

Cosmologia

La **cosmologia** ha come oggetto di studio l'universo nel suo insieme, ed in particolare ne vuole spiegare l'origine e l'evoluzione. La cosmologia nasce nella religione e nella filosofia come teoria della struttura dell'universo (vedi ad esempio il sistema tolemaico), la sua creazione (vedi il creazionismo) e il sua relazione con l'Uomo. Oggigiorno la cosmologia è invece una scienza che fa principalmente parte dell'astronomia ma raccoglie in sé diverse discipline e teorie anche al di fuori dell'astronomia stessa.

La cosmologia come scienza: storia, stato attuale e problemi aperti

Il sistema geocentrico

Nel mondo occidentale le prime teorie cosmologiche basate su fondamenti scientifici (e non puramente religiosi) furono quelle degli astronomi e dei filosofi dell'antica Grecia. Per quanto vi fossero voci discordanti (ad es. Aristarco da Samo, che sostenne un modello in cui la Terra ruota attorno al Sole), l'opinione più diffusa era che la Terra fosse immobile al centro dell'universo, mentre il Sole, la Luna, i planeti e le stelle ruotavano intorno ad essa incastonati in sfere concentriche. La principale esposizione di questo sistema fu data da Tolomeo nel II secolo, per cui esso è anche noto come Sistema Tolemaico.

La rivoluzione copernicana e la gravitazione universale

Fu solo nel XVI secolo che Copernico ripropose il sistema eliocentrico (o, per l'appunto, copernicano), che prese finalmente il sopravvento nel XVII secolo, grazie fra l'altro all'opera di Galileo e Keplero: fu così finalmente affermato che è la Terra che (in compagnia degli altri pianeti) orbita intorno al Sole e non viceversa. Dal punto di vista filosofico, questo passaggio segnò la fine della concezione dell'universo centrato sull'Uomo, il che provocò molte resistenze ad esempio da parte della Chiesa cattolica. Vista l'enorme importanza che ebbe anche al di fuori del campo scientifico, questo cambio di prospettiva è comunemente noto come Rivoluzione copernicana.

Nel 1687 Newton fornì una delle prime chiavi interpretative della struttura del Sistema solare e dell'Universo in generale: la legge di gravitazione universale, che unificava una serie di fenomeni (la caduta dei gravi, le maree, il moto dei pianeti); la cosmologia dei due secoli successivi fu in buona parte un tentativo di applicare le leggi della meccanica newtoniana dapprima al sistema solare e poi ad una scala più ampia.

Tuttavia la reale natura delle stelle (e con essa la possibilità di stimare le distanze cosmologiche) rimase incerta fino a quasi due secoli dopo la pubblicazione della teoria di Newton. Per via della mancata osservazione del moto di parallasse, molti sostenitori del sistema copernicano avevano ipotizzato che esse siano astri simili al Sole ma molto più lontani, e che quindi l'Universo sia un mare infinito di stelle (il primo a sostenere questa tesi fu forse Giordano Bruno. Queste ipotesi trovarono conferma nel 1838, quando Bessel riuscì a misurare la parallasse (e quindi la distanza, di circa 8 anni luce) della stella 61 Cygni.

La scoperta della Via Lattea e delle altre galassie

Nel frattempo, nel 1785 Herschel aveva scoperto che la distribuzione delle stelle sulla volta celeste non è uniforme, ma che nella fascia circolare che fin dall'antichità è nota come Via Lattea il loro numero è molto più alto che altrove, il che suggeriva che il Sole fosse all'interno di un sistema di stelle a forma di disco che fu chiamato Galassia. La posizione del Sole entro la Galassia fu a lungo oggetto di controversie, finché nel 1922 l'astronomo olandese Kapteyn dimostrò che esso non è affatto vicino al centro galattico, ma semmai in una posizione piuttosto periferica: la componente stellare della nostra Galassia forma infatti un disco appiattito di circa 100.000 anni luce di diametro, ed il sole si trova a circa 30.000 anni luce dal centro (lo spessore del disco è di poche migliaia di anni luce).

Tuttavia già dagli ultimi anni del XIX secolo l'interesse dalla cosmologia si era spostato su un'altra controversia, che opponeva coloro che sostenevano che la nostra Galassia costituisce praticamente tutto l'Universo, e coloro che invece sostenevano che le cosiddette *nebulose a spirale* non erano altro che galassie simili alla nostra che noi osserviamo dall'esterno. Questa seconda ipotesi si rivelò corretta quando nel 1924 Edwin Hubble riuscì a misurare la distanza della Galassia di Andromeda, scoprendo che essa si trova ad alcuni milioni di anni luce da noi: essa è quindi ben al di fuori della nostra galassia e ha dimensioni simili ad essa.

