

LA LEZIONE

Origine e destino dell'Universo

INTRODUZIONE

Lo studio della struttura e dell'evoluzione dell'Universo si basa su dati e ipotesi scientifiche, tuttavia il problema dell'origine e del destino del Cosmo non può essere affrontato come si affronta normalmente un problema scientifico, a causa dell'impossibilità di verificare con esattezza qualsiasi ipotesi attraverso le osservazioni e l'indagine sperimentale. La conoscenza stessa dell'Universo nel suo complesso è inevitabilmente imprecisa, dal momento che l'orizzonte scrutabile, seppure molto esteso, è indubbiamente limitato e ciò non consente di rispondere come vorremmo a interrogativi affascinanti su cosa c'è oltre l'orizzonte cosmico o sulla natura dello spazio che ci circonda, che hanno molte implicazioni filosofiche e religiose.

La visione attuale dell'Universo è molto diversa da quella del mondo antico, basata per lo più sulla visione filosofica e religiosa della realtà e con l'assenza o quasi di conferme di carattere scientifico, ma anche da quella dell'inizio del secolo scorso, che si appoggiava sul modello di un Universo statico e perennemente immutabile. L'idea di un Universo in continua evoluzione è infatti estranea sia alla mentalità del mondo antico, sia al pensiero meccanicistico dei secoli scorsi. Le grandi scoperte nel campo della fisica dei primi trent'anni del secolo scorso, dalla relatività di Einstein alla teoria dei quanti, hanno infatti aperto la strada alla concezione di un Universo che muta nel corso del tempo.

L'Universo è attualmente in espansione e tutte le galassie si stanno allontanando le une dalle altre. La scoperta di questo fenomeno risale agli anni Venti del Novecento, quando Edwin Hubble dimostrò che gli spettri delle stelle e delle galassie osservate sono caratterizzati da uno spostamento delle righe spettrali che nel visibile è verso il rosso (redshift), tanto più marcato quanto più la stella o la galassia sono lontane, che corrisponde a un moto di recessione (o allontanamento). Osservazioni più recenti e misure più precise delle distanze di lontane galassie hanno però indicato che in realtà la velocità d'espansione non va decelerando, come si riteneva, bensì accelerando, come se ci fosse una forza che si oppone alla forza di gravità.

ORIGINE

L'ipotesi cosmologica attualmente più accreditata è che l'Universo sia nato da un'esplosione primordiale di un 'punto' di materia infinitamente densa, che prende il nome di Big Bang, letteralmente «grande bang». Inizialmente l'Universo era molto piccolo e con temperatura incredibilmente elevata, poi andò espandendosi e raffreddandosi. L'energia si trasformò in materia, e si formarono gli elementi più leggeri, idrogeno ed elio. Dopo circa un miliardo di anni, la forza di gravità portò la materia – sotto forma di gas idrogeno ed elio – ad aggregarsi e si costituirono lentamente le protogalassie in leggera rotazione. Circa tre miliardi di anni dopo il Big

Bang le protogalassie cominciarono a fondersi e a dare origine alle prime galassie. Cinque miliardi di anni dopo si formarono le prime galassie di dimensioni maggiori, fra cui alcune a spirale, come quella nella quale viviamo noi oggi (fig.1).

