



La Misura del Mondo 7 -Età e dimensioni dell'Universo

Bruno Marano
Dipartimento di Astronomia
Università di Bologna

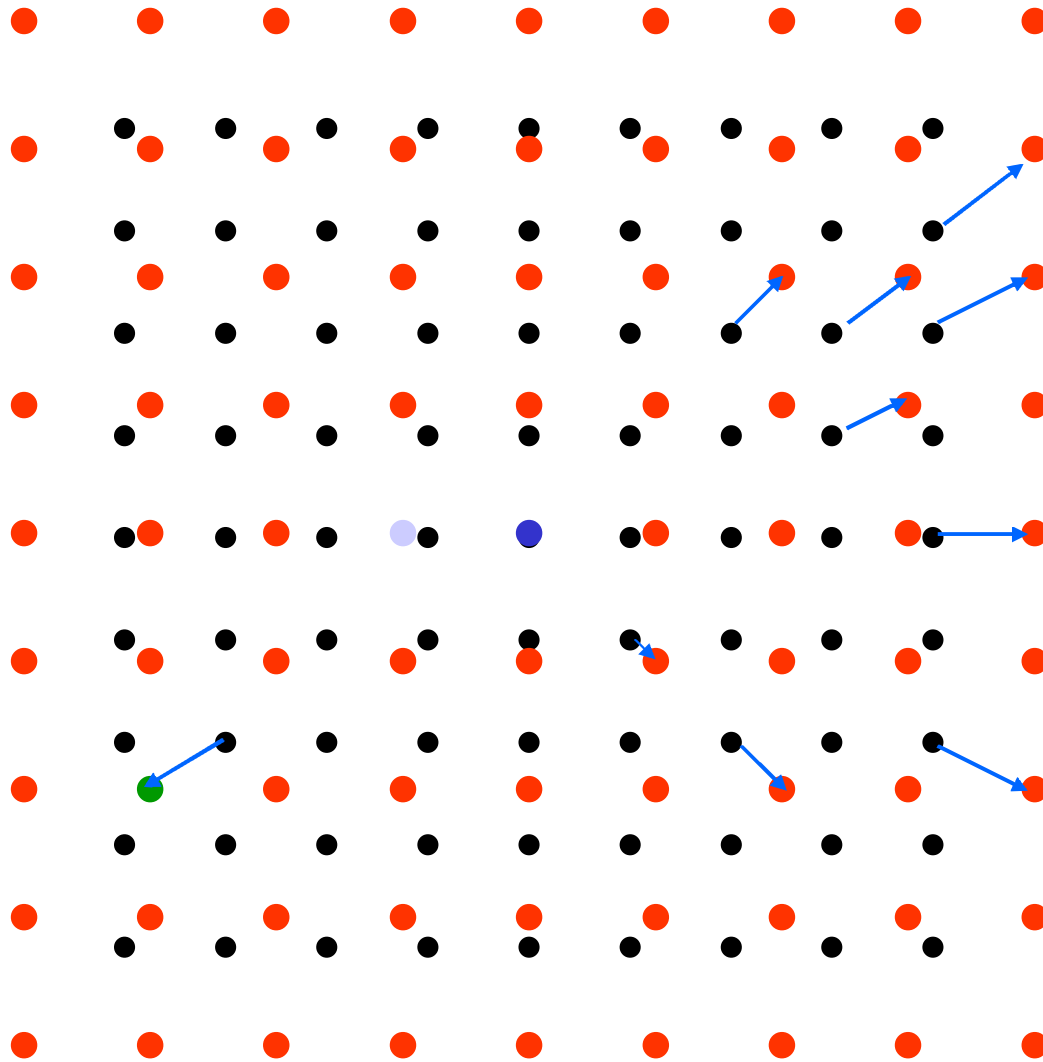
Le conclusioni del lavoro di Hubble

- In tutte le direzioni osserviamo galassie, fino a grandi distanze
- Queste galassie si allontanano tutte da noi, se non consideriamo le più vicine
- La velocità aumenta proporzionalmente alla distanza dalla nostra galassia
- Su distanze sufficientemente grandi, non ci sono luoghi o direzioni privilegiate nell'Universo.
- L'età dell'Universo è circa 13 Miliardi di anni (in realtà il primo valore ottenuto da Hubble era 7 volte più piccolo perché la scala delle distanze fu inizialmente molto sottovalutata) .

Un'espansione senza centro

- L'espansione osservata sembrerebbe porre la nostra Galassia al centro del moto complessivo dell'Universo
- In realtà, analizzando la legge di espansione di Hubble, risulta che ogni osservatore vede lo stesso tipo di espansione
- L'Universo *non ha centro*. Ogni suo punto è equivalente agli altri (*Principio Cosmologico*)
- Ciò che si espande è dunque “lo spazio”, tracciato dalle Galassie che lo popolano.