La nascita della cosmologia moderna

Si può affermare che la cosmologia moderna nasca fra il 1915 ed il 1929: nel 1915 infatti Einstein pubblicò il primo articolo riguardo alla teoria della relatività generale, mentre nel 1929 Hubble scoprì la sua famosa legge, che implica che l'Universo sia in espansione.

Poco tempo dopo la pubblicazione della sua teoria (che "sostituiva" la gravitazione universale newtoniana) Einstein per primo la applicò al calcolo dell'evoluzione dinamica dell'universo. Gli fu subito evidente che, assumendo che la materia sia distribuita nell'universo in modo omogeneo, anche un universo infinito tenderebbe a collapsare su sè stesso. Essendo però opinione comune che l'universo fosse statico (ed eterno), Einstein ricorse all'artificio di aggiungere nelle equazioni del campo gravitazionale una costante, detta costante cosmologica, per controbilanciare questa contrazione. Questa costante non modificava minimamente le predizioni della teoria in tutti gli altri campi, ma la sua introduzione si prestava ad un altro genere di critica. Infatti, esiste un *unico* valore della costante cosmologica che consente di avere un universo in equilibrio statico, ed anche in questo caso l'equilibrio risulta instabile; ciò significa che per avere un universo eternamente statico il valore "fisico" della costante cosmologica dovrebbe essere *esattamente* quello richiesto dalla condizione di staticità. Ogni altro valore, anche estremamente prossimo a quello indicato da Einstein, conduce ad un universo in collasso o in espansione.

Nel 1922 il matematico russo Alexander Friedmann notò questo problema e, abbandonando l'ipotesi che l'universo sia statico (ed eterno), trovò che le soluzioni delle equazioni della relatività generale indicavano che l'universo avrebbe avuto un inizio in cui sarebbe stato infinitamente denso, e che da allora si sarebbe espanso; cinque anni dopo Georges Édouard Lemaître arrivò allo stesso risultato in modo indipendente. Sia Friedman che Lemaître trovarono anche che nel caso da loro esaminato (e comunemente accettato anche attualmente) di un universo omogeneo ed isotropo, la metrica che risolve le equazioni del campo gravitazionale è la cosiddetta metrica di Friedman-Lemaître-

Robertson-Walker. L'insieme di questa metrica e delle soluzioni trovate da Friedmann e Lemaître costituiscono il cosiddetto modello cosmologico di Friedmann-Lemaître

Pochi anni dopo queste idee teoriche trovarono una clamorosa conferma sperimentale nella scoperta di Hubble che le galassie si allontanano da noi ad una velocità proporzionale alla loro distanza, la qual cosa può essere spiegata facilmente assumendo che l'universo si stia espandendo.

La teorie del Big Bang e dello Stato Stazionario

L'idea che l'universo avesse un inizio portò alla formulazione della teoria del Big Bang, ovvero che l'universo sia nato da una singolarità gravitazionale in cui erano concentrati tutto lo spazio-tempo e la materia dell'universo; in particolare nel 1948 Alpher, Bethe e Gamow introdussero il cosiddetto modello $\alpha\beta\gamma$, che spiegava come potesse avvenire la sintesi degli elementi chimici nell'ambito della teoria del Big Bang, ovvero in un universo in rapida espansione ed in raffreddamento.

Tuttavia alcuni scienziati non accettarono l'idea di un universo che non fosse eterno e proposero modelli alternativi; fra questi il più famoso e fortunato fu la teoria dello stato stazionario di Fred Hoyle, in cui l'universo sarebbe eterno e la diluizione della materia dovuta all'espansione sarebbe bilanciata da una continua creazione spontanea di particelle (1948).

Per circa 20 anni la controversia fra i due modelli cosmologici fu alquanto accesa; essa giunse però ad una conclusione piuttosto rapida dopo che l'osservazione della radiazione cosmica di fondo a microonde (nel 1964 da parte di Arno Penzias e Robert Woodrow Wilson) e diverse misure della densità dei quasar non portarono al quasi totale abbandono delle teorie alternative ed all'adozione quasi unanime di quelle basate sul Big Bang.

Inflazione e materia oscura

Per quanto dopo il 1970 il modello del Big Bang sia rimasto praticamente senza serie alternative, esso presentava e presenta alcune rilevanti lacune. È utile segnalare qui due fra le più importanti, che hanno condotto all'introduzione di due significative modifiche alla teoria. Entrambe queste lacune emersero poco dopo la scoperta della radiazione di fondo, e riguardavano l'estrema uniformità su tutto il cielo della radiazione stessa:

- il primo problema (*problema dell'orizzonte*) è che nei modelli standard del big bang due regioni di cielo sufficientemente lontane fra loro (ad una distanza angolare superiore a circa un grado) non possono essere entrate in contatto fra loro prima dell'epoca alla quale la radiazione di fondo è stata emessa, per cui non possono aver raggiunto un equilibrio termico alla medesima temperatura; sarebbe quindi logico attendersi disomogeneità molto più accentuate nella radiazione che osserviamo;
- il secondo problema è che nella teoria originale del big bang le fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo sono molto più piccole di quanto sarebbe necessario per spiegare la formazione delle galassie in un tempo più breve dell'età dell'Universo.

