

## **Capitolo Primo**

### **Le tappe principali della cosmologia**

La cosmologia, intesa come disciplina per la comprensione della struttura ed evoluzione dell'Universo, è appartenuta, almeno per gli ultimi tre millenni, al solo dominio della mitologia, della religione e della filosofia. Non si può parlare di cosmologia scientifica, intesa come una branca della scienza teorica e/o sperimentale, se non a partire dagli anni '20 del secolo scorso, quando iniziarono i primi lavori sulla termodinamica dell'Universo con Otto Stern e quando i matematici Alexander Friedman e Georges Lemaitre mostrarono che le equazioni della relatività generale di Albert Einstein possedevano anche soluzioni per un Universo in espansione nel tempo. Secondo Helge Kragh, un autorevole storico della scienza e della tecnologia dell'Università di Aarhus, Danimarca, la nascita della cosmologia fisica, intesa come quella forma di cosmologia dove il contenuto di materia e di radiazione dell'Universo è messo al centro dello studio (e non solamente la geometria dello spazio-tempo), è maturata gradualmente e non si è realizzata mediante un unico "salto

quantico”, caratterizzato dalla scoperta, nel 1965, della radiazione cosmica di fondo, come ancora oggi molti astronomi e fisici ritengono. Prima di questo approccio più fisico, si può parlare solo di cosmologie non-fisiche o matematiche come, ad esempio, il modello di Willem de Sitter del 1917.

Le basi della moderna cosmologia scientifica partono da ben più lontano, dalle prime osservazioni del '600 degli “oggetti nebulari” da parte di Galileo Galilei, di Nicolas-Claude Fabri de Peiresc, di Christiaan Huygens, e del '700 da parte di William Herschel e di Charles Messier, con il suo famoso catalogo delle “nebulose” compilato con il preciso intento di non confonderle con nuove comete. Nell'800 Lord Rosse scoprì la struttura a spirale di alcune di queste “nebulose”, come la famosa galassia M51 nella costellazione dei Cani da Caccia. Stava così iniziando a maturare l'idea della possibile natura extragalattica di alcuni oggetti nebulari (a spirale), con le relative conseguenze sulla scala reale dell'Universo. Ancora agli inizi del 1920 non erano ben chiare le idee sulle scale galattiche: infatti gli statunitensi Harlow Shapley, dell'osservatorio di Mount Wilson, e Heber D. Curtis, dell'osservatorio di Lick, dibattevano sulla posizione occupata dal Sole e dagli oggetti nebulari a spirale, oltre

20

che sulla scala della nostra galassia (la Via Lattea). Il primo posizionava la nostra stella lontana dal centro galattico ma attribuiva alla nostra galassia dimensioni di 300000 anni luce di diametro con gli oggetti nebulari a spirale interni ad essa; il secondo posizionava il Sole al centro della galassia, con un diametro di 30000 anni luce, con gli oggetti nebulari al di fuori di essa pensati come concentrazioni di stelle simili alla Via Lattea. Entrambi avevano solo una parte di ragione.

Si dovrà aspettare il 1925 per fare un passo avanti nella comprensione delle reali scale galattiche: Edwin Hubble, con i contributi di Ernst Opik e Knut Lundmark, riuscì a stimare la distanza della Galassia di Andromeda (M31) utilizzando la relazione periodo di pulsazione-luminosità di alcune stelle variabili dette Cefeidi, le quali costituiscono dei veri “campioni” di riferimento di luminosità e quindi sono degli indicatori di distanza. La distanza così trovata risultava comunque sottostimata, solo 900000 anni luce, ma consentiva di chiarire una volta per tutte la natura extragalattica di questi oggetti e confutare il modello proposto da Shapley. Ma il nome di Hubble è legato allo sviluppo della cosmologia moderna soprattutto per la nota legge di espansione cosmica, con la relazione velocità di recessione-spostamento verso il rosso (red-shift) delle linee spettrali

della luce emessa dalle galassie. Questo risultato costituisce un vero e proprio salto qualitativo in ambito cosmologico: non solo la dinamica pervade la piccola e media scala ma anche quella dell'intero Universo. Questa proprietà avrà conseguenze straordinarie e impreviste.

In quegli anni viene pubblicata la *Teoria della Relatività Generale* di Einstein (1915) e la prima verifica sperimentale da parte di Sir Arthur Eddington e Arthur Crommelin con la dimostrazione del piegamento della luce proveniente da una stella da parte del Sole (1919). La gravità agisce dunque come una deformazione dello spaziotempo che curva e rallenta tutto, anche la luce. Prima della scoperta di Hubble, Einstein applica le sue equazioni di campo per descrivere l'intero Universo e per fare questo in modo consistente con le teorie e osservazioni di un Universo statico, introduce una costante detta appunto costante cosmologica (1917). Dopo la scoperta dell'espansione dell'Universo, Einstein dovette ricredersi ed eliminare tale costante dalle equazioni considerandola il suo più grande abbaglio. Vedremo in seguito come la scoperta dell'energia oscura abbia riportato in campo l'idea di questa costante cosmologica.

