



Istituto Nazionale di Astrofisica

Osservatorio astronomico di Brera



Universo in fiore

Il modello cosmologico standard e l'enigma dell'espansione

Luigi Guzzo

Universita' degli Studi di Milano

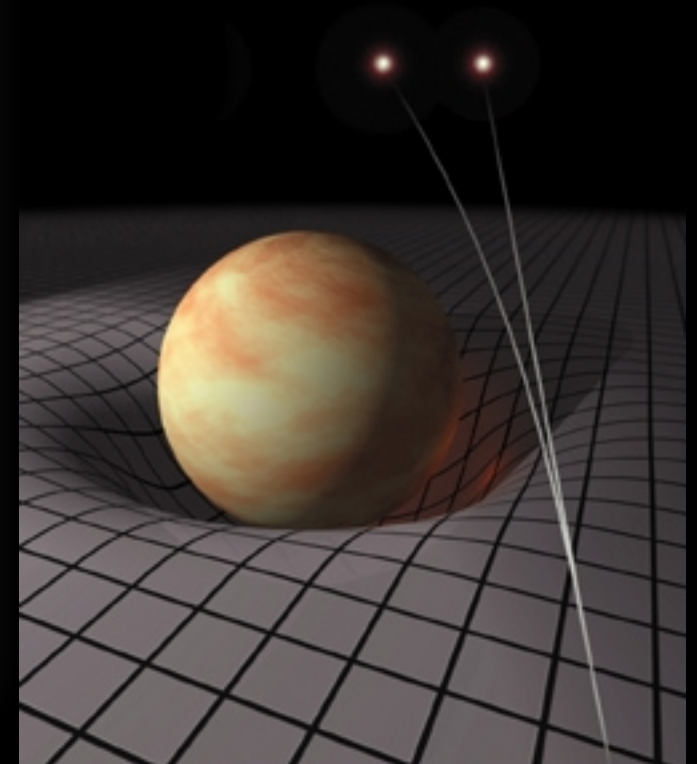
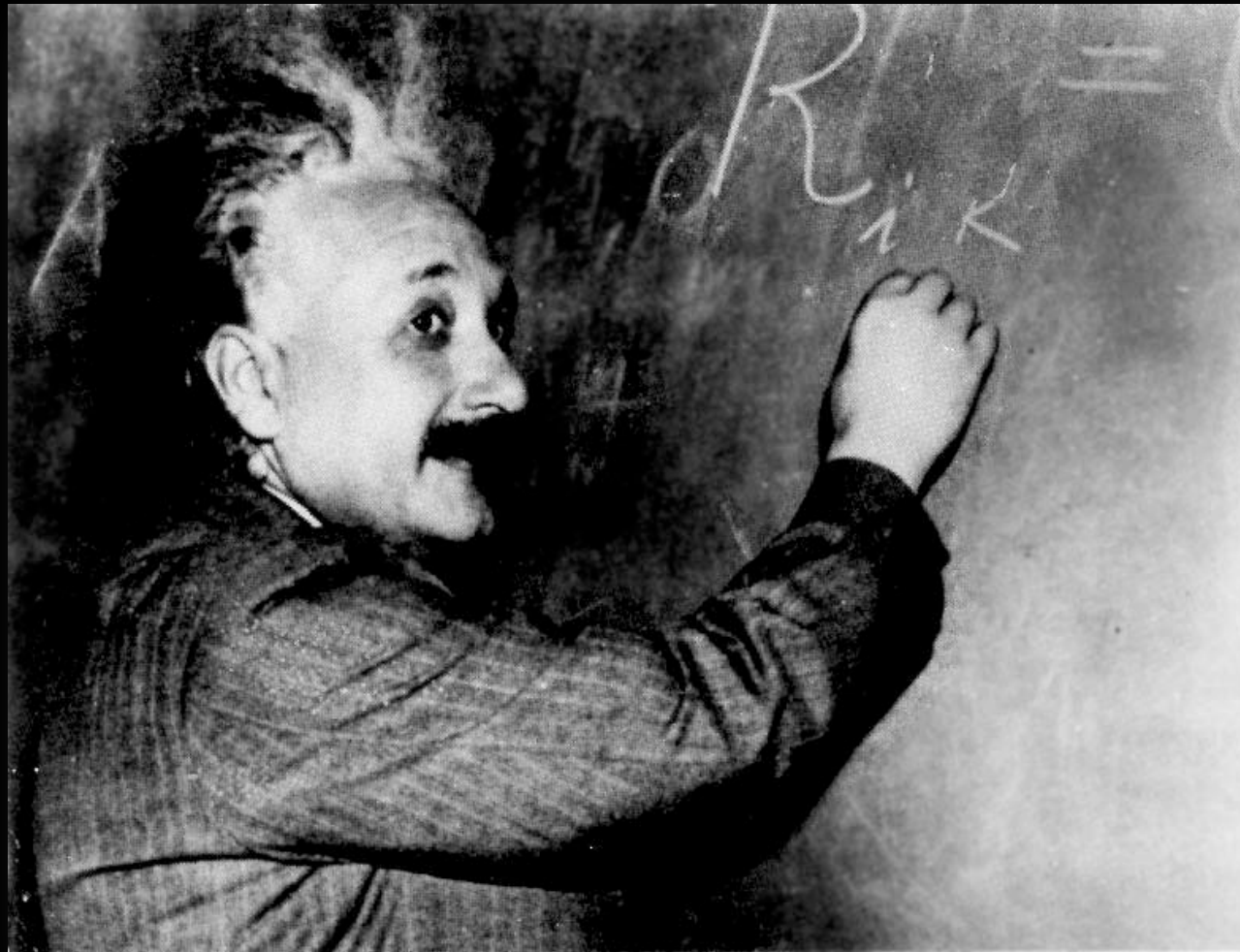
11 Aprile 2017

Se guardiamo l'Universo a grandissima scala

- 
- The background of the slide is a large-scale map of the universe, showing the distribution of galaxies. The map is a mosaic of many small, colorful patches, each representing a different region of the sky. The overall shape is roughly circular, with some irregularities at the edges. The colors are primarily red, orange, and yellow, with some blue and green patches. The map is set against a black background.
- 1) L'Universo e' lo stesso in ogni direzione (su scale grandi)
 - 2) Non siamo in un punto privilegiato
→ **omogeneita' e isotropia**

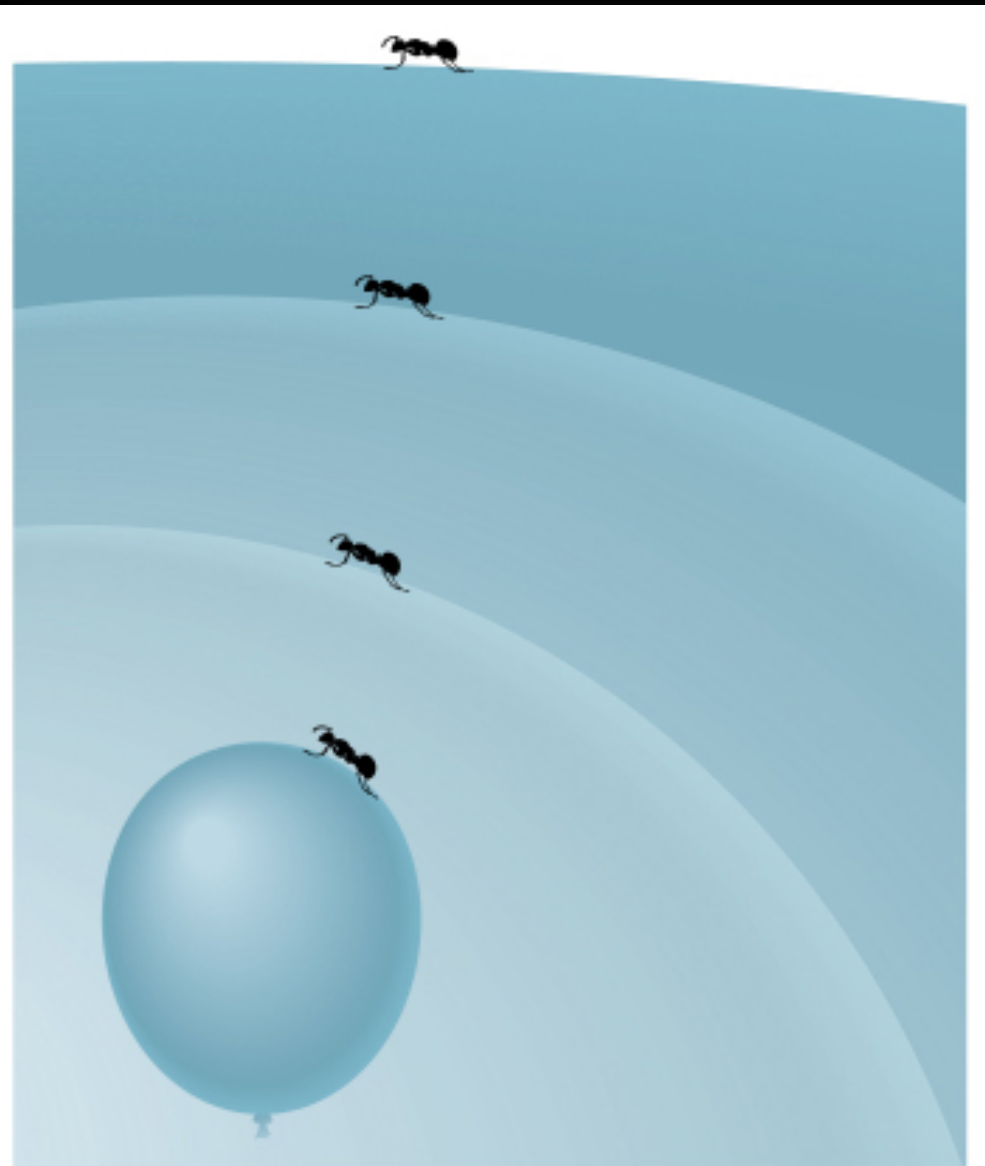
The APM Galaxy survey
Maddox Sutherland Efstathiou & Loveday

La forza di gravita' e' descritta dalla teoria della Relativita' Generale di Albert Einstein: la gravita' e' una proprieta' dello spazio-tempo



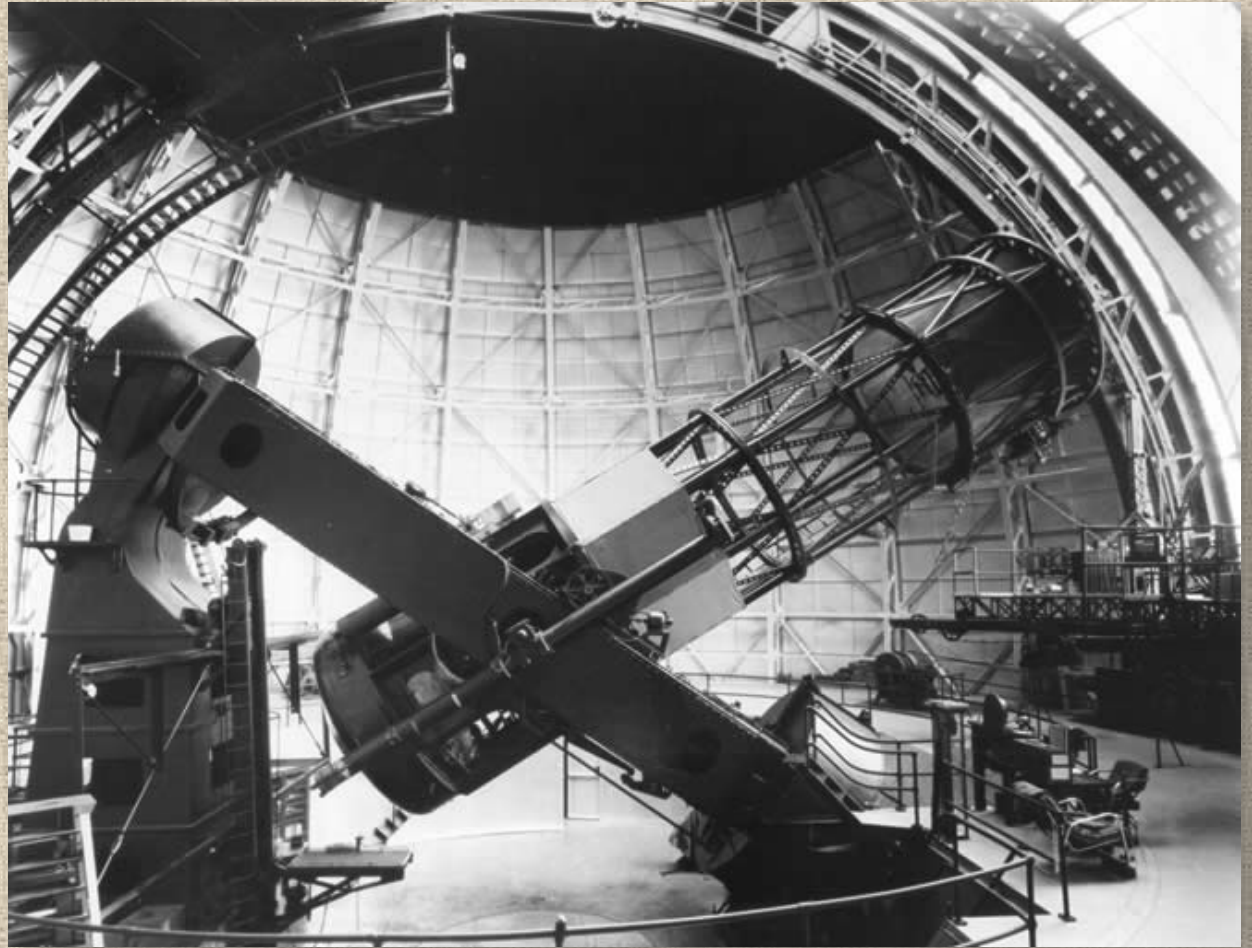
Einstein nota due cose applicando la sua teoria all'Universo intero:

1. L'Universo "fa fatica" a stare fermo: se lo lasciamo libero comincia a contrarsi sotto l'effetto della propria gravita'
2. la sua "geometria" dipende dalla quantita' di materia e energia che esso contiene



Copyright © Addison Wesley.

