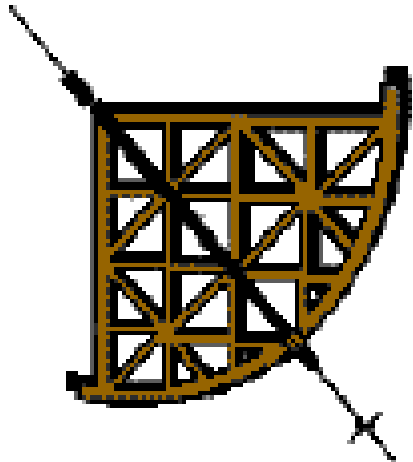


Introduzione alla Cosmologia

Fisica

Lezione 15

I modelli cosmologici moderni: Lo stato stazionario vs Il modello del Big Bang



Giorgio G.C. Palumbo
Università degli Studi di Bologna
Dipartimento di Astronomia



L'Universo di Newton

- Per prevenire il collasso
 - Omogeneo
 - Isotropo
 - Dimensioni infinite
 - Nessun centro
 - infinito nel tempo
 - C'è sempre stato
 - Ci sarà per sempre
- ⇒ Principio cosmologico perfetto

Il principio cosmologico perfetto

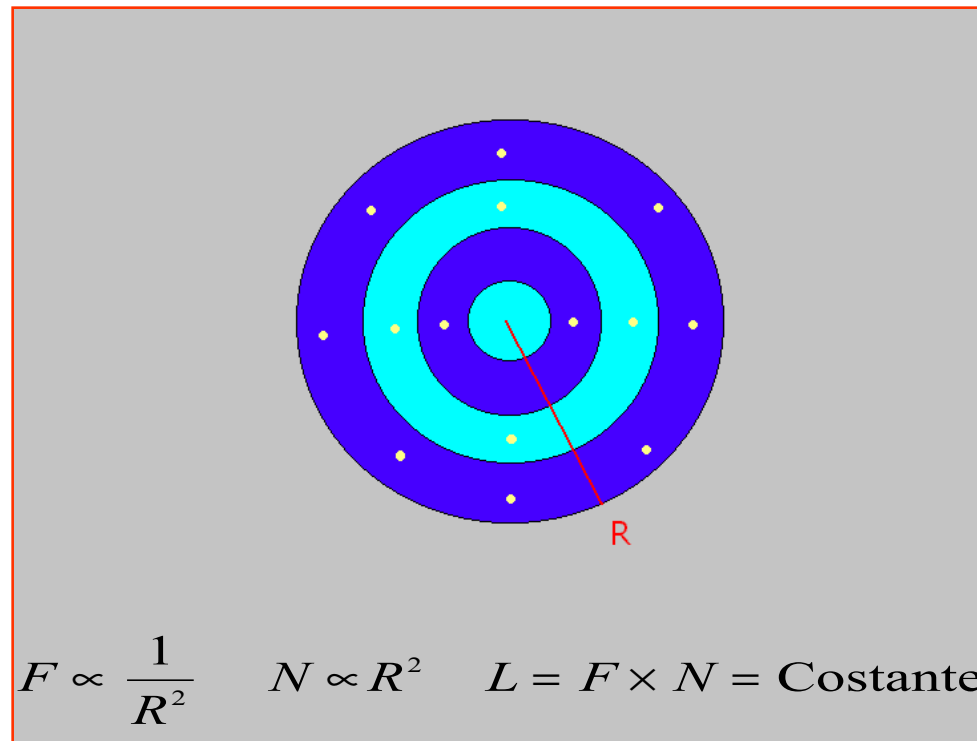
- **omogeneo**: l'Universo su grande scala appare lo stesso
⇒ non c'è un posto speciale (centro)
- **isotropo**: l'Universo appare lo stesso in tutte le direzioni nel cielo
⇒ non esistono direzioni speciali (assi)
- **immutabile**: l'Universo appare lo stesso in ogni epoca
⇒ non esistono epoche speciali

Problemi della cosmologia newtoniana

- a) Come mai il cielo è buio di notte (paradosso di Olbers)?
- b) Come calcolare la forza di gravità esercitata in un punto (ad esempio su di noi) da tutte le stelle?

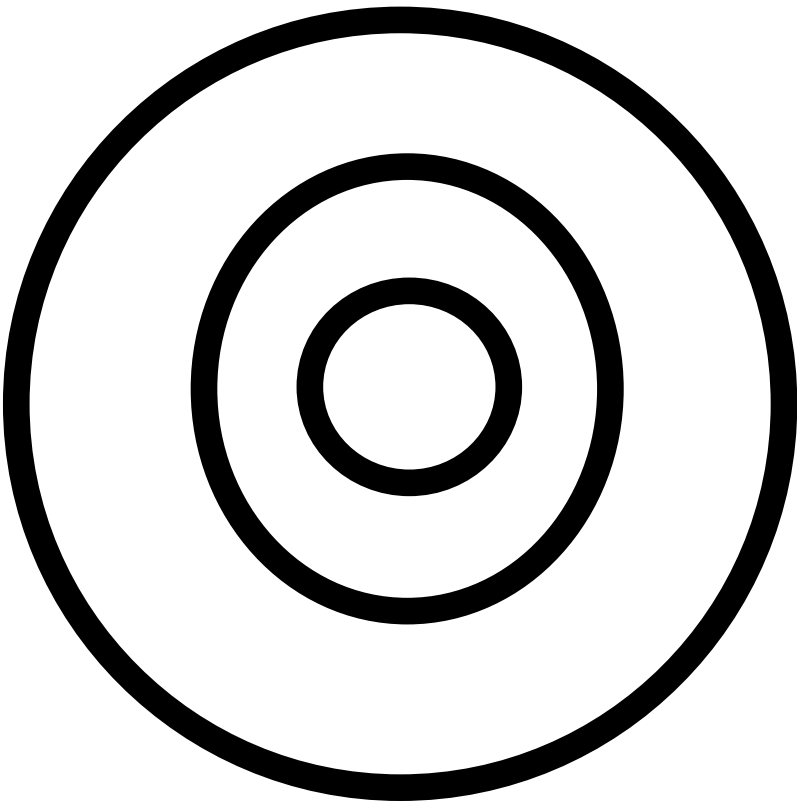
Il paradosso di Olbers

Nell'universo Newtoniano, la luce ricevuta da una stella diminuisce proporzionalmente all'inverso del quadrato della distanza, ma il numero di stelle cresce proporzionalmente al quadrato della distanza.



Problemi con un Universo infinito

- Paradosso di Olbers: Perché il cielo di notte è buio?