Dal nostro punto di vista



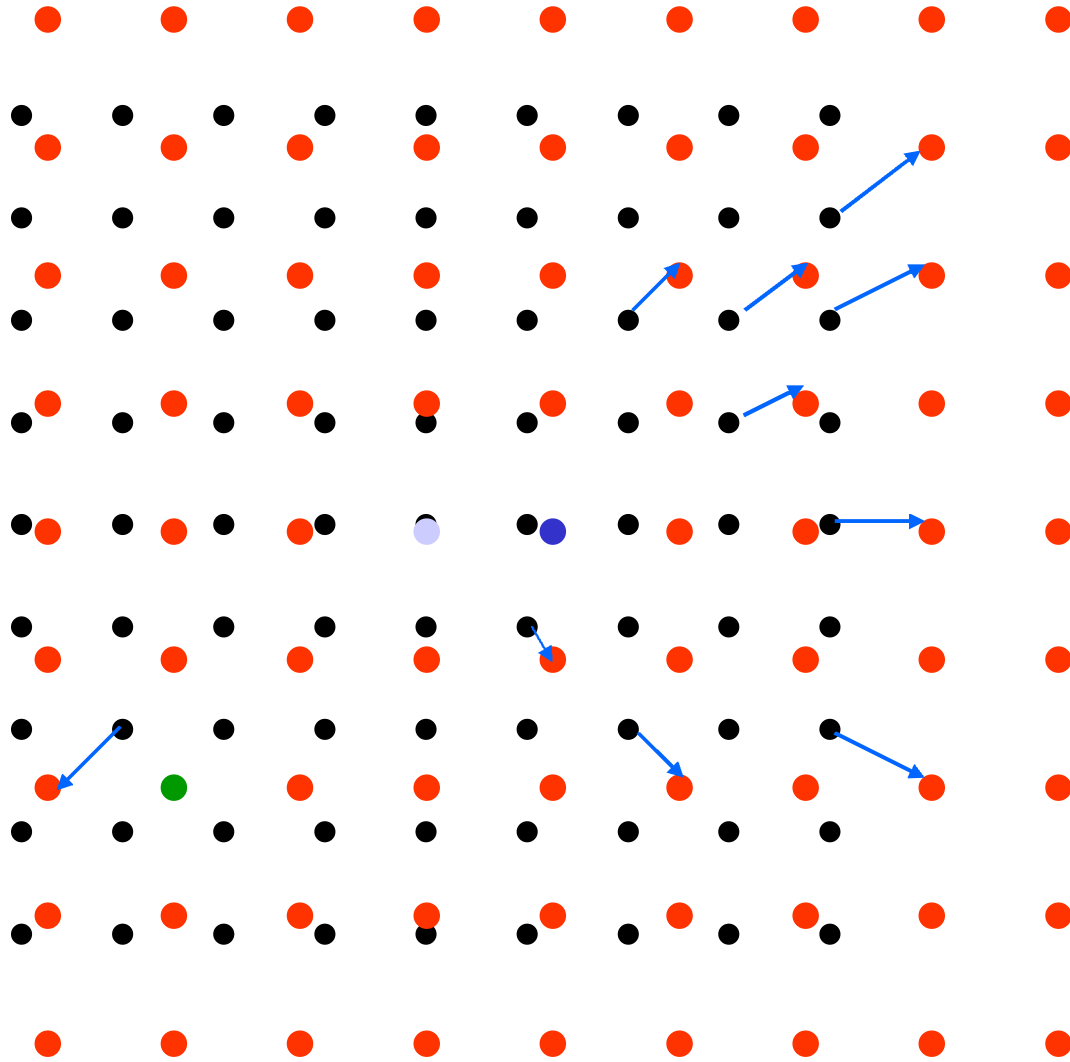
- prima

- dopo

- noi

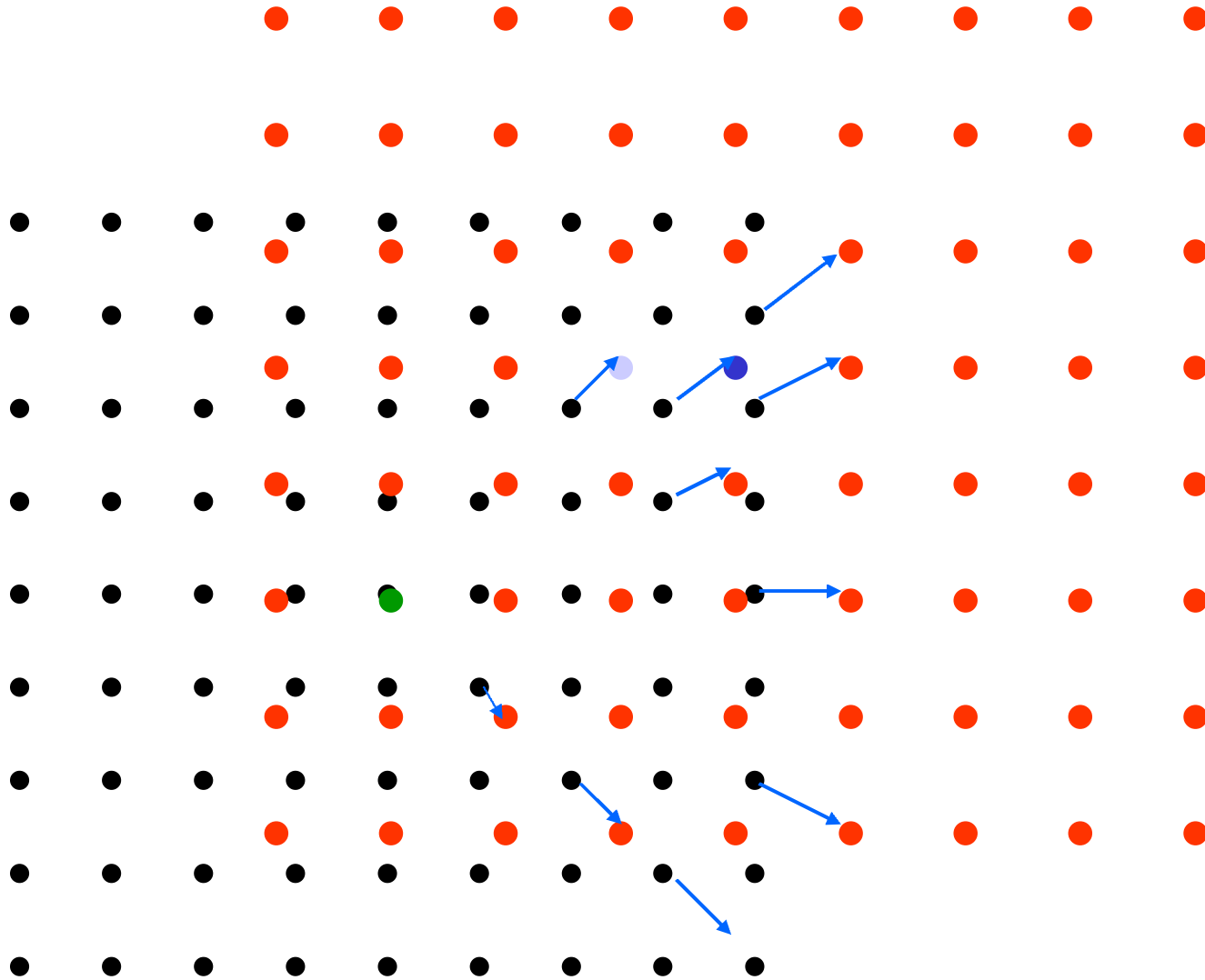
- un altro

- un terzo



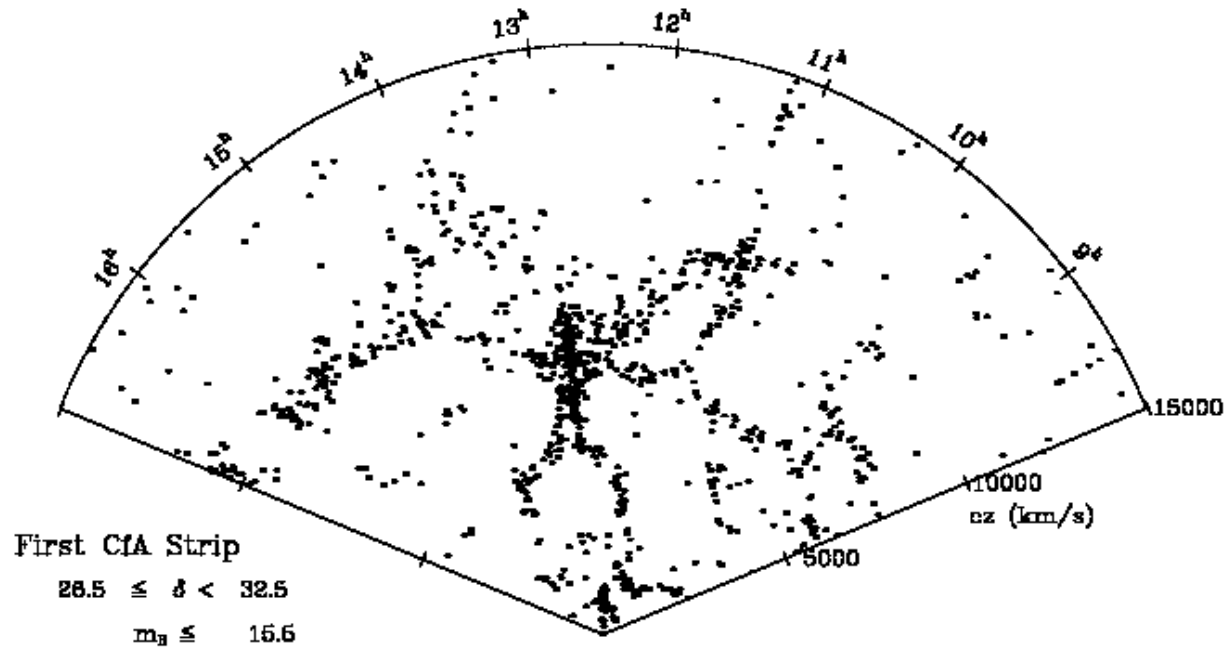
Un altro ...

- prima
- dopo
- noi
- un altro
- un terzo



Proviamo con una Galassia più lontana

L'universo è omogeneo su grandissima scala.
La distribuzione delle galassie vicine mostra
importanti disuniformità (La survey CfA)



Copyright SAO 1998