Le soluzioni delle equazioni di campo della Relatività Generale a cura del matematico russo Alexander

Friedmann (1922) e del matematico belga Georges Lemaître (1927), hanno fornito il modello cosmologico standard di un Universo denso, caldo ed in espansione. Naturalmente, invertendo il segno della variabile tempo, questo modello suggeriva, come scenario iniziale, l'esistenza di una singolarità spazio-temporale da cui doveva aver avuto origine l'Universo così come lo osserviamo oggi; questa singolarità ha preso il nome di "Big-Bang", termine che, ironia della sorte, è stato coniato da uno dei fondatori della teoria cosmologica rivale, quella dello Stato Stazionario, da parte di Sir Fred Hoyle.

Gli anni dal 1932 al 1938 sono tappe fondamentali per la nascita della cosmologia nucleare, cioè quella componente della teoria cosmologica che ha utilizzato gli sviluppi e le conquiste della fisica nucleare. Il neutrone è stata la particella fondamentale per la comprensione dei processi di produzione di energia nelle stelle e della nucleosintesi cosmica, come proposta per la prima volta dal fisico tedesco Carl Friedrich von Weizsacher. L'idea di fondo è che la materia nelle varie forme come la si osserva oggi è il risultato di un processo di sintesi stellare e cosmica avvenuta nel passato. La cosmologia nucleare può inoltre fornire informazioni sulle condizioni e sui processi dell'Universo primordiale, prossimo all'evento del "Big-Bang".

L'altra tappa decisiva per lo sviluppo della cosmologia moderna avviene nel 1965, quando i radio-astronomi statunitensi Arno Penzias e Robert Wilson individuano sperimentalmente, quasi per caso, la radiazione cosmica di fondo (o in breve: CMB da: "Cosmic Microwave Background"). Contemporaneamente, Robert Dicke e James Peebles spiegano, mediante calcoli, l'origine cosmologica di una tale radiazione alla temperatura osservata di 2.7 K, in perfetto accordo con la teoria del Big-Bang. È doveroso ricordare che già in precedenza, negli anni '50, George Gamow, Ralph Alpher e Robert Herman avevano sviluppato un modello cosmologico delle fasi iniziali, dopo il Big-Bang, che prevedeva correttamente la formazione degli elementi più leggeri (nucleosintesi) e la radiazione cosmica di fondo. La scoperta della radiazione cosmica di fondo rappresenta senza dubbio l'evidenza sperimentale più forte che supporta il modello cosmologico del "Big-Bang" e questo residuo fossile dell'esplosione primordiale è continuo oggetto di studio da parte dei più avanzati progetti di osservazione spaziale con satelliti.

Una delle assunzioni della moderna cosmologia è il Principio Cosmologico, inizialmente formulato da Edward Arthur Milne nel 1933 secondo cui l'Universo a grande scala è spazialmente omogeneo e isotropo. Inoltre, una

delle implicazioni cosmologiche della CMB è che l'Universo è spazialmente piatto. Ma perché l'Universo è omogeneo, isotropo e piatto? Come si formano le strutture a grande scala nell'Universo? Negli anni '80 è stata suggerita una risposta sulla base dell'idea che l'Universo nelle sue primissime fasi sia passato attraverso un periodo di espansione esponenziale, chiamata inflazione. Il modello cosmologico standard prevede che la dinamica dell'Universo in espansione sia determinata dalle equazioni di campo della Relatività Generale di Einstein, le quali correlano il tasso di espansione al contenuto di materia, in particolare alla densità di energia e alla pressione. La densità di energia associata alla materia fredda (polveri) diminuisce nel tempo, a causa dell'espansione, più lentamente (circa un fattore 10) della densità di energia associata alla radiazione. La densità di energia nell'Universo primordiale era dunque dominata dalla radiazione. La transizione verso la materia è avvenuta ad un dato istante quando le perturbazioni hanno iniziato a crescere per effetto dei processi di condensazione gravitazionale. Il disaccoppiamento tra materia barionica e radiazione è avvenuto circa 380000 anni dopo il "Big-Bang". Il secondo istante caratteristico è il tempo della ricombinazione, quando gli elettroni e gli ioni si combinano

per formare atomi neutri. I fotoni della radiazione cosmica di fondo hanno viaggiato indisturbati da quell'istante fino ad oggi. Se si misurano delle anisotropie nella CMB queste dipenderanno dalla presenza di fluttuazioni di densità al tempo della ricombinazione. Il modello cosmologico standard non è in grado di spiegare l'isotropia osservata della CMB. Inoltre, per spiegare la proprietà di piattezza spaziale dell'Universo, la densità di energia iniziale deve essere molto vicina al valore di densità critica che comporta un Universo piatto e questo stato è difficile da giustificare. E ancora, dobbiamo spiegare la correlazione spaziale esistente tra le galassie e gli ammassi di galassie su scale molto grandi ( $> 50$  Mpc,  $1\text{pc}=3.26$  anni luce). Infine, il modello cosmologico standard, se estrapolato alle condizioni singolari del "Big-Bang", entra in difficoltà poiché, ad esempio, la temperatura della materia cresce e tende all'infinito nella singolarità. È dunque necessaria una teoria comprensiva migliore, in grado di risolvere i problemi appena descritti e che sia in grado di trattare la materia in condizioni prossime alla singolarità. La teoria della materia migliore di cui disponiamo, soprattutto per trattare queste condizioni di energie estreme, è la teoria di campo quantistica e forse anche la teoria delle stringhe di cui parleremo in seguito.