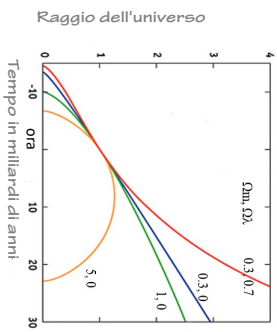
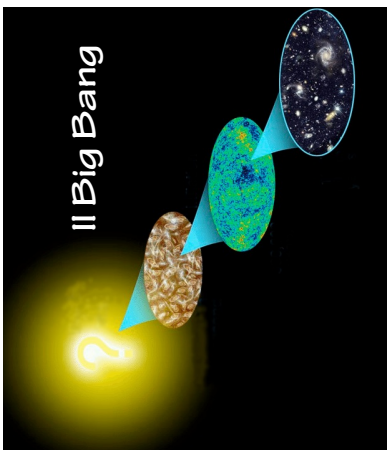


**Evoluzione del raggio dell'Universo**, secondo diversi modelli cosmologici per diversi valori della densità di materia ( $\Omega_m$ ) e della densità dell'energia dell'Universo ( $\Omega_\Lambda$ ). L'evoluzione dell'Universo è legata al valore di  $\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda$ . Se  $\Omega = 5$ , l'Universo si ricondenserà in un Big-Crunch (curva gialla). Se l'Universo ha curvatura zero ( $\Omega = 1$ ) o negativa ( $\Omega = 0,3$ ), l'espansione si estenderà all'infinito (curve verde e blu).

Le osservazioni attuali portano alla curva rossa. La curvatura è zero, e l'espansione accelera.



## L'universo tascabile



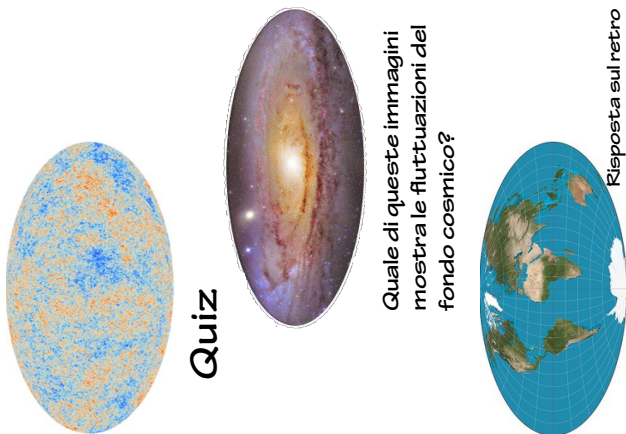
Françoise Combes  
Osservatorio di Parigi



**La costante cosmologica**

Nel 1915, Albert Einstein pubblicò le equazioni della relatività generale, che collegano la geometria dell'universo alla quantità di materia ed energia che contiene. Per rendere conto di un universo statico (cosa che si credeva all'epoca), aveva aggiunto un termine chiamato costante cosmologica,  $\Lambda$ . Quando nel 1929 divenne chiaro che l'Universo è in espansione, Einstein dichiarò che l'introduzione di  $\Lambda$  era il più grande errore della sua vita.

Per la maggior parte del XX secolo,  $\Lambda$  è stato ignorato. Ma nel 1998, usando le supernovae di tipo Ia, che sono indicatori di distanza più potenti delle Cefeidi, due gruppi di osservatori hanno scoperto che l'espansione dell'Universo sta accelerando. Hanno ricevuto il premio Nobel nel 2011.



Risposta sul retro

**L'orizzonte dell'Universo osservabile.** Tutti gli osservatori sono al centro di una sfera che rappresenta il loro Universo osservabile. Non possono osservare oltre questo orizzonte. Le galassie che possono esistere oltre questo orizzonte non hanno avuto il tempo di comunicare con gli osservatori perché i loro fotoni, viaggiando alla velocità della luce, non hanno avuto abbastanza tempo per raggiungere gli osservatori.