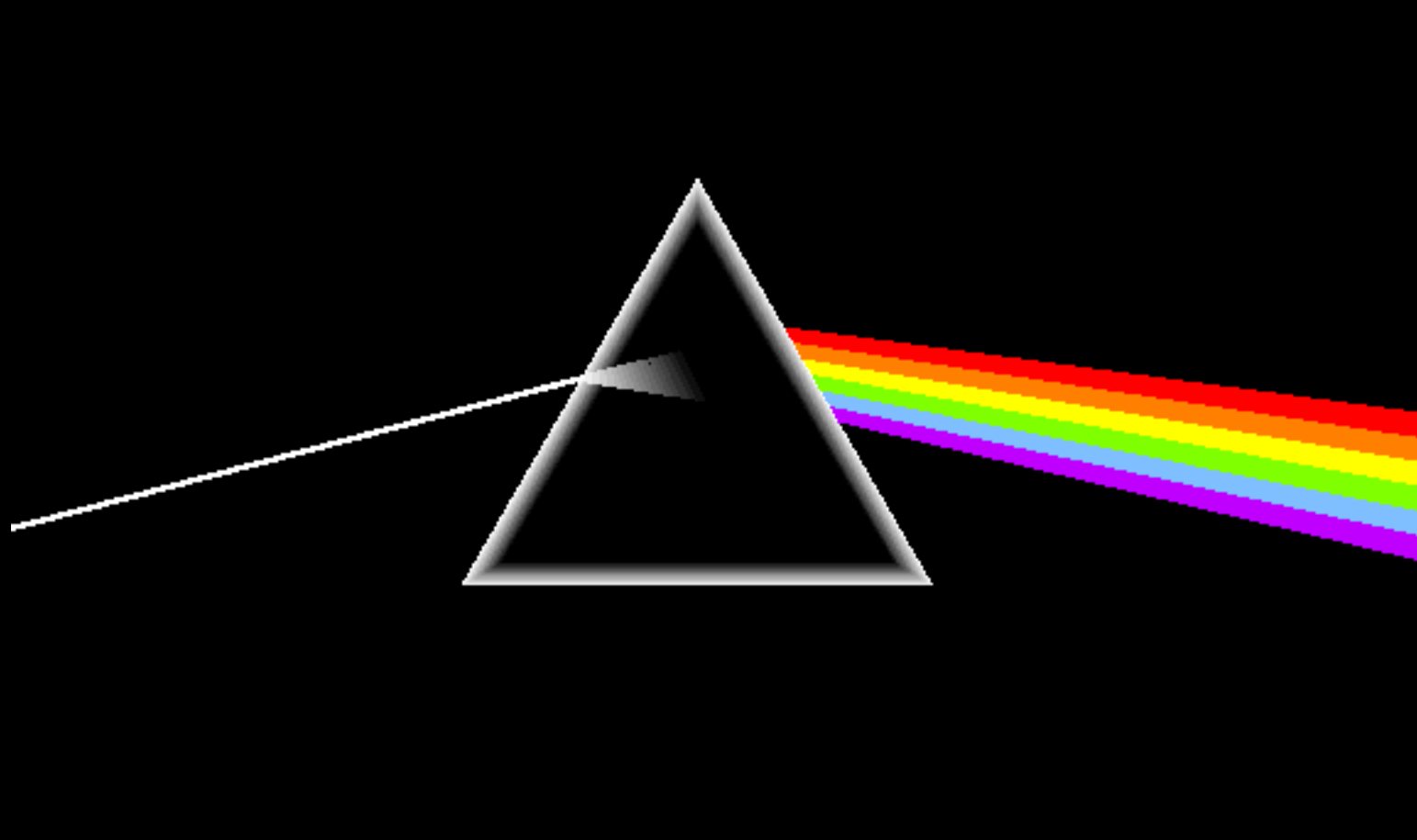
E. Hubble, 1929....

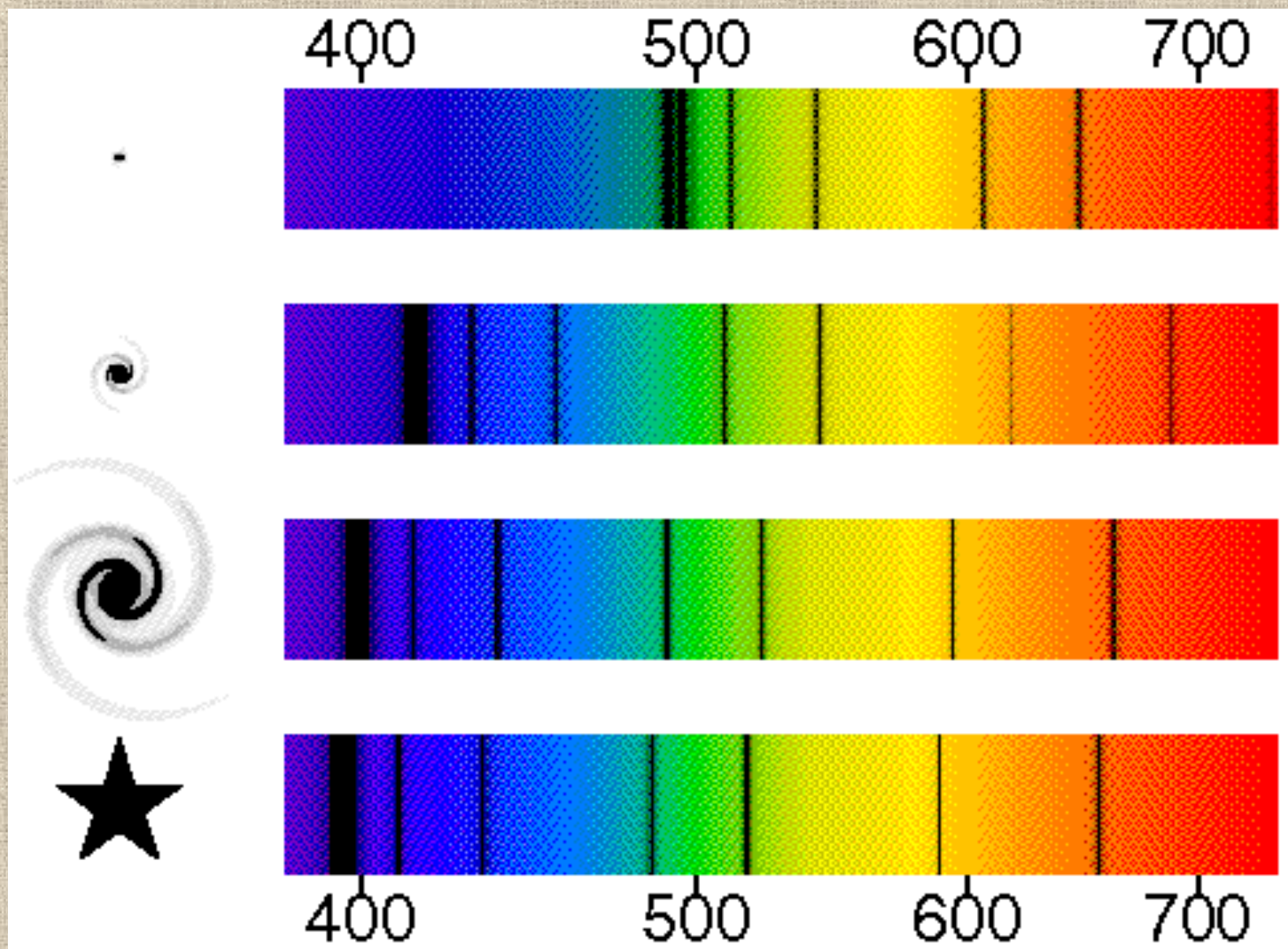


Barred Spiral Galaxy NGC 1300



Lo spettro della luce: semplicemente l'arcobaleno



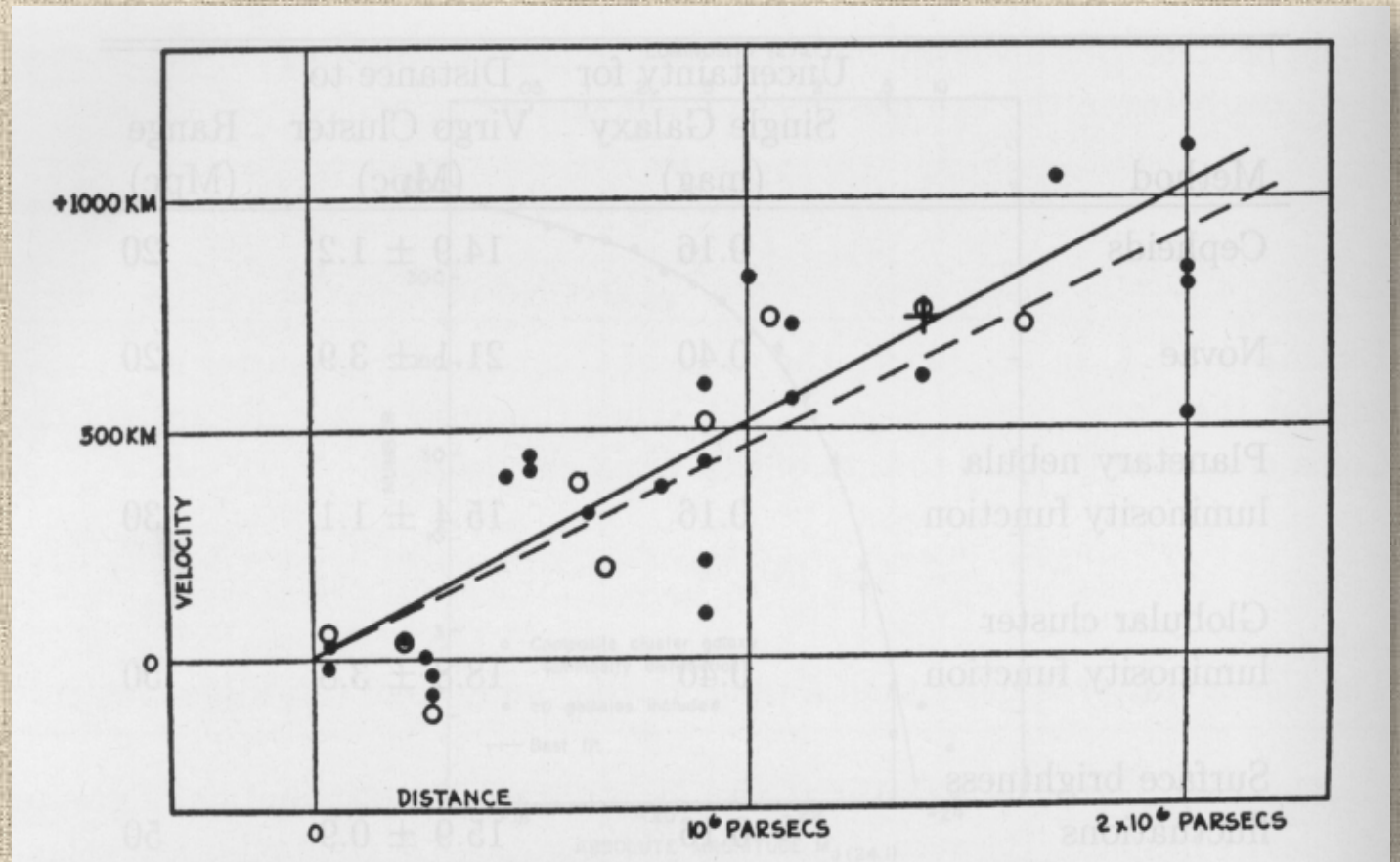


Hubble: Le galassie si allontanano le une dalle altre, l'Universo si espande!