Guscio di raggio $r_3 = 2r_1$:

Superficie: $S_3 = 4\pi (2r_1)^2$

Volume: $V_3 = 4\pi (2r_1)^3 \Delta x$

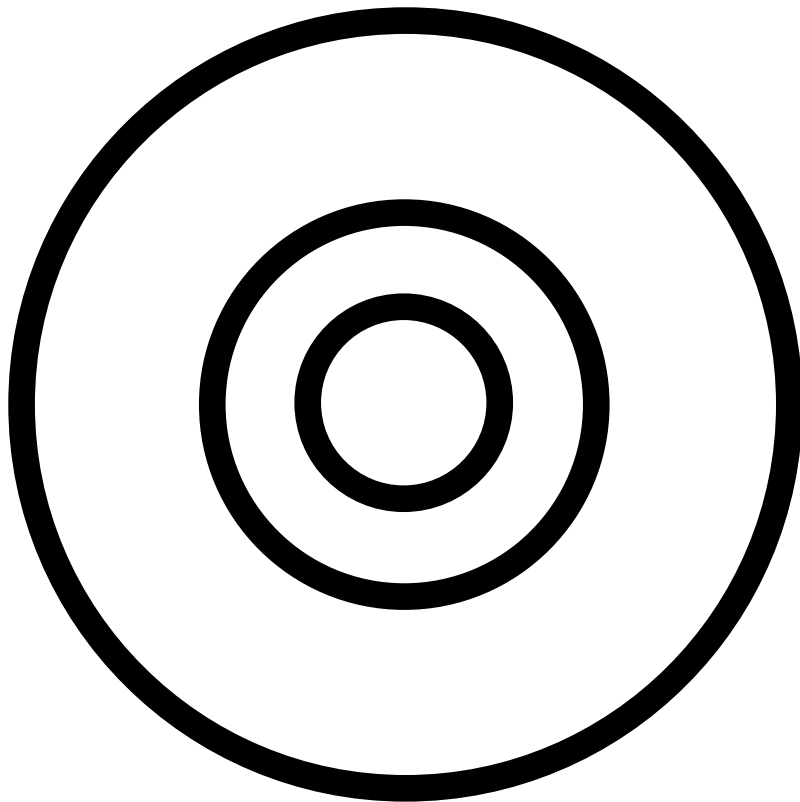
di stelle: $N_3 = 4\pi \xi (2r_1)^3 \Delta x$

luminosità per stella: $l_* / 16$

Luminosità del guscio:

$$L_3 = 4\pi \xi (2r_1)^3 \Delta x l_* / 16$$

$$= 4\pi \xi r_1^2 \Delta x l_* = L_1$$



Ciascun guscio contribuisce

$$L_1 = 4\pi \xi r_1^2 \Delta x l_*$$

Numero infinito di gusci

⇒ Luminosità infinita

Soluzione del paradosso di Olbers ?

- L'Universo è finito
- L'Universo ha una età finita
- La distribuzione delle stelle nello spazio non è uniforme
- La lunghezza d'onda della radiazione aumenta nel tempo.

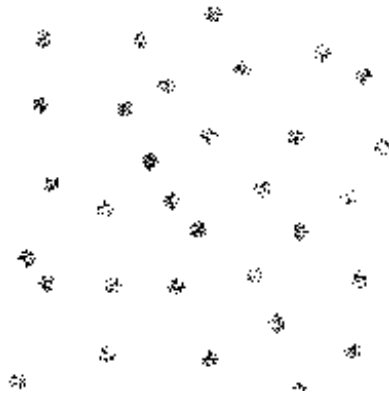
Nota: per il modello Big Bang, tutte queste condizioni sono soddisfatte

E la gravità in un universo infinito?

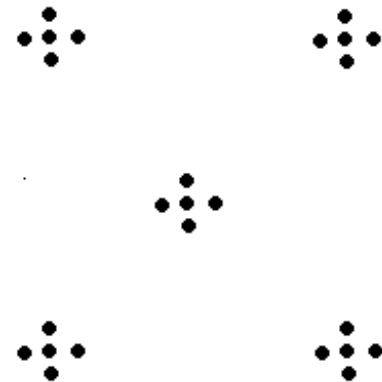
In un universo infinito e omogeneo, la forza di gravità newtoniana non può essere calcolata.

Il principio cosmologico

L'ipotesi che sta alla base dei modelli è che l'universo sia, su grande scala, omogeneo ed isotropo. Milne nel 1935 ha chiamato questa ipotesi «**principio cosmologico**» di Einstein.



Distribuzione omogenea



Distribuzione gerarchica

Il principio cosmologico è confermato?

Osservazioni



Metafisica



Isotropia + Principio Copernicano = Omogeneità

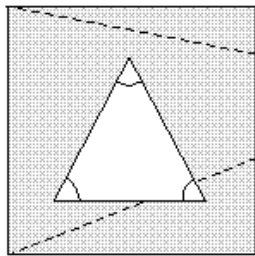
Metrica di Robertson-Walker:

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\vartheta^2 + \sin^2\vartheta d\phi^2) \right]$$

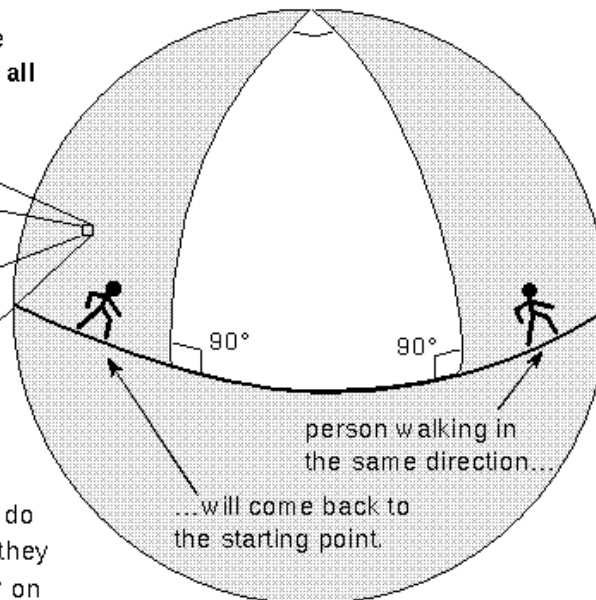
L'universo di Einstein

Nel 1917 Einstein propone il primo modello cosmologico relativistico. È omogeneo, statico, finito e illimitato. Necessita la presenza di una costante cosmologica (Λ) positiva: questa agisce come una forza repulsiva che controbilancia la gravità. Ma è una situazione instabile.

On small scales the surface looks flat. The angles of **small** triangles add up to 180° .

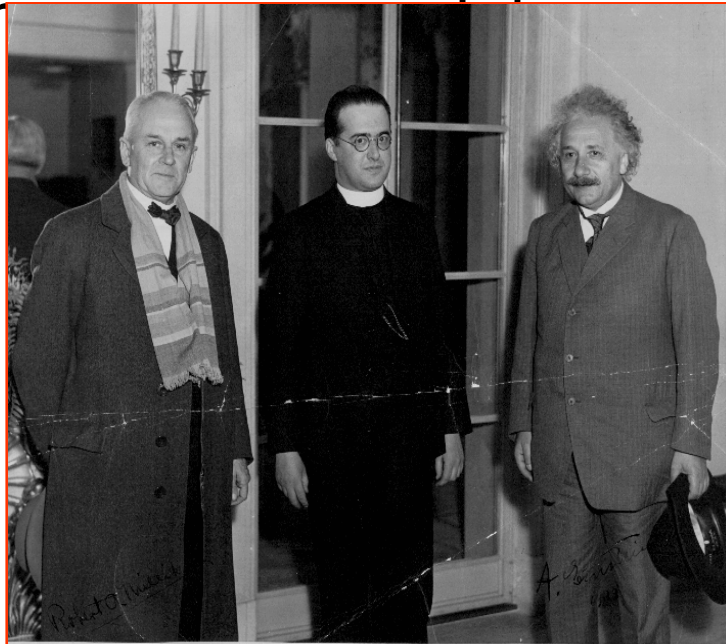


On a curved surface the angles in a **large** triangle do not add up to 180° (here they add up to more than 180° on this type of curved surface).