## L'orizzonte dell'universo

Oggi possiamo ripercorrere l'intera storia dell'Universo, a partire dal Big Bang (vedi p. 10). Numerose osservazioni confermano questo modello cosmologico, e gli astronomi hanno esplorato gran parte dell'Universo osservabile. Non possono osservare oltre una certa distanza, naturalmente, perché i segnali che arrivano sulla Terra non possono viaggiare più velocemente della luce, la cui velocità è di 299.792 km/s. Quindi, osservare oggetti lontani è come andare indietro nel tempo. I fotoni che riceviamo oggi dalle galassie primordiali sono stati emessi da 12 a 13 miliardi di anni fa. Così, vediamo queste galassie come erano in gioventù. Quando osserviamo i fotoni del fondo cosmico, stiamo guardando indietro nel tempo di 13,8 miliardi di anni (vedi pagina accanto).

**La radiazione fossile**

A causa della sua espansione, l'Universo si raffredda. Oggi la sua temperatura è solo 3 gradi sopra lo zero assoluto (3 K o -270°C). L'Universo è immerso nella radiazione a questa temperatura, che è una reliquia del Big Bang.

Questa radiazione è stata rilevata per caso nel 1965 dai radio-astronomi Arno Penzias e Bob Wilson che stavano lavorando su ricevitori a microonde.

Incuriositi da un debole segnale proveniente da tutte le direzioni, si consultarono con l'astrofisico Robert Dicke e i suoi colleghi, che suggerirono che si trattava della radiazione fossile del Big Bang. Per questa scoperta Penzias e Wilson ricevettero il premio Nobel nel 1978.



Penzias & Wilson

## Il Big Bang

Se l'Universo è in espansione, allora all'inizio era necessariamente molto denso e molto caldo.

L'astronomo Fred Hoyle non amava questo modello cosmologico. Per prenderlo in giro, in un programma della BBC nel 1949 lo chiamò **Big Bang**. E questo è il nome che è rimasto!

Uno dei primi argomenti a favore del Big Bang fu proposto nel 1948 da George Gamow e dal suo studente Raif Alpher. Essi dimostrarono che solo sotto le estreme condizioni di densità e temperatura del Big Bang si potrebbero formare elio, deuterio e litio, nelle quantità che si osservano ora nell'Universo.



Fred Hoyle

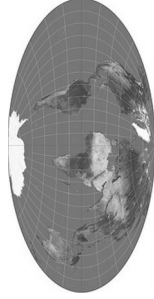


G. Gamow



Per saperne di più su questa serie e sugli argomenti presentati in questo libretto, visita <http://www.tumip.org>

## Risposte



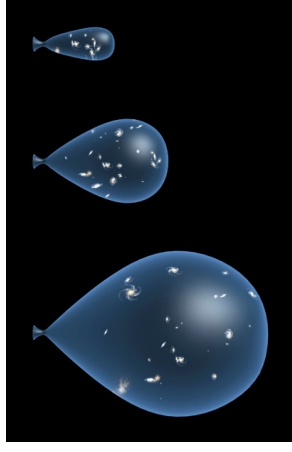
Mappe dei continenti e degli oceani della Terra.



Immagine ottica della galassia di Andromeda M31



Fluttuazioni cosmiche di fondo

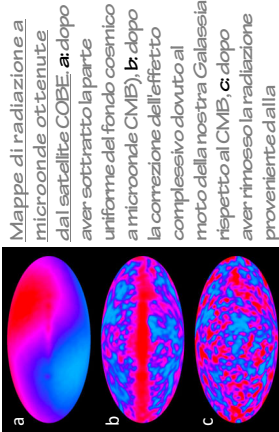


L'Universo è un po' come la superficie di un palloncino che si gonfia su cui sono disegnate le galassie. Ogni osservatore in una data galassia ha l'impressione che tutte le altre galassie si stiano allontanando, con una velocità proporzionale alla loro distanza. Nel 1915, Vesto Slipher studiò gli spettri delle nebulose a spirale e scoprì che la maggior parte di esse mostrano linee spettrali spostate verso il rosso, il che indica che si stanno allontanando dalla Terra\*. Questa fu la prima prova - non ancora riconosciuta all'epoca - dell'espansione dell'Universo (vedi pagina a fianco).

\*Vedere TUMIP 10.