*Velocità' apparente di
allontanamento*

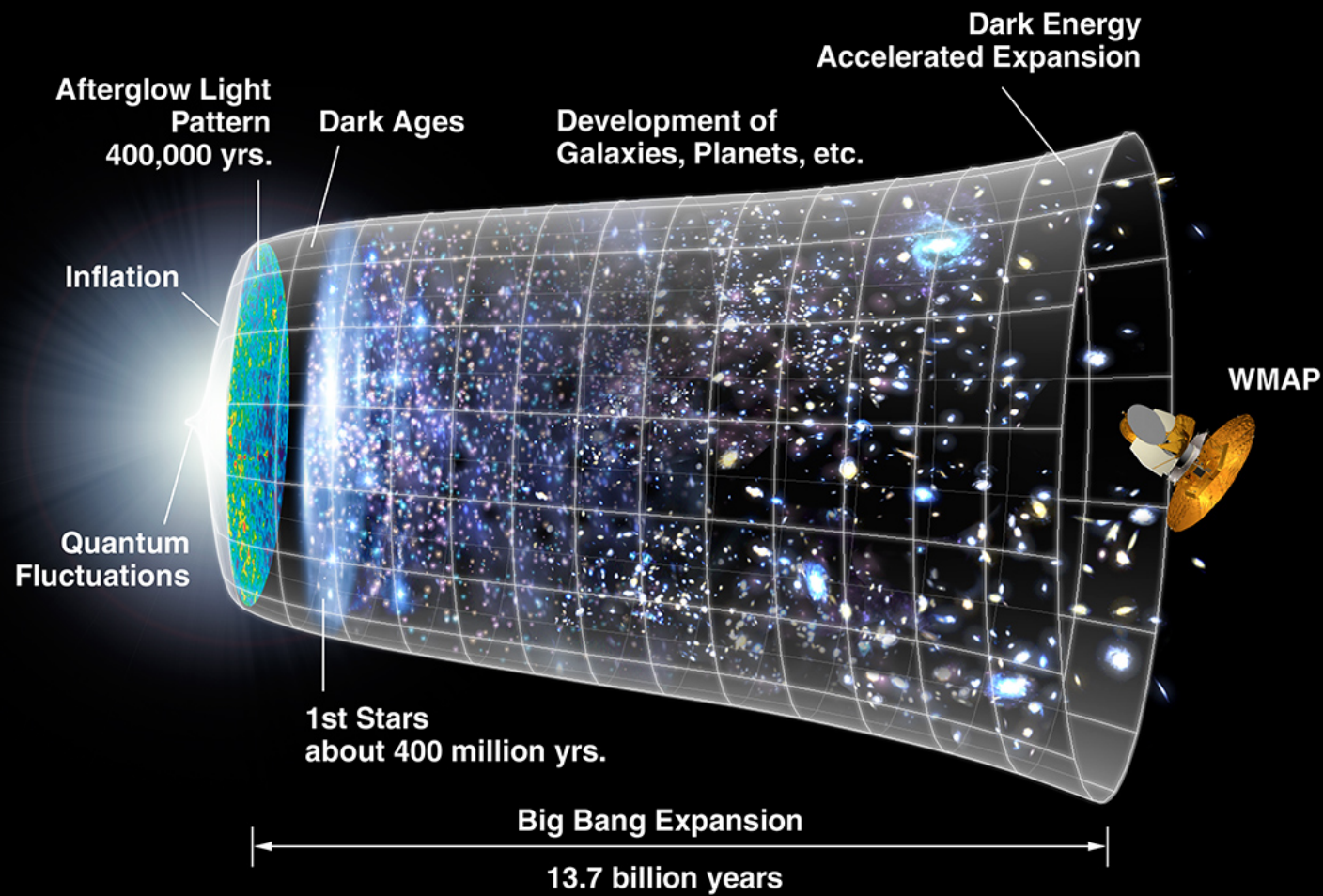
$$Velocità' = H_0 \times distanza$$

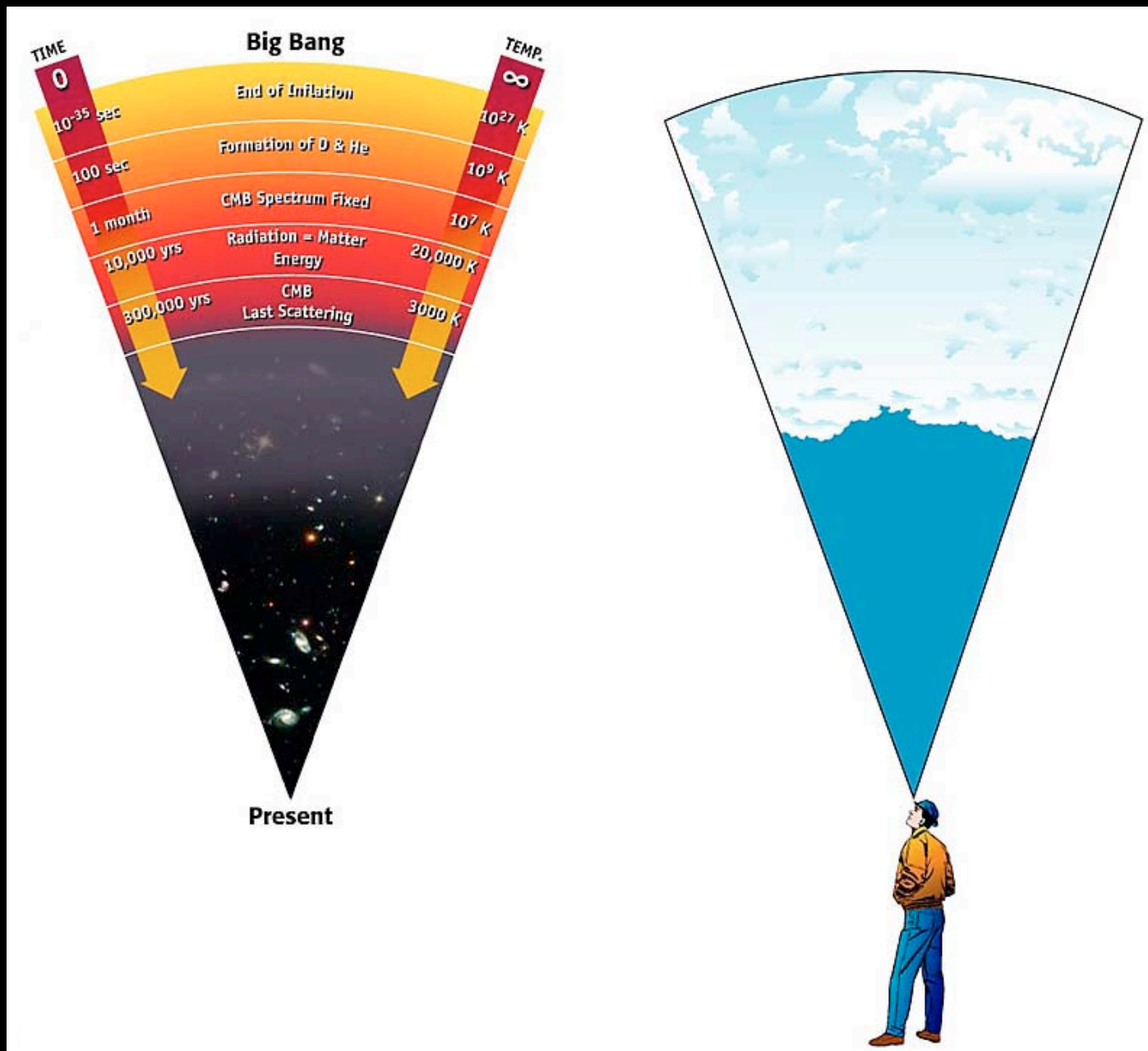


Distanza

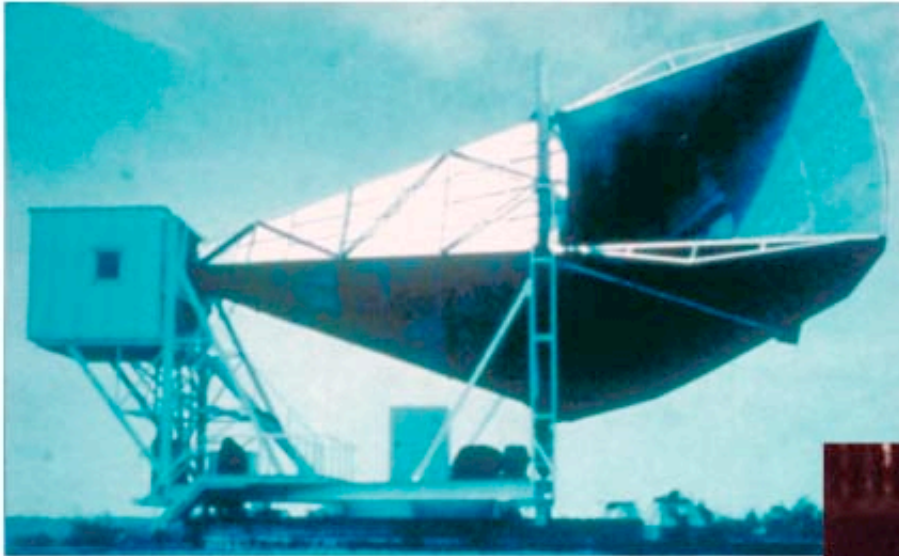
Quindi l'Universo non e' fermo, proprio come suggeriva la relativita'. Ma allora, andando indietro nel tempo tutto doveva essere sempre piu' denso e caldo, fino ad arrivare ad un istante iniziale: il **Big Bang**







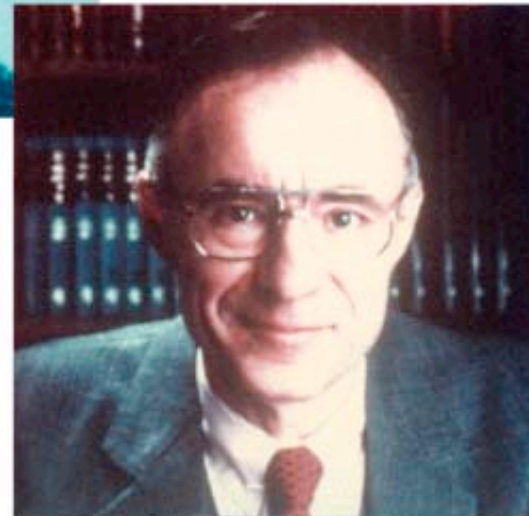
DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND



Microwave Receiver



Robert Wilson

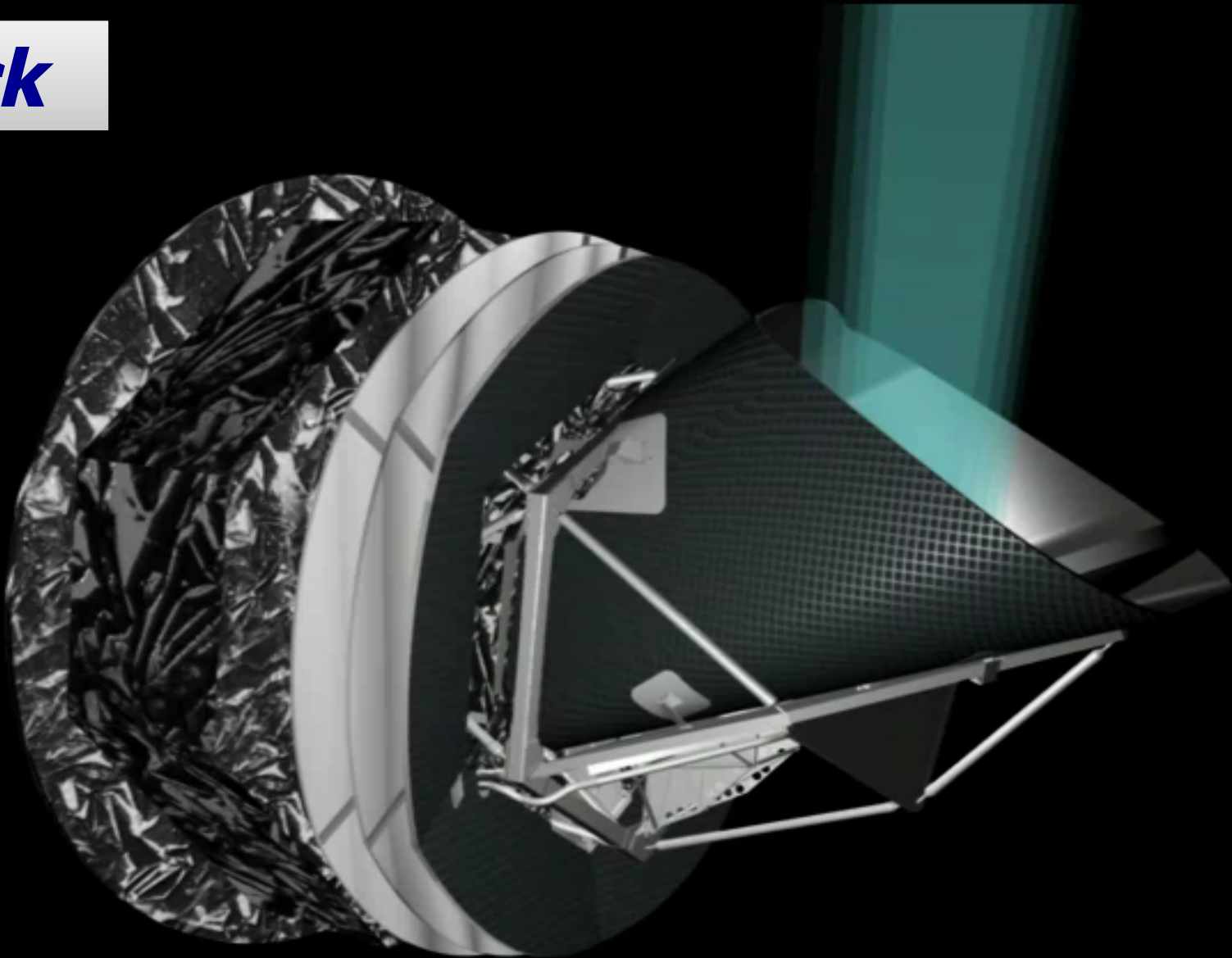


Arno Penzias

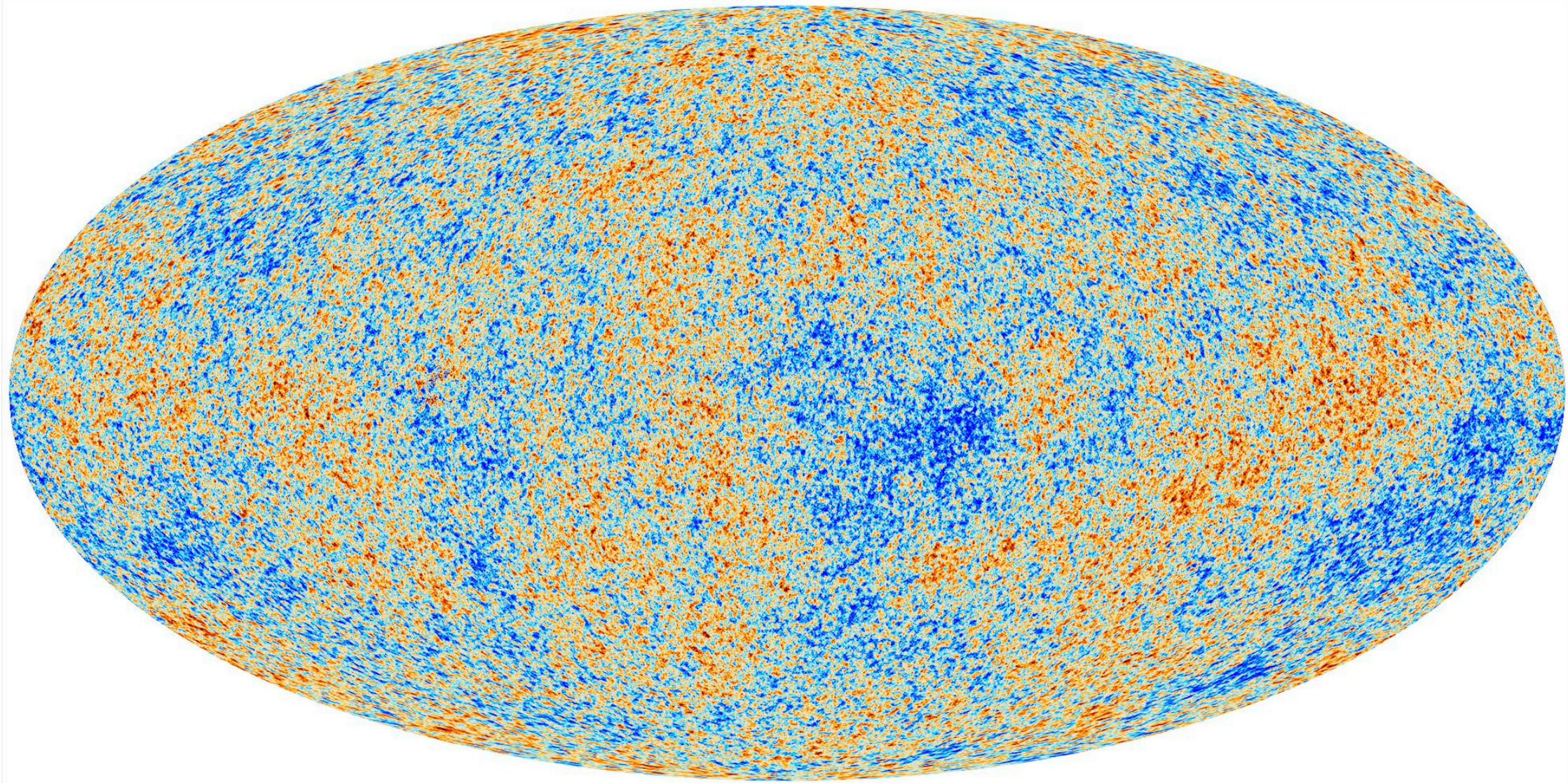
1964

MAP990045

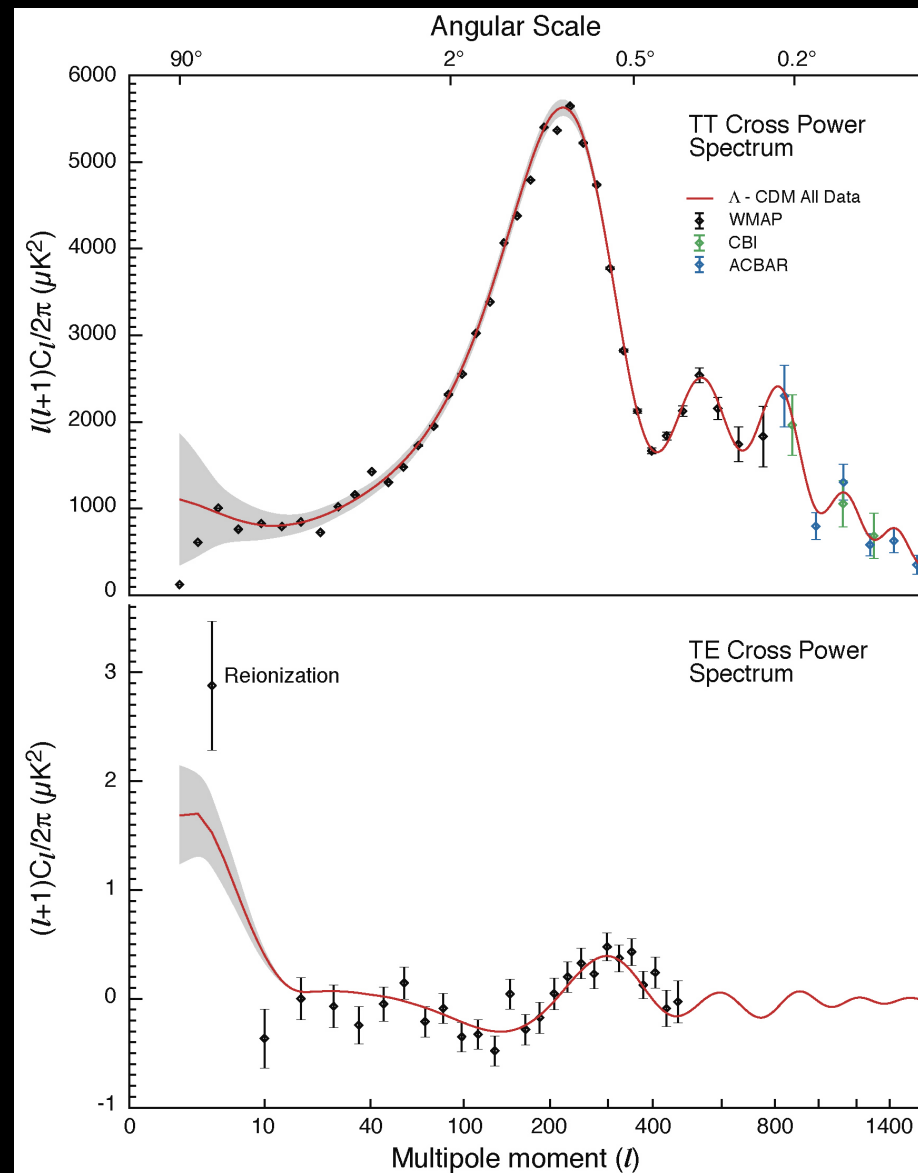
Planck



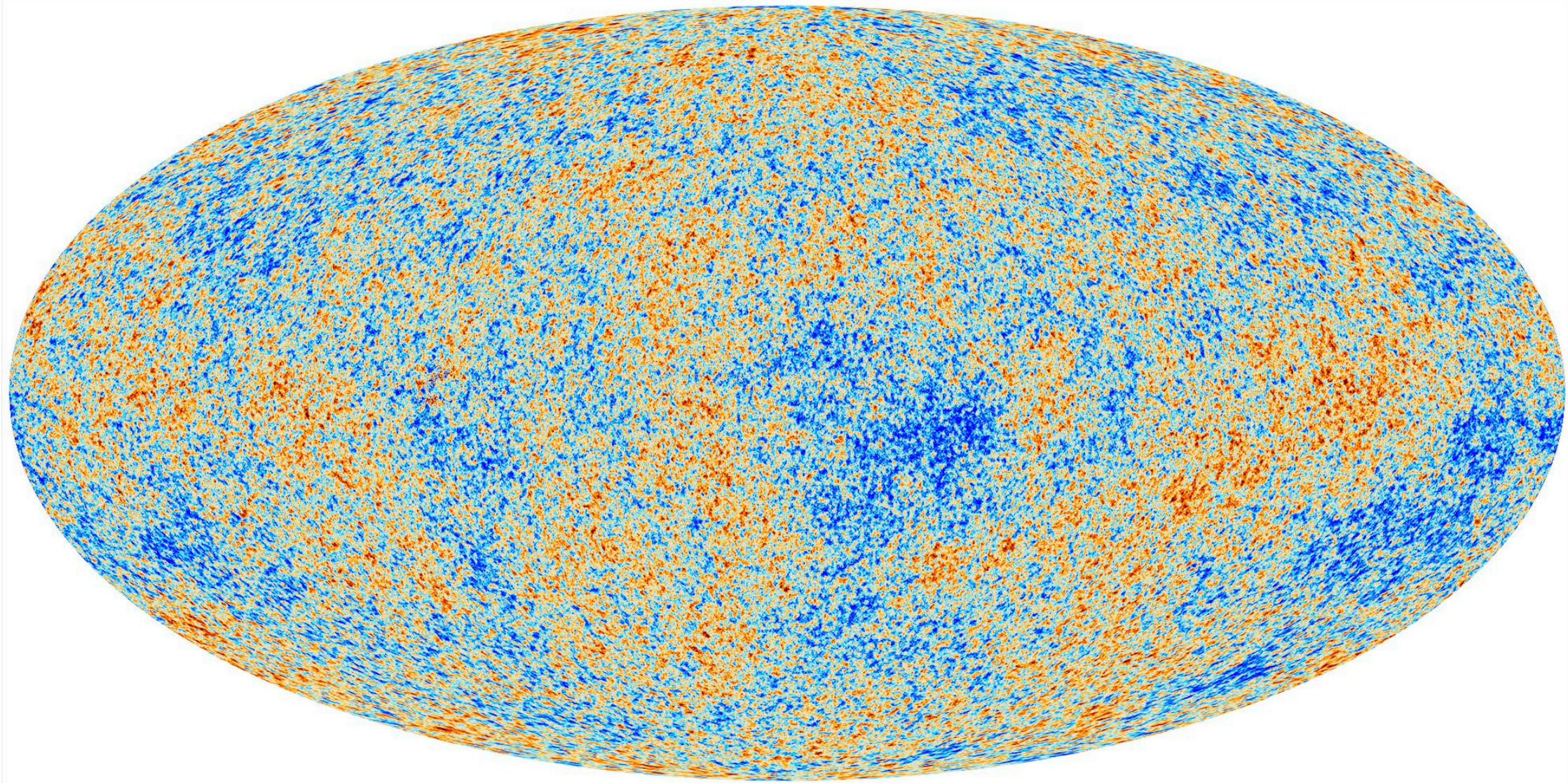
Distribuzione sul cielo dell'intensità della radiazione di fondo (Planck)