I modelli relativistici

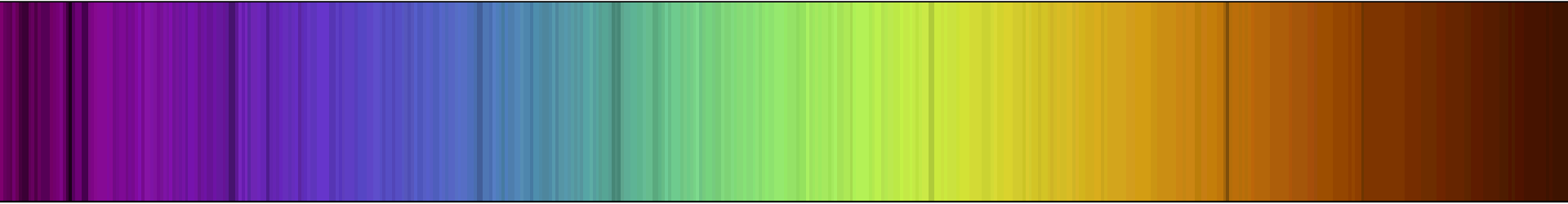
Negli anni successivi si scopre però che l'universo di Einstein è instabile. Il russo **Alexander Friedmann** (1922) indipendentemente il belga **Georges Lemaître** (1927) trovano le soluzioni alle equazioni della relatività generale che implicano un universo in espansione o in contrazione.



Millikan, Lemaître e Einstein a Pasadena (1933)

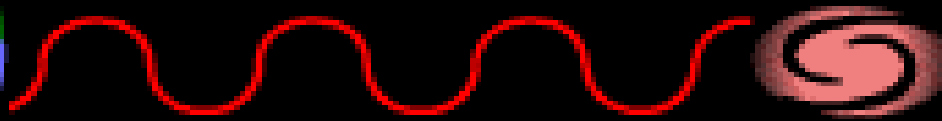
L'espansione dell'Universo

Il redshift



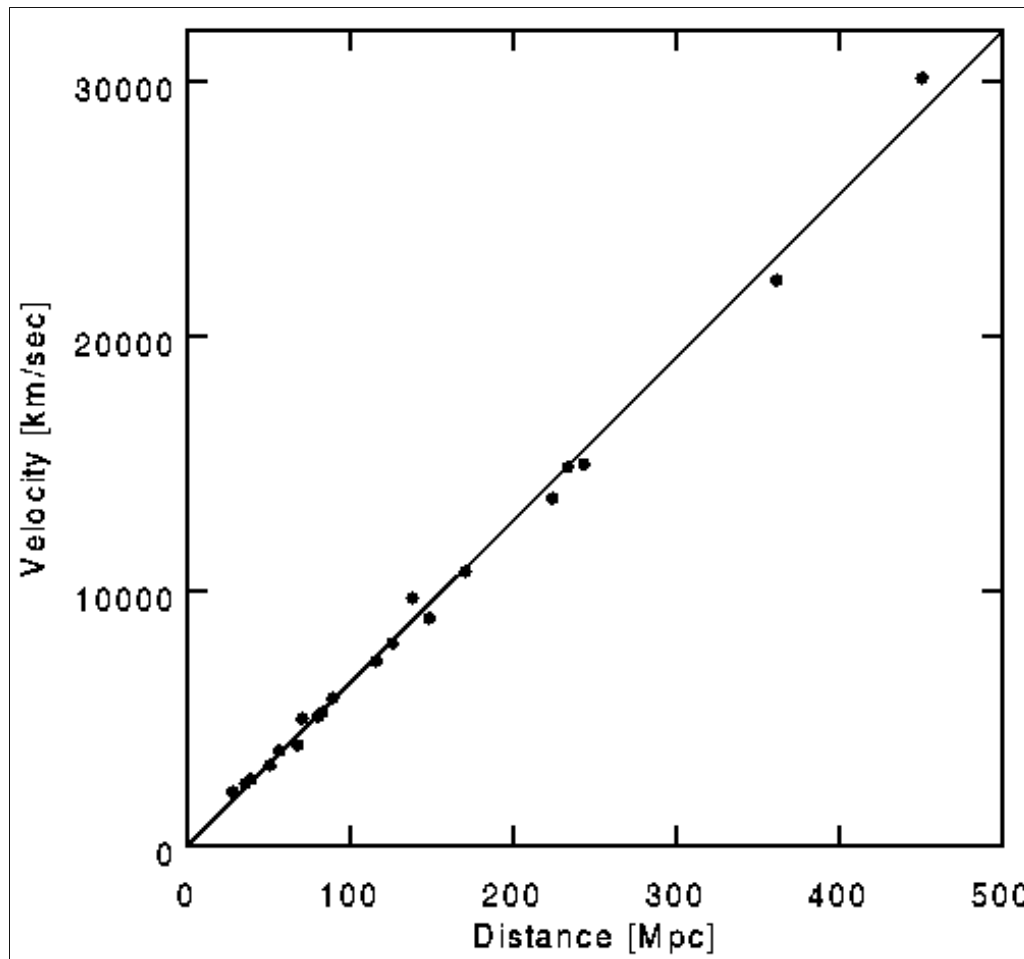
$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

Doppler classico



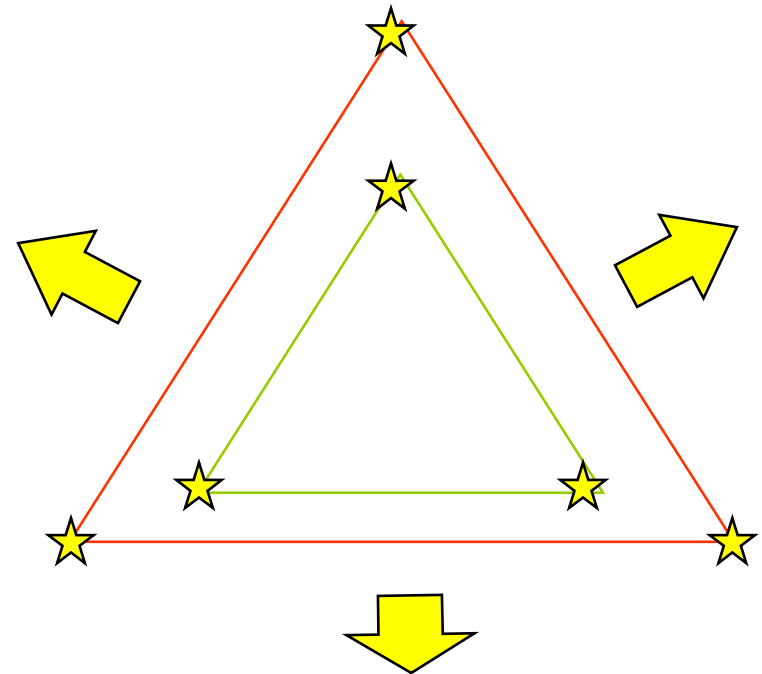
L'universo si espande

La velocità di allontanamento di una galassia è proporzionale alla sua distanza da noi (Hubble 1929): **$V = H \times D$**



Il significato dell'espansione

La legge di Hubble è una conseguenza della conservazione dell'omogeneità nel tempo.



Legge di Hubble

$$V = H \times D$$

Teorica : esatta se misurata allo stesso tempo cosmico t_c

$$c \times z \approx H_0 \times D \quad \Rightarrow \quad D \approx \frac{c}{H_0} \times z \quad \text{Approssimata : OK per piccole distanze}$$

$$D = \frac{c}{H_0} \times f(z)$$

Esatta : dipende dal modello

H è costante nello spazio, ma dipende dal tempo: $H(t)$.
Definiamo H_0 la costante di Hubble al tempo attuale.

Distanza di Hubble: $D_H = c/H_0$

Tempo di Hubble: $T_H = 1/H_0$

Con $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$, $D_H = 14$ miliardi di anni-luce
e $T_H = 14$ miliardi di anni

La teoria dello Stato Stazionario

Nel 1948, Hoyle, Bondi e Gold partirono dal presupposto che l'universo deve mantenere le stesse proprietà non solo in ogni punto dello spazio, ma anche nel corso del tempo:

Il **Principio Cosmologico Perfetto**

Affinché la densità sia costante occorre dunque la creazione continua di nuova materia.

Questa teoria è stata smentita dalle osservazioni: l'universo nel passato era diverso da come è oggi.

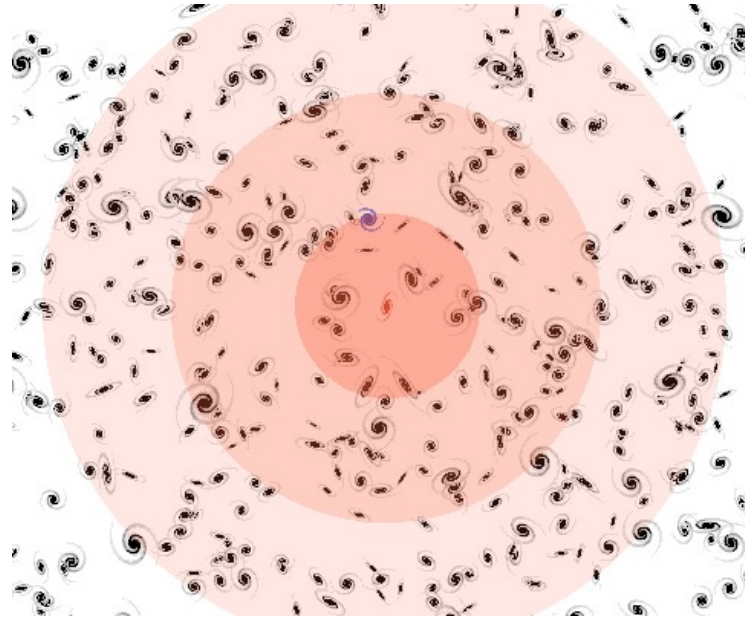


Georgy Gamov (1904-1968)



- Se l'Universo è in espansione ci deve essere stato un Big Bang
- Quindi l'Universo iniziale doveva essere molto denso e caldo
- Ambiente ottimale per fare gli elementi per mezzo della fusione nucleare (Alpher, Bethe & Gamow, 1948)
 - **Successo:** predice che l'abbondanza di Elio è 25%
 - **Fallimento:** non riproduce elementi più massivi del Litio e Berillio (\Rightarrow che si formano nelle stelle)

Il Big Bang



L'universo è nato circa 15 miliardi di anni fa in uno stato ad elevata densità e temperatura (secondo la relatività generale una singolarità iniziale con densità infinita). → *Big Bang*

I nuclei di idrogeno ed elio sono stati prodotti nei primi minuti

Il resto è stato sintetizzato all'interno delle stelle ed espulso nello spazio dalle esplosioni di supernova.

Errori tipici sul Big Bang

- a) Se tutto si espande, anche gli atomi, allora non ci accorgeremmo di nulla.
- b) Secondo la formula dell'effetto Doppler, quando il redshift è superiore all'unità la velocità di recessione della galassia è superiore a quella della luce. Bisogna forse usare la formula dell'effetto Doppler relativistico?
- c) L'universo è davvero nato da un punto? Dov'è il centro dell'espansione?

Espansione dell'universo



Nello spazio newtoniano, due particelle non soggette a forze rimangono nel loro stato di quiete o moto relativo.



Nel nostro universo, due particelle non soggette a forze si allontanano.



Se però le due particelle sono legate, come le galassie in un ammasso, allora esse non seguono l'espansione.

La struttura della materia

Periodic Table of the Elements

1											2						
H											He						
3											4						
Li											Be						
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112						
Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110	111	112						

Naming conventions of new elements

* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

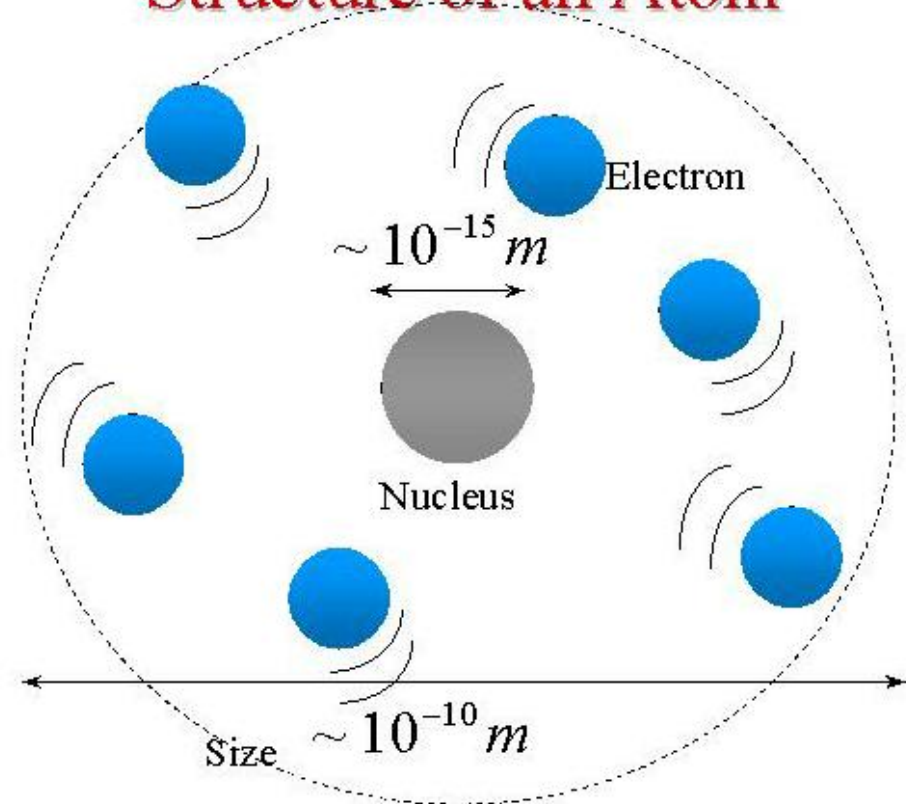
+ Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

- **Gli Atomi sono per gran parte spazio vuoto**
- **Atomi sono protoni (+), neutroni (o) ed elettroni (-)**
- **protoni e neutroni formano il nucleo atomico**

Structure of an Atom

- **# di protoni determina l'elemento**
- **Gli elettroni esterni determinano la chimica**



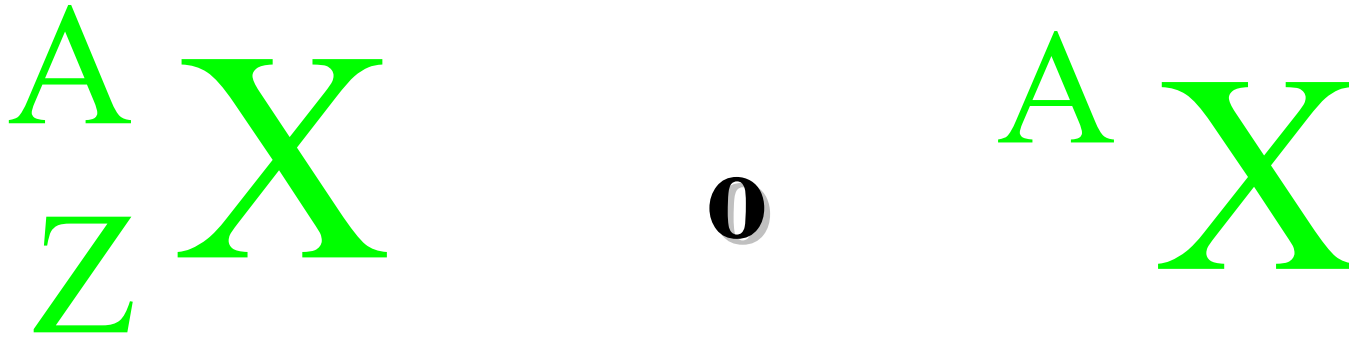
- **Neutroni e protoni sono molto simili, ma**
 - **Protoni sono elettricamente carichi, neutroni no**
 - **Neutroni hanno massa leggermente maggiore**
- **Elettroni sono meno massivi dei nucleoni**
⇒ gran parte della massa di un atomo è concentrata nel nucleo
- **Se cariche dello stesso segno si respingono, e il nucleo è fatto di protoni, perchè i protoni non si respingono ?**

Le quattro forze della natura

- Gravità
- Elettromagnetismo
- Forza nucleare forte
- **Tiene insieme i nuclei atomici**
- Forza nucleare debole
- **Decadimento di neutroni liberi in protoni**



Nomenclatura

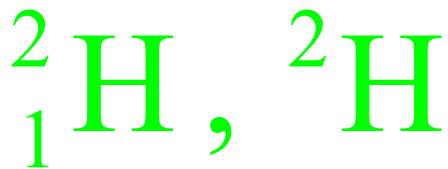


- **Z:** numero di protoni
- **A:** numero di nucleoni (protoni e neutroni)
- **N:** numero di neutroni ($=A-Z$)
- **X:** nome dell'elemento

Esempi



Idrogeno (1 protone, 0 neutroni)
 $\Rightarrow Z=1, N=0, A=1$

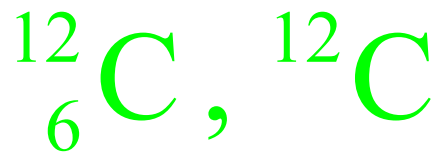


Deuterio (1 protone, 1 neutrone)
 $\Rightarrow Z=1, N=1, A=2$



Elio (2 protoni, 2 neutroni)
 $\Rightarrow Z=2, N=2, A=4$

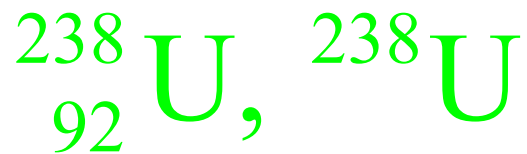
Altri esempi ...



Carbonio (6 protoni, 6 neutroni)
 $\Rightarrow Z=12, N=6, A=6$



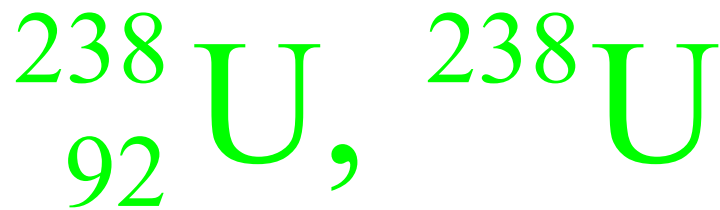
Ferro (26 protoni, 30 neutroni)
 $\Rightarrow Z=26, N=30, A=56$



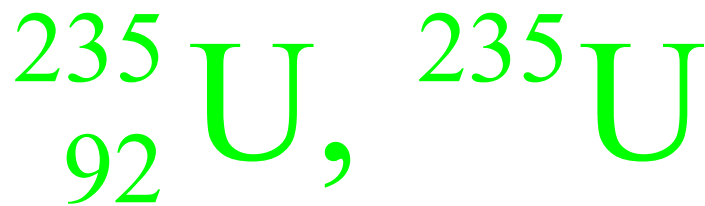
Uranio (92 protoni, 146 neutroni)
 $\Rightarrow Z=92, N=146, A=238$

Isotopi

Due atomi con lo stesso numero di protoni, ma un diverso numero di neutroni si chiamano **Isotopi** ed hanno le stesse proprietà chimiche ma diverse proprietà nucleari.



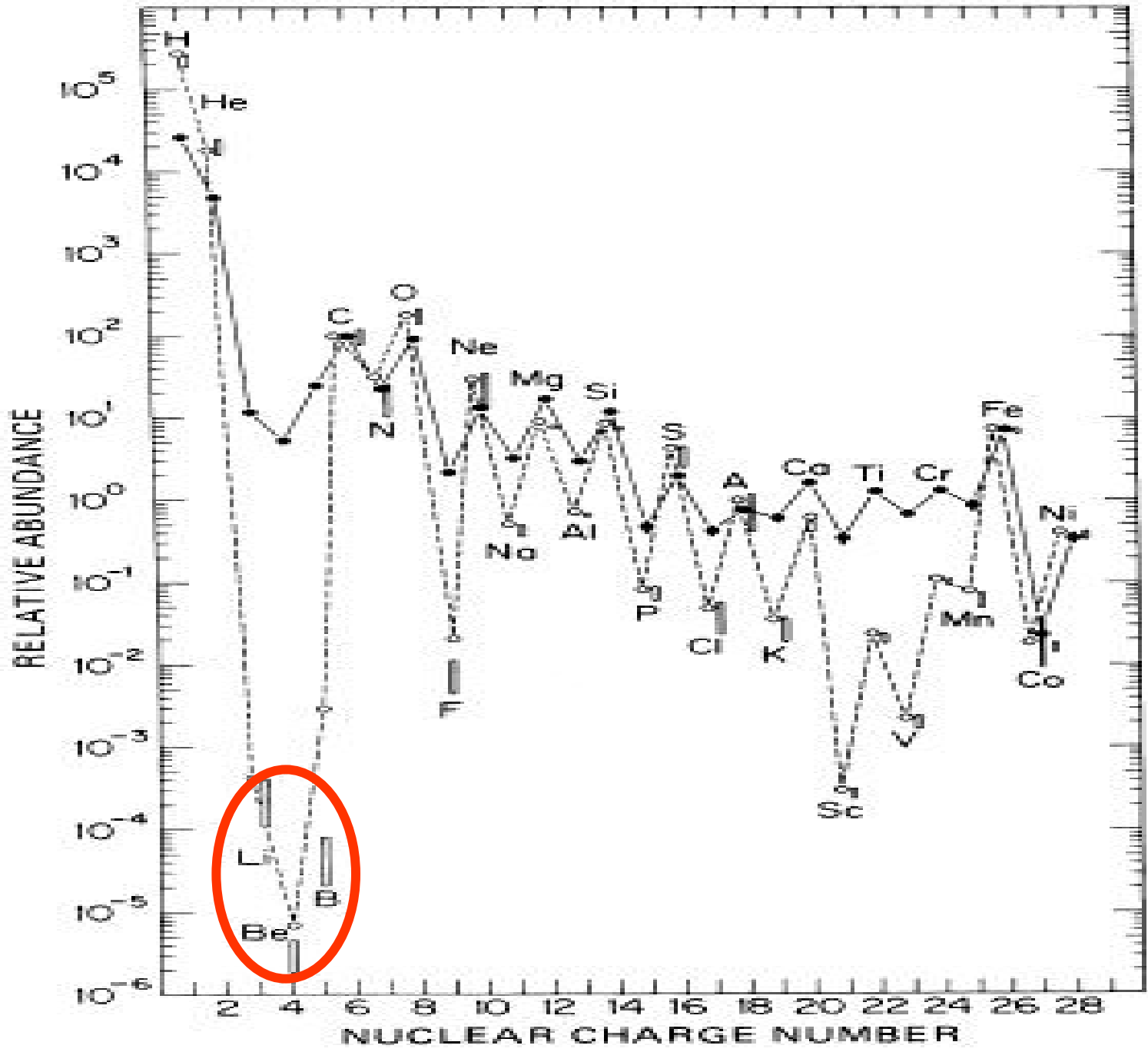
Uranio -238
(Z=92, N=146, A=238)



Uranio -235
(Z=92, N=143, A=235)

Abbondanza degli elementi

- **Idrogeno e Elio i più abbondanti**
- **Carenza di Li, Be, B**



Storia termica dell'Universo

- Quando l'Universo aveva meno di 300000 anni, era così caldo che non potevano esserci atomi ma solo nuclei ed elettroni perchè la forza elettromagnetica non era sufficiente a tenerli uniti.**
- Quando l'Universo aveva meno di ~ 1 sec, era così caldo che i nuclei atomici erano separati in neutroni e protoni perchè la forza nucleare forte non era sufficiente a tenerli uniti**

Conferme del Big Bang

- a) L'abbondanza dell'elio al 25% in massa;
- b) La presenza di una radiazione di fondo isotropa;
- c) L'esistenza di piccole fluttuazioni in questa radiazione che riflettono le fluttuazioni di densità da cui hanno avuto origine le strutture osservate.

L'universo nelle sue fasi iniziali era estremamente caldo e denso, e non potevano esistere nuclei atomici.

Quando la temperatura si abbassò al di sotto di una certa soglia, ebbe luogo tutta una serie di reazioni nucleari.

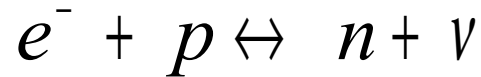
Formazione dell'elio

- **Idrogeno (H):** 1 nucleone (protone)
- **Elio (He):** 4 nucleoni (2 protoni, 2 neutroni)
- Per formare l'elio dall'idrogeno occorre:
 - Avvicinare 2 protoni e 2 neutroni, affinché l'interazione forte possa unirli.
 - Per questo bisogna superare la repulsione coulombiana \Rightarrow velocità elevate \Rightarrow alte temperature

Ma le collisioni a 4 corpi sono improbabili.

Formazione dell'elio (I)

Quando $T > 10^{10}$, l'alta temperatura non permette la formazione dei nuclei atomici: neutroni, protoni, elettroni e neutrini danno luogo alle reazioni seguenti:



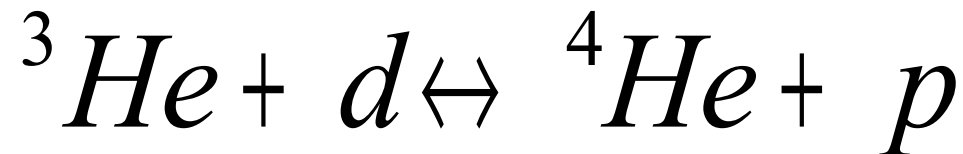
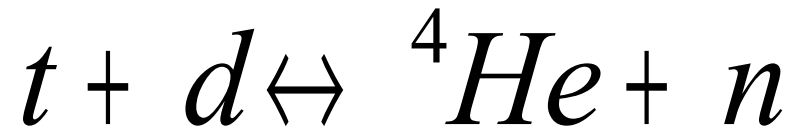
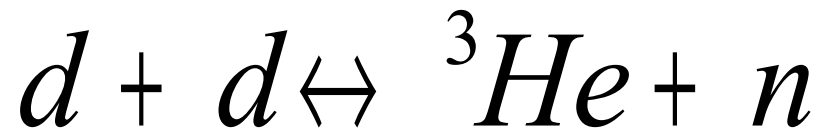
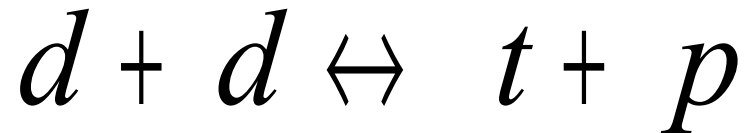
$$\frac{n}{p} = e^{-\frac{Q}{kT}}, \quad Q = (m_n - m_p)c^2 = 1.2934 \text{ MeV}$$



Quando la temperatura scende a 10^9 K , 3 minuti circa dopo il Big Bang, il deuterio sopravvive, e comincia la nucleosintesi.

Formazione dell'elio (II)

Quando $T < 10^9$, a partire dal deuterio si ha una catena di reazioni che porta alla produzione di elio.



Il collo di bottiglia ad $A=5$ e 8 (I)

- Non esistono nuclei atomici stabili con 5 o con 8 nucleoni
- La catena delle reazioni si ferma al ${}^7\text{Li}$
- **Come si sono formati gli altri elementi?**
- Esiste un nucleo meta-stabile (${}^8\text{B}^*$). Se questo nucleo fa in tempo a collidere con l' ${}^4\text{He}$, possono formarsi il ${}^{12}\text{C}$ ed altri elementi più pesanti.

Il collo di bottiglia ad $A=5$ e 8 (II)

- Reazioni richieste:



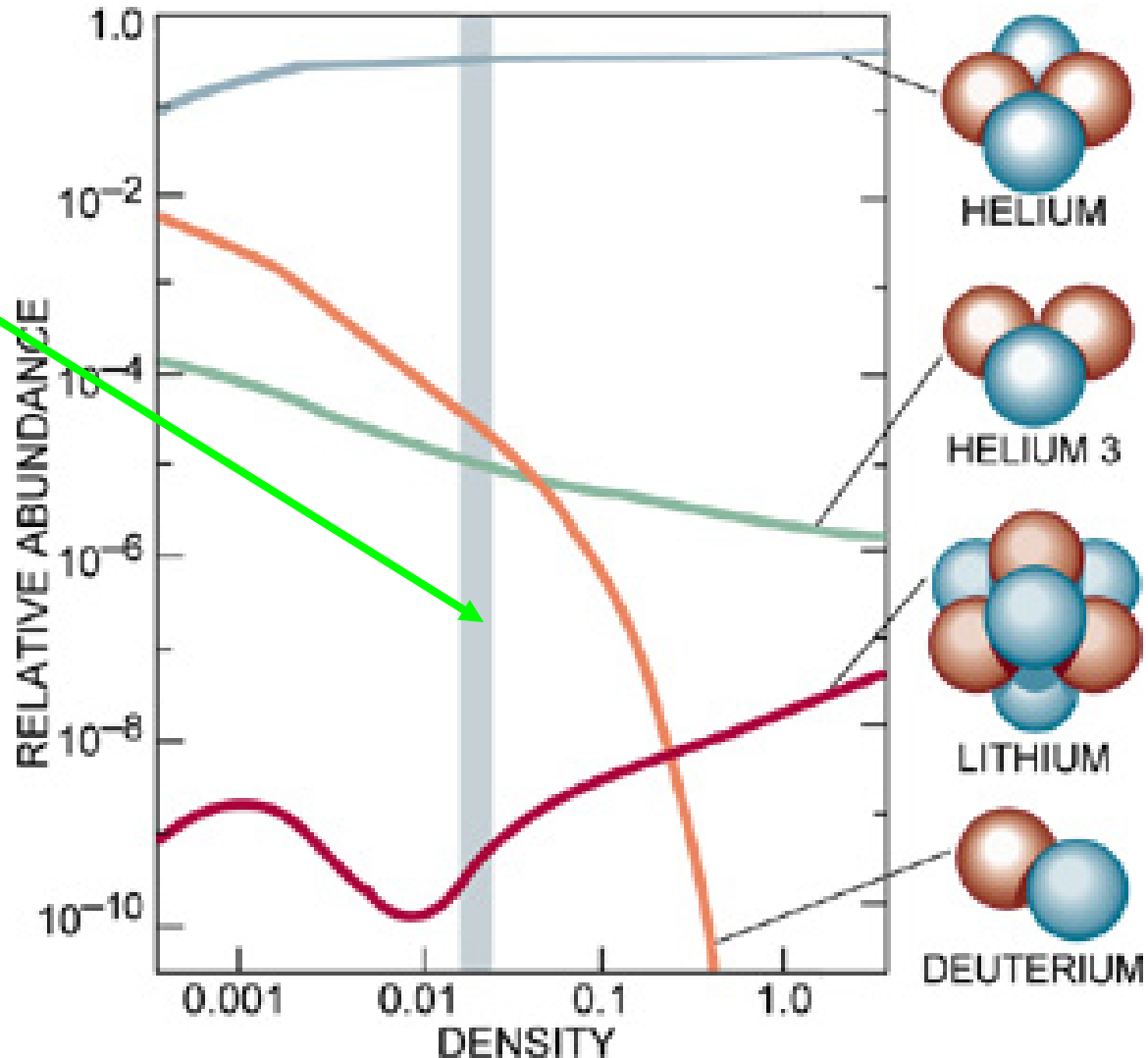
- Reazione a 3 corpi, che richiede alte densità.
- Avviene all'interno di stelle evolute.
- **Conclusione: nel big bang sono sintetizzati gli elementi leggeri (fino al ${}^7\text{Li}$). Tutti gli altri si formano nelle stelle.**

Nucleosintesi Primordiale

**Consistente con
l'abbondanza
di H, He e Li**

Risultato:

- **L'abbondanza
di H, He e Li è
consistente**
- **ma: $\Omega_b \sim 0.04$**



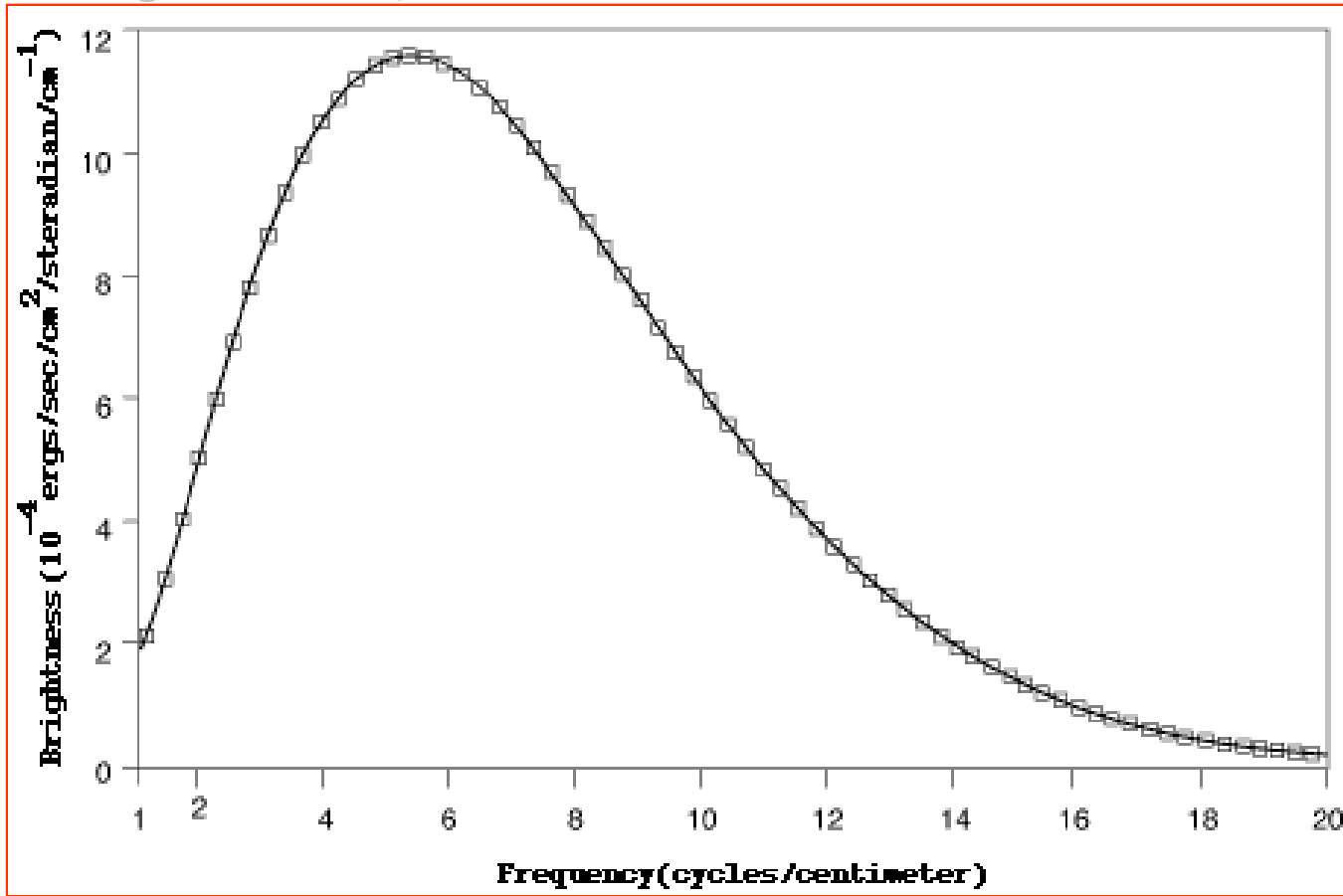
Penzias e Wilson (1965)



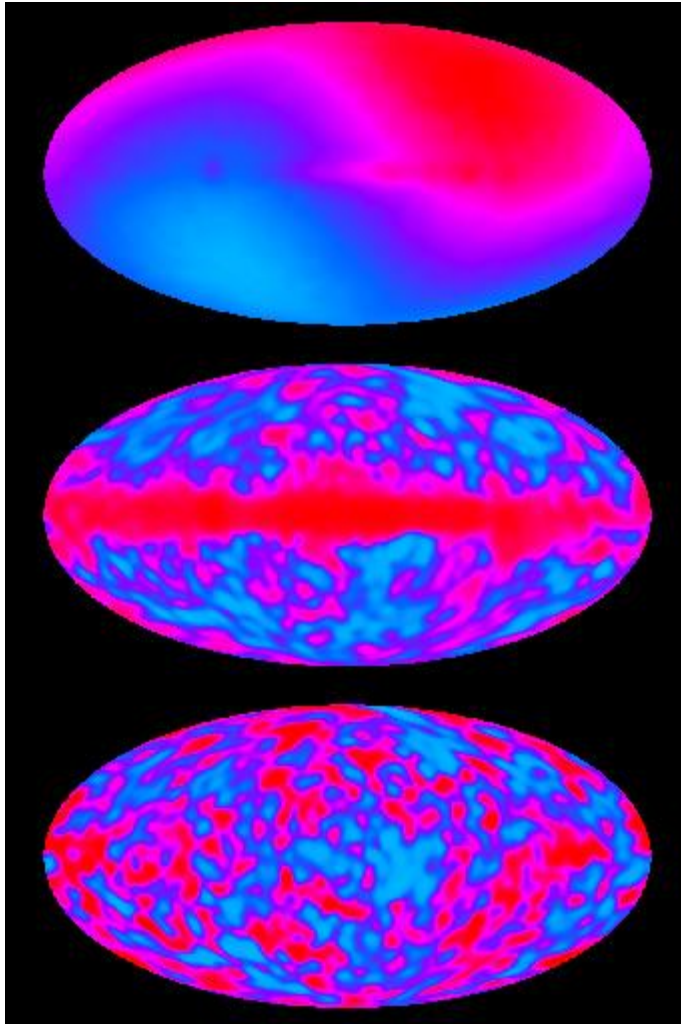
- Ricercatori dei laboratori Bell, usarono un'antenna per misurare l'emissione radio della Via Lattea.
- Scoprirono un fastidioso rumore di fondo che non poteva essere eliminato. Il gruppo di Princeton spiegò loro che avevano scoperto **la radiazione cosmica di fondo (CMB)**.
- Fu loro assegnato il premio Nobel per la fisica nel 1978.

Spettro della radiazione di fondo

Circa 400000 anni dopo il Big Bang, elettroni e protoni si sono legati, e l'universo è divenuto «trasparente». I fotoni hanno potuto propagarsi liberamente, e la temperatura corrispondente a questa radiazione di fondo, allora superiore a 1000 K, è calata fino agli attuali 2,73 K.



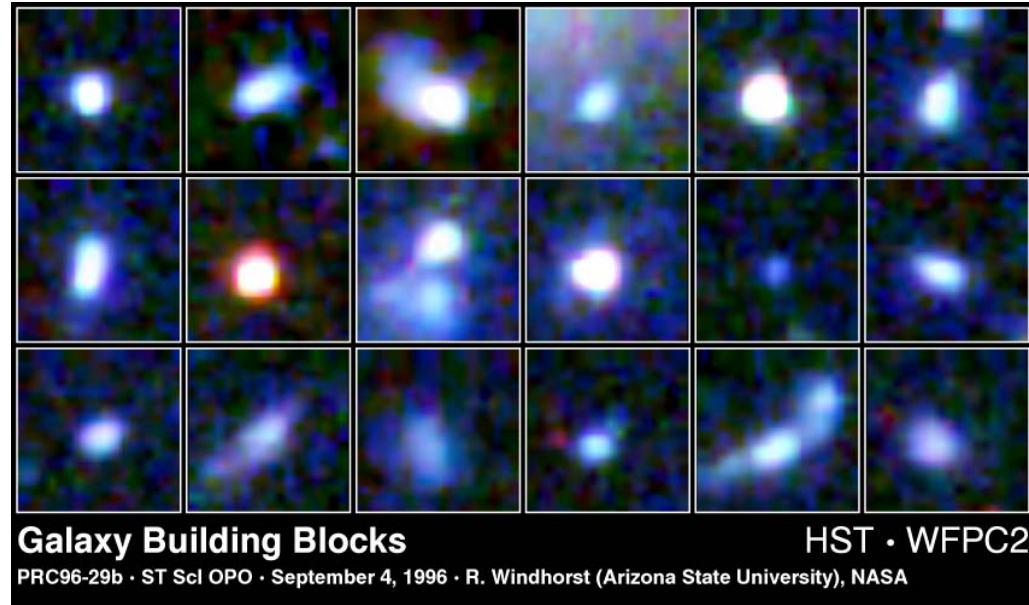
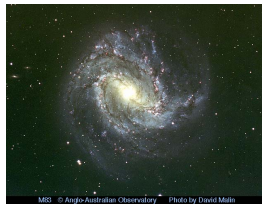
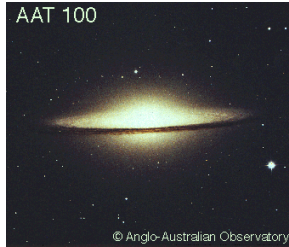
Possiamo applicare il principio cosmologico al nostro Universo ?



La CMB= luce dal Big Bang.
è uniforme per 1 parte in 10^5

⇒ **Si, l'Universo appare omogeneo e isotropo**

Si può applicare al nostro Universo il principio cosmologico forte ?



Galassie oggi

Galassie 10 miliardi di anni fa

⇒ **no, l'Universo sembra cambiare nel tempo**