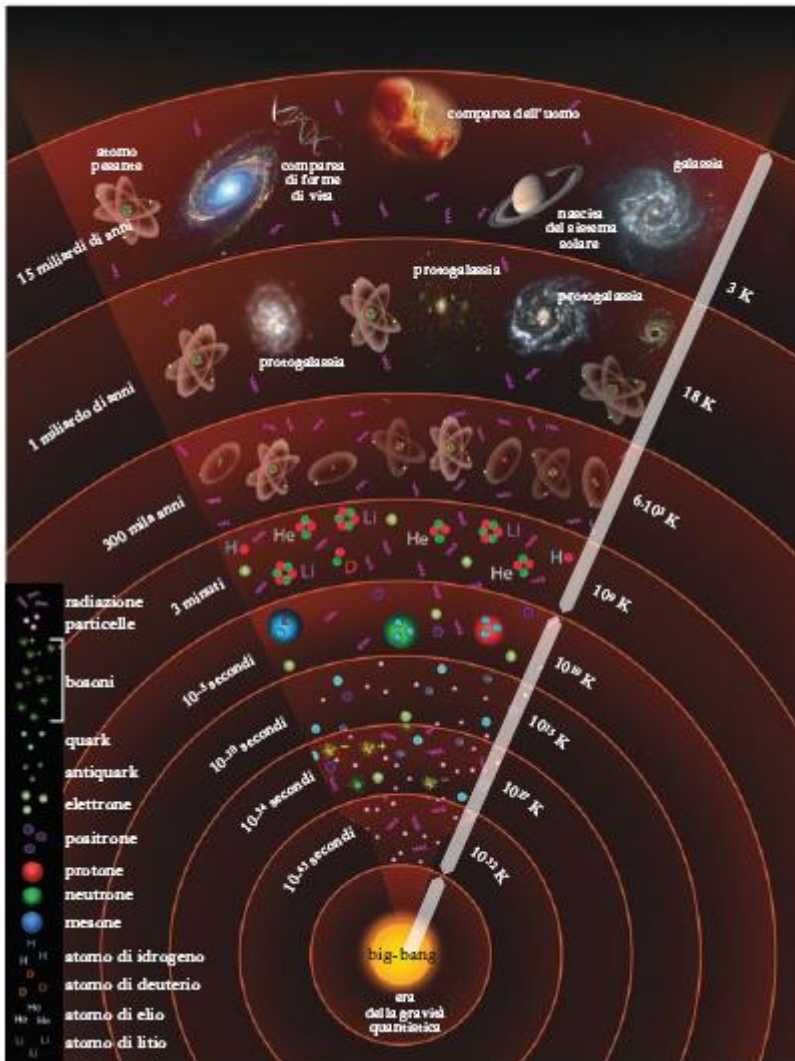


fig.1 Evoluzione dell'Universo a partire dal Big Bang iniziale: sono rappresentate la scala dei tempi (a sinistra) e quella delle temperature

Fu un astronomo britannico di nome Fred Hoyle a utilizzare per primo l'espressione Big Bang. Hoyle se ne servì in senso ironico: riteneva infatti che l'ipotesi di un'esplosione improvvisa fosse «disperatamente lontana dal vero». Hoyle insieme ai colleghi austriaci Hermann Bondi e Thomas Gold – con i quali durante la Seconda guerra mondiale aveva lavorato al perfezionamento degli apparecchi radar – presentò il modello di Universo in stato stazionario, contrapposto a quello dell'Universo in evoluzione. Nel modello di Hoyle – che rappresentò l'ultimo tentativo di salvare l'idea dell'immobilismo cosmico – l'Universo non ha data di nascita perché esiste da sempre.

LA RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

La teoria di Hoyle subì una decisiva sconfitta quando due tecnici statunitensi della Bell telephone company, Arno Penzias e Robert Wilson, scoprirono casualmente – mentre mettevano a punto una sensibile antenna destinata a ricevere i segnali emessi dai

satelliti artificiali – un disturbo radio costante, presente in qualsiasi direzione puntassero la loro antenna. Pensarono perfino che il disturbo dipendesse dalla presenza di una coppia di piccioni sull'antenna, ma non era così. Avevano invece scoperto la radiazione cosmica di fondo prevista dalla teoria del Big Bang, il residuo di energia prodotto dall'esplosione dalla quale è nato l'Universo, a circa 2,7 K (kelvin).

La radiazione individuata da Penzias e Wilson, infatti, non poteva essere associata a stelle, galassie o ammassi di galassie, ma era coerente a un fenomeno cosmologico come l'origine dell'Universo. Grazie a questa scoperta Penzias e Wilson ottennero il premio Nobel per la fisica nel 1978.