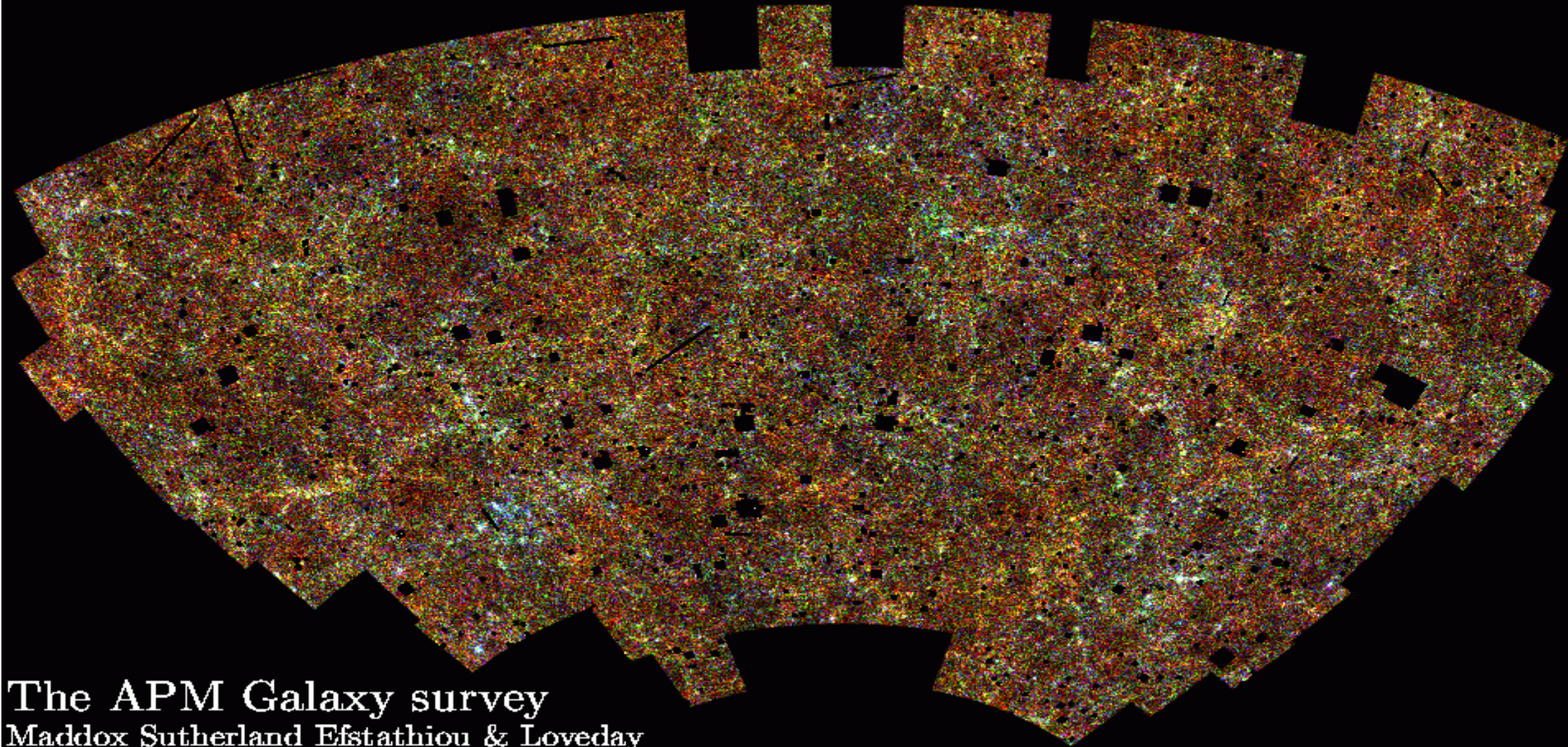
Quanto contano le disomogeneita' a diverse scale angolari?



Distribuzione sul cielo dell'intensità della radiazione di fondo (Planck)



Densita' di galassie proiettata sul cielo

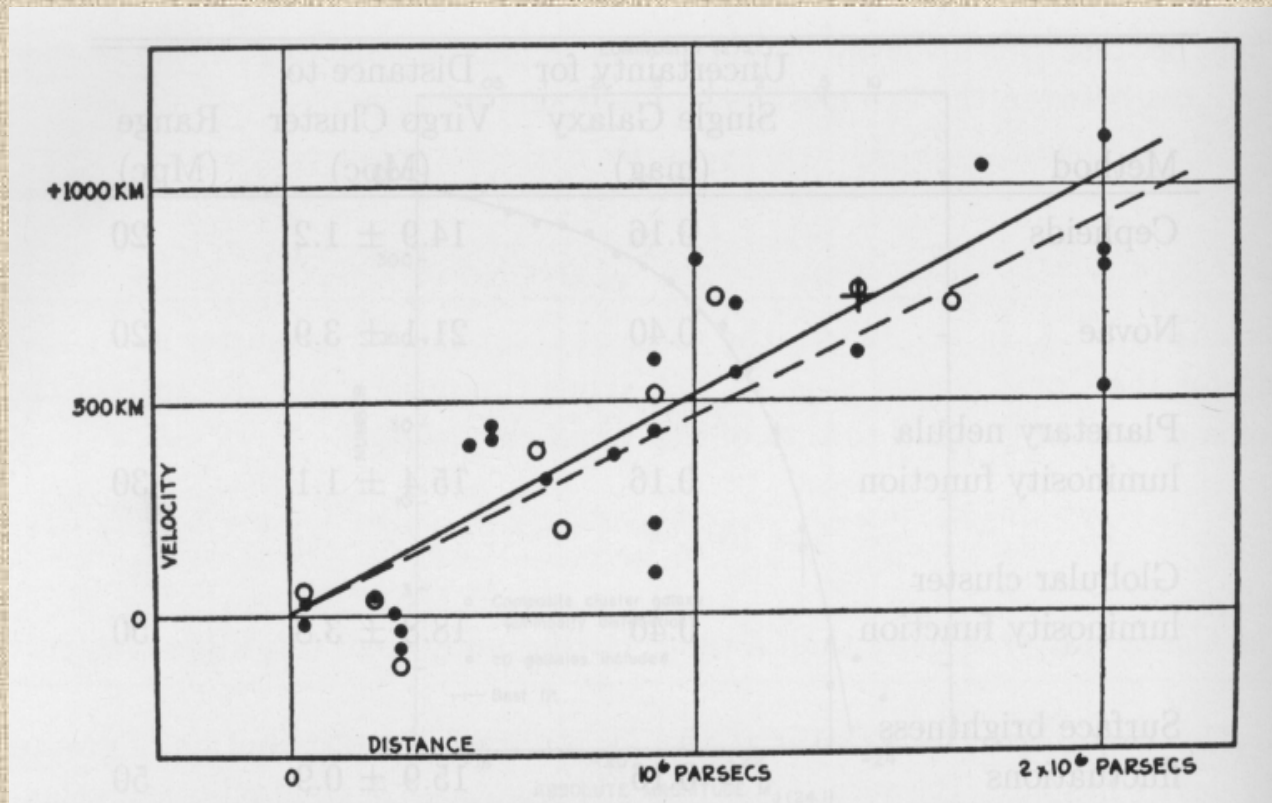


The APM Galaxy survey
Maddox Sutherland Efstathiou & Loveday

Se rovesciamo la legge di Hubble possiamo ottenere la distanza delle galassie misurando il loro *redshift*. E quindi ricostruirne la distribuzione tridimensionale nello spazio!