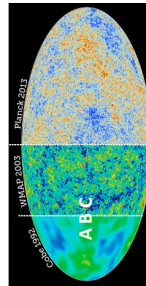
## L'espansione dell'Universo

Come si sono formate le galassie? Un secolo fa se ne sapeva poco, nemmeno se esistessero galassie oltre alla nostra, la Via Lattea. Nel 1908, Henrietta Leavitt mostrò che per le Cefeidi - un tipo di stella a luminosità variabile - l'intervallo di tempo tra due massimi successivi è legato alla loro magnitudine assoluta  $M$  (relazione periodo-luminosità). Nel 1925, quando Edwin Hubble identificò le Cefeidi nelle **nebulose a spirale**, fu in grado di stimare le loro distanze e dimostrare che sono al di fuori della Via Lattea. Le nebulose a spirale da allora sono state chiamate **galassie**. Nel 1927 Georges Lemaitre capì che la "fuga" delle galassie è un effetto dovuto all'espansione dello spazio. Nel 1929, Hubble stabilì la relazione tra la distanza e la velocità di volo delle galassie. Questa relazione cruciale, prima chiamata legge di Hubble, è stata rinominata legge di Hubble-Lemaitre nel 2018.



Mappe di radiazione a microonde ottenute dal satellite COBE, a) dopo aver sottratto la parte uniforme del fondo cosmico a microonde (CMB), b) dopo la correzione dell'effetto complessivo dovuto al moto della nostra Galassia rispetto al CMB, c) dopo aver rimosso la radiazione proveniente dalla Via Lattea e dalle galassie vicine, scopriamo finalmente le minuscole fluttuazioni della CMB (1/100.000 di ampiezza), cioè lo stato dell'Universo durante la ricombinazione.

Il fondo diffuso osservato da COBE nel 1992 (A), da WMAP nel 2003 (B) e dal satellite Planck lanciato da NASA ed ESA nel 2013 (C).

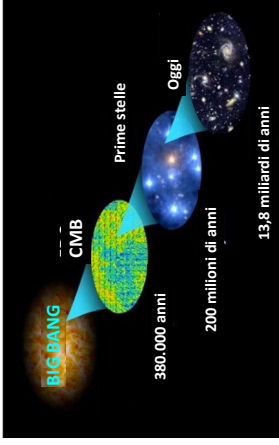


Ogni missione rivela più dettagli.

## Energia oscura

L'espansione doveva essere decelerata dall'attrazione gravitazionale di tutta la materia nell'Universo.

Se l'espansione accelera, come pensiamo ora, significa che c'è un'altra componente che esercita una forza repulsiva. Questo è il ruolo che gioca la costante cosmologica. Questa componente è chiamata **energia oscura**. Essa renderebbe compatibili tutte le osservazioni, come la curvatura e l'età dell'Universo (che non può essere inferiore all'età delle stelle più vecchie). Resta da scoprire la natura di questa energia oscura. La storia dell'Universo come lo intendiamo oggi è descritta a pag. 10 e il suo destino è schematizzato a pag. 8.



Una storia semplificata dell'Universo:

- Durante i primi minuti: il Big Bang, e la formazione delle particelle elementari e della radiazione.
- Dopo 380.000 anni, ricombinazione di protoni ed elettroni in atomi di idrogeno.
- Dopo 200 milioni di anni, formazione delle prime stelle nelle prime galassie e progressiva reionizzazione dell'Universo.
- Infine, fino ad oggi, la trasformazione delle galassie per fusione di galassie più piccole.

## Fluttuazioni primordiali

La radiazione fossile del Big Bang, scesa a 3 gradi Kelvin a causa dell'espansione, fu emessa quando l'Universo era ancora denso e caldo, 380.000 anni dopo il Big Bang. L'Universo fu allora attraversato da onde che lasciarono la loro impronta sul fondo cosmico a microonde. Queste sono le **fluttuazioni primordiali** - i semi delle galassie (vedi pagina 6).

Quando la temperatura dell'Universo scese sotto i 3000 K, i protoni si ricombinarono con gli elettroni per formare atomi di idrogeno. Gli studi statistici sulle fluttuazioni mostrano che l'Universo contiene il 5% di barioni (la materia oscura e il 70% di **energia oscura**, ed indicano anche che l'Universo è geometricamente piatto e che sono passati 13,8 miliardi di anni dal Big Bang.