Un'altra conferma alla teoria del Big Bang, oltre all'espansione dell'Universo e alla scoperta della radiazione cosmica di fondo, proviene dalla misurazione dell'abbondanza degli elementi chimici deuterio ed elio presenti nell'Universo, in linea con le quantità previste dalla teoria del Big Bang. La prima mappa globale della radiazione cosmica di fondo fu effettuata nel 1989 dal satellite COBE (COsmic Background Explorer), che mise in luce la presenza in essa di debolissime fluttuazioni di temperatura, e dunque di densità. La materia primordiale non era cioè distribuita in modo omogeneo. Queste piccole disomogeneità, chiamate fluttuazioni primordiali, grazie alla forza di attrazione gravitazionale, si sono evolute nel corso della vita dell'Universo, fino a dare origine alle strutture odierne, cioè le stelle e le galassie, che possiamo considerare distribuite uniformemente se consideriamo l'Universo su grande scala.

Ulteriori mappature delle fluttuazioni della temperatura della radiazione cosmica di fondo sono state effettuate successivamente nell'ambito delle missioni WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) nel 2003 e Planck, dal 2009 (figg. 2 e 3).

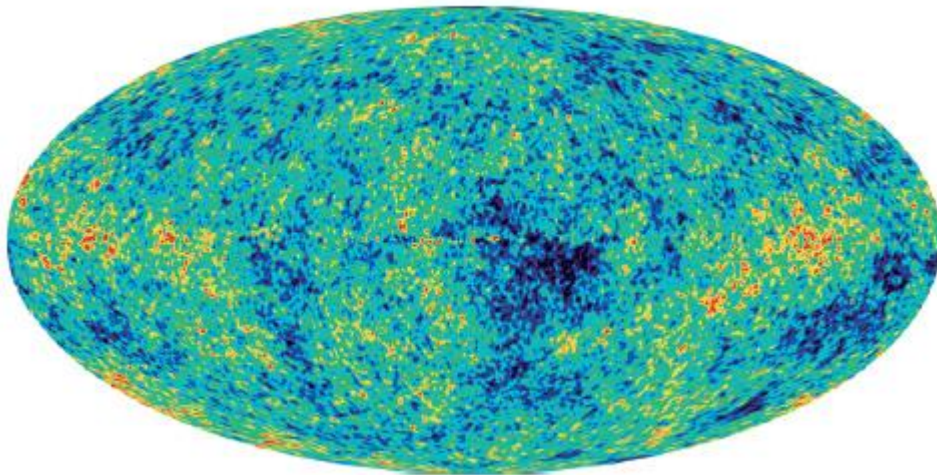


fig.2 Anisotropie nella radiazione di fondo cosmico rilevate dalla sonda WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) e corrispondenti, in falsi colori, alle variazioni termiche sussistenti circa 300.000 anni dopo il Big Bang. Le parti rosse indicano temperature un po' più alte, quelle blu temperature leggermente più basse.

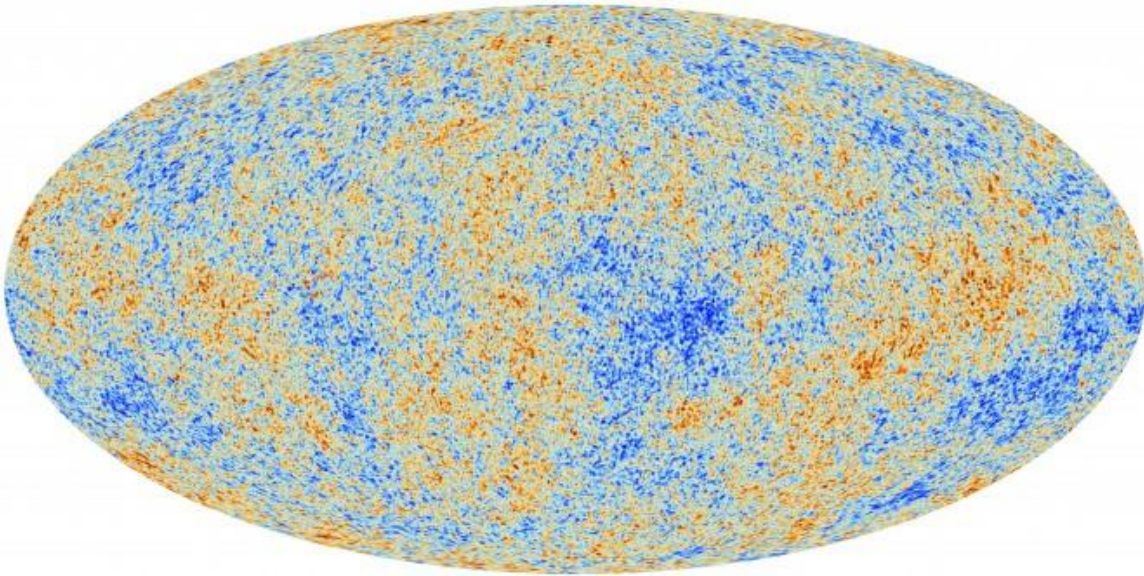


fig.3 La mappa della anisotropie della radiazione cosmica di fondo ottenuta dai dati di Planck (ESA). Le parti rosse indicano temperature un po' più alte, quelle blu temperature leggermente più basse.

Un altro esperimento che ha consentito di raffinare le nostre conoscenze sull'origine dell'Universo è stato BOOMERanG (Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics), mediante osservazioni effettuate dal 1997 al 2003 da un telescopio sospeso a un pallone aerostatico, che ha confermato la presenza di microonde e onde radio nell'Universo primordiale e la cosiddetta teoria dell'inflazione, secondo la quale subito dopo il Big Bang l'Universo ha attraversato una fase brevissima di espansione cosmica molto rapida. Tale fase risolve alcuni problemi legati alla teoria del Big Bang, tra cui il fatto che l'Universo quasi euclideo nel quale viviamo è una soluzione fisicamente inspiegabile: una sia pur microscopica deviazione dalle corrette condizioni iniziali avrebbe portato a un collasso o a una rarefazione quasi totale della materia in tempi rapidissimi. Il problema dell'orizzonte, poi, è legato al fatto che l'Universo possiede le stesse proprietà (per es., densità di materia, temperatura di fondo cosmico, abbondanza relativa degli elementi) in punti che non hanno mai avuto contatto causale nel loro passato, tali cioè da essere separati da una distanza superiore a quella che la luce ha potuto percorrere.

La fase primordiale di espansione cosmica accelerata, anziché rallentata, proposta dalla teoria dell'inflazione, può risolvere entrambi i problemi: tale espansione rende stabile l'Universo euclideo e permette processi fisici a distanza molto maggiore rispetto alla cosmologia standard, capaci di omogeneizzare la materia su tutto lo spazio.

LA LEGGE DI HUBBLE

Pensiamo alla sirena di un'ambulanza. Quando il veicolo si avvicina il suono della sirena è più acuto di quando l'ambulanza invece si allontana. Il fenomeno prende il nome di effetto Doppler e può essere generalizzato dicendo che il suono emesso da una sorgente in avvicinamento rispetto a un osservatore ha una frequenza maggiore del suono della stessa sorgente in allontanamento rispetto all'osservatore (fig.4).

