radiazione di fondo è come se ci fossero circa 30.000 stanze tra loro isolate. Il fatto che in esse la temperatura sia la stessa, a meno di un decimillesimo di grado, è sorprendente e può spiegarsi solo assumendo che la temperatura fosse uguale in ogni pezzettino di cielo fin dall'inizio.

Quale è il meccanismo che ha generato questa straordinaria uniformità fin dall'origine? Il modello del Big Bang non dà risposte al riguardo.

La figura 24 mostra, in modo schematico e semplificato, come una porzione di spazio si sia evoluta nel tempo. Dobbiamo sottolineare il fatto che lo spazio disegnato è limitato per pure esigenze grafiche, e non implica in alcun modo l'esistenza di un confine. Dopo un periodo di rapidissima espansione iniziale, denominato *inflazione*, del quale parleremo tra poco, seguono i periodi della nucleosintesi, della ricombinazione, della formazione delle stelle e delle galassie. Le linee tratto-punto indicano qualitativamente l'orizzonte di un osservatore al centro della porzione di spazio rappresentata.



**Figura 24.** La figura mostra in modo qualitativo l'evoluzione temporale dell'Universo. Dopo la ipotizzata, rapidissima espansione iniziale (linea verticale, inflazione) e la creazione di materia e radiazione, è seguita la formazione prima dei nuclei e poi degli atomi leggeri. Dalle piccole disuniformità presenti nella distribuzione della materia è seguita la formazione delle stelle e delle galassie, tra cui la Via Lattea, di cui fa parte il sistema solare. Le linee tratto-punto rappresentano l'orizzonte di un potenziale osservatore.

A questo punto, possiamo porci una domanda cui tentiamo di dare risposta nel prossimo paragrafo.

## 7.4 Quanto è grande l'Universo?

Questa domanda è una delle prime e più dirette che vengono poste quando si discute di cosmologia, ed è un po' imbarazzante rispondere che la questione è complicata, legata alla geometria dello spazio e che in definitiva non ha una risposta certa. Guardiamo ancora la figura 18, e consideriamo una geometria con curvatura positiva come quella della terra. Se un aereo parte, procedendo verso Est, dopo un po' ritorna da dove è partito, e la distanza percorsa indica la dimensione del nostro pianeta. Analogamente, se lo spazio avesse una curvatura positiva, un ipotetico viaggiatore potrebbe partire e dopo un bel po' di tempo tornare al punto di partenza. La distanza percorsa ci direbbe quanto è grande l'Universo. Se però lo spazio è piatto o addirittura aperto il nostro viaggiatore non torna al punto di partenza e viaggia verso l'infinito. Non facciamoci ingannare da un aspetto della figura 18; le superfici che rappresentano lo spazio piatto e aperto hanno un bordo e terminano solo per ragioni grafiche. Il disegno mostra superfici a due dimensioni in uno spazio a tre dimensioni dove ha un senso parlare di un limite, un bordo. Quando parliamo dell'Universo ragioniamo di tre dimensioni non inglobate in una quarta e non ha molto senso dire che l'Universo ha un confine. Un confine che lo separa da cosa? Diceva Euclide che due rette parallele si incontrano... ma all'infinito! Concludendo, poiché l'Universo ha, su vasta scala, una geometria euclidea, nulla possiamo dire riguardo alla sua estensione, può benissimo essere infinito..., o forse no, basterebbe una debolissima curvatura per renderlo finito.

# Capitolo 8

## I primissimi istanti

Nella teoria standard del Big Bang l'inizio è definito come il tempo in cui il fattore di scala<sup>1</sup> si annulla e la densità di energia diviene infinita. Quando in una teoria una grandezza assume un valore infinito, in genere significa che si sono raggiunti i limiti di validità di quella teoria.

Secondo l'elettromagnetismo classico, ad esempio, la forza tra due cariche elettriche è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Quando la distanza si annulla, la forza non è calcolabile e tale legge si dimostra inadeguata. La moderna teoria quantistica che interpreta la forza tra due corpi come dovuta allo scambio di particelle, nel caso delle forze elettromagnetiche, i fotoni, permette di calcolare l'interazione fino alle più piccole distanze.

L'ipotesi del Big Bang è che nei primissimi istanti la materia e la radiazione si siano trovate in uno stato di altissima densità e temperatura e che si siano successivamente evolute espandendosi e raffreddandosi. Come abbiamo visto questo approccio è ampiamente giustificato sperimentalmente ed è diventato il quadro teorico di riferimento per la cosmologia moderna. Tuttavia, il modello assume, senza darne una giustificazione, che la geometria sia euclidea e che, fin dai primi istanti, l'Universo sia isotropo e omogeneo.

Andiamo ora a illustrare il meccanismo dell'*Inflazione* che, in qualche modo, estende il "modello base" del Big Bang ipotizzando fenomeni avvenuti in tempi incredibilmente vicini al tempo zero ( $10^{-38}$ s). Così si giustifica, in modo abbastanza plausibile, sia la geometria dello spazio sia la sua omogeneità.

Il modello inflativo, che oggi riceve grandi consensi tra i cosmologi, è quello proposto da Alan Guth e Alexei Starobinsky e perfezionato, in seguito, da Andrej Linde. Chiariamo subito ed in modo netto che, mentre il quadro di evoluzione dell'Universo che abbiamo descritto si posa su solide evidenze sperimentali, la teoria dell'inflazione, anche se plausibile ed affascinante, non è ancora sostenuta inequivocabilmente dalle osservazioni.

### 8.1 Il modello dell'inflazione

Riguardiamo la figura 21 che illustra come la densità di energia di vuoto, materia e radiazione varino in funzione del parametro di scala secondo il Modello

---

1 Ricordiamo che il "fattore di scala" definisce quale sarebbe a una certa epoca la distanza tra due punti oggi distanti un metro. Andando indietro nel tempo, lo spazio si contrae, la distanza diminuisce ed il fattore di scala assume valori minori di uno. Se, a una certa epoca, il fattore di scala fosse 0,5, una distanza di un metro si ridurrebbe a 50 cm.

Cosmologico Standard. Oggi la densità di energia del vuoto è preponderante (70% del totale), mentre, nei primi istanti, l'Universo era dominato dall'energia associata alla radiazione. Viceversa si ipotizza che in tempi dell'ordine di  $10^{-38}$ s in cui l'energia dominante aveva proprietà simili a quella del vuoto. Ricordiamo che questa forma di energia, che chiameremo *energia inflativa*, è molto particolare, caratterizzata da una densità indipendente dal volume che origina l'accelerazione della espansione. Diversamente, quando radiazione e materia sono dominanti nell'Universo, la velocità di espansione diminuisce, cioè l'espansione decelera.

Secondo il modello dell'inflazione, ad un certo istante, in una regione dello spazio infinitamente piccola, la densità di questo tipo di energia inizia molto gradualmente a diminuire fino a quando, raggiunto un valore critico, precipita a un valore di minimo. Tutto questo avviene entro i primi  $10^{-32}$ s della vita dell'Universo generando materia e radiazione in uno stato di altissima densità e temperatura, quello prefigurato dal Big Bang.

Può suonare strano, ma trasformazioni simili a quella descritta sono comuni in natura. Consideriamo l'acqua appena sopra  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ovvero allo stato liquido. È sufficiente che la temperatura si abbassi un po' perché l'acqua si trasformi in ghiaccio, uno stato con proprietà completamente diverse liberando contemporaneamente una certa quantità di calore. Similmente, nel modello dell'inflazione, l'energia presente subisce una trasformazione generando la materia e la radiazione.

Un'altra analogia si può riscontrare con quanto succede sulle montagne russe. Andiamo al Luna Park, saliamo su un vagoncino e facciamoci trainare in alto. Come è variata l'energia del veicolo e di quale energia si tratta? Quando la catena ci porta in alto ci fornisce una certa energia (chiamata potenziale); quando scendiamo questa energia si trasforma in energia del moto (chiamata cinetica). Nel modello dell'inflazione l'energia inflativa corrisponde all'energia potenziale. La pendenza dei binari è dapprima modestissima ed il carrello frenato dall'attrito scende con velocità costante ma, quando le rotaie diventano ripide, il carrello cade acquisendo velocità, cioè energia cinetica, fino a quando i binari prendono a risalire. Se però la catena non si riaggancia, il carrello non riesce a ritornare alla quota iniziale e rimane intrappolato, oscillando in un avvallamento, fino a fermarsi completamente a causa dell'attrito. L'energia iniziale del carrello (potenziale) si è, alla fine, completamente trasformata in calore, l'equivalente della materia e della radiazione generati nell'inflazione.

Una teoria fisica, per essere considerata tale, deve avere un carattere quantitativo. Abbiamo detto che, a un certo istante, l'energia inflativa ha iniziato a diminuire. Come fissiamo questo istante nella vita del nostro Universo? Per dare una possibile risposta dobbiamo fare una breve digressione nel mondo delle particelle elementari (vedi anche appendice C).

Esistono tre tipi di forza con cui le particelle interagiscono. In ordine di intensità crescente sono denominate: *debole*, *elettromagnetica*, *forte*. L'*interazione gravitazionale*, se confrontata alle altre, è estremamente debole e non giuoca alcun ruolo alla scala dell'atomo.

Il fenomeno che noi sperimentiamo come una forza è un fenomeno quantistico e riconducibile a uno scambio di particelle, cui diamo il nome di *mediatori*. I diversi tipi di forza si differenziano per i diversi mediatori. Nelle interazioni elettromagnetiche viene scambiato un quanto di luce, il fotone, nelle interazioni deboli le particelle Z e W, in quelle forti il gluone<sup>2</sup>.

Gli esperimenti hanno mostrato che l'intensità di ognuna di queste forze dipende dall'energia a cui avviene l'interazione; ad esempio, la forza elettromagnetica con cui due elettroni interagiscono non è sempre la stessa, ma varia, in questo caso aumenta, con l'energia a cui avviene l'urto.

Curiosamente, mentre l'intensità della forza elettromagnetica e debole aumenta con la violenza dell'urto, quella della forza forte diminuisce. Esiste, probabilmente, un'energia a cui tutte e tre le interazioni hanno la stessa intensità e sono interpretabili come dovute ad un'unica *forza unificata*. Quando gli urti diventano meno violenti, questa forza si differenzia nelle tre forze che abbiamo sopra elencato. Conoscendo come varia l'intensità delle forze, possiamo stimare l'energia a cui questo avviene:  $10^{16}$  GeV, diecimila miliardi di volte l'energia a cui quark e gluoni interagiscono all'LHC del CERN.

Questa ipotesi, chiamata *Grande Unificazione*, non è sperimentalmente provata ma è teoricamente molto interessante, al punto da essere considerata assai probabile e spesso data per vera. Una prima unificazione è già stata verificata: le interazioni deboli ed elettromagnetiche si sono dimostrate unificate a circa 100 GeV di energia: *l'unificazione elettrodebole*.

Non sarebbe la prima volta, in Fisica, che un'idea esteticamente attraente si riveli corretta; in questo caso si postula che l'energia inflativa inizi a decadere e inneschi il processo sopra descritto<sup>3</sup> proprio all'energia della grande unificazione.

La densità di energia al momento della transizione è fantasticamente elevata, dell'ordine di  $10^{111}$  protoni/m<sup>3</sup> (un uno seguito da 111 zeri prima della virgola ed equivalente a  $10^{82}$  volte quella dell'acqua). La temperatura è di  $10^{32}$  K e siamo a  $10^{-38}$  secondi dal tempo zero. Un intervallo di tempo così minuscolo da perdere di significato per il senso comune.

2 I mediatori W e Z delle forze deboli sono stati scoperti al CERN e hanno portato alla attribuzione del premio Nobel a C. Rubbia e S. Van der Meer nel 1984.

3 Esistono vari modelli dell'inflazione, che si differenziano per la formulazione matematica della forma di energia e per la durata del periodo in cui l'energia diminuisce molto lentamente. Il lettore potrebbe trovare in altre pubblicazioni valori numerici, quali il tempo di inizio, il valore dell'energia del vuoto e la durata dell'espansione, diversi da quelli citati. I valori utilizzati sono quelli più comuni nella letteratura e che Alan Guth, uno dei primi proponenti la teoria, utilizza nelle sue lezioni.

Si ricordi, tuttavia, quello che abbiamo discusso nel paragrafo 6.2: gli istanti vicini al “concepimento” dell'Universo sono ricchi di eventi importanti. In quest'epoca governata dall'inflazione, in un intervallo temporale per noi senza significato, si verificano eventi di drammatica rilevanza, nientedimeno che la generazione del nostro Universo, con la materia e la radiazione che lo caratterizzano. Il tempo di un microsecondo, che ci pareva così vicino all'inizio, ora sembra un tempo infinitamente lontano.