$$\text{Distanza} = \text{Velocita}' / H_0$$

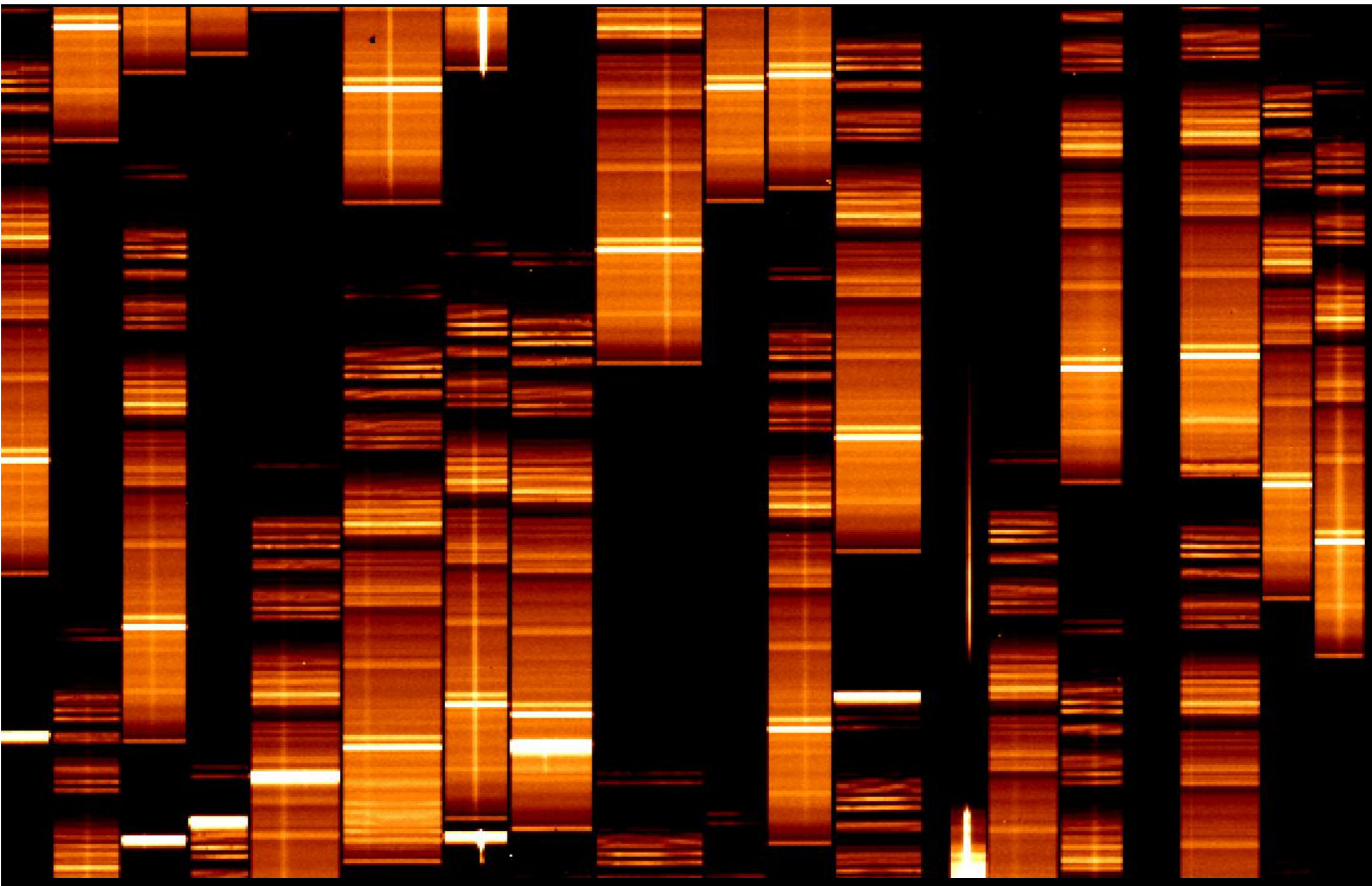
Redshift



Distanza







Field W1



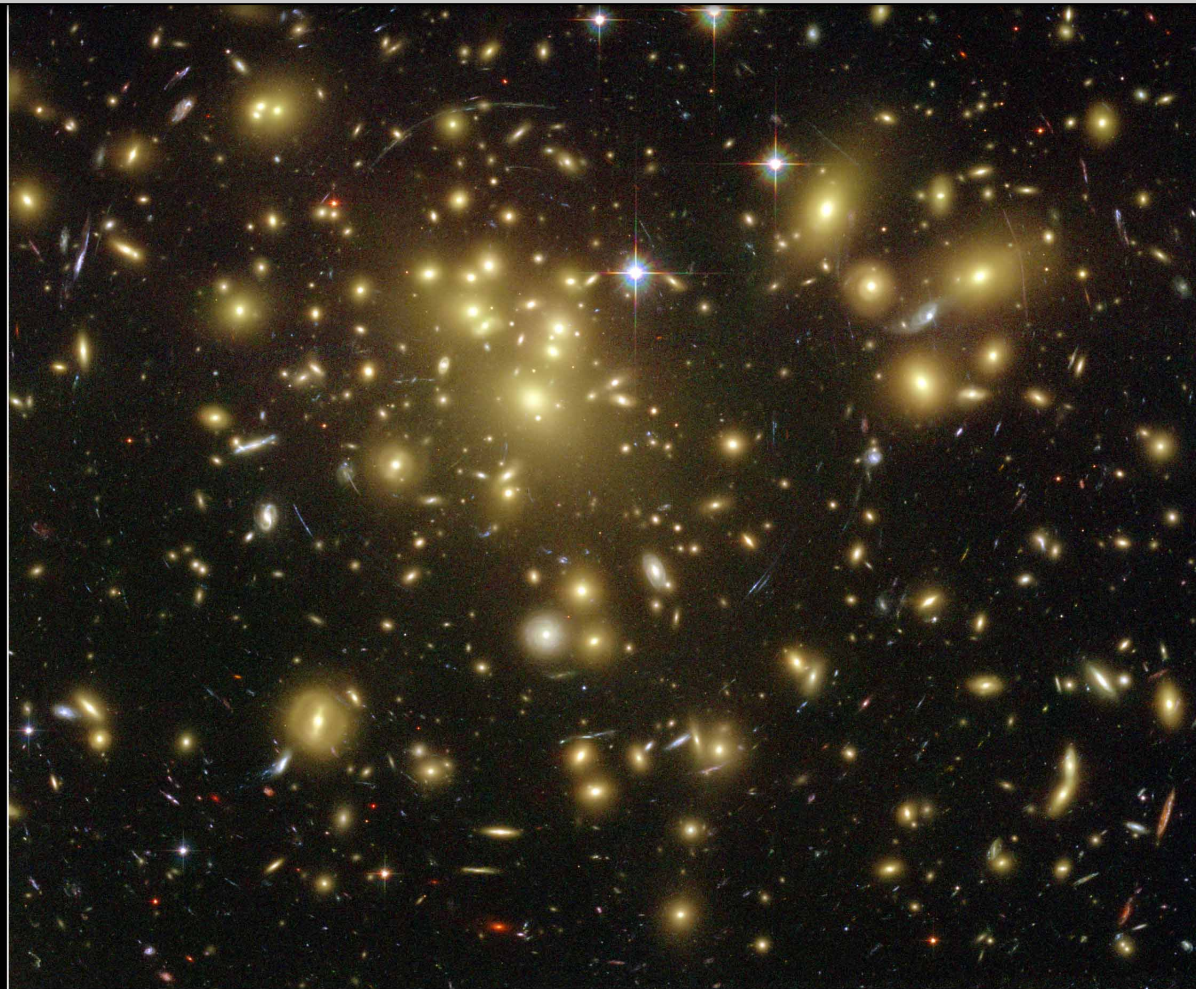
Field W4

Ma quel che vediamo corrisponde a tutta la materia esistente?

Sicuramente c'è del gas diffuso al di fuori delle galassie, come quello caldo negli ammassi di galassie, che emette nei raggi X

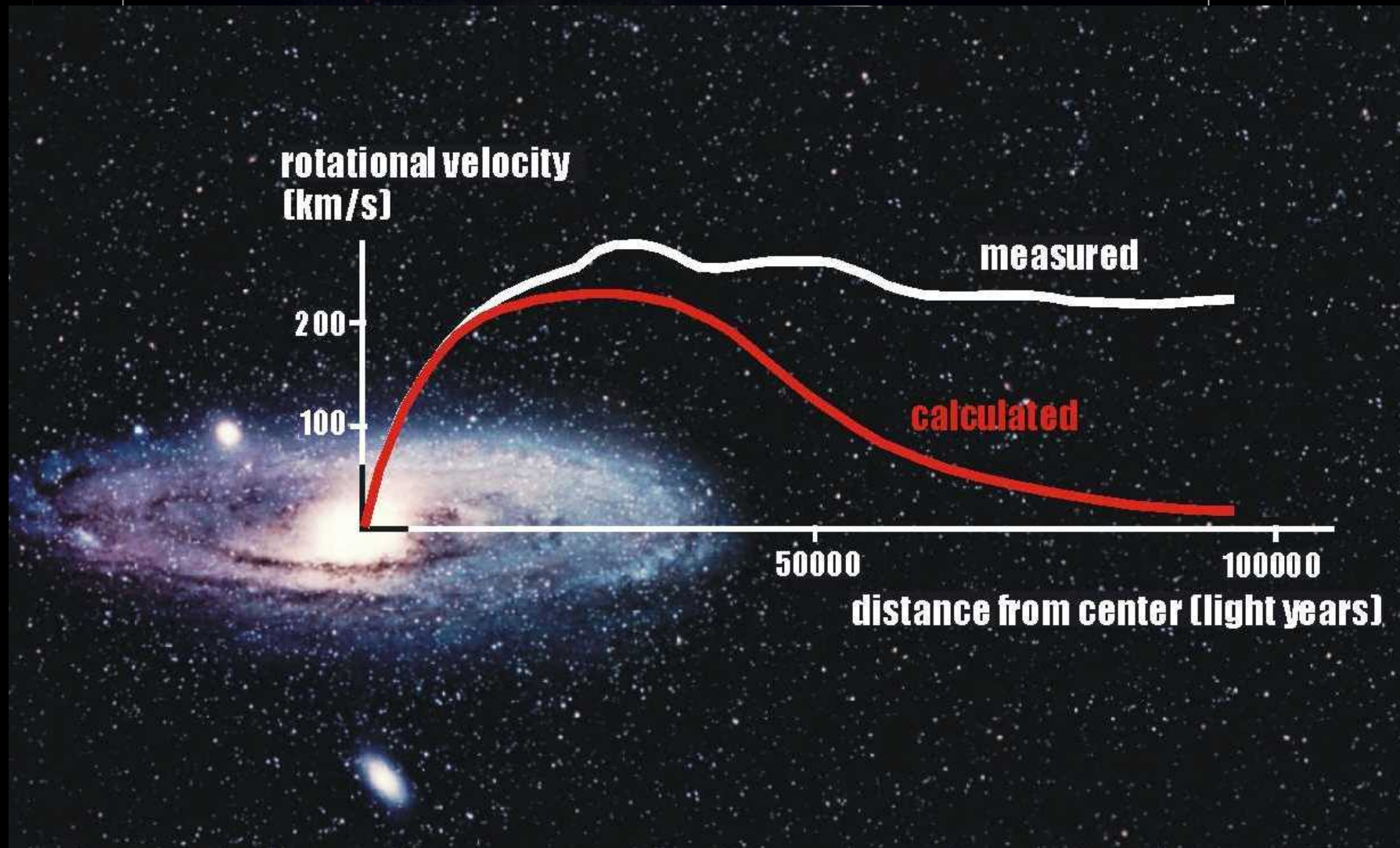


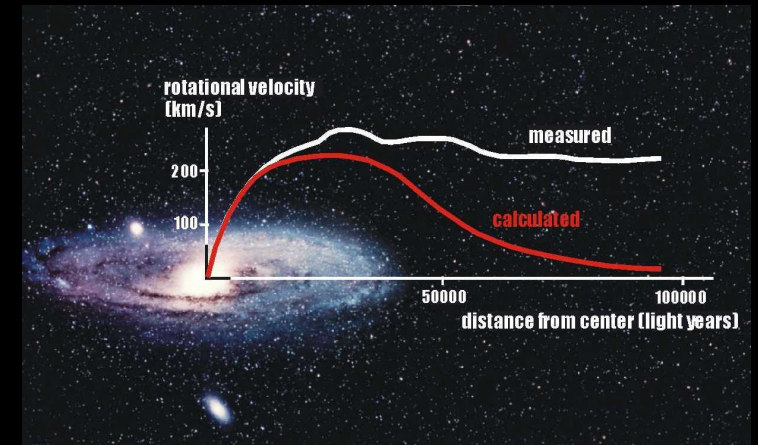
Ma non basta. Qualcos'altro che non emette luce di alcun tipo fa muovere le galassie piu' velocemente di quanto ci si aspetti: deve esserci dell'altra massa che non vediamo, oltre a galassie e gas



Galaxy Cluster Abell 1689
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

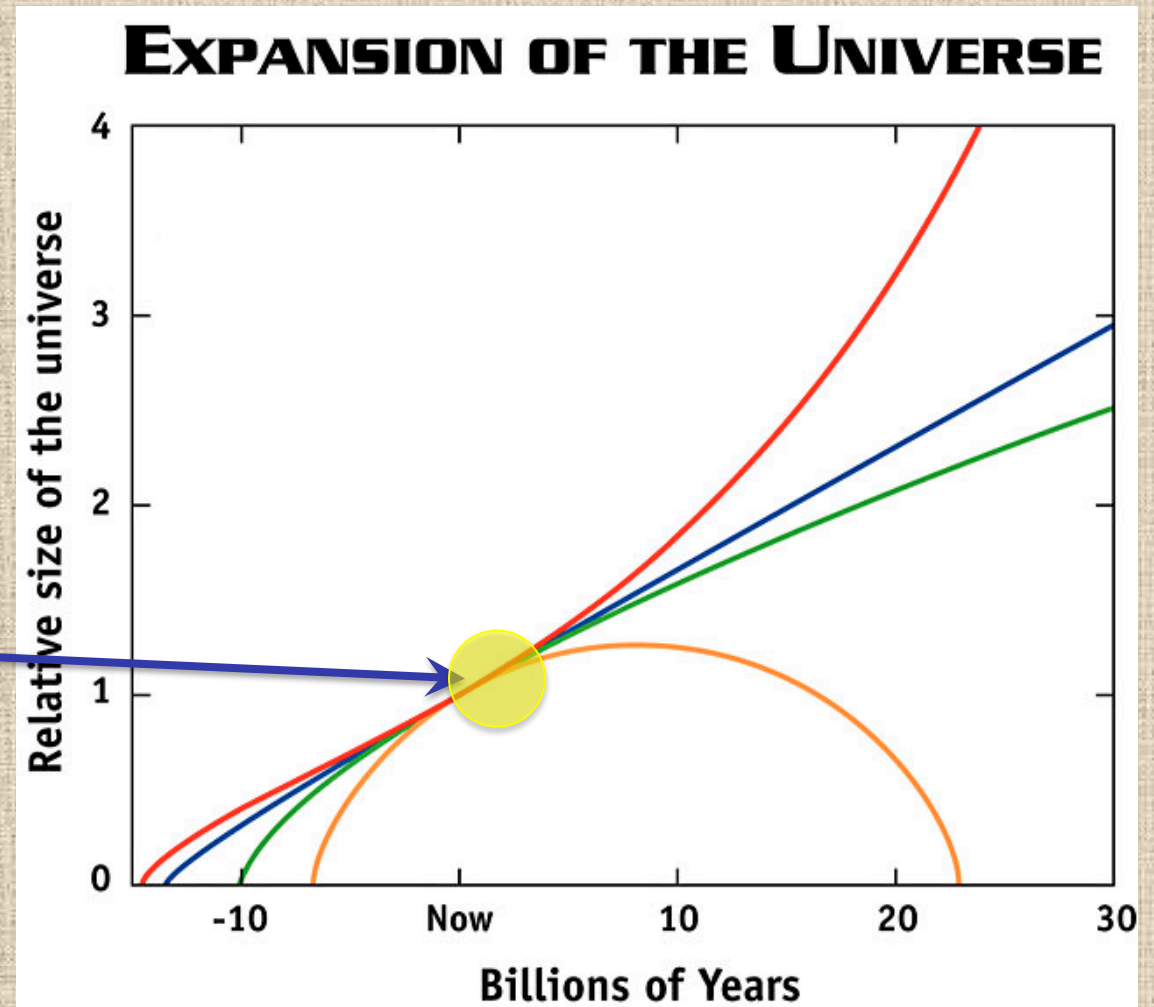
Analogamente, le parti esterne delle galassie spirali ruotano piu' velocemente di quanto ci si aspetterebbe dalla distribuzione di luce: e' necessario un alone di **materia oscura**