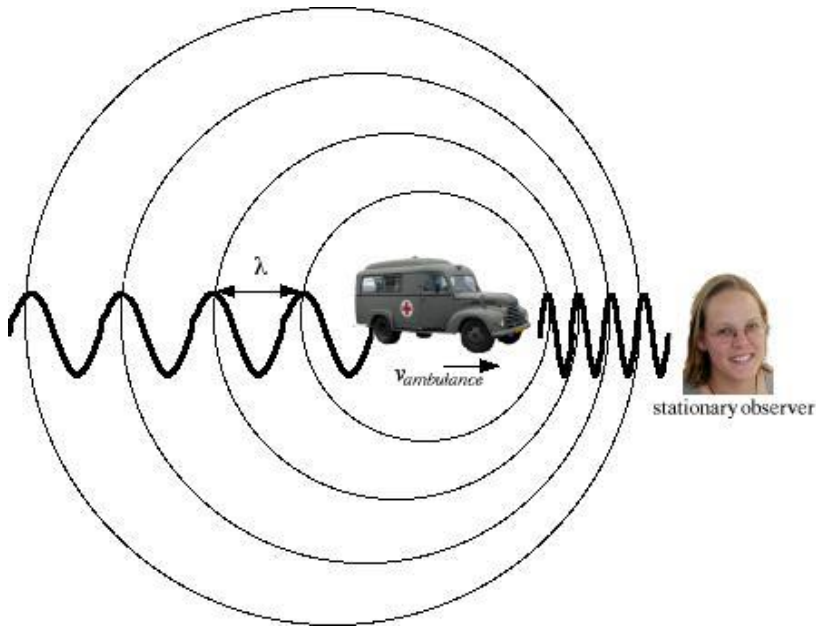


fig.4 Rappresentazione schematica dell'effetto Doppler

Qualcosa di simile avviene anche alla luce. Se una sorgente di luce si avvicina, la luce tende ad assumere una colorazione blu – che corrisponde a una frequenza maggiore – mentre quando la sorgente di luce si allontana la luce assume una colorazione che si sposta verso il rosso, che ha una frequenza minore. Studiando lo spettro (spettroscopia) della luce

emessa dalle galassie, gli astronomi hanno rilevato uno spostamento verso il rosso, una prova del loro allontanamento. Se tutte le galassie si stanno allontanando, questo fatto vuol dire che l'Universo si sta espandendo.

La legge che lega la velocità di allontanamento alla distanza di una galassia prende proprio il nome di legge di Hubble (fig.5), dal nome dell'astronomo che la scoprì negli anni Venti del Novecento.

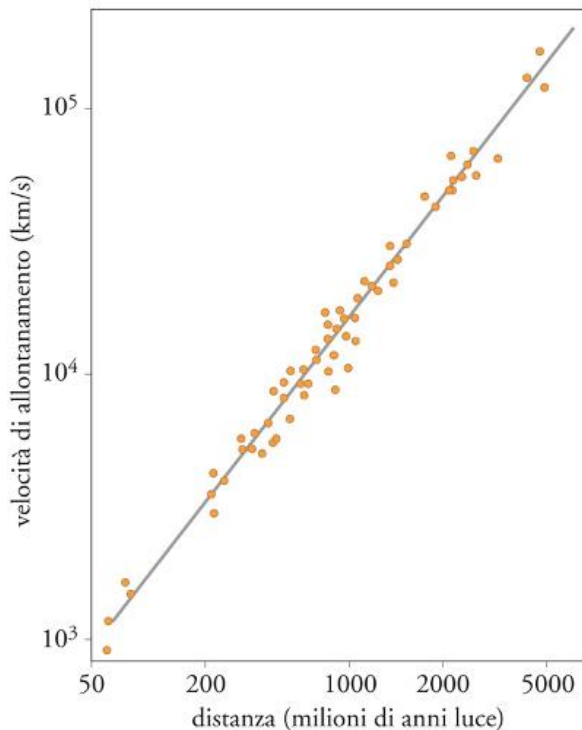


fig.5 Rappresentazione grafica della legge di Hubble $v=Hd$, secondo la quale tutte le galassie sembrano allontanarsi da noi con velocità v tanto più elevata quanto maggiore è la loro distanza d .

Secondo questa legge esiste una proporzionalità diretta tra lo spostamento verso il rosso (redshift, fig.5a) delle righe di spettrali della luce proveniente dalle galassie e la distanza delle galassie stesse. La costante che esprime tale proporzionalità è chiamata costante di Hubble ed è un valore che esprime la rapidità con cui l'Universo si espande e dal quale pertanto si può ricavare l'età dell'Universo, che può stimarsi attualmente in circa 13,7 miliardi di anni.



fig.5a Esempio di spostamento verso il rosso (redshift) o verso il blu (blueshift) delle righe spettrali della luce delle galassie

Per capire cosa succede alle galassie durante l'espansione dell'Universo possiamo utilizzare un palloncino e un pennarello indelebile. Gonfiamo leggermente il palloncino, disegniamo due puntini sulla sua superficie, indichiamo con A uno dei puntini e con B l'altro e misuriamo la distanza tra A e B. Chiamiamo C un altro puntino vicino ai primi due e misuriamo poi la distanza fra A e C. Gonfiamo il palloncino fino a quando la distanza fra A e B non raddoppia e poi misuriamo la distanza fra A e C: ci accorgeremo che anch'essa è raddoppiata in accordo alla legge di Hubble. Il risultato non cambia qualunque sia il punto di partenza.

Questo gioco dimostra quindi che non esiste un punto di osservazione privilegiato. Supponendo che ogni volta che gonfiamo il palloncino impieghiamo un secondo, possiamo calcolare la velocità come spazio - distanza fra due punti - diviso tempo e costruire un grafico che rappresenta la legge di Hubble. In altre parole ogni osservatore, in qualsiasi punto dell'Universo si trovi, vede lo stesso tipo di espansione perché ciò che si espande non è l'Universo, ma lo spazio che contiene le galassie.

L'ESPANSIONE ACCELERATA

Mentre BOOMERANG esplorava il cielo dell'Antartide, fu annunciata una scoperta destinata a costituire non soltanto una delle rivoluzioni più profonde nello sviluppo della cosmologia moderna, ma anche della fisica fondamentale. La scoperta si basa sulla determinazione dell'espansione dell'Universo fatta misurando la distanza di oggetti che possono definirsi candele campione, perché caratterizzati dalla medesima luminosità intrinseca. Risulta evidente che per tali oggetti, nota la luminosità apparente e quella intrinseca e sapendo che l'intensità luminosa decresce in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza, quest'ultima risulta perfettamente determinata. Poiché era inoltre necessario osservare a grandi distanze, occorre scegliere oggetti intrinsecamente molto brillanti. Questi potentissimi indicatori di distanza furono individuati nelle supernovae, stelle che alla fine della loro evoluzione esplodono diventando anche dieci miliardi di volte più brillanti del Sole, con una luminosità di poco inferiore a quella della stessa galassia a cui appartengono.

Ci sono supernovae di diversi tipi a seconda che rappresentino lo stato finale di stelle massive oppure di stelle di massa piccola. Particolarmente adatte all'osservazione cosmologica sono le cosiddette supernovae di tipo Ia (SNIa), formate dall'esplosione di nane bianche, che acquisiscono massa in sistemi stellari binari. La luminosità massima delle SNIa non è proprio sempre la stessa, ma si è potuto dimostrare che quelle brillanti diminuiscono di splendore nelle prime due settimane dopo l'esplosione in modo più lento di quelle deboli. Misurando quindi la rapidità di declino della luce si

risale alla luminosità della supernova al suo massimo e si dispone pertanto di un preciso e potente indicatore di distanza.

Al fine di poter determinare come si espande l'Universo a grandi distanze, si sono formati due gruppi internazionali di ricerca, l'High-Z SN Search e il Supernovae Cosmology Project, che, utilizzando i maggiori telescopi, sia terrestri sia spaziali, hanno prodotto i primi risultati nel 1998.

Da allora le supernovae, che costituiscono un fenomeno raro in una singola galassia (l'ultima apparve nella nostra galassia nel 1604 e fu osservata da Galileo e Keplero) sono state scoperte al ritmo di più di 100 l'anno e parecchie decine sono sufficientemente lontane per darci l'indicazione su come si espande l'Universo. Le osservazioni a partire dal 1998 avevano messo in evidenza che supernovae lontane apparivano più deboli di quello che ci si aspettava se la distanza fosse stata quella indicata dalla loro velocità di recessione, dovuta all'espansione dell'Universo, nell'ipotesi che questa fosse di tipo decelerato come fino ad allora si pensava. Il fatto che fossero più deboli significava che la loro distanza era più grande e questo era compatibile solo se l'Universo, anziché essere frenato nel suo moto di espansione dall'azione gravitazionale della materia, fosse accelerato. Un fatto di enorme portata che non era mai stato seriamente considerato prima. Un'analisi più accurata, compiuta successivamente, ha permesso di accertare l'andamento di questa accelerazione: supernovae ancora più lontane delle precedenti, esplose 10 miliardi di anni fa quando l'Universo era ancora relativamente giovane, indicano infatti un'espansione decelerata. Se ne conclude che l'Universo abbia trascorso i primi 9 miliardi in una fase di espansione con velocità decrescente, e che solo 5 miliardi di anni fa sia iniziato quel moto per cui la sua velocità di espansione è in continuo aumento nel tempo.

IL DESTINO DELL'UNIVERSO

Le conseguenze della legge di Hubble sono che, percorrendo all'indietro l'espansione dell'Universo, questo dovrebbe avere avuto inizio da un punto, in un'epoca tanto più remota quanto più lenta è la velocità d'espansione e quindi quanto più piccolo è il valore di H . Questa semplice estrapolazione indicherebbe che l'Universo ha avuto inizio con volume zero, temperatura e densità infinite, e cioè da quella che in matematica viene definita una singolarità, ma che non ha senso fisico. Fino alla scoperta dell'espansione accelerata dell'Universo, si riteneva che la stessa gravità esercitata dalla materia presente nell'Universo avrebbe avuto l'effetto di rallentare l'espansione. A seconda della densità della materia presente nell'Universo, si sarebbero potuti avere diversi casi. Si definisce velocità critica all'inizio dell'espansione quella per cui le forze di espansione e di gravitazione si bilanciano esattamente. Questa condizione si verifica per una certa densità, detta densità critica. Si usa indicare con Ω_0 il rapporto fra la densità osservata e la densità critica. Se la velocità è maggiore di quella critica, e quindi $\Omega_0 < 1$, la gravitazione non può arrestare l'espansione, se invece è minore, e quindi $\Omega_0 > 1$, l'espansione finirà per arrestarsi e si avrà una fase di contrazione (fig. 6).

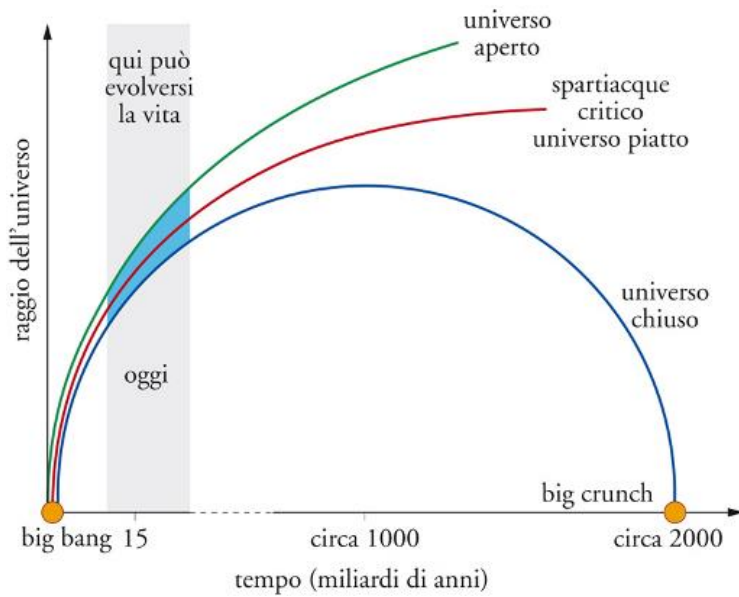


fig.6 Velocità di espansione in funzione del tempo per un universo aperto iperbolico, aperto piatto, chiuso

Si può fare l'analogia con un razzo lanciato dalla Terra a una velocità superiore o inferiore alla velocità di fuga. Le osservazioni indicano che la velocità di espansione è molto vicina a quella critica, per cui sembrava difficile stabilire quale sarebbe stato il futuro del nostro Universo. Con la scoperta che la velocità di espansione dell'Universo non va decelerando, bensì accelerando, come se ci fosse una

forza sconosciuta (chiamata energia oscura) che si oppone alla forza di gravità, il futuro dell'Universo sembra quello di un'espansione all'infinito, in uno spazio sempre più freddo e vuoto.

Dopo una prima fase di rallentamento, quando l'energia gravitazionale della materia era dominante, l'Universo ha iniziato ad accelerare, qualche miliardo di anni fa, nel momento in cui con l'espansione la materia è diventata più rarefatta e la sua attrazione gravitazionale si è indebolita lasciando prevalere l'energia oscura. In futuro, spinto da tale energia, se resterà costante o addirittura aumenterà, lo spazio si espanderà e si svuoterà sempre più: con il passare del tempo la nostra galassia rimarrà isolata da tutte le altre, che, a mano a mano, scompariranno dall'orizzonte cosmico.