Uniformità dell'Universo su grande scala

Nella mappa sono rappresentate le posizioni di un campione di 31000 radiosorgenti, galassie più rare e molto luminose nella banda delle onde radio. Sono osservabili dai Radiotelescopi fino a grandissima distanza. L'uniformità generale è evidente.

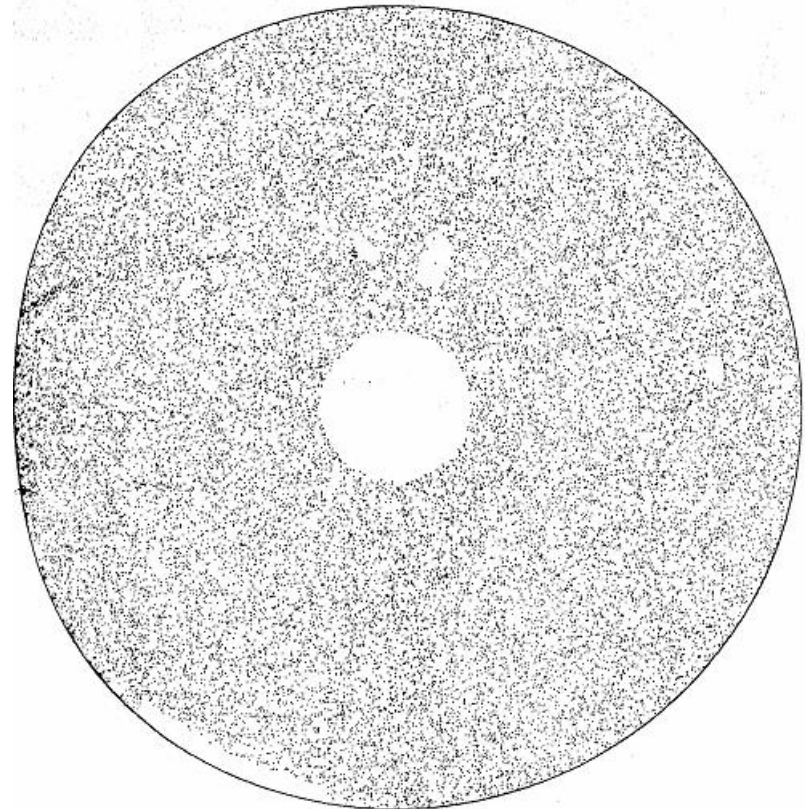


Figure 3.10. Angular distribution of the $\sim 31,000$ brightest 6 cm radio sources (Gregory and Condon 1991.)

L'età dell'Universo

Se due galassie distanti tra loro D si allontanano a velocità V , esse si saranno trovate a contatto a un tempo precedente

$$t = V/D$$

cioè a un tempo

$$t = 1/H.$$

Il tempo t è lo stesso qualunque sia la coppia di Galassie. Tutte le galassie si trovavano a contatto tra loro. Tutta la materia dell'Universo si trovava “a contatto” a quell'epoca. (Tutto inizia con un “*Big Bang*”)

L'Universo nasce e si evolve

Dalle osservazioni risulta: **$t \sim 13$ miliardi di anni**

La grande difficoltà è misurare D in modo preciso; occorre calibrare la Luminosità Assoluta delle Galassie.

LA CALIBRAZIONE DELLE DISTANZE EXTRAGALATTICHE

Un problema rimasto aperto cinquant'anni

La misura delle velocità delle galassie attraverso il loro spettro è una operazione difficile ma diretta, priva elementi di intermediazione importanti.

La misura della loro distanza è invece risultata estremamente difficile, non solo sul piano delle tecniche osservative, ma anche e soprattutto perché essa deriva in modo indiretto, molto mediato, da proprietà osservabili delle Galassie. In sintesi, la difficoltà consiste nel fatto che le stelle più brillanti, più facilmente osservabili nelle galassie esterne, sono oggetti rari. Non è possibile quindi studiarne un numero sufficiente entro le distanze entro cui si misura la parallasse. Per dare un esempio, un unico ammasso di stelle, le Iadi, è a distanza dal sole tale da poterne determinare la parallasse geometrica. E' necessario sviluppare una sorta di "catena" o "scala" che calibri progressivamente la luminosità di oggetti sempre più brillanti.

In questo processo si può incorrere in errori di *metodo*, attribuendo ad un oggetto o a una classe di oggetti una natura – e quindi una luminosità assoluta – diversa dal reale. Così misure anche molto accurate possono portare ad un risultato grossolanamente sbagliato.

segue

LA CALIBRAZIONE DELLE DISTANZE EXTRAGALATTICHE

Un problema rimasto aperto cinquant'anni

Hubble individuò nelle Cefeidi, variabili regolari cento volte più brillanti del Sole, la chiave per la determinazione delle distanze extragalattiche. Le Cefeidi sono caratterizzate da una stretta dipendenza della luminosità dal loro periodo. Sono “candele campione”.

Osservarle nelle galassie significa determinarne la distanza.

Una insufficiente conoscenza delle proprietà fisiche delle variabili portò Hubble a determinare una scala delle distanze sette volte più piccola di quella accettata ora.

L'Universo avrebbe avuto un'età sette volte inferiore, difficile da conciliare con la datazione delle rocce terrestri.

Il problema fu risolto negli anni '50. Restò una residua incertezza, di circa un fattore 2, risolta di recente attraverso lo Hubble Space Telescope. Il valore ora accettato della costante di Hubble è $75 \text{ Km/sec/Mparsec}$.

E' tuttora aperto il problema della determinazione delle distanze delle galassie più lontane, in cui le candele campione sono rappresentate dalle “supernove”, stelle in fase esplosiva che emettono in poche settimane la luce che una stella normale produce in tutta la sua vita. Un'ampia analisi si trova nelle referenze Braccesi, Rowan Robinson, Webb.

Bruno Marano

La misura del Mondo 7

Una verifica: la radioattività naturale consente di datare le rocce

- Il decadimento naturale di un nucleo atomico è un evento probabilistico. Di un numero di atomi $N(0)$ presenti inizialmente, ne resta dopo un tempo t un numero $N(t)$ da:

$$N(t) = N(0) \cdot e^{-t/\tau}$$

dove τ è il tempo caratteristico.

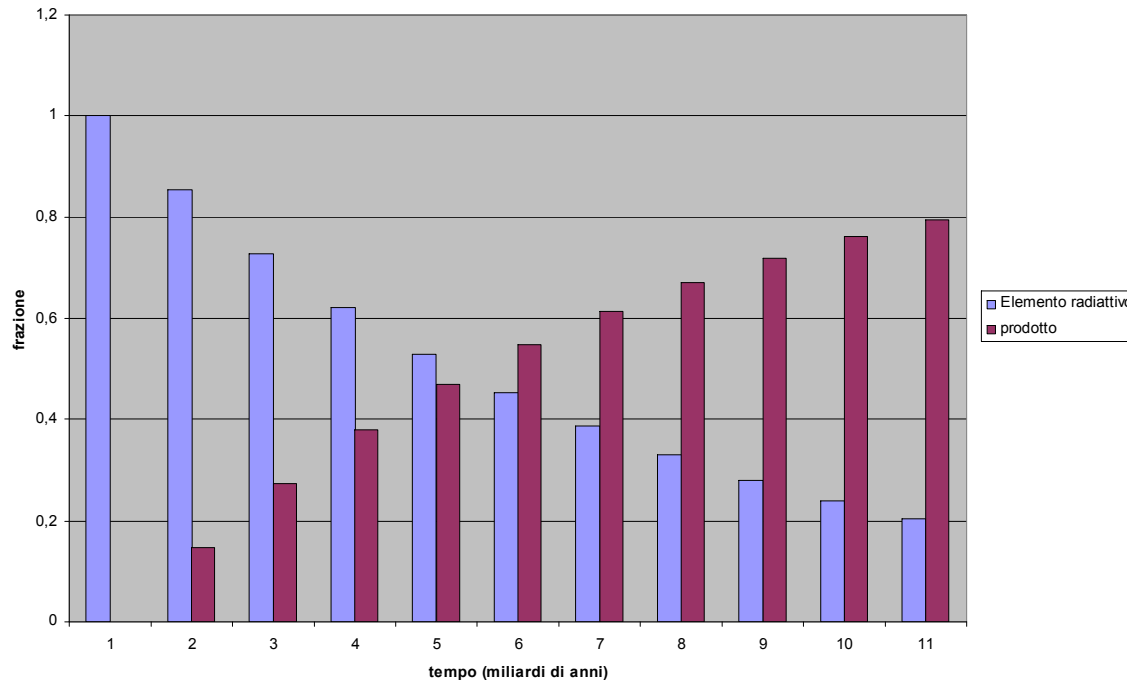
- Il prodotto di decadimento cresce secondo la legge.

$$P(t) = N(0) - N(t) = N(0) \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

- Spesso si usa il “tempo di dimezzamento” o “di vita media”, che è il tempo $t_{1/2}$, tale che $N(t_{1/2}) = N(0)/2$. ($t_{1/2} = \sim 0.7 \tau$)
- Per U^{238} $t_{1/2} = 6.3$ Miliardi di anni per U^{235} $t_{1/2} = 1.0$ Miliardi di anni.
- Il prodotto di decadimento è il Pb^{206}

La datazione delle rocce col decadimento radioattivo

U^{238} in Pb^{206} (Rutheford , ca. 1920)



In forma semplificata: in una roccia il rapporto tra la concentrazione di un elemento radioattivo e il prodotto finale del decadimento misura il tempo trascorso dalla sua solidificazione. (In realtà il prodotto finale preesiste in forma “nativa” e il procedimento reale è più complesso). L’età delle rocce terrestri risulta di 4.2 Miliardi di anni, compatibile con l’età dell’Universo che deriva dalle più recenti misure della costante di Hubble.

La teoria della relatività generale (Einstein, 1917)

La teoria della relatività generale fornisce le relazioni che permettono di studiare il moto delle masse. Esse rappresentano lo strumento teorico più efficace di cui disponiamo per descrivere la storia dell'Universo.

La descrizione quantitativa richiede, in generale, la risoluzione di un sistema di dieci equazioni non lineari alle derivate parziali (come dire, “molto difficile, spesso impossibile”). La soluzione, nel caso dell'intero Universo, si basa tuttavia sul “Principio Cosmologico”: ogni punto dell'Universo è uguale agli altri, non esistono punti particolari, meno che meno ne esiste un “centro”. Sotto questa condizione, le equazioni si semplificano moltissimo e si arriva ad una “legge del moto” dell'Universo il cui contenuto può, a parole, essere descritto così:

- *L'Universo, nella sua globalità, si deve o espandere o contrarre. Nel primo caso, l'espansione è frenata dalla materia-energia presente, nel secondo la contrazione è accelerata dalla materia-energia presente.*

(È ben noto che nella Teoria della Relatività energia e materia si identificano attraverso la nota relazione di Einstein $E=mc^2$)

La teoria della Relatività prevedeva un Universo dinamico, ma negli anni 20 era diffusa l'idea che esso fosse statico

La teoria è inoltre compatibile con la presenza di un effetto non collegato alla materia-energia, di cui tuttavia essa non può definire né presenza né intensità né natura. La legge del moto sopra descritta andrà quindi integrata come segue.

- *Questo comportamento può essere alterato da una eventuale “forza cosmica”. Essa non è associabile alla materia-energia che conosciamo, ma piuttosto ad una proprietà generale dell’Universo.*

Ovviamente, per un principio di economia, tale “forza cosmica”, rappresentata nelle equazioni dalla costante cosmologica “ Λ ”, è chiamata in causa quando la forma più semplice delle equazioni non sia in grado di spiegare le proprietà osservate dell’Universo. Einstein la introdusse perché la riteneva necessaria a consentire che l’Universo fosse statico, in quiete, secondo l’idea che gli astronomi ne avevano ancora all’inizio del XX secolo. Apprese poi che oltreoceano, a Mt. Wilson in California, nel più grande telescopio di allora, le osservazioni rivelavano l’espansione generale dell’Universo.

Rifiutò quindi Λ , come inutile, quando conobbe i risultati di Hubble sull’espansione generale dell’Universo. (Nulla di strano che Λ sia richiamata in causa ogniqualvolta le osservazioni paiono mettere in crisi la descrizione più semplice).



Einstein in visita a Mt. Wilson,
California, 1931

Edwin Hubble



Bruno Marano
La misura del Mondo 7

Le equazioni di Einstein in un Universo omogeneo (equazioni di Friedmann)

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = -\frac{kc^2}{R^2} + \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3}$$

and

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3} \left[\rho + \frac{3P}{c^2} \right] + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

- $R(t)$ = fattore di scala, $D(t)/D(t_0) = R(t)/R(t_0)$

- k e Λ costanti

- $\frac{\dot{R}}{R}$ = Costante di Hubble

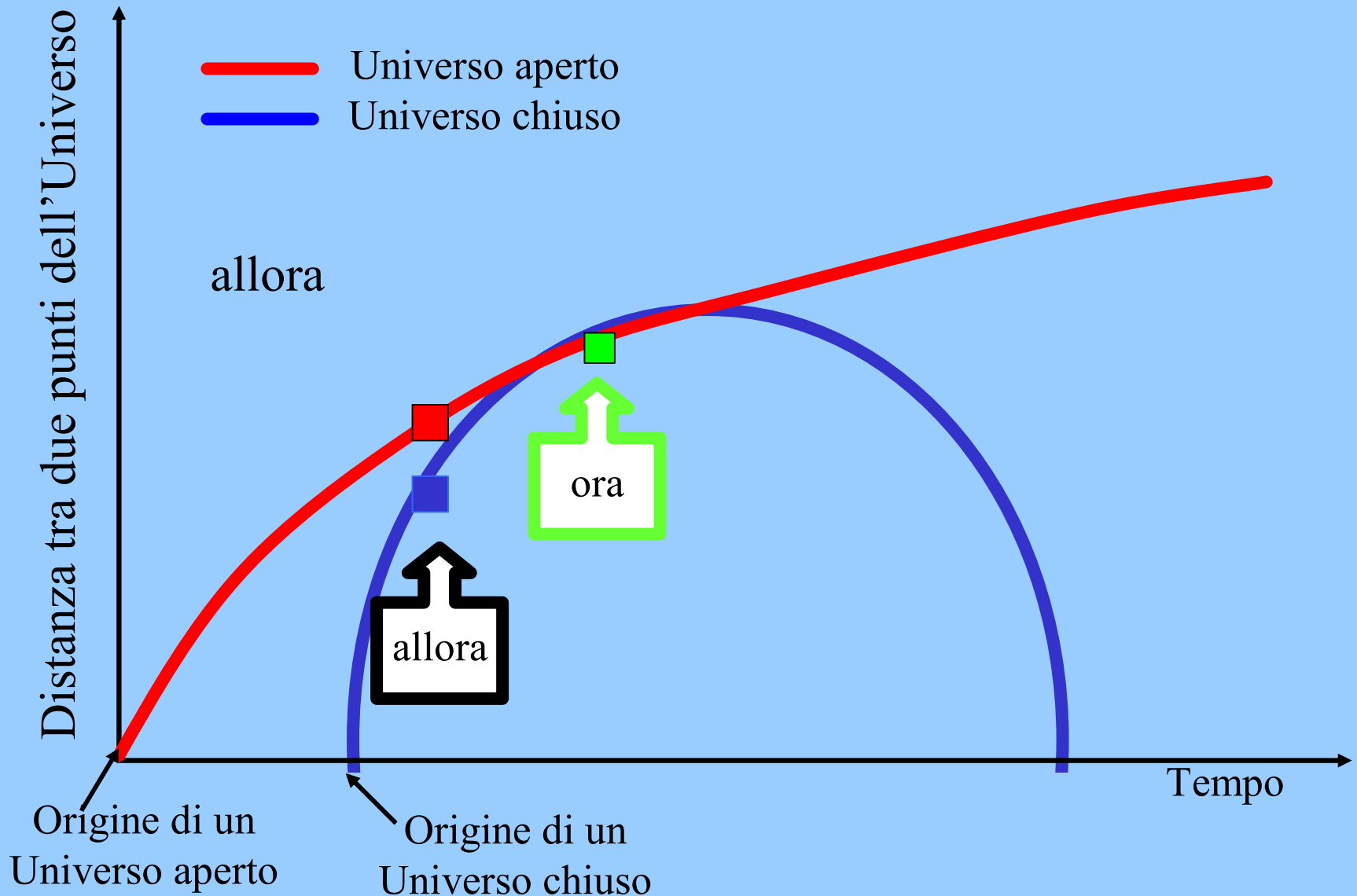
→ La velocità di espansione (\dot{R}) e l'accelerazione (\ddot{R}) sono “governate” da densità ρ e pressione p

→ Se $k = 0$ e $\Lambda = 0$, la costante di Hubble H è determinata dalla densità nell'Universo

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \cancel{\frac{kc^2}{R^2}} + \frac{8\pi G\rho + \cancel{\Lambda c^2}}{3}$$

L'evoluzione dell'universo

(Le soluzioni delle equazioni di Friedmann)



Un Universo "aperto" o "chiuso"?

Le osservazioni di galassie vicine, attorno al punto "ora", non permettono di riconoscere se l'Universo si espanderà indefinitamente (U.aperto) o se l'espansione si arresterà, per poi invertirsi (U.chiuso). Osservando galassie molto lontane (freccia nera nel diagramma), di cui ci arriva la luce emessa quando l'Universo era più giovane, si può sperare di misurare quanto rapida sia stata, nel passato, l'evoluzione dell'Universo, e quindi quale ne sia stato il passato e quale ne sarà il futuro.

"Osservare il passato" richiede la capacità di rivelare e scomporre la poca luce che ci arriva da galassie lontanissime. Solo con grandissimi telescopi e tecnologie avanzate si può sperare di ottenere la sensibilità necessaria.

Il telescopio da 5
del Mt. Palomar



Una alternativa tramontata: lo stato stazionario

- Alcuni cosmologi ritennero profondamente insoddisfacente il concetto di un universo uguale in tutti i punti dello spazio (“principio cosmologico”) ma diverso al trascorrere del tempo.
- Postularono quindi quello che fu definito il “Principio Cosmologico Perfetto”, ovvero che l’Universo fosse immutabile nello spazio e nel tempo, sempre e ovunque uguale.
- Per rendere il Principio cosmologico perfetto compatibile con l’espansione cosmica, era necessaria l’esistenza di un processo continuo di creazione di materia. Diversamente l’espansione avrebbe prodotto una rarefazione della materia, cioè una evoluzione. Tale processo non era verificato nei laboratori terrestri, ma poteva aver luogo in situazioni cosmiche assai lontane dalle condizioni di un nostro laboratorio scientifico
- La scoperta che le radiosorgenti avevano conteggi “più ripidi” dell’andamento euclideo dette un grave colpo a questa ipotesi. Le radiosorgenti lontane (come dire “nel passato”) erano più numerose che ora: qualcosa cambiava nella vita dell’Universo.
- Il colpo definitivo, che rese il principio cosmologico perfetto incompatibile con l’osservazione, venne più tardi

“I telefonini e la cosmologia”

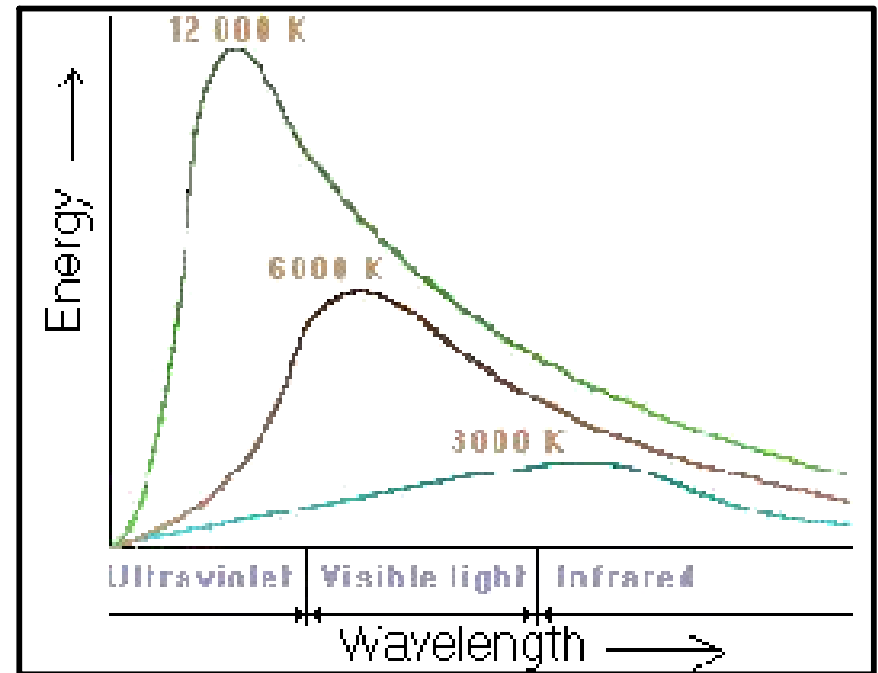
- Se c'era stato il Big Bang, tutto l'Universo era inizialmente una “unica stella”. In esso, per poche decine di secondi, era avvenuta una fusione nucleare generalizzata. Si poteva con essa spiegare la grande abbondanza dell'Elio, che nelle stelle è un prodotto intermedio, non finale. *Si doveva poter osservare la radiazione emessa allora* (Gamow, 1949).
- Nel 1964, alla Bell Telephone si studiava la possibilità di trasmissione di segnali tramite onde elettromagnetiche ad alta frequenza (tecnologia ora di uso generalizzato) ma l'antenna di prova riceveva dei disturbi non eliminabili...
- riceveva la radiazione fossile dell'Universo primordiale
- La teoria dell'Universo in espansione (il “Big Bang”) riceveva così una formidabile conferma sperimentale

Gli scopritori della radiazione fossile Penzias e Wilson
Sullo sfondo l'antenna "sugarspoon" (paletta per lo zucchero)



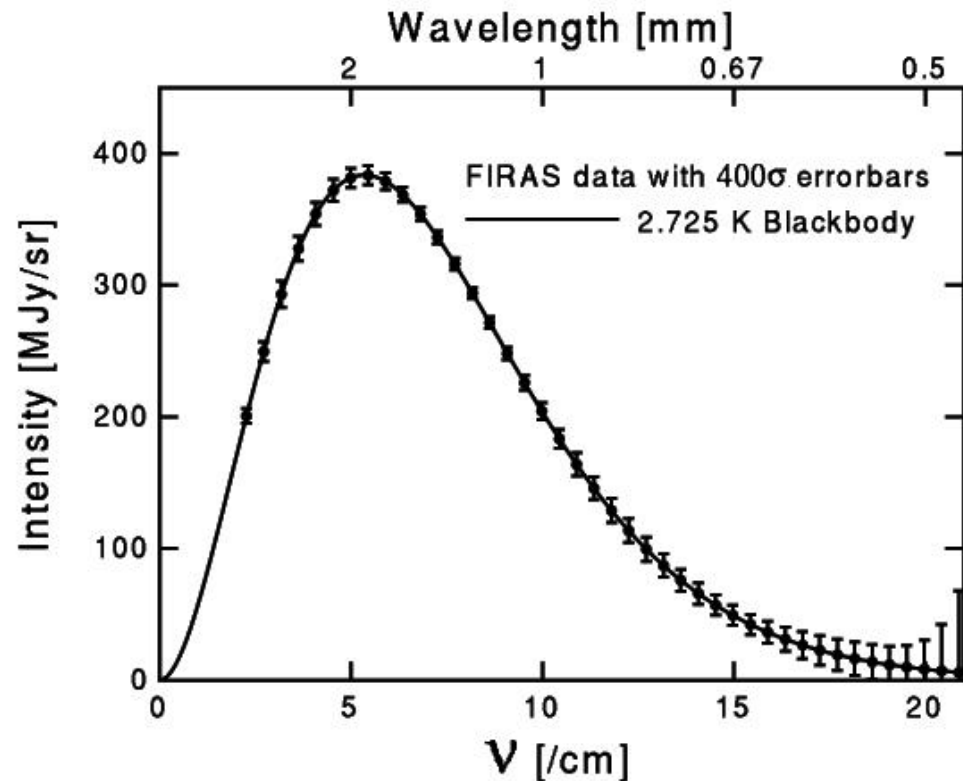
Il relitto della radiazione primordiale

- Lo spostamento verso il rosso dovuto alla espansione sposta la radiazione verso lunghezze d'onda maggiori (corrispondenti a temperature minori).
- I raggi γ prodotti nella fusione nucleare primordiale sono diventati onde radio di alta frequenza (microonde)



La radiazione fossile

- A intensità massima attorno a $\lambda \sim 2\text{mm}$.
- Corrisponde a una temperatura di $\sim 3\text{ }^{\circ}\text{K}$
- E' uniforme in tutte le direzioni ("isotropa")
- I dati sperimentali si sovrappongono con estrema precisione alla curva teorica



La radiazione fossile è ben distinta dalle altre sorgenti cosmiche

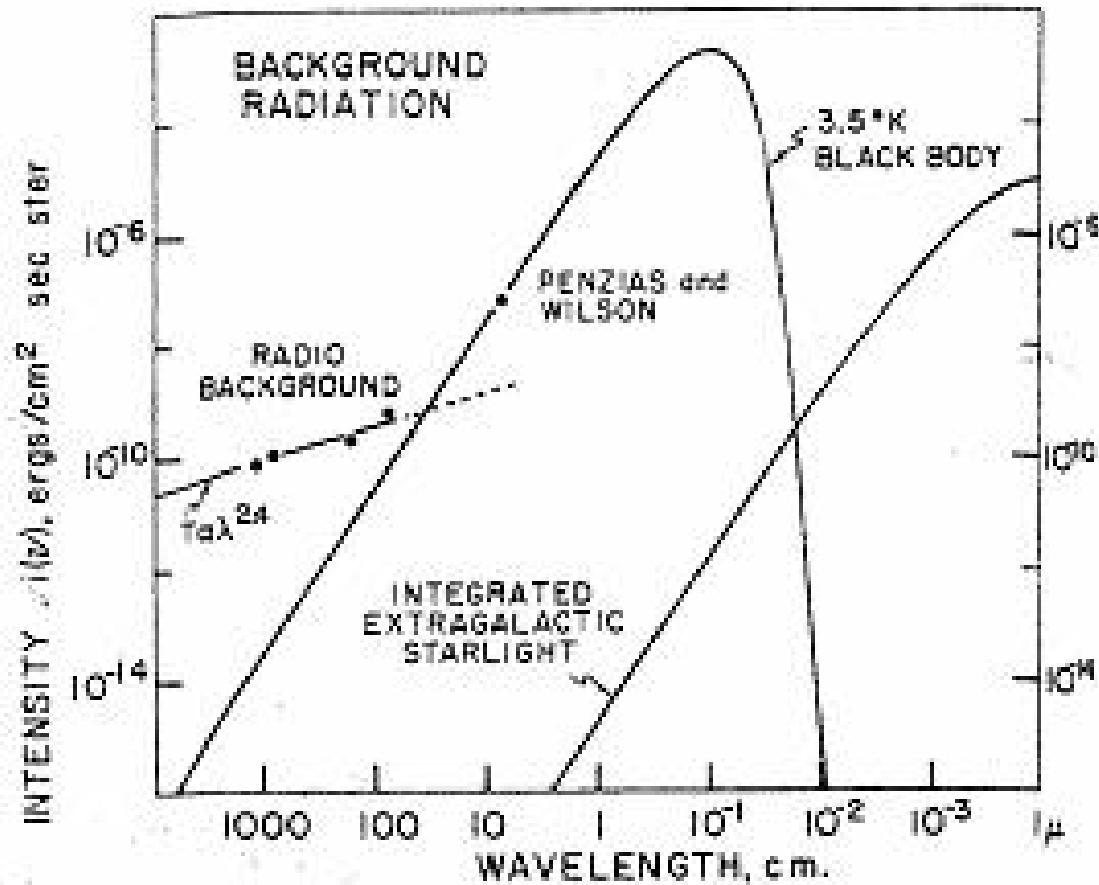
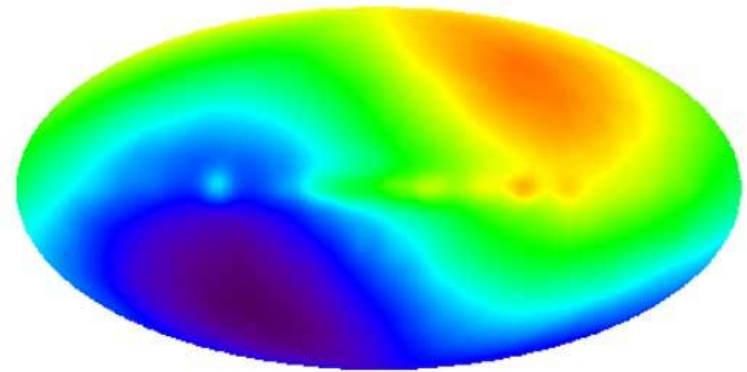


Figure 6.4. Spectrum of the cosmic background radiation, March 1965.

Il nostro moto rispetto alla radiazione fossile

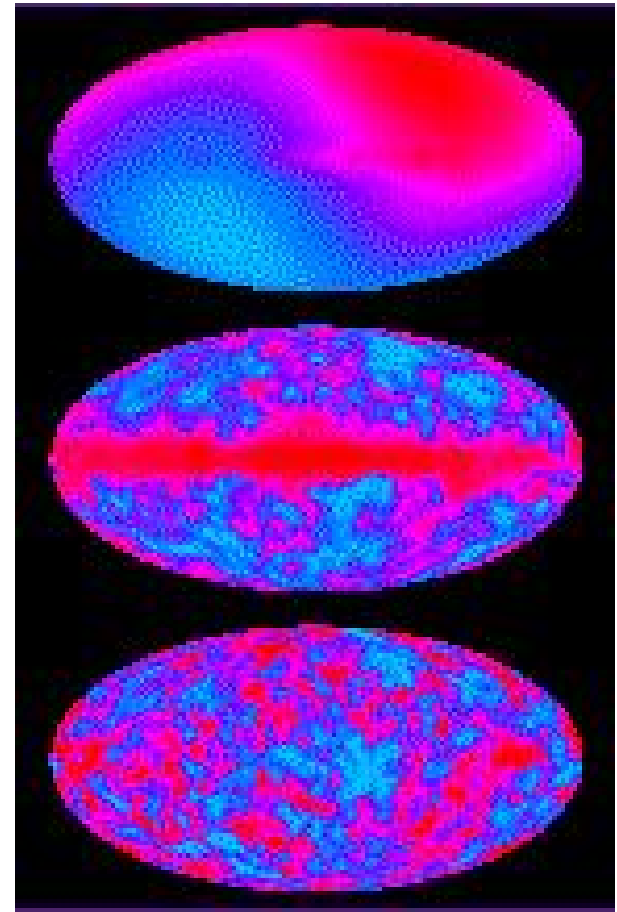
- La temperatura della radiazione: rosso= più freddo, blu = più caldo
- La Galassia si muove, rispetto alla radiazione che permea l'Universo, in direzione del centro dell'area blu
- La velocità è di 600 Km/s (eff. Doppler)



NASA, COBE Exp.

L'uniformità della radiazione

- Sottratto il moto della Galassia (1) e l'emissione della Galassia(2), restano disuniformità minori di una parte su 10000 (3)
- Nell'Universo primordiale non c'è ancora traccia di Galassie o simili strutture
- Cosa ha reso così uniformi regioni dell'Universo che non si sono mai “viste” tra loro?



Tutto capito?

No. Alcune sole delle molte
questioni aperte:

- Cosa ha reso l'Universo così omogeneo?
- Ci vuole più massa di quella che sappiamo riconoscere: e il resto?

Ci fermiamo qui. Le risposte (?) potrebbero cambiare da ora al prossimo corso.