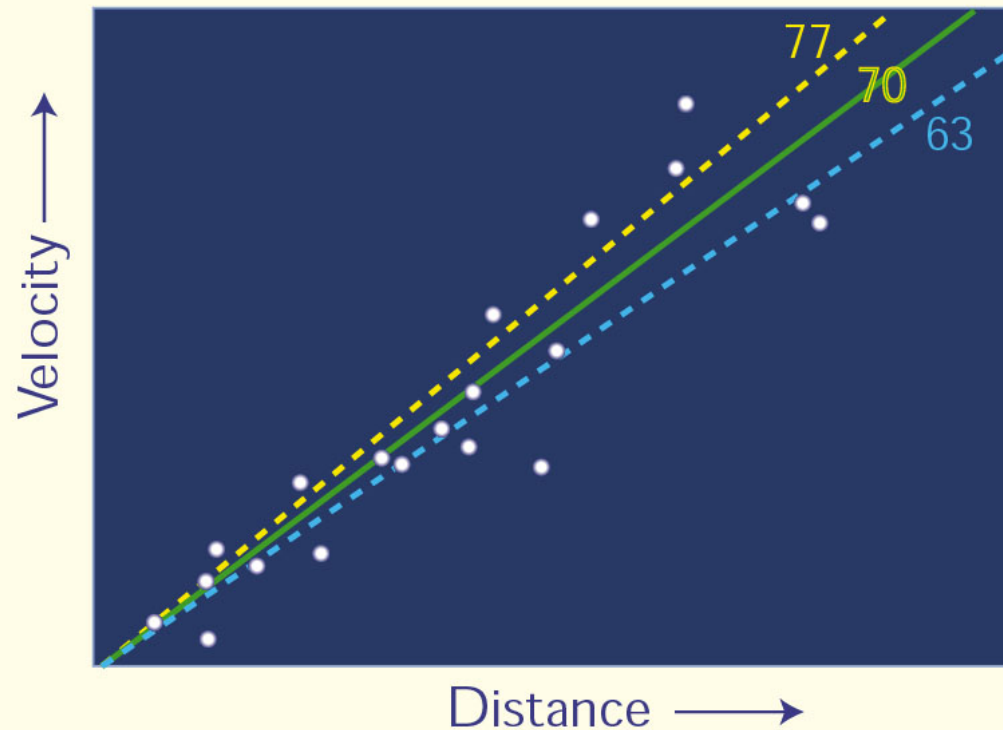
La quantita' di materia oscura risulta essere circa 5 volte quella della materia ordinaria che conosciamo

Cosa sappiamo della velocità di espansione nel passato?

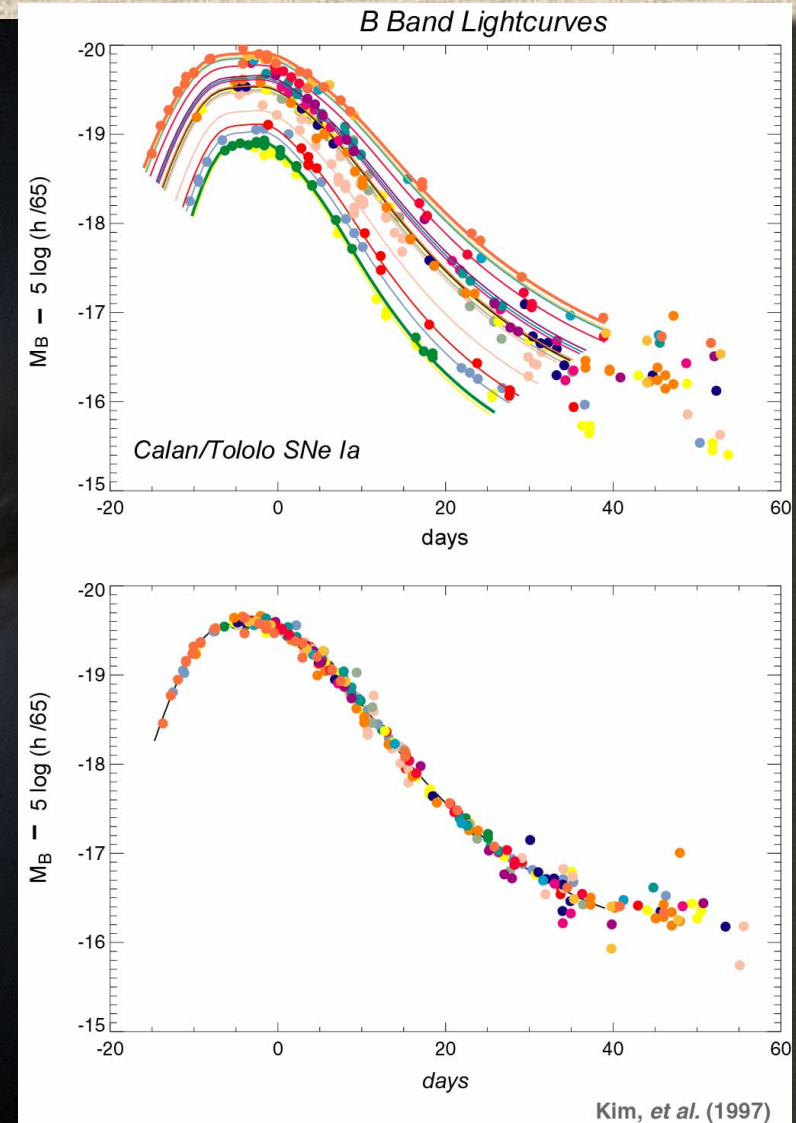
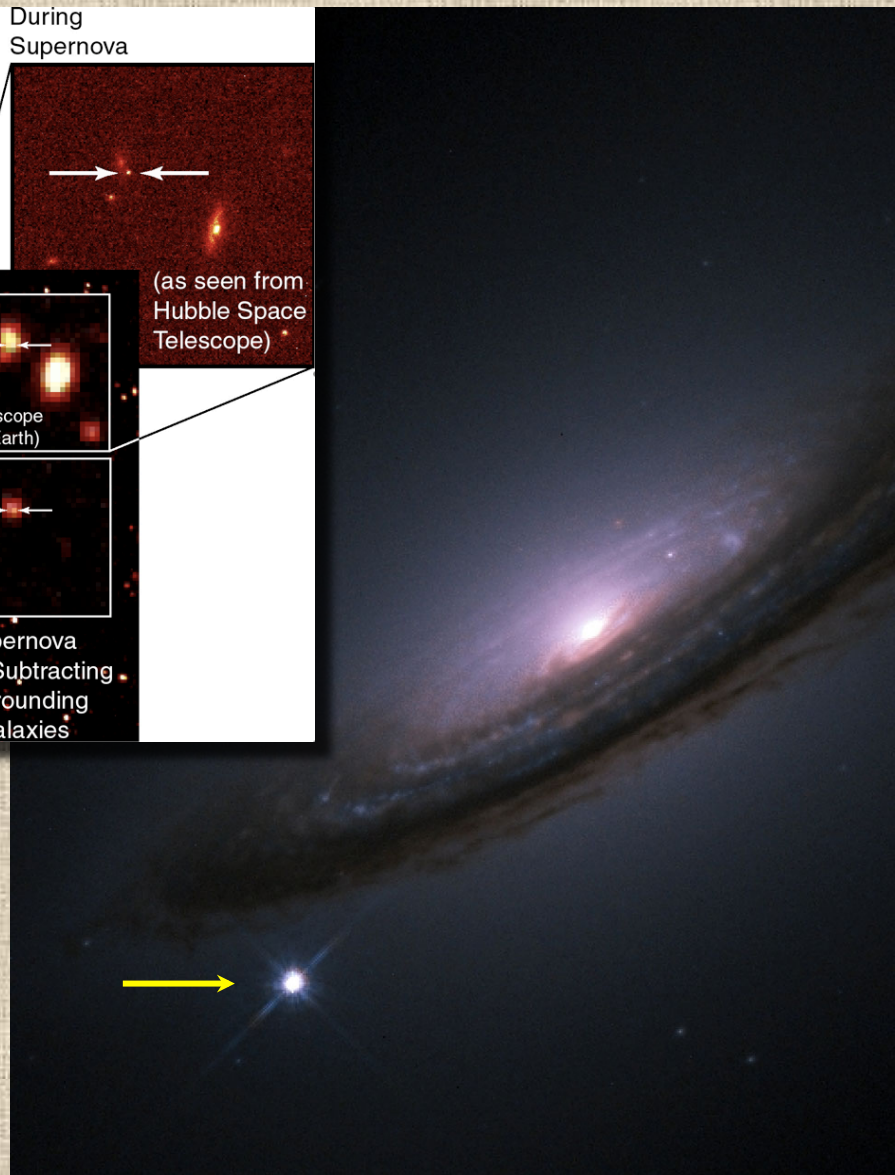
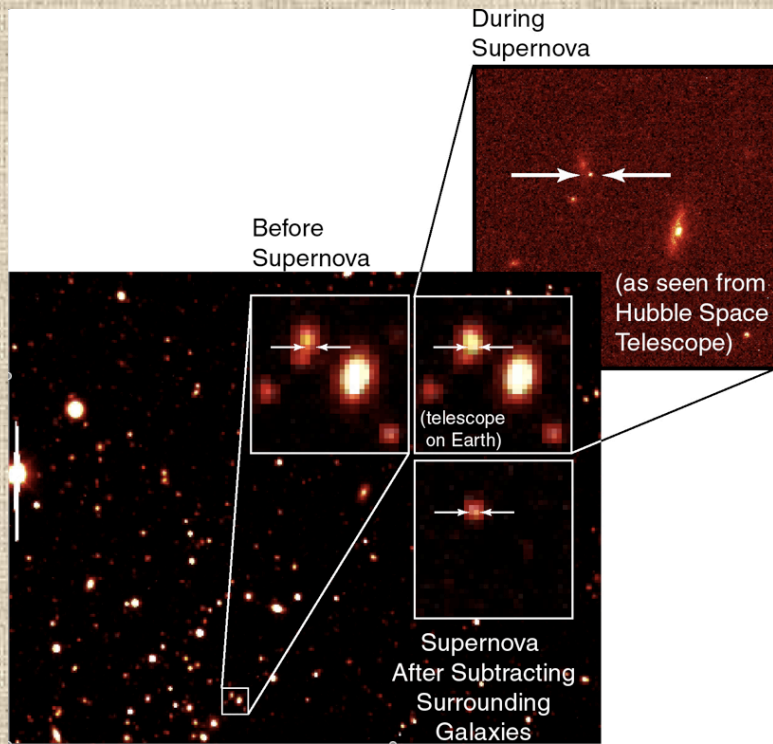


Candele standard: stelle di cui conosciamo a priori la luminosita' assoluta:
misurando la loro luminosita' apparente otteniamo la loro distanza!
Hubble uso' le stelle CEFEDI, una classe di stelle variabili

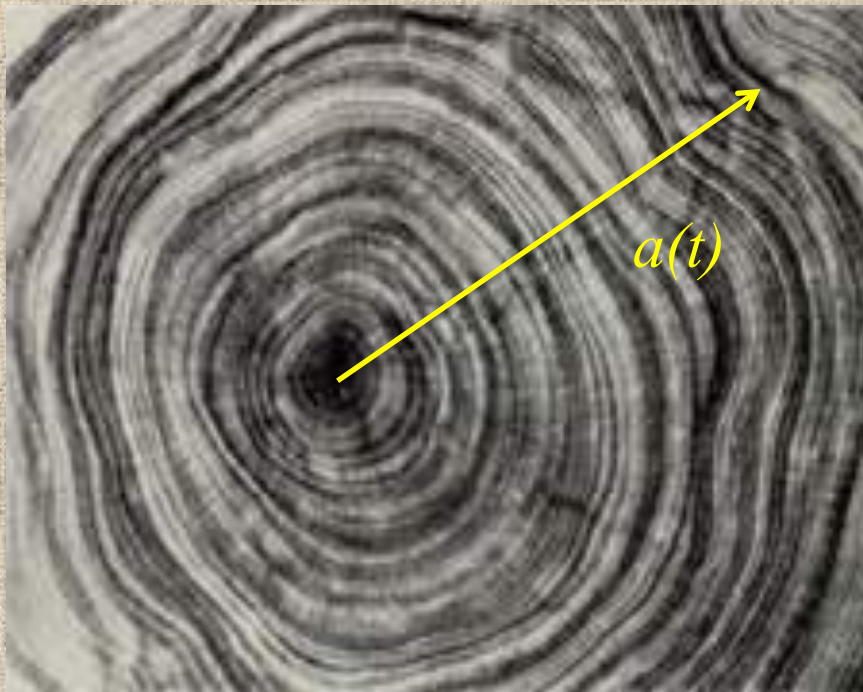
Hubble Diagram for Cepheids



Se vogliamo andare ancora piu' lontano, dobbiamo trovare delle candele standard intrinsecamente molto luminose: le supernove di Tipo Ia