Per risolvere il problema dell'orizzonte è stata introdotta un'idea teorica nota come inflazione, secondo la quale subito dopo il Big Bang l'universo avrebbe attraversato una fase di espansione estremamente accelerata (l'inflazione, appunto); due regioni di cielo estremamente lontane fra loro potrebbero quindi essere state in contatto (ed avere avuto il tempo di entrare in equilibrio termico) *prima* dell'inflazione. L'inflazione darebbe inoltre conto di numerose osservazioni (ad es. la *piattezza* dell'universo) altrimenti difficili da spiegare.



Per quel che riguarda la crescita delle fluttuazioni fino a formare le galassie, la soluzione comunemente accettata è che esista la cosiddetta materia oscura, ovvero una forma di materia che non abbiamo ancora osservato in quanto sarebbe elettricamente neutra (e quindi non sarebbe in grado di emettere od assorbire luce); la fisica delle particelle fornisce diversi tipi di particelle di cui la materia oscura potrebbe essere costituita, ad es. i neutrini, o più probabilmente i cosiddetti WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*, particelle massive debolmente interagenti). Poiché la materia oscura non sarebbe influenzata dalla radiazione di fondo, essa ha potuto iniziare il suo collasso gravitazionale (dal quale sarebbero nate le galassie) molto prima della materia normale (barionica), eliminando quindi il problema del tempo di formazione delle galassie. Anche la materia oscura spiegherebbe diverse altre osservazioni, fra cui le misurazioni delle curve di rotazione delle galassie, che furono il motivo per cui fu originariamente introdotta.

Inflazione e materia oscura sono ormai entrate a far parte del filone principale della cosmologia. Tuttavia entrambe non sono ancora considerate dimostrate, anche se ci sono concrete speranze di poter giungere ad una scoperta decisiva (ad es. l'individuazione della particella elementare che costituirebbe la materia oscura) in tempi non troppo lunghi. D'altra parte, esistono anche alcuni sostenitori di teorie alternative, ad esempio delle cosiddette *teorie MOND* (da *MODified Newton Dynamics*), che eliminerebbero questi problemi (il particolare il secondo) introducendo delle leggere modifiche alla teoria della gravitazione: queste teorie godono di scarso seguito ma sono compatibili con le osservazioni.

L'energia oscura

Il problema forse più importante che affligge il modello del Big Bang è attualmente quello della cosiddetta *energia oscura*. Infatti alla fine degli anni '90 alcune misure di Supernovae hanno appurato che, contrariamente a quanto atteso, l'espansione dell'universo non sta rallentando, bensì accelerando. Per quanto la relatività generale fornisca un meccanismo (lo stesso che viene utilizzato da alcuni decenni per spiegare l'inflazione) attraverso il quale è possibile avere forme di energia che producono una gravità repulsiva, questa scoperta ha colto di sorpresa la maggior parte dei cosmologi. Al momento attuale non esiste una teoria che possa spiegare in maniera soddisfacente da cosa derivi l'energia (subito battezzata *energia oscura*) che sarebbe responsabile di questa accelerazione, e che sarebbe la forma dominante di energia nel nostro universo (la sua densità sarebbe infatti oltre 10 volte superiore a quella della materia normale e oltre 2 volte superiore a quella della materia oscura).

Problemi aperti

Oltre ai problemi inerenti la materia oscura (la prova o la smentita della sua esistenza e lo studio della sua eventuale composizione) e l'energia oscura (l'esistenza di un termine cosmologico nelle equazioni di Einstein), nella cosmologia attuale restano aperte molte questioni riguardanti gli istanti iniziali dell'universo, quando la densità è confrontabile con la densità di Planck e gli effetti quantistici diventano importanti.

Per fornire dati utili a restringere il campo di accettabilità delle teorie per quanto riguarda le fasi iniziali dell'evoluzione dell'universo saranno utili le nuove finestre osservative basate su *messaggeri* che possano attraversare la materia anche quando questa sia opaca alla radiazione, ad esempio i neutrini e, se saranno rilevate, le onde gravitazionali. Un altro problema ancora aperto di estremo interesse per la cosmologia è la formazione delle strutture, a tutte le scale, da quella dei superammassi di galassie, a quella galattica, a quella planetaria.