Nel tempo in cui l'energia inflativa decade gradualmente, la violenta ed accelerata espansione dello spazio continua, ed ogni lunghezza viene fantasticamente dilatata, moltiplicata fino ad almeno diecimila miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di volte ( $10^{40}$ ). L'universo a noi visibile (42 miliardi di anni luce) corrisponderebbe alla dilatazione di una porzione di spazio di circa  $10^{-39}$  m. Tutto quello che possiamo osservare nasce da una frazione infinitesimale di spazio. Quando l'energia inflativa decade bruscamente, l'espansione accelerata finisce e, a causa dell'attrazione gravitazionale tra la materia e la radiazione create, inizia la lenta decelerazione dell'espansione. Questa fase è durata fino a circa cinque miliardi di anni fa quando l'energia del vuoto è tornata ad essere la componente maggioritaria dell'Universo.

La teoria dell'inflazione è tenuta in grande considerazione dai cosmologi, in quanto permette di comprendere perché l'Universo sia piatto e quasi perfettamente isotropo e omogeneo.

Consideriamo la geometria. Nel modello inflativo non supponiamo nessuna geometria dello stato iniziale, che poteva benissimo essere caratterizzata da un raggio di curvatura positivo o negativo. La veloce espansione annulla qualunque curvatura. La giustificazione rigorosa si trova naturalmente nelle equazioni che governano il fenomeno, ma possiamo immaginare l'effetto dell'espansione considerando un telo tutto spiegazzato, appena uscito dalla lavatrice. La sua geometria non è certamente euclidea; se, però, applichiamo al telo una forte tensione in ogni direzione, le pieghe scompaiono, il telo diventa piatto e la geometria, euclidea. L'espansione esponenziale dello spazio agisce similmente alle forze che applichiamo al telo. Il modello dell'inflazione fornisce una risposta anche al problema della omogeneità. L'Universo a noi visibile corrisponde, prima dell'inflazione, a una porzione di spazio dell'ordine di  $10^{-39}$  m mentre l'orizzonte era di  $10^{-28}$  m, ben 100 miliardi di volte maggiore. L'Universo che noi vediamo era quindi comodamente compreso nell'orizzonte divenendo isotropo e omogeneo e tale è rimasto durante l'espansione esponenziale che lo ha enormemente ingigantito.

## 8.2 L'origine delle disomogeneità

Nel cielo della CMB sono però presenti disomogeneità misurabili nella percentuale di una parte su diecimila. Da dove vengono? La teoria dell'inflazione le giustifica brillantemente, interpretandole come dovute agli effetti quantistici che avvengono nell'energia inflativa durante l'espansione. Abbiamo ampiamente discusso come anche il "vuoto" non sia vuoto, ma caratterizzato da un continuo ribollire di coppie particella-antiparticella, che si creano e si annichilano in un tempo brevissimo. Questo meccanismo è presente anche durante l'inflazione e provoca fluttuazioni dell'energia inflativa che successivamente si traducono in fluttuazioni nella densità dei fluidi di materia e radiazione.

Le regioni di maggiore densità attraggono ulteriore materia, provocando un aumento della temperatura e della pressione esercitata verso l'esterno. Ad un certo momento, la pressione contrasta l'attrazione gravitazionale ed inizia una fase di espansione che genera una zona di minore densità e pressione nel fluido. Si innesca così un meccanismo di contrazioni e di espansioni, delle vere e proprie vibrazioni. Le zone in cui avvengono questi fenomeni sono immerse nel vasto mare di protoni, elettroni e fotoni e generano delle onde che per le loro caratteristiche vengono chiamate acustiche. Il meccanismo è analogo a quello che nell'aria origina il suono. Se la corda di un violino o la membrana di un tamburo vibra, si generano nell'aria zone di pressione e decompressione che si propagano. Quando queste onde giungono al nostro timpano provocano delle vibrazioni che, tramutate in impulsi nervosi, ci fanno percepire il suono. Analogamente, nell'Universo primordiale, queste onde si propagano durante i 380.000 anni che precedono la ricombinazione, si sommano e interferiscono tra loro, generando zone di maggiore e minore densità e temperatura. I fotoni della CMB ci danno la fotografia di come fosse distribuita la materia al tempo della ricombinazione. Le zone di maggiore densità ci appaiono più fredde perché i fotoni hanno dovuto "spendere" più energia per liberarsi dalla attrazione gravitazionale e più calde per le zone più rarefatte dove l'attrazione è minore. Lo studio delle disuniformità di temperatura è ricchissimo di informazioni per la cosmologia, in quanto le caratteristiche di generazione e di propagazione delle onde acustiche dipendono dalle proprietà del fluido e, quindi, di quanta energia, materia e radiazione fossero presenti nell'Universo a quell'epoca.

L'analisi quantitativa viene effettuata misurando le variazioni di temperatura rispetto al valore medio tra due zone separate nel cielo da un angolo definito e il prodotto delle due variazioni viene mediato su tutto il cielo. Si applica lo stesso algoritmo per diversi valori dell'angolo. Il risultato è mostrato in figura 25. Per capire come questo algoritmo che in termini scientifici si chiama "correlazione tra due punti", dia una indicazione sulle onde che si sono propagate nell'Universo, consideriamo un caso molto semplice: l'onda sinusoidale disegnata in figura 1B. Supponiamo che l'ampiezza dell'onda rappresenti la variazione di

temperatura rispetto al valore medio. Assumiamo che il primo punto corrisponda a un massimo e prendiamo il secondo punto a una distanza arbitraria; facciamo il prodotto delle due variazioni, cioè nel nostro caso, delle due ampiezze. Se il secondo punto corrisponde a un valore massimo dell'onda, la correlazione è massima, mentre un punto diverso darebbe un prodotto inferiore. Un grafico della correlazione in funzione della distanza mostrerebbe una serie di picchi distanziati di una lunghezza d'onda. La correlazione ci fornisce, quindi, informazioni sull'onda, in questo caso sulla sua lunghezza d'onda.

Il valore della correlazione della temperatura nella CMB (figura 25) è convenzionalmente mostrato in dipendenza del parametro  $l$  (chiamato dagli addetti ai lavori “momento di multipolo”), direttamente connesso al valore dell'angolo su cui la correlazione è calcolata<sup>4</sup>.

Le correlazioni sono dominate da tre picchi; il primo, quello dominante, corrisponde a un angolo di poco più di  $1^\circ$  ( $l \sim 200$ ), seguito da due picchi a  $\sim 0,36^\circ$  ( $l \sim 500$ ) e  $0,22^\circ$  ( $l \sim 800$ ). Non sono visibili correlazioni per angoli superiori a  $\sim 1^\circ$ .

Cosa significa tutto questo?

Le “onde sonore” che si propagano nel fluido di protoni, elettroni e fotoni sono caratterizzate da una propria velocità che al momento del disaccoppiamento determinano un “orizzonte sonoro” che corrisponde a  $l=200$ . Chiariamo: l'orizzonte di cui abbiamo parlato in precedenza e che determina l'Universo a noi visibile è quello determinato dai fotoni che si propagano alla velocità della luce. Nel plasma i fotoni non possono propagarsi e l'unico scambio di energia avviene tramite le onde sonore che si propagano con una velocità che è approssimativamente la metà di quella dei fotoni: l'orizzonte risulta dimezzato.

Correlazioni nel plasma ad angoli superiori ( $l < 200$ ) non possono essersi generate dopo la creazione di materia e radiazione perché le onde sonore non hanno avuto il tempo di propagarsi; possono essersi generate solo in tempi precedenti e ci danno informazioni sull'Universo primordiale. Secondo il modello inflativo le fluttuazioni sono casuali e nessuna correlazione è prevista come i dati sembrano confermare.

Le correlazioni tra punti a distanze angolari minori di  $1^\circ$  e, quindi, “entro l'orizzonte sonoro”, sono indotte dalle onde acustiche. La componente dominante corrisponde alla correlazione tra due zone di massima compressione ed i picchi successivi a frammentazioni prodotte nelle diverse fasi del processo di contrazione e dilatazione. Sono di estremo interesse perché ci danno indicazioni su come le oscillazioni nel fluido di materia e radiazione si siano generate e propagate.

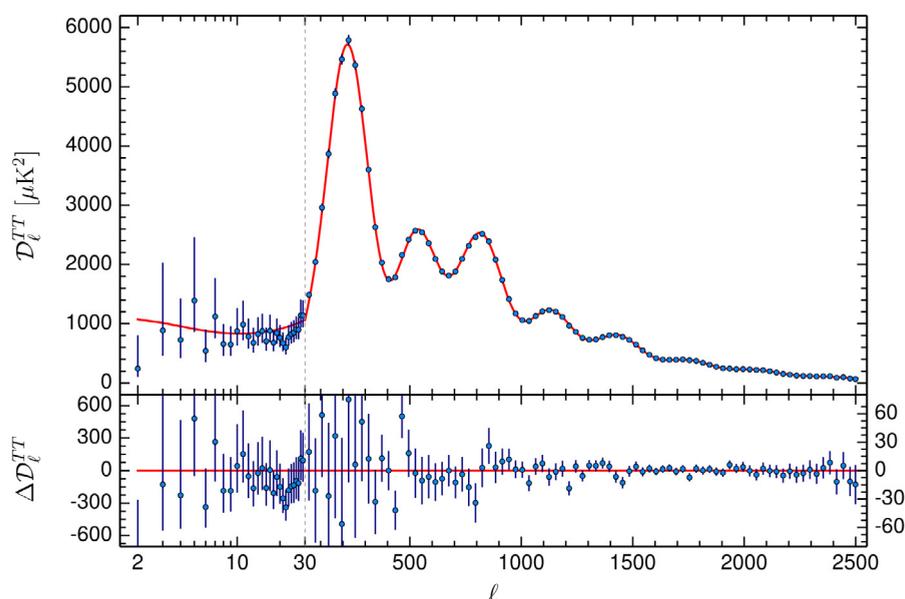
Come le caratteristiche della propagazione del suono nell'atmosfera dipendono dalle proprietà fisiche dell'aria quali composizione, temperatura e pressione,

---

4 La relazione tra il momento di multipolo  $l$  e l'angolo  $\Theta$  che separa due zone è:  $l=180/\Theta$ .

così le onde acustiche primordiali dipendono dalle caratteristiche dell'universo primitivo: la densità di energia, di materia ordinaria, di materia oscura, di radiazione e anche dalla costante di Hubble, perché mentre le onde si propagano l'Universo si espande. Le previsioni del modello cosmologico standard sono mostrate dalla curva rossa in figura 25. Nella parte inferiore della stessa sono evidenziate le differenze tra i dati sperimentali e le previsioni del modello.

Possiamo considerare una straordinaria conquista della moderna cosmologia che due studi indipendenti: le supernovae e la CMB, portino a valori delle costanti cosmologiche compatibili: 4% di materia ordinaria, il 26% di materia oscura, 70% di energia oscura e una geometria euclidea.



**Figura 25.** Correlazioni di temperatura tra due zone in funzione del parametro di multipolo  $l$ . Le correlazioni inferiori a  $\sim l=200$  rappresentano correlazioni “sopra l’orizzonte” delle onde acustiche. Quelle a  $l$  maggiori sono correlazioni “entro l’orizzonte” e ci danno informazioni sulle proprietà del plasma. La linea rossa rappresenta la previsione del Modello Cosmologico Standard. Il riquadro inferiore mostra le differenze tra valori sperimentali e valori calcolati.

Inoltre, il tipo di geometria, l’isotropia dello spazio, le proprietà delle correlazioni sono grandi successi del modello inflativo che a ragione è considerato molto seriamente. Manca ancora la prova incontrovertibile della sua validità, la “pistola fumante” che sia effettivamente il meccanismo da cui tutto ha avuto inizio. La chiave del problema sta nel tradurre in termini quantitativi l’idea della espansione esponenziale: una espressione matematica dell’energia inflativa che

predica con precisione i dati sperimentali, la sua densità, il tempo e la durata del decadimento e, non ultima, la comprensione dei processi che hanno trasformato l'energia in materia e radiazione.

Tanto l'energia presente durante l'inflazione quanto l'energia del vuoto, oggi presente, producono l'espansione accelerata dello spazio, ma sono la stessa cosa? Potremmo essere tentati di dare una risposta affermativa perché molte sono le analogie, ma troppo poco sappiamo delle proprietà di entrambe per sostenerlo. Certo, è un'ipotesi intrigante e, nell'ultimo decennio, si è aperta un'ulteriore possibilità.

### 8.3 L'inflazione e il Bosone di Higgs

Nella cosmologia che abbiamo descritto sono presenti l'energia gravitazionale, elettromagnetica e debole. Purtroppo, nessuna di queste ha le proprietà richieste dalla energia che ha dato origine alla inflazione. Esistono varie possibili spiegazioni di questa decisiva componente dell'energia dell'Universo... e una di queste è particolarmente affascinante.

Il 2012 è stato un anno fondamentale nella fisica subnucleare perché è l'anno in cui gli esperimenti ATLAS e CMS, all'LHC del CERN, hanno scoperto una nuova particella: il bosone di Higgs. La sua esistenza era stata postulata fin dal 1964<sup>5</sup>, per rendere il Modello Standard delle interazioni fondamentali coerente con il fatto che particelle e alcuni mediatori delle forze hanno massa non nulla. La scoperta ha suscitato grandissimo clamore, non solo come scoperta fondamentale nel campo della fisica delle alte energie, ma anche per la cosmologia, in quanto la forma di energia associata alla nuova particella ha proprietà che ne fanno un possibile candidato all'energia inflativa. L'ipotesi, quindi, sarebbe che la particella di Higgs sia in qualche modo responsabile dell'inflazione.

Le proprietà dell'energia associata al bosone di Higgs sono note dagli esperimenti compiuti all'LHC e, quindi, dovrebbe essere facile verificare questa ipotesi che però presenta diversi punti critici.

La prima criticità deriva dal valore di vuoto associato a questa energia, di molti ordini di grandezza superiore a quella da cui deriva l'accelerazione dello spazio. Una spiegazione convincente di questo non è stata formulata, ma l'esistenza del bosone di Higgs è assodata; aggiungiamo questa discrepanza a quella già citata sul valore dell'energia del vuoto. Ricordiamo infatti che i calcoli basati sui principi generali della meccanica quantistica, danno un valore 120 ordini di grandezza superiore a quello misurato.

---

5 R. Brout, F. Englert e P. Higgs avevano proposto in modo indipendente la teoria che permette di assegnare una massa alle particelle elementari. P. Higgs aveva predetto in modo chiaro che, nell'ambito di questa teoria esistesse una nuova particella, da cui il nome. F. Englert e P. Higgs hanno ricevuto il premio Nobel nel 2013.

Una seconda difficoltà nasce dal fatto che dobbiamo prevedere le proprietà dell'Higgs facendo un salto dall'energia a cui sperimentiamo oggi al CERN ( $10^4$  GeV) a quella della Grande Unificazione ( $10^{16}$  GeV), ben mille miliardi di volte superiore. Forse siamo troppo presuntuosi nel pensare di poterlo fare. Dobbiamo assumere che in questo intervallo di energia continuino a valere le leggi che conosciamo, anche se abbiamo elencato più di un motivo per cui ci si debba aspettare qualche novità andando ad energie maggiori.

Per meglio capire le difficoltà che un calcolo di questo genere deve superare, supponiamo di avere un litro d'acqua congelata e di volerne predire le proprietà alla temperatura della Grande Unificazione ( $10^{32}$  K). Per farlo, dobbiamo conoscere tutte le trasformazioni che l'acqua subisce. Prima diviene liquida, poi vapore e, salendo in temperatura, si trasforma in un insieme di atomi di idrogeno e di ossigeno ionizzati. Raggiunti il milione di gradi, il litro d'acqua è diventato un gas di protoni, neutroni ed elettroni che, quando raggiunge i  $10^{12}$  K si trasforma in un plasma di quark e gluoni (vedi paragrafo 6.1); e siamo ancora lontani dal traguardo di  $10^{32}$  K.

Conosciamo le proprietà dell'energia legata all'Higgs alla temperatura di  $10^{12}$  K, equivalente all'energia di LHC. Con tutte le incertezze del caso possiamo estrapolarne le caratteristiche alla temperatura dell'inflazione, dedurne le proprietà della radiazione di fondo e confrontarle con i dati disponibili.

Purtroppo, queste predizioni male si accordano con i dati, in particolare sono carenti nel predire la distribuzione delle disomogeneità nella CMB. L'ipotesi che l'energia presente durante l'inflazione corrisponda a quella collegata al bosone di Higgs oggi è guardata con scetticismo.

Sarebbe stato un grande successo giungere al riconoscimento che questa forma di energia, appena scoperta e che noi verifichiamo nel mondo dell'infinitamente piccolo, fosse la stessa che ha generato l'infinitamente grande. Peccato.

L'energia inflativa, quella del vuoto e quella del campo di Higgs hanno certamente delle proprietà in comune, ma di cui sappiamo troppo poco e quindi non possiamo concludere se siano forme diverse o equivalenti.

Caratteristica peculiare della scienza è che una nuova teoria consente un nuovo punto di vista sulla realtà e contemporaneamente pone nuovi interrogativi. Infatti, l'ipotesi dell'inflazione risponde a molte domande, ma apre anche molti quesiti. Il primo, naturalmente, riguarda l'origine dell'immensa energia che ha generato il tutto e che produce la vertiginosa accelerazione dello spazio. Siamo alle soglie del grande mistero e non abbiamo risposte, salvo, forse, una curiosa coincidenza.

L'energia gravitazionale, cioè l'energia dovuta alla mutua attrazione, che ha un valore negativo, è approssimativamente uguale all'energia presente nel nostro Universo in tutte le altre forme, che ha un valore positivo. La somma dei due termini sembrerebbe essere uguale a zero. In altre parole, la creazione del

tutto potrebbe non aver richiesto dispendio di energia, non è “costata” nulla! Una fluttuazione!

## 8.4 Stringhe, Universi Tascabili e Multiversi

Allacciamoci le cinture, lasciamo vagare la fantasia e partiamo verso un possibile, strabiliante scenario verso cui ci porta la teoria dell'inflazione. Abbiamo detto che, ad un certo istante ed in una regione dello spazio, l'energia del vuoto ha iniziato a decadere portando al Big Bang. Solo una volta ed in un'unica regione? L'ipotesi, audace ma più logica, è che mutamenti di questo tipo siano avvenuti e avvengano in continuazione ed in luoghi diversi, dando origine ad altrettanti Universi, ognuno dei quali viene chiamato *Universo tascabile* ed è parte di una realtà molto più grande: il *Multiverso*. Quanti sono gli Universi tascabili? Non possiamo saperlo: uno, due... forse infiniti.

Quanto descritto ricorda quello che succede in un volume di acqua prossimo all'ebollizione. All'interno del liquido si creano zone microscopiche che danno origine a bollicine di vapore che crescono fino a quando tutto il liquido entra in ebollizione. Ogni bollicina corrisponde, in cosmologia, ad un Universo tascabile, ma qui finisce l'analogia. Nel modello cosmologico, la violenta dilatazione dello spazio si arresta e l'energia del vuoto decade bruscamente, generando un Big Bang.

Le caratteristiche del nostro Universo, quelle che dopo quattordici miliardi di anni hanno permesso l'origine della vita, dipendono da un delicato equilibrio tra i valori delle costanti fisiche che caratterizzano materia ed energia, quali, ad esempio, la massa e la carica elettrica dell'elettrone e del protone. L'esistenza della vita, almeno come noi la conosciamo, è basata sulla chimica del carbonio, in definitiva sul valore dei livelli energetici degli elettroni che intervengono nei vari processi. È sufficiente che all'atomo di carbonio si sostituisca un atomo di silicio, simile per caratteristiche chimiche, ma con elettroni a livelli di energia un poco differenti, che le reazioni della chimica organica all'origine della vita non abbiano luogo. Perché, tra tutti i valori possibili delle costanti fondamentali, proprio quelli che hanno dato origine al nostro Universo si sono realizzati?

Sogno della fisica è l'elaborazione di una teoria da cui discendano tutte le leggi e che permetta di capire perché i valori delle costanti siano quelle che sono, e non altri. Oggi siamo molto lontani dal poter formulare una tale teoria, ma esiste la possibilità di un approccio alternativo, collegato alla *Teoria delle Stringhe* ed alla postulata esistenza di infiniti Universi tascabili.

La teoria delle stringhe ipotizza che le leggi fisiche fondamentali trovino la loro espressione in uno spazio a molte dimensioni, tipicamente dieci (nove spaziali e una temporale). Noi viviamo in uno spazio con tre dimensioni spaziali ed una temporale, e non percepiamo le altre sei perché “arrotolate” su sé stesse, con raggi di curvatura piccolissimi, il che fa sì che non siano rilevabili

sperimentalmente. Come suggerisce il nome, le stringhe sono strutture ad una dimensione, in uno spazio a dieci dimensioni, che assumono configurazioni diverse. Alcune hanno gli estremi liberi, altre si congiungono ad anello, altre si aggrovigliano in modi più complicati. I componenti elementari della materia e della radiazione, quelli che conosciamo e probabilmente altri ancora ignoti, originano dalle diverse configurazioni ed eccitazioni delle stringhe. Di questa teoria d'avanguardia non esistono oggi prove sperimentali, ma viene presa in considerazione in quanto possibile via verso una teoria quantistica della gravità.

La teoria della Relatività Generale spiega la forza di gravità come dovuta alla curvatura dello spazio, e non ad uno scambio di particelle. Ogni tentativo di elaborare una teoria che interpreti la gravità come dovuta a uno scambio di particelle, cui si dà il nome di *gravitoni*, porta a contraddizioni e difficoltà matematiche. La teoria delle stringhe, dove lo spazio ed il tempo, attori principali nella Relatività Generale, sono solo una parte di una realtà a dieci dimensioni, apre interessanti e promettenti prospettive di elaborare una teoria quantistica della gravità.

Torniamo alla cosmologia. L'energia del vuoto dipende dal modo in cui le sei dimensioni "arrotolate" si possono configurare. Moltissimi modi diversi sono possibili in uno spazio a sei dimensioni, ed a questi corrisponde un altrettanto grande numero di valori di energia del vuoto, di costanti fondamentali e di Universi tascabili con caratteristiche fisiche diversissime.

Capovolgendo il modo di ragionare, potremmo non tanto cercare la legge da cui tutto discende e che spiega il motivo per cui il nostro Universo è quello che è, ma dire che è quello che è perché ha permesso la nostra forma di vita e, quindi, la nostra esistenza. Noi agiamo come elemento di selezione tra tutti gli infiniti Universi tascabili possibili. Non c'è più la necessità di giustificare i valori delle quantità fisiche che caratterizzano il nostro mondo, queste sono quelle che sono perché noi esistiamo. In altri Universi, queste costanti potrebbero essere diversissime e non permettere la vita, almeno nei termini di quella che conosciamo. A questa visione ci si riferisce come *principio antropico*.

Il termine venne introdotto per la prima volta dal fisico australiano Brandon Carter durante il simposio "Confronto delle teorie cosmologiche con i dati delle osservazioni"<sup>6</sup> tenutosi a Cracovia, nel 1973, in occasione delle celebrazioni per il cinquecentesimo anniversario della nascita di Copernico. Tale principio venne enunciato a una platea di fisici e cosmologi per evidenziare come tutte le osservazioni scientifiche siano soggette a dei vincoli dovuti alla nostra esistenza in qualità di "osservatori". In seguito, si è sviluppata come un'ipotesi tesa a spiegare le attuali caratteristiche dell'Universo.

---

6 Carter, Brandon (1990). Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology, pp. 121-133 in John Leslie, ed., Physical Cosmology and Philosophy. New York: Macmillan.

Il fisico americano Freeman John Dyson è l'autore di una famosa frase utilizzata in diversi e opposti contesti anche dai media: «l'Universo doveva già sapere che saremmo arrivati. Nelle leggi della fisica vi sono coincidenze numeriche che paiono essere accordate tra loro per rendere l'Universo abitabile».

Dyson era una personalità eclettica, multiforme ed inquieta, noto per contributi alla matematica, alla teoria dei solidi ed alla elettrodinamica quantistica, vincitore del Premio Templeton per ricerche nell'ambito dei rapporti tra scienza e spiritualità. Nel corso della sua vita aveva riflettuto molto sul fatto che le costanti universali della fisica sembrano fatte apposta per consentire l'esistenza della vita umana.

In un certo senso il principio antropico supera questa difficoltà in quanto è la nostra esistenza come osservatori che le giustifica, senza richiedere l'intervento a priori di un demiurgo.

# Epilogo

Nel corso di questo breve saggio abbiamo percorso la storia dell'evoluzione del nostro Universo, sfiorato il mistero dell'Origine, 14 miliardi di anni fa, e siamo giunti fino ai nostri giorni.

Il modello di evoluzione che abbiamo cercato di presentare è indubbiamente una grande conquista dell'ingegno umano, ha alcune innegabili criticità ma il quadro complessivo è solido, avvalorato da incontrovertibili risultati sperimentali. Nei prossimi decenni, nuove scoperte potranno chiarire i molteplici punti interrogativi che, come abbiamo sottolineato, sono presenti nel modello, ma molto difficilmente sconvolgeranno il quadro complessivo.

Qualche miliardo di anni fa, su quel sassolino sperduto nello spazio, dove esistono condizioni fisiche assai speciali e che chiamiamo terra, è nata la vita. L'evoluzione ha portato a organismi sempre più organizzati e complessi fino all'uomo, la cui mente è in grado di comprendere e ricostruire la storia dell'origine. Come se l'Universo stesso, tramite il processo evolutivo, volesse conoscere la sua storia. I misteri dell'inizio e dell'oggi si toccano.

A inizio 900 conoscevamo a malapena la struttura della nostra galassia ed ora parliamo con disinvoltura di distanze pari a 40 miliardi di anni luce.

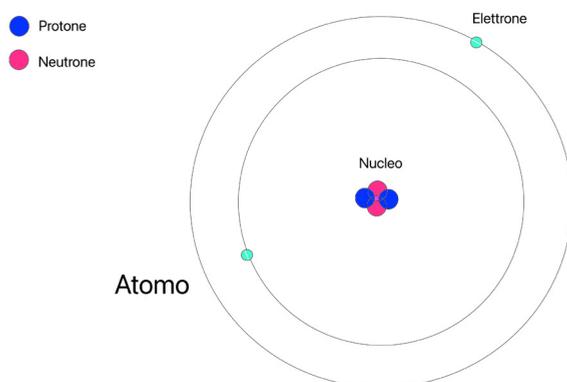
Se abbiamo potuto raccontare questa storia è merito degli scienziati che ne hanno scritto i capitoli fondamentali, mostrando come la fisica moderna sia stata in grado di dare forma teorica e largo riscontro sperimentale a questo straordinario incontro tra infinitamente piccolo ed infinitamente grande, proponendo un'unica grande visione. Ma questa non è solo una storia dell'intelletto e della ragione; è anche una storia del sentimento. Perché non è un caso che gli autori di questo libro siano esperti di fisica delle particelle o di astro-particellare. E non è un caso, è stato anzi inevitabile, che siano stati colti da autentica passione per queste tematiche cosmologiche, per quello straordinario mistero che ha sempre affascinato l'uomo: l'immensità del cielo stellato. Ringraziamo quindi il lettore per l'interesse, e anche per la pazienza nel seguire i fili di questa storia. Che in fondo è la storia più grande di tutte. Con i protagonisti più piccoli di tutti. Una storia di particelle nell'infinito.



# Appendice A

## Atomi per tutti

L'atomo, come costituente fondamentale della materia ha una storia lunga e gloriosa, che parla il linguaggio della chimica e della fisica. A 150 anni dalla nascita della famosa Tavola di Mendeleev, che organizza gli atomi in base alle loro proprietà chimiche, sappiamo molto della sua struttura; in un certo senso "sappiamo tutto" dell'atomo perché abbiamo compreso le leggi che lo governano: l'attrazione elettromagnetica tra un nucleo con carica elettrica positiva e gli elettroni con carica negativa. La figura 1A dà un'idea schematica della struttura di un atomo.

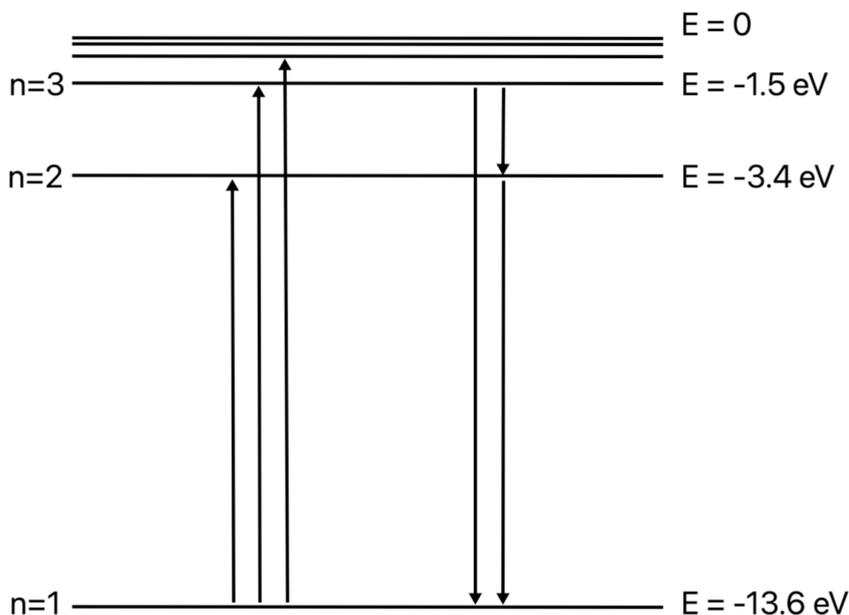


**Figura 1A.** Atomo di elio. Gli elettroni con carica elettrica negativa orbitano attorno al nucleo carico positivamente costituito da protoni e neutroni. La figura non è in scala perché il raggio del nucleo misura circa  $10^{-12}$  mm mentre quello dell'atomo è approssimativamente  $10^{-7}$  mm, centomila volte maggiore.

Il numero di elettroni conferisce all'atomo le caratteristiche chimiche. L'atomo più semplice è quello con un solo elettrone: l'idrogeno (H). L'atomo con due elettroni è l'elio (He), e quello con tre è l'atomo di litio (Li). Percorrendo la tavola degli elementi troviamo, in successione, il berillio (Be), il boro (B), il carbonio (C), l'azoto (N) e così via, fino ad arrivare all'elemento con 92 elettroni: l'uranio (U). Un atomo è elettricamente neutro. Agli elettroni dotati di carica elettrica negativa corrispondono, nel nucleo, un ugual numero di protoni dotati di carica positiva. Il numero di elettroni (o di protoni), che gli scienziati chiamano *numero atomico* ed indicano con la lettera *Z*, caratterizza l'elemento chimico in maniera univoca, ad esempio, dire elemento con numero atomico 6 e dire carbonio, è la stessa cosa. Abbiamo anche capito quali siano le dimensioni dell'atomo: sono

dell'ordine di un decimo di un milionesimo di millimetro (in notazione scientifica  $10^{-7}$  mm). Molto piccolo se confrontato alle dimensioni degli oggetti della vita quotidiana. Il nucleo è molto più piccolo:  $10^{-12}$  mm; se il nucleo avesse le dimensioni di una biglia di 1cm, l'atomo avrebbe la dimensione di 1 km.

Un atomo, però, è molto diverso da un "sistema solare in miniatura", come la figura 1A sembrerebbe suggerire. Mentre, nel sistema solare, un pianeta può percorrere un'orbita ad una distanza qualsiasi dal sole, nell'atomo l'elettrone può percorrere solo certe orbite definite. Ad un'orbita permessa corrisponde una quantità definita di energia, e solo certe energie sono possibili: la "quantizzazione" dell'energia che un elettrone può assumere in un atomo è una conseguenza delle leggi della meccanica quantistica, la rivoluzionaria teoria del microscopico, nata agli inizi del 900. In figura 2A sono rappresentati i valori di energia che un elettrone può assumere in un atomo di idrogeno.



**Figura 2A.** Energie possibili che un elettrone può avere nell'atomo di idrogeno. Normalmente l'elettrone si trova nel livello di energia minore:  $E = -13.6 \text{ eV}$  ( $n=1$ ). Gli altri livelli ( $n=2,3, \dots$ ) hanno energie maggiori e corrispondono a livelli eccitati dell'atomo. Il livello di energia zero corrisponde a un elettrone libero, cioè staccato dal nucleo.

Questi valori corrispondono all'energia necessaria a strappare l'elettrone dalla sua orbita, rendendolo libero. Per questo viene chiamata *energia di legame*, ed è definita con valori negativi.

Lo stato fondamentale di un atomo è quello in cui l'elettrone si trova nel livello di minima energia, che, nella figura 2A, è denominato  $n=1$ ; in tale livello l'energia di legame (che tiene unito l'elettrone al nucleo) è di  $-13.6 \text{ eV}$ <sup>1</sup>. Supponiamo che l'atomo acquisti energia assorbendo un fotone (il quanto dell'energia elettromagnetica) di  $10.2 \text{ eV}$  (energia corrispondente alla differenza di energia tra i livelli  $n=1$  e  $n=2$ ): l'elettrone si sposterà dal livello fondamentale al livello eccitato indicato in figura con  $n=2$ . Se il fotone assorbito avesse una energia maggiore, l'elettrone si sposterebbe su una orbita superiore ( $n=2,3,\dots$ ) e, nel caso di una energia maggiore di  $13,6 \text{ eV}$ , si staccerebbe dall'atomo ed avremmo, nel caso dell'atomo di idrogeno, un protone e un elettrone liberi.

È possibile anche il processo inverso: supponiamo di avere un atomo eccitato, con l'elettrone al livello  $n=2$ . Poiché i sistemi fisici tendono allo stato di minima energia, l'elettrone torna allo stato fondamentale  $n=1$ , emettendo un fotone con una energia di  $10.2 \text{ eV}$  corrispondente alla differenza di energia tra i due livelli.

Se l'elettrone si trovasse a un livello superiore, in figura  $n=3$ , potrebbe decadere direttamente nello stato fondamentale emettendo un fotone di  $12.1 \text{ eV}$ , oppure decadere prima nel livello con  $n=2$  e successivamente nel livello con  $n=1$ . In questo caso, due fotoni sono emessi, uno con energia di  $1.9 \text{ eV}$  e uno con energia di  $10.2 \text{ eV}$ . Questi fenomeni sono comuni a tutti gli atomi ed è facile comprendere come dall'analisi dei fotoni emessi o assorbiti sia possibile risalire ai livelli di energia. Poiché i livelli sono caratteristici di ogni atomo, dallo studio dei fotoni emessi o assorbiti si risale alla composizione chimica della sorgente.

La massa di un atomo è quasi tutta concentrata nel nucleo e poiché il raggio di un atomo è centomila volte più grande possiamo concludere che la materia che ci circonda è composta essenzialmente da vuoto.

Siamo soliti misurare la "quantità" di materia, presente in un certo volume, in grammi per centimetro cubo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). A questa quantità i fisici ed i chimici danno il nome di *densità*. L'acqua, ad esempio, ha una densità di un grammo per centimetro cubo. Il ferro ha una densità di  $7,8 \text{ g}/\text{cm}^3$  ed è pertanto percepito come più "pesante". Un pezzo di legno con densità  $0.7 \text{ g}/\text{cm}^3$  è più leggero dell'acqua e quindi galleggia, se immerso in essa. La materia con la più alta densità è l'osmio ( $Z=76$ ), con  $22,7 \text{ g}/\text{cm}^3$ , il doppio di quella del piombo.

Tutto ciò che compone il mondo in cui viviamo ha una densità che varia dalle frazioni di grammi ad un paio di decine di grammi per centimetro cubo. I nuclei atomici hanno, invece, densità di tutt'altra taratura, dell'ordine dei milioni di miliardi di grammi per centimetro cubo; un cucchiaino di materia nucleare peserebbe quanto un transatlantico.

1 Nel mondo degli atomi, come unità di misura della energia viene utilizzato l'elettron-Volt (eV), corrispondente alla energia che un elettrone assume se accelerato tra i poli di una batteria di 1 Volt. L'eV corrisponde a  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Joule, l'unità di misura dell'energia più comunemente usata nel mondo macroscopico.

Il nucleo è formato da protoni con carica elettrica positiva e sappiamo che particelle dello stesso segno si respingono. Sin dagli albori della fisica nucleare ci si è chiesti come fosse possibile tenere confinati, in una così piccola regione di spazio, particelle cariche dello stesso segno.

La stabilità del nucleo, e quindi la sua esistenza, è resa possibile dalla presenza di una forza attrattiva prevalente sulla forza di repulsione elettrostatica, che disgregherebbe il nucleo. Questa forza, detta *nucleare forte*, ipotizzata dal fisico giapponese Hideki Yukawa, a metà degli anni Trenta del secolo scorso, si manifesta quando particelle come i protoni si trovano a piccolissime distanze, come all'interno di un nucleo atomico. Nel nucleo sono presenti, oltre ai protoni, carichi positivamente, anche particelle neutre, scoperte dal fisico inglese James Chadwick nel 1932, denominate neutroni. I neutroni sono particelle “gemelle” dei protoni, da cui si distinguono unicamente perché non dotati di carica elettrica. Protoni e neutroni interagiscono tramite l'interazione forte.

Come detto, un elemento chimico è caratterizzato dal numero di protoni presenti nel nucleo o equivalentemente dal numero di elettroni che lo circondano. Il numero di neutroni presenti nel nucleo di uno stesso elemento è variabile. Esistono, ad esempio, tre diversi tipi del nucleo più semplice, quello in cui è presente un protone: l'idrogeno (H), con un solo protone, il deuterio (D), con un protone ed un neutrone, ed il trizio (T), con due neutroni e un protone. L'idrogeno, il deuterio ed il trizio hanno, tutti, le stesse proprietà chimiche, e prendono il nome di *isotopi* dell'idrogeno. La somma del numero di protoni e neutroni di un nucleo si chiama *Numero di Massa* e si indica con la lettera A. Comunemente, in fisica nucleare, un nucleo X è definito schematicamente come  ${}^A X_Z$ , dove A è il numero di massa, e Z il numero atomico. I già citati idrogeno, deuterio e trizio si scrivono anche come  ${}^1\text{H}_1$ ,  ${}^2\text{H}_1$  e  ${}^3\text{H}_1$ . L'esistenza di isotopi è comune a tutti gli elementi.

Come ulteriore esempio: un nucleo di carbonio è presente in natura con due diversi isotopi. Il più comune è quello con 6 protoni e 6 neutroni (carbonio-12 o  ${}^{12}\text{C}_6$ ), ma esistono in natura anche nuclei di carbonio con 7 neutroni (carbonio-13 o  ${}^{13}\text{C}_6$ ). Ribadiamo che, dal punto di vista chimico, si tratta di due atomi identici. Dal punto di vista nucleare, invece, i due tipi di nuclei rappresentano due forme isotopiche diverse, con proprietà “nucleari” diverse. Se prendessimo un qualsiasi pezzo di carbone e lo esaminassimo con uno spettrometro di massa, uno strumento in grado di “separare” i nuclei di carbonio formati da 6 neutroni da quelli formati da 7 neutroni, scopriremmo che il primo, ossia il carbonio-12, rappresenta il 98,93% del totale, mentre il carbonio-13 costituisce solo l'1.07%. Questi rapporti<sup>2</sup> si sono definiti al momento della formazione degli elementi, e sono chiamati *rapporti isotopici*.

---

2 Rigorosamente queste percentuali tra i diversi isotopi sono sempre le stesse, ma solo nel sistema solare.

Cosa succederebbe se cercassimo di aggiungere o togliere un neutrone ai nuclei stabili dei due nuclei di carbonio? L'aggiunta di un neutrone al carbonio 13 porterebbe alla formazione del carbonio-14 ( $^{14}\text{C}$ ). Questo nucleo si forma costantemente sul nostro pianeta, e deriva dall'interazione della radiazione cosmica con l'azoto che, insieme all'ossigeno, costituisce l'atmosfera. A differenza degli isotopi precedenti, il carbonio-14, una volta formatosi, ha una certa probabilità di decadere in un dato lasso di tempo, trasformandosi in un altro nucleo. Considerato un grande numero di nuclei di carbonio-14, si verifica che, dopo 5600 anni circa, la metà di questi sarà decaduta. Misurando la quantità di Carbonio-14 presente in un campione fossile, e conoscendo il tempo di dimezzamento, si risale al tempo in cui il reperto era in vita; in questo consiste la datazione archeologica con il metodo del carbonio-14 o radiocarbonio.

Più di 5000 isotopi corrispondono ai 92 elementi della tavola periodica. Solo 273 di questi sono stabili, come ad esempio il carbonio-12 ed il carbonio-13.

I nuclei interagiscono tra loro, tipicamente, tramite l'interazione forte e più raramente anche tramite l'interazione elettromagnetica o debole. Di particolare interesse nella cosmologia è la formazione dei nuclei degli elementi leggeri che, partendo da protoni, neutroni e deuterio ( $^2\text{H}_1$ ), portano alla formazione di nuclei di elio ( $^4\text{He}_2$ ), ed a piccole quantità di Litio ( $^6\text{Li}_3$ ,  $^7\text{Li}_3$ ) e Berillio ( $^9\text{Be}_4$ ). Questi processi avvengono rapidamente, ad opera dell'interazione forte, e ad essi ci si riferisce come la *nucleosintesi primordiale*, avvenuta nei primi minuti dopo il Big Bang. Gli elementi con un numero atomico superiore, presenti oggi nel sistema solare, si sono invece formati in parte in quelle fornaci nucleari che sono le stelle e quando una stella esplose al termine della sua vita.



# Appendice B

## Luce e radiazione elettromagnetica

### B1- Proprietà delle onde

Il concetto di onda ci è familiare a partire dall'osservazione della superficie del mare, che non sia in uno stato di "calma piatta" e neppure in tempesta. Prendiamo un breve filmato e fissiamo per un momento un'immagine. La superficie del mare ci mostrerà un insieme di "ondulazioni", zone dove l'altezza dell'acqua è massima, alternate a zone di minimo. Se ora facciamo scorrere il filmato, osserviamo che, in uno stesso punto, i massimi ed i minimi si alternano, mentre, se manteniamo l'attenzione su un massimo e lo osserviamo vediamo che "viaggia", cioè si sposta con regolarità. Le onde appena descritte sono perturbazioni del mezzo (l'acqua del mare) in cui si propagano. Notiamo che è la perturbazione che si propaga, mentre l'acqua rimane sostanzialmente ferma. I parametri che caratterizzano un'onda sono:

- La *lunghezza d'onda*. È la distanza tra due massimi (o minimi). Viene convenzionalmente indicata con la lettera  $\lambda$  ed essendo una lunghezza si misura in metri (m) o suoi multipli e sottomultipli.
- Il *periodo*. È il tempo trascorso affinché due massimi passino dallo stesso punto. Viene indicato con la lettera T e si misura in secondi (s).
- La *frequenza*, indicata con la lettera greca  $\nu$ , corrispondente all'inverso del periodo e, quindi, al numero di volte che, in un secondo, il massimo dell'onda passa dallo stesso punto. La sua unità di misura è l'inverso del secondo ( $s^{-1}$ ). Prende il nome di *Hertz*, dal fisico tedesco Heinrich Rudolf Hertz, e viene indicata con il simbolo Hz.
- La velocità di un'onda. È la sua lunghezza d'onda divisa per il suo periodo:  $v = \lambda / T$  o, detto altrimenti, moltiplicata per la sua frequenza  $v = \lambda \times \nu$ . Si misura in m/s.

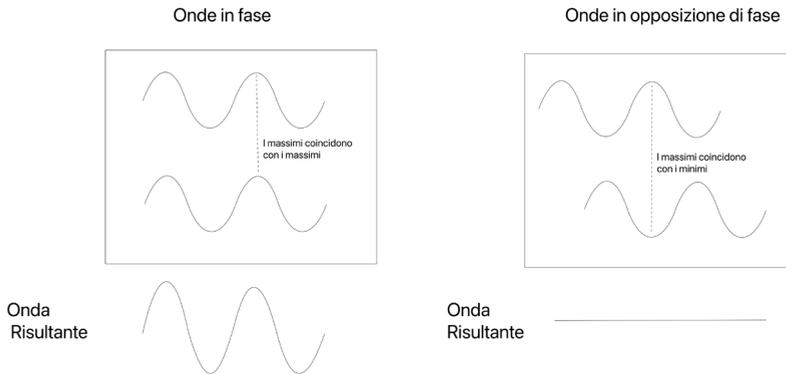
La lunghezza d'onda delle onde del mare varia, ma non è raro vedere onde con lunghezza d'onda di un metro che si "muovono" con una velocità di 1 m/s cui corrisponde la frequenza di 1 Hz.

In natura abbiamo molti tipi di onde caratterizzate dal tipo di perturbazione e dal mezzo in cui si propagano. Un altro esempio molto comune di onde è dato dal suono. Il mezzo di propagazione è l'aria e la perturbazione consiste in zone di maggiore o minore pressione. I parametri delle onde sonore sono molto diversi da quelli delle onde del mare. La loro velocità tipica, nell'aria, è di 344 m/s

(1238 km/h). e la frequenza cui è sensibile l'orecchio umano varia da 20.000 Hz (suoni acuti) a 20 Hz (suoni gravi).

Le onde si propagano e interagiscono tra loro con modalità totalmente diverse (almeno fino a quando non osserviamo fenomeni alla scala atomica) da quelle con cui si propagano e interagiscono i corpi materiali, e queste modalità permettono di distinguere i fenomeni ondulatori da quelli corpuscolari. Come esempio consideriamo la figura 1B, dove sono schematizzati i profili di due onde simili ma originate a tempi diversi.

L'ampiezza della perturbazione risultante è la somma algebrica delle perturbazioni. Se i due massimi coincidono (figura a sinistra), l'ampiezza della perturbazione raddoppia, ma se al massimo di una corrisponde un minimo dell'altra (figura a destra), il risultato è la mancanza di ogni perturbazione. Cioè niente. Fenomeni di questo tipo, che i fisici chiamano di *interferenza*, distinguono le onde dai corpuscoli. Quando due fiumi si congiungono, le onde presenti in essi possono anche scomparire, ma le due portate di acqua naturalmente si sommano.



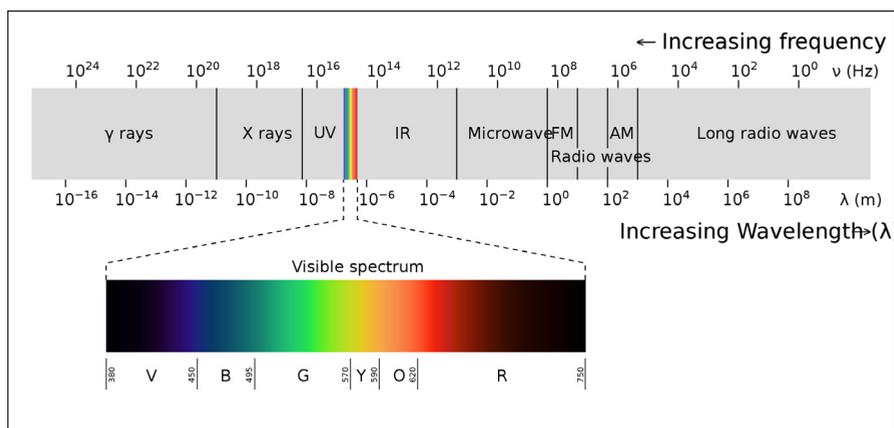
**Figura 1B.** Fenomeno di interferenza costruttiva e distruttiva tra due onde.

## B2 – Le onde elettromagnetiche

Nel 1801 il fisico inglese Thomas Young, verificando l'esistenza di fenomeni tipici dell'interferenza, dimostrò che la luce è un fenomeno ondulatorio. I diversi colori che osserviamo corrispondono a diverse lunghezze d'onda, molto ma molto più piccole di quelle marine o di quelle sonore. In cosa consiste la perturbazione della luce che si propaga nel vuoto, considerato che la luce delle stelle giunge fino a noi, con una velocità estremamente elevata ( $\approx 300.000$  km/s)?

Poco dopo la metà del XIX secolo, i fenomeni elettromagnetici trovarono, grazie a Michael Faraday e James Clerk Maxwell, piena comprensione e rappresentazione matematica. Le equazioni di Maxwell prevedono l'esistenza di onde in cui la "perturbazione" è dovuta al campo elettrico ed al campo magnetico ad esso associato. Parliamo perciò di *onde elettromagnetiche*. La velocità delle onde elettromagnetiche, calcolata dalle equazioni di Maxwell, corrisponde con precisione a quella della luce, da cui la deduzione, convalidata da innumerevoli altre verifiche, che luce è un'onda elettromagnetica. Lo studio delle onde elettromagnetiche, delle loro proprietà e applicazioni, ha impegnato fisici e ingegneri per molti decenni, anzi, possiamo dire con buona ragione che continua anche oggi.

La figura 2B mostra i valori della lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche. Si può osservare come la lunghezza d'onda  $\lambda$  vari da decine di migliaia di chilometri a  $10^{-16}$  m (un decimo del raggio di un protone), ben 24 ordini di grandezza. La luce, o, meglio, lo spettro a noi visibile, occupa la piccola frazione compresa tra 420 nm (cui corrisponde il colore violetto) e 720 nm cui corrisponde il colore rosso. Tutto ciò che è al di fuori di questo intervallo non è in grado di eccitare il nostro sistema visivo e quindi risulta invisibile. Molti animali riescono invece a percepire lunghezze d'onda maggiori, la zona dei raggi infrarossi, e lunghezze d'onda minori, la zona dei raggi ultravioletti.



**Figura 2B.** Spettro delle onde elettromagnetiche, da quelle di maggior lunghezza d'onda (onde radio), ai raggi gamma. Nella figura è anche riportata la corrispondente scala in frequenza (Hz).

Notiamo anche che la frequenza riportata nella parte superiore della figura è elevata, variando da 10 Hz (onde radio lunghe) a  $10^{24}$  Hz (raggi gamma). Per caratterizzare un'onda elettromagnetica si utilizza, a seconda dei casi e della convenienza, o la lunghezza d'onda, o la frequenza. Prendendo a riferimento il visibile, troviamo a lunghezze d'onda maggiori del rosso, un intervallo denominato infrarosso ( $\lambda=1-100 \mu\text{m}$ ) e successivamente quello delle microonde ( $\lambda= 0.1-100 \text{ mm}$ ).

Queste ultime rivestono un grandissimo interesse in cosmologia, perché corrispondono alla radiazione generata 380.000 anni dopo il Big Bang, radiazione che è tuttora presente attorno a noi. A lunghezze d'onda ancora maggiori troviamo le onde utilizzate per le trasmissioni telefoniche, radio e televisive. Considerando, invece, lunghezze d'onda minori dell'intervallo visibile, troviamo, in figura, l'abbronzante (con cautela) radiazione ultravioletta, i raggi X ( $\lambda=0.001-0.0001 \mu\text{m}$ ) ed i raggi gamma prodotti in interazioni nucleari. Non esiste un limite inferiore alla lunghezza d'onda. Nell'acceleratore di particelle LHC al CERN si produce radiazione di lunghezza d'onda anche inferiore a  $10^{-20}$  m (un centesimo di miliardesimo di miliardesimo di metro), centomila volte inferiore al raggio di un nucleo atomico, come descritto nell'appendice precedente.

### B3 – Le onde elettromagnetiche come quanti di energia

La studio della natura è affascinante perché pieno di sorprese. Agli albori del secolo scorso si pensava di avere compreso “tutto”, materia e radiazione (anche così chiamiamo le onde elettromagnetiche). Ma sorprendentemente, si scoprì che quando interagiscono con la materia, le onde elettromagnetiche scambiano solo multipli di quantità discrete di energia, *quanti* di energia, come fossero costituite da un insieme di corpuscoli. L'energia del quanto dipende dalla frequenza secondo la relazione  $E=h\nu$  dove  $h$  è la *costante di Planck*, che corrisponde a  $6,626 \cdot 10^{-34}$  Joule x secondo. Il Joule (J) è l'unità di misura dell'energia e, per darne un'idea, 1 J corrisponde approssimativamente all'energia di moto che un corpo di un kilogrammo acquista cadendo da una altezza di 10 cm. L'energia di un fotone, assumendo anche frequenze molto elevate, è piccolissima se confrontata alla energia dei processi che ci riguardano nel quotidiano.

Siamo quindi portati a pensare ad un'onda elettromagnetica come al moto di particelle, cui diamo il nome di *fotoni*, che si muovono alla velocità della luce e che, per coerenza con la relatività di Einstein, hanno massa nulla. Come detto, l'energia di un singolo fotone è minuscola, ad esempio, a una frequenza di  $10^9$  Hz, quella dei nostri telefonini, corrispondono fotoni di  $6,6 \cdot 10^{-25}$  J. Quando si prendono in considerazione lunghezze d'onda dei raggi X e gamma, l'energia dei fotoni diviene confrontabile con l'energia di reazioni chimiche e nucleari, rispettivamente. Si può allora caratterizzare un'onda elettromagnetica esprimendo, non la lunghezza d'onda o la frequenza, ma l'energia del fotone corrispondente. Ad esempio ai raggi X corrispondono energie di migliaia di eV (keV), e ai raggi gamma milioni di eV (MeV). Non c'è un limite all'energia che un fotone può avere. I fotoni corrispondenti alla radiazione elettromagnetica generata nelle reazioni a LHC possono superare  $10^{12}$  eV, mille volte l'energia contenuta in un protone. Recentemente, un esperimento dedicato allo studio della radiazione che ci giunge dallo spazio ha rivelato fotoni con una energia ben mille volte

superiore ( $10^{15}$  eV). Quali straordinari processi avvengono nel Cosmo capaci di generare particelle di così elevata energia?

Forse potrebbe generarsi una certa confusione su un punto cruciale: la radiazione elettromagnetica è un fenomeno ondulatorio o corpuscolare? Entrambi. I fotoni interagiscono come particelle, ma si propagano come onde. Dal dualismo onda-corpuscolo nasce la *Meccanica Quantistica*, la teoria con cui si interpretano i fenomeni atomici e nucleari. Se la luce si comporta come una particella, siamo sicuri che le particelle non si comportino anche come onde? La risposta è positiva, rispecchiando la grande eleganza e coerenza della natura. Si tratta del famoso dualismo “onda-corpuscolo”, una delle innovazioni concettuali più significative della fisica del novecento.

Ad esempio, un fascetto di elettroni con una energia di 14 keV ha una lunghezza d'onda di  $10^{-11}$  m e presenta i fenomeni di interferenza tipici di un'onda ma, data la piccolezza della lunghezza d'onda, molto difficili da osservare. Questo è il motivo per cui i corpuscoli ci appaiono come corpuscoli!

## B4 – Lo spettro del corpo nero

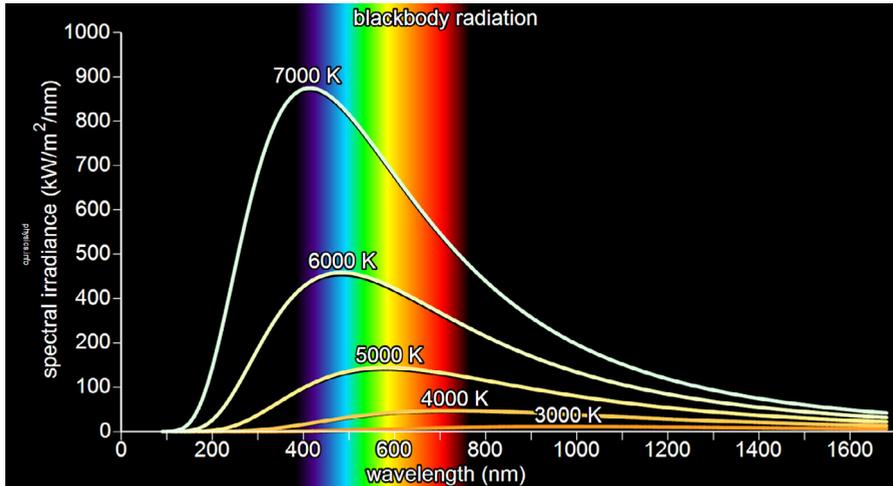
Un'onda elettromagnetica, qualunque sia la sua lunghezza d'onda, si genera quando una carica elettrica cambia il suo stato di moto, cioè cambia la sua velocità o direzione. Le caratteristiche dell'onda, lunghezza d'onda e frequenza, dipendono dal moto delle cariche che la generano. Qui tratteremo unicamente dello spettro delle onde elettromagnetiche che si originano da un corpo solido o liquido. A differenza di un atomo isolato che assorbe o emette radiazione di lunghezza d'onda definita, come descritto nell'appendice A nel caso dell'atomo di idrogeno, un corpo solido o liquido emette un continuo di lunghezze d'onda.

In questi stati della materia sono presenti elettroni e ioni. Maggiore è la temperatura del corpo e maggiore è la velocità media con cui gli elettroni si muovono, si urtano, cambiano di direzione ed energia. Gli elettroni, cambiando velocità, originano onde elettromagnetiche. L'intensità della radiazione emessa dipende dalla lunghezza d'onda e, fatto rilevante, unicamente dalla temperatura del corpo e non dalle sue proprietà chimiche o fisiche. Nel caso di un corpo che non riflette alcun tipo di radiazione o, equivalentemente la assorbe totalmente e ci appare “nero”, la dipendenza della intensità della radiazione dalla lunghezza d'onda è chiamata *spettro di corpo nero*, dipende solo dalla temperatura ed è una funzione universale calcolabile teoricamente.

La figura 3B mostra l'energia emessa in un secondo per  $m^2$  e per intervalli di lunghezza d'onda di 1nm ( $10^{-9}$ m) della radiazione di corpo nero in funzione della lunghezza d'onda emessa da sorgenti con temperature comprese tra i 7000 K e i 3000 K.

Non possiamo non aprire una brevissima parentesi richiamando il fatto che lo studio della radiazione del corpo nero ha rivestito un ruolo fondamentale

nella nascita della fisica quantistica. Le equazioni classiche dell'elettromagnetismo, le equazioni di Maxwell, per intenderci, non sono in grado di spiegare l'andamento mostrato in figura. Solo l'ipotesi, avanzata da Planck, che l'emissione di radiazione da parte della materia avvenisse per quanti, portò all'accordo tra calcolo teorico e valori sperimentali. Pochi anni dopo, Einstein sposò il concetto di quanti e spiegò l'effetto fotoelettrico, altro fenomeno in contrasto con l'elettromagnetismo classico.



**Figura 3B.** Intensità della radiazione emessa da un corpo nero a varie temperature in funzione della lunghezza d'onda espressa in nanometri ( $\text{nm}=10^{-9}\text{ m}$ ).

Torniamo alla figura 3B e richiamiamo l'attenzione sul fatto che il corpo emette radiazione in un ampio intervallo di lunghezze d'onda. Se osserviamo ad esempio lo spettro corrispondente a 6.000 K le lunghezze d'onda della radiazione spaziano da 200 nm ( $0.2\ \mu\text{m}$ ), cui corrisponde l'ultravioletto, a lunghezze d'onda cui corrisponde l'infrarosso. Le lunghezze d'onda visibili, quelle comprese tra 420 nm e 720 nm, coprono solo una piccola parte dello spettro. Guardiamo le curve corrispondenti a temperature minori. L'intensità della radiazione diminuisce rapidamente e il massimo, si sposta a valori di lunghezza d'onda maggiori. Il massimo di intensità della radiazione solare, corrispondente a una temperatura della superficie del sole di 5800 è a 500 nm, mentre il massimo di una sorgente di 3000 K è a 1000 nm, da noi percepito solo come sorgente di calore. Immaginiamo un blocco di metallo ad alta temperatura, collocato in una stanza buia. Il blocco di metallo apparirà alla vista con un vivido colore tendente al violetto. Raffreddandosi, il suo colore si modificherà gradualmente, fino ad apparire giallognolo, poi arancione, poi rosso cupo e, infine, scomparire dalla nostra vista. Potremo sentire ancora per un po' la sua presenza

grazie al calore che emette, ma quando raggiungerà la temperatura ambiente la sua presenza non sarà più percepibile dai nostri sensi. Possiamo correttamente domandarci se emetta ancora radiazione. La risposta è positiva. L'andamento mostrato in figura, fino a 3000 K, continua anche per temperature inferiori, anche bassissime, solo che la parte di radiazione emessa nell'intervallo cui siamo sensibili diviene trascurabile. Anche noi che non siamo certamente luminosi, con una temperatura corporea di circa 37 °C (310 K), emettiamo radiazione con un massimo nella zona dell'infrarosso, percepita come calore. A differenza dell'occhio umano, molti animali, ad esempio i serpenti, sono in grado di “vedere” onde elettromagnetiche nella banda dell'infrarosso e pertanto in grado di vedere le prede nella notte. Su questo principio si basano i visori notturni, che hanno molte applicazioni militari e civili. In questi dispositivi, la radiazione infrarossa viene captata da speciali sensori che la trasformano in una radiazione a noi visibile.

## B5 Lo spettro della luce del sole e delle stelle

Se facciamo passare la luce del sole in un prisma, osserviamo che, come nell'arcobaleno, la luce si divide in tanti colori. Se misurassimo a varie lunghezze d'onda l'intensità di questo arcobaleno troveremmo un andamento simile a quello del corpo nero con una temperatura di 5.800 K. Abbiamo misurato la temperatura della superficie solare!

Se poi disponessimo di uno strumento un po' più raffinato, uno spettrometro, vedremmo che al continuo di colori che vanno dal rosso al violetto si sovrappongono numerose righe scure più o meno intense. La radiazione continua è generata dal moto termico degli elettroni sulla superficie del sole. Nel giungere fino a noi, attraversa sia l'atmosfera solare che quella terrestre. Quando l'energia dei fotoni – ricordiamo che ad ogni lunghezza d'onda corrisponde una precisa energia – coincide con la differenza di energia tra i livelli elettronici degli atomi (vedi Appendice A), i fotoni sono assorbiti, e nello spettro compare una riga scura, una *riga di assorbimento*. Le righe di assorbimento sono caratteristiche degli elementi chimici e dal loro studio risaliamo alla composizione dell'atmosfera solare. In modo analogo, lo studio dello spettro e delle righe di assorbimento della luce che ci giunge dalle stelle ci dà informazioni sulla temperatura e la composizione chimica della loro atmosfera.

## B6 L'effetto Doppler e il Redshift

Nel paragrafo 2.1 “Come misuriamo la velocità e la distanza di una galassia?” abbiamo discusso come, per effetto Doppler, un suono possa essere percepito

più grave o più acuto, a seconda di come la sorgente si allontani o si avvicini. Lo stesso effetto è presente anche nel caso di onde elettromagnetiche.

Se una stella, o una galassia, si allontana da noi, la lunghezza d'onda delle righe di assorbimento o emissione aumenta per l'effetto Doppler. Similmente, se la stella o la galassia si avvicina, la lunghezza d'onda diminuisce spostandosi verso il violetto.

Nella figura 6 è riportata la formula che collega la lunghezza d'onda dell'onda sonora percepita alla velocità della sorgente. Tale formula è valida solo per velocità piccole rispetto alla velocità della luce e per maggiore precisione va sostituita da una più complessa, in accordo con i principi della Relatività Speciale.

Dalla differenza tra la lunghezza d'onda delle righe di assorbimento misurate nella radiazione proveniente dalla sorgente in moto, e le corrispondenti lunghezze d'onda ottenute in laboratorio, si determina la velocità con cui la sorgente si allontana da noi. In cosmologia si definisce come *redshift* di una sorgente luminosa, e si indica con la lettera "z", lo spostamento della lunghezza d'onda rispetto a quella osservata in laboratorio.

# Appendice C

## Il mondo delle particelle elementari

Immaginate di essere in un film di fantascienza: una potente divinità aliena vi dà un incarico strabiliante: costruire un vostro Universo. A un primo sguardo sembra una assurdità, ma è probabile che, almeno una volta nella vita, vi siate trovati in una condizione simile, quando, ad esempio, da piccoli, avete realizzato delle costruzioni con il Lego.

Se anziché prendere una scatola monotematica (come il razzo Saturno V, o la Morte Nera di Star Wars), vi procurate dei pezzi sciolti, allora il vostro Universo di Lego ve lo dovete costruire voi. E, per farlo, avete due elementi fondamentali: i pezzetti di plastica e il modo in cui si incastrano tra di loro. In altre parole, avete i costituenti fondamentali del vostro piccolo Universo e sapete come incastrarli l'uno nell'altro; ma, ovviamente, con questi pezzi potete mettere insieme tanti diversi assemblaggi. Siete dei piccoli dei, dei demiurghi, che fanno e disfanno a loro piacimento.

Questa storia potrebbe ricordarvi una delle formidabili intuizioni degli antichi filosofi greci. Per Anassagora (ma anche per Platone), dalla materia informe e rozza (il Caos), un principio ordinatore superiore (un Logos, o un demiurgo) assembla e costruisce in modo ordinato il Cosmo. Nel nostro esempio, il Caos sono i mattoncini di Lego, e voi il demiurgo che, impiegando la legge degli incastrati, costruite le figure. Costruite il Cosmo.

### C1 I costituenti

L'Universo Fisico è analogo. Per descriverlo potete partire da costituenti fondamentali che si chiamano quark e leptoni, i nostri mattoncini di Lego. Sono gli elementi indicati nella parte sinistra della tabella della figura 1C.

	PARTICELLE			ANTIPARTICELLE					
QUARK	u	c	t	$\bar{u}$	$\bar{c}$	$\bar{t}$	$\gamma$	Fotone	
	d	s	b	$\bar{d}$	$\bar{s}$	$\bar{b}$	$W^+$	Bosoni W	
LEPTONI	e	$\mu$	$\tau$	$\bar{e}$	$\bar{\mu}$	$\bar{\tau}$	$W^-$		Bosone di Higgs
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$	Z	Bosone Z	
							g	Glucione	
	I	II	III	I	II	III			

**Figura 1C.** Costituenti elementari della materia e portatori di forze. I quark ed i leptoni, a sinistra nella tabella, divisi in tre generazioni (indicate in tabella con i numeri romani), sono i mattoni costituenti l'universo. Ad ogni quark e leptone corrisponde un anti-quark e un anti-leptone, pure mostrati in tabella. A destra, sono elencati in colonna i portatori delle forze fondamentali ed il Bosone di Higgs.

I quark sono caratterizzati da una carica elettrica che è solo una frazione della carica elettrica dell'elettrone, indicata convenzionalmente con la lettera "e". I quark indicati nella parte superiore della tabella con il colore arancione: "up" (u), "incantato" (c dall'inglese charm), e "top" (t), hanno una carica elettrica positiva  $q=+2/3e$ , mentre quelli della riga sottostante, i quark "down", (d), "strano" (s) e "bello" (b), hanno una carica elettrica negativa  $q=-1/3e$ .

Come illustreremo tra breve, i quark sono sorgenti e soggetti alla forza forte, a quella debole oltre che naturalmente a quella elettromagnetica. Riprendendo l'esempio del Lego, le forze sono un po' come le protuberanze sui mattoncini che ne permettono l'assemblaggio. Ci sono voluti molti anni e molte ricerche per convincerci della loro esistenza, perché i quark non esistono come particelle "libere", ma solo all'interno di quelle che vengono impropriamente chiamate *particelle elementari*. Impropriamente, perché, a differenza dei leptoni, che vivono in perfetta solitudine, proprio elementari non sono, visto che sono agglomerati di quark. Gli esempi più noti sono il protone e il neutrone.

I leptoni (dal greco *lepto*, "leggero"), indicati in tabella con il colore verde, hanno carica unitaria negativa  $q=-e$ , come l'elettrone, il "mu" ( $\mu$ ) ed il "tau" ( $\tau$ ), o nulla, come i neutrini ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ). Sono sorgenti e soggetti alla forza debole e, se elettricamente carichi, a quella elettromagnetica, ma non alla forza forte. Nel nostro Universo, accanto ad una particella esiste una *antiparticella*, nome con cui si indica un componente con la stessa massa, ma con proprietà opposte. Ad esempio, accanto al protone esiste l'antiprotone con carica elettrica negativa e, analogamente, accanto all'elettrone, l'antielettrone, che ha una carica elettrica

positiva. Anche i quark ed i leptoni hanno le corrispondenti antiparticelle, gli antiquark e gli antileptoni. Ad esempio, accanto al quark up esiste l'antiquark up, con carica negativa  $q = -2/3e$  e, accanto al quark down, l'antiquark down con carica  $q = +1/3e$ .

Tutti gli atomi che ci circondano, e che abbiamo descritto nella Appendice A, sono costituiti dai quark up (u) e down (d) e dall'elettrone. I fisici hanno validissime ragioni per considerare i quark up e down come "fratelli". Il demiurgo che ha costruito il nostro Universo li ha "imparentati" e con essi ha formato il protone ed il neutrone, i componenti del nucleo atomico. Il protone si costruisce con due quark up ed un quark down (uud), mentre il neutrone, con due quark down e uno up (ddu). Il lettore può facilmente verificare che le cariche elettriche del protone e del neutrone sono rispettivamente  $q_p = +1e$  e  $q_n = 0$ .

Nella realtà che quotidianamente ci circonda è presente un altro leptone, molto più elusivo e difficile da rivelare perché interagisce pochissimo con la materia, il neutrino ( $\nu$ ). Come nel caso dei quark up e down, il neutrino è imparentato con l'elettrone a formare la coppia ( $e, \nu_e$ ).

La coppia dei quark up e down, dell'elettrone e del neutrino-e formano quella che si chiama la *Prima Generazione* dei costituenti elementari.

Gli altri quark presenti nella tabella hanno masse superiori a quelli della prima generazione, hanno nomi di fantasia ed anch'essi si "imparentano" a coppie: il quark "incantato" (c) con il quark "strano" (s) a formare la *Seconda Generazione* ed il quark "top" (t) con il quark "bello" (b) a formare la *Terza Generazione*. Similmente per i leptoni quelli carichi si associano ai rispettivi neutrini e formano la seconda e la terza generazione di leptoni.

La massa dei quark è molto varia e passa da pochi MeV, per i quark up e down, a 173.000 MeV, per il quark top. Sorprendente! La massa di un componente elementare, cioè senza una struttura interna, è molto simile a quella di un nucleo di Tungsteno, formato da 74 protoni e 109 neutroni.

Anche i leptoni carichi, della seconda e terza generazione, il leptone "mu" ( $\mu$ ) ed il leptone "tau" ( $\tau$ ) hanno masse superiori a quella dell'elettrone. L'elettrone ha una massa di 0,51 MeV, mentre quella del "tau" ( $\tau$ ), il più pesante, è di 1780 MeV.

I neutrini, che si differenziano tra di loro perché imparentati con il relativo leptone carico ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ), hanno masse molto piccole e a quasi cento anni dalla loro scoperta mal conosciute<sup>1</sup>.

I quark e leptoni della seconda e terza generazione si creano in interazioni nucleari di alta energia, come quelle che avvengono all'LHC del CERN, nelle interazioni di raggi cosmici nell'atmosfera, oppure in cataclismi cosmici, quali

---

<sup>1</sup> La determinazione della massa dei neutrini è un problema aperto della fisica moderna. La loro esistenza influenza in modo limitato l'evoluzione del Cosmo che abbiamo descritto.

l'esplosione di una supernova o la collisione di due buchi neri. Avendo una massa superiore sono instabili e decadono nei costituenti la prima generazione.

I mattoncini di Lego rappresentati dai quark e dagli antiquark si legano, per lo più, in strutture molto particolari: quella con tre quark, come il protone ed il neutrone, e quella con un quark e un antiquark. Avendo a disposizione sei diversi mattoncini, il numero di combinazioni è molto grande e l'elenco di tutte le combinazioni scoperte richiede oggi un centinaio di pagine. Le combinazioni di tre quark formano la famiglia dei *Barioni*.

Accanto alle combinazioni di tre quark esistono, naturalmente, quelle degli antiquark, come l'antiprotone, l'antineutrone, eccetera: l'antimateria.

Le combinazioni di un quark ed un antiquark formano la famiglia dei *Mesoni*. Il mesone di massa più piccola è quello formato da un quark up e un antiquark down, cui si dà il nome di *mesone*  $\pi^+$ . Tutti i mesoni sono instabili e decadono, o in quark, o in leptoni o in fotoni.

A tutte le particelle elementari composte da quark, cioè all'insieme dei Barioni e dei Mesoni si dà il nome di *Adroni* e, poiché i nuclei degli atomi sono composti da protoni e neutroni, alla materia ordinaria si dà il nome di *materia adronica*.

## C2 Le forze

Nella tabella della figura 1C, a destra sono elencati i costituenti che rappresentano le interazioni, il modo in cui i mattoncini del Lego di quark e leptoni si possono unire insieme. Sono il logos dell'Universo, rappresentano le interazioni fondamentali di cui sono i portatori, secondo il linguaggio della fisica moderna.

Cosa significa rappresentare le interazioni ed esserne i portatori? Esistono tre tipi di forza con cui le particelle interagiscono. In ordine di intensità crescente, sono denominate: *deboli*, *elettromagnetiche*, *forti*. Il fenomeno che noi sperimentiamo come una forza è un fenomeno quantistico riconducibile, nel mondo subatomico, a uno scambio di particelle, cui diamo il nome di *mediatori*. I diversi tipi di forza si differenziano per i diversi mediatori. Nelle interazioni elettromagnetiche viene scambiato un quanto di luce, il fotone, nelle interazioni deboli le particelle Z e W, e nelle interazioni forti il gluone.

Mentre il fotone ed il gluone hanno massa nulla, i mediatori delle interazioni deboli hanno una massa rispettivamente di 80 e 91 GeV.

Queste forze sono responsabili dell'arrangiamento dei mattoncini, del gioco di quark e leptoni che ha governato la formazione dei protoni e dei neutroni, dei nuclei, della radiazione cosmica di fondo, per finire con la formazione di stelle, galassie e con la nascita della vita. Queste interazioni del mondo microscopico permettono quindi la formazione di ciò che conosciamo e di noi stessi.

Le *interazioni gravitazionali*, di cui il lettore avrà notato l'assenza, che tanta importanza hanno in cosmologia, sono estremamente più deboli e non giocano alcun ruolo nel mondo degli atomi. La Gravitazione è invece la forza che

domina l'Universo su grande scala. E la moderna teoria della gravitazione è la Relatività Generale, la teoria che Einstein propose al mondo nel 1915.

Non abbiamo ancora trovato una teoria migliore della Relatività Generale per comprendere la Gravitazione. Nonostante il suo più ovvio limite, quello di non avere una versione quantistica, cioè la sua interpretazione come dovuta a uno scambio di portatori, i *gravitoni*, questa teoria ha superato brillantemente tutti i test che sono stati fatti fino ad ora. E tutte le previsioni della Relatività Generale sono state sempre confermate, fino all'ultima. Fino alla scoperta delle Onde Gravitazionali, la pulsazione stessa del tessuto spaziotemporale.

Nonostante la sua debolezza alla scala atomica, la gravitazione ha due proprietà rimarchevoli che la rendono decisiva a livello cosmologico. Innanzitutto, la gravitazione agisce allo stesso modo su tutto, dagli elettroni, agli uomini e alle galassie: nessuno ne è esente. In secondo luogo, la sua azione è sempre additiva. Aumentando la massa una sorgente di campo gravitazionale diventa sempre più importante, senza gli effetti di cancellazione tipici di altre forze (cariche elettriche opposte si attraggono e si compensano!). Ad esempio, la forza tra un protone e un antiprotone è la stessa che tra due protoni. Per questo motivo essa è la forza che domina l'universo alle grandi scale (planetaria, cosmologica). La gravità ha quindi plasmato l'universo che si sta espandendo. Il futuro del tutto dipende da questa forza e dalla energia del vuoto, in un Cosmo ormai pieno di strutture formate.

### C3 Il Bosone di Higgs

Avere capito questa dinamica, la dinamica dei protagonisti di questa tabella, è stata una delle più grandi conquiste della conoscenza umana. Il cosiddetto *Modello Standard* delle particelle elementari è lo schema, il modello, l'archè della nostra comprensione.

Cosa ci sta a fare nella tabella il solitario quadratino contrassegnato con la lettera H? La formulazione matematica del Modello Standard, che va ben oltre lo scopo di questa breve introduzione, era in contrasto con il fatto che i quark ed i mediatori avessero una massa. Nel 1964, i fisici Brout, Englert e Higgs proposero l'esistenza di una forma di energia, cui comunemente si dà il nome di *Campo di Higgs*, la cui interazione con i componenti elementari ed i mediatori genera la massa degli stessi. La rivelazione del bosone di Higgs era quindi considerata un passo fondamentale per la coerenza della teoria.

Nel 2012, la scoperta nei laboratori del CERN da parte delle collaborazioni ATLAS e CMS, di questa particella è stata quindi la convalida essenziale del Modello Standard.



# Ringraziamenti

Gli autori ringraziano caldamente Roberta Aquilini, Roberto Bianchessi, Lorenzo Caccianiga, Tiziana Conti, Elena Fusar Poli e Alberto Osella per i suggerimenti nella stesura del manoscritto, Emanuele Mandelli per la collaborazione nella preparazione delle figure.



# Lista delle illustrazioni

- Fig. 1 La nebulosa di Orione.  
<https://search.creativecommons.org/photos/d21ed007-f33a-483c-9159-fc58bb4d4034>  
Crediti: Ivan Bok - CC BY 4.0
- Fig. 2 La grande nebulosa di Andromeda.  
<https://search.creativecommons.org/photos/8bdaf9a1-2fa9-4387-85bf-a6f-76d7b33f4>  
Crediti: CajunAstro - CC BY 2.0
- Fig. 3 Una immagine del profondo universo presa dal telescopio spaziale James Webb.  
<https://www.jwst.nasa.gov/content/webbLaunch/assets/images/firstImages//image1-DeepField/STSCI-J-p22035a-2000px.jpg>  
Immagine di pubblico dominio - Crediti NASA,ESA,CSA,STScI galassi
- Fig. 4 Distribuzione di decine di migliaia di galassie in una piccola regione del cielo australe.  
<http://vipers.inaf.it/>  
Crediti: eso/B.Granett, L.Guzzo&VIPERS Collaboration - CC-BY 4.0 InterG national Licence
- Fig. 5 Il diagramma di Hubble.  
[http://www.astroexplorer.org/details/10\\_1086\\_320638\\_fg1](http://www.astroexplorer.org/details/10_1086_320638_fg1)  
Crediti: Freedman et al. 2001 The Astrophysical Journal 553 47 - CC-BY 4.0
- Fig. 6 L'effetto Doppler per le onde acustiche.  
Immagine realizzata dagli autori
- Fig. 7 Metodo della parallasse.  
Immagine realizzata dagli autori
- Fig. 8 L'antenna Holmdel.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Horn\\_Antenna-in\\_Holmdel,\\_New\\_Jersey.jpeg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Horn_Antenna-in_Holmdel,_New_Jersey.jpeg)  
Crediti: Nasa - Immagine pubblico dominio
- Fig. 9 Lo spettro della radiazione cosmica di fondo misurata dall'esperimento COBE.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Firas\\_spectrum.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Firas_spectrum.jpg)  
Immagine pubblico dominio - Crediti: NASA, COBE
- Fig. 10 Confronto delle risoluzioni angolari degli esperimenti COBE-WMAP-Planck.  
[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/planck/multimedia/pia16874.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/planck/multimedia/pia16874.html)  
Crediti: NASA/JPL-Caltech/ESA - From Wikimedia Commons, the free media repository
- Fig. 11 Mappa delle anisotropie della CMB ottenuta dall'esperimento Planck dell'ESA.  
[https://www.cosmos.esa.int/documents/387566/425793/2015\\_SMICA\\_CMB/](https://www.cosmos.esa.int/documents/387566/425793/2015_SMICA_CMB/) - Immagine pubblico dominio  
Crediti: ESA e Plank Collaboration
- Fig. 12 a,b,c Cinematica di un grave.  
Immagine realizzata dagli autori

- Fig. 13 La nebulosa del Granchio.  
<https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/crab-nebula-mosaic.jpg>  
 Crediti: NASA, ESA, J. Hester and A. Loll (Arizona State University)  
[CC BY-SA 2.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/)
- Fig. 14 La supernova 1994D.  
<http://www.spacetelescope.org/images/opo9919i/>  
 Crediti: Nasa/ESA The Hubble Key Project Team and The High-Z Supernova Search Team.  
 NASA/ESA CC 4.0
- Fig. 15 La supernova SCP/SN-L2, SN CL012Car, Caracalla.  
<https://hubblesite.org/contents/media/images/2014/21/3353-Image.html>  
<https://hubblesite.org/contents/media/images/2014/21/3359-Image.html>  
 Crediti: NASA, ESA, Perlmutter (UC Berkeley, LBNL), A. Koekemoer (STScI), M. Postman (STScI), A. Riess (STScI/JHU), J. Nordin (LBNL, UC Berkeley), D. Rubin (Florida State University), and C. McCully (Rutgers University - NASA/ESA CC 4.0
- Fig. 16 Il diagramma di Hubble aggiornato con i dati ottenuti dallo studio delle supernovae.  
 arXiv:astro-ph/0402512v2 ;Fig.4  
 Crediti: Adam.G.Riess et all. - CC-BY 4.0 license
- Fig. 17 Differenza tra la luminosità apparente delle supernovae e la luminosità calcolata nell'ipotesi di una espansione con velocità costante dello spazio.  
 arXiv:astro-ph/0402512v2 ; Fig.6  
 Crediti: Adam.G.Riess et all. Gli autori ringraziano A. Riess per aver permesso la pubblicazione della figura.
- Fig. 18 Possibili curvature dello spazio a due dimensioni.  
<https://map.gsfc.nasa.gov/media/990006/index.html>  
 Crediti: NASA / WMAP Science Team  
 Immagine autorizzata per scopi educativi (<https://www.nasa.gov/multimedia/guidelines/index.html>)
- Fig. 19 Velocità di rotazione della materia attorno al centro della galassia M33.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy\\_rotation\\_curve#/media/File:Rotation\\_curve\\_of\\_spiral\\_galaxy\\_Messier\\_33\\_\(Triangulum\).png](https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy_rotation_curve#/media/File:Rotation_curve_of_spiral_galaxy_Messier_33_(Triangulum).png)  
 Crediti: Mario De Leo - CC BY-SA 4.0
- Fig. 20 Differenza tra la luminosità apparente delle supernove e la luminosità calcolata nell'ipotesi di una espansione con velocità costante dello spazio confrontata con diversi modelli di Universo.  
 arXiv:astro-ph/0402512 Fig.7  
 Adam.G.Riess et all. Gli autori ringraziano A. Riess per aver permesso la pubblicazione della figura.
- Fig. 21 Variazione nel tempo della densità di energia della radiazione, della materia e del vuoto.  
 Figura degli autori
- Fig. 22 Velocità di espansione dell'Universo.  
 Figura degli autori

- Fig. 23 Particelle prodotte nell'urto tra nuclei di piombo e tracciate dal rivelatore Alice all'LHC.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/ALICE\\_experiment#/media/File:1011252\\_11-A4-at-144-dpi.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/ALICE_experiment#/media/File:1011252_11-A4-at-144-dpi.jpg)  
Crediti: Pcharito Own work - CC BY-SA 3.0
- Fig. 24 Evoluzione dell'Universo. Dall'inflazione alla formazione di stelle e galassie.  
Figura degli autori
- Fig. 25 Correlazioni di temperatura nella CMB.  
[https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2016/10/aa27101-15/F11.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2016/10/aa27101-15/F11.html)  
Figura 11  
Crediti: ESA/Planck e Planck Collaboration - Public products from Planck mission
- Fig. 1A Atomo di Idrogeno.  
Figura degli autori
- Fig. 2A Assorbimento ed emissione di fotoni.  
Figura degli autori

- Fig. 1B Interferenza costruttiva e distruttiva tra due onde.  
Figura degli autori
- Fig. 2B Spettro delle onde elettromagnetiche.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM\\_spectrumrevised.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrumrevised.png) - Credit: Philip Ronan CC BY-SA 3.0
- Fig. 3B Spettro di corpo nero.  
<http://howthingswork.org/physics-qm-black-body-radiation/>  
Credit Bhutajata - CC BY-SA 4.0
- Fig. 1C Quark, leptoni e mediatori delle forze elementari secondo il modello standard.  
Figura degli autori

# Dalle stelle all'universo

## Nascita della cosmologia moderna

**Luciano Mandelli, Marco Giammarchi, Lino Miramonti**

Da sempre l'uomo è affascinato dallo spettacolo del cielo stellato che lo porta a porsi grandi domande: cosa sta sopra di noi? L'Universo è eterno o è nato, e come, in un tempo remoto? È finito o infinito? Quale è il suo futuro? Siamo soli oppure ci sono altri pianeti, altri mondi?

Per rispondere almeno in parte a queste domande, e con la convinzione che sia un dovere degli uomini di scienza trasmettere alla società notizia delle conoscenze acquisite, abbiamo scritto questo libro. Qui raccontiamo, con semplicità ma con rigore, come nell'ultimo secolo, scoperta dopo scoperta, lo schema dell'Universo che gli uomini si erano fatti nel passato sia andato in pezzi e un quadro diverso, affascinante e anche inquietante sia gradualmente emerso.

Questa storia non è però solo una storia dell'intelletto e della ragione; è anche una storia del sentimento. Non è un caso che gli autori di questo libro, esperti di fisica delle particelle e di fisica astroparticellare siano stati colti da autentica passione per queste tematiche cosmologiche, per quello straordinario mistero che racchiude il cielo stellato.

In copertina: *Cosmic cliff in the Carina nebula. NIR CAM Image.* <https://webbtelescope.org/contents/news-releases/2022/news-2022-031> - Public Domain

ISBN 979-12-80325-81-5 (print)  
ISBN 979-12-80325-85-3 (PDF)  
ISBN 979-12-80325-87-7 (EPUB)  
DOI 10.54103/milanoup.65