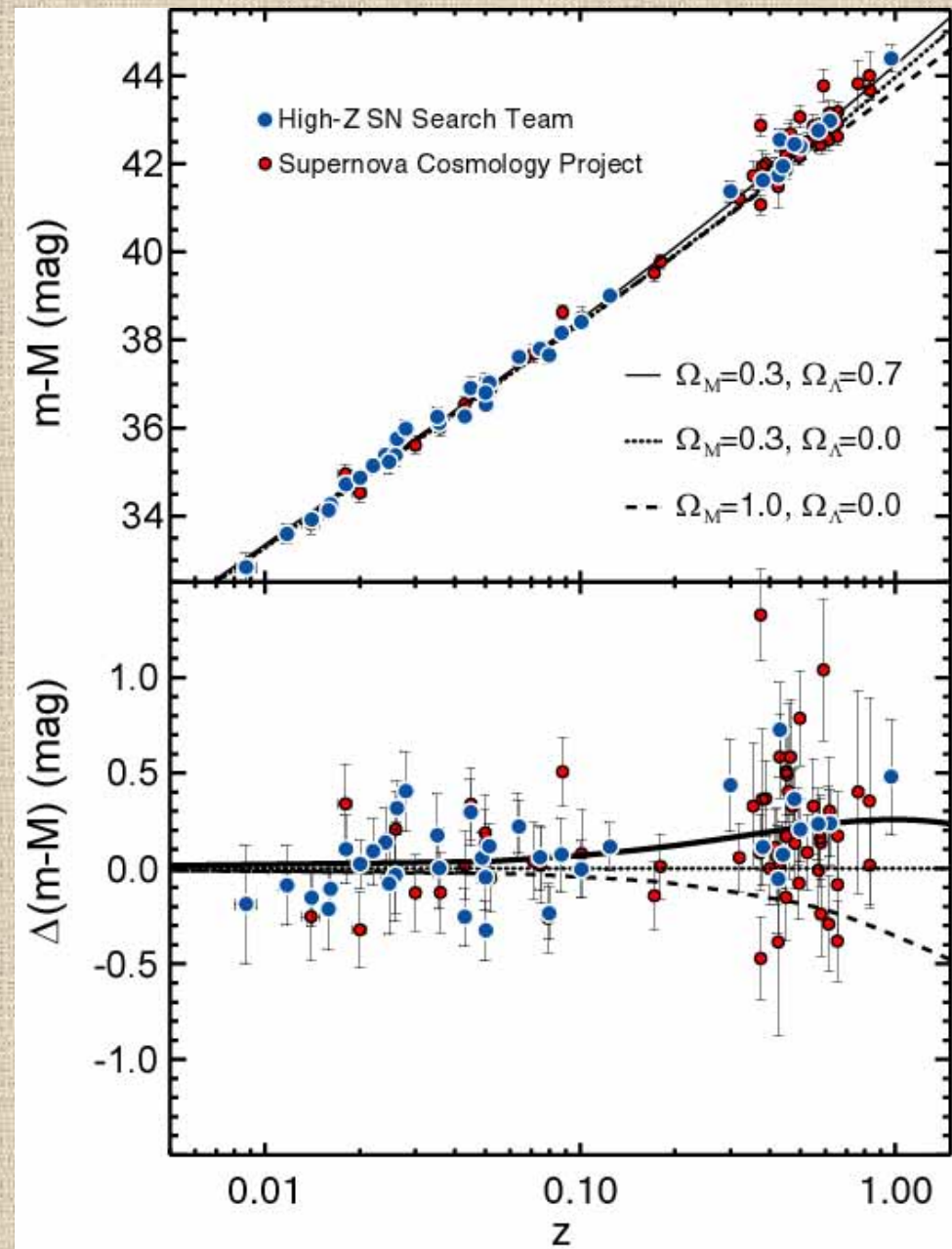


E il loro diagramma di Hubble ci da' un risultato sorprendente: l'espansione dell'Universo non sta rallentando, bensì accelerando

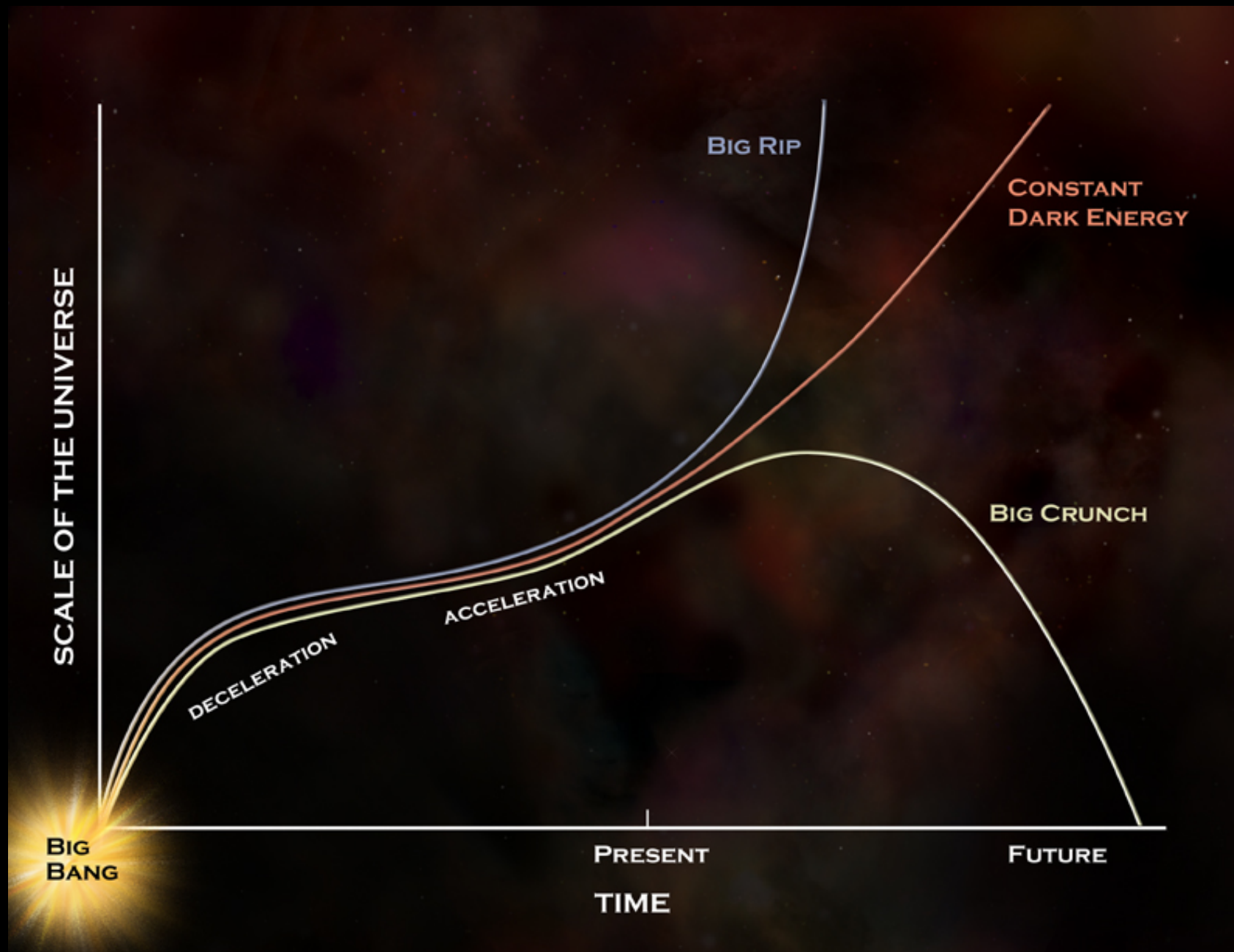


$\log(Distanza)$

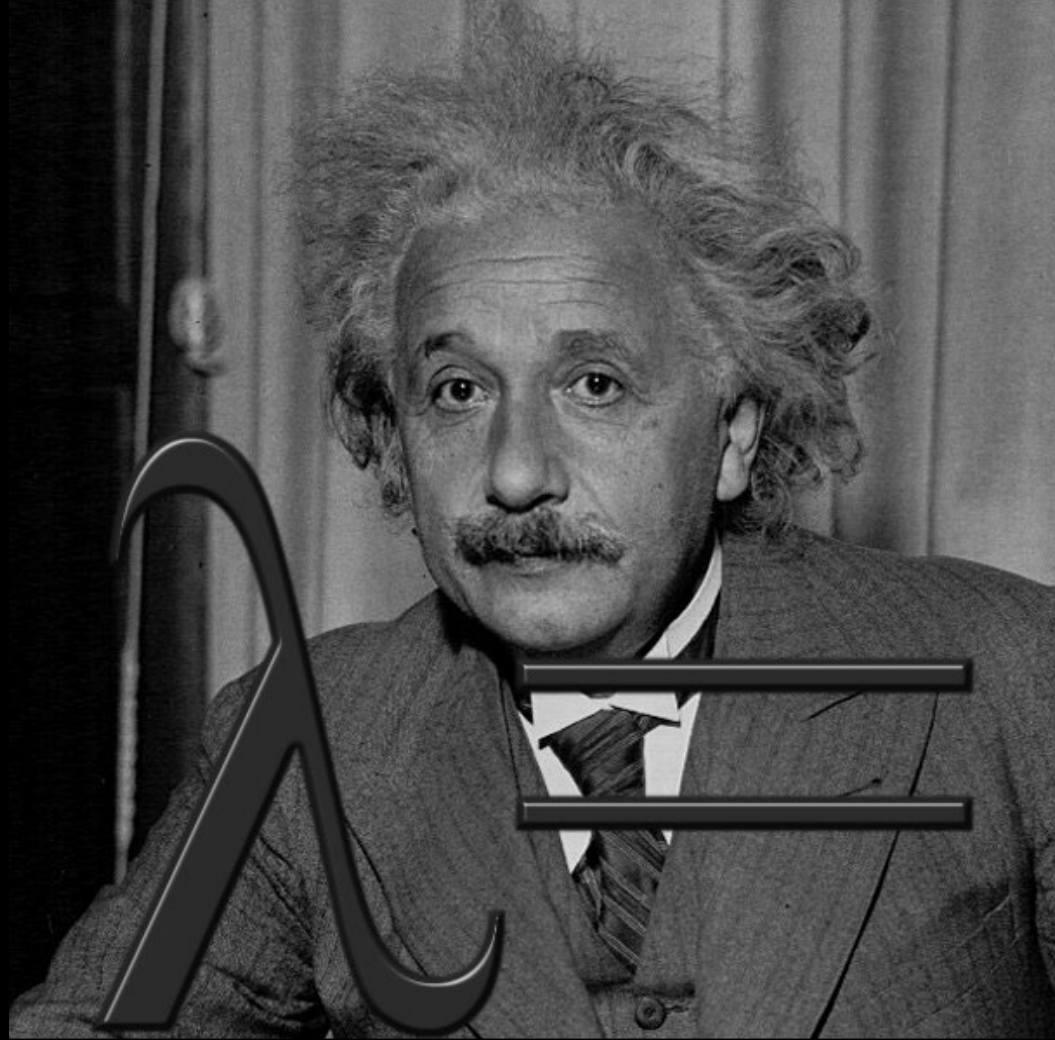
→ E' come se misurassimo la storia di crescita di un albero e vedessimo che recentemente sta crescendo piu' in fretta che nel passato



Redshift delle linee spettrali



L'osservazione delle supernove ci obbliga ad aggiungere la *Costante Cosmologica* Λ nelle equazioni di Einstein... ma cosa significa fisicamente?



Implica l'esistenza di una forma di energia repulsiva che aiuta l'espansione, che chiamiamo ***Energia Oscura***

Premio Nobel per la Fisica 2011



Saul Perlmutter



Brian Schmidt



Adam Riess

... per la scoperta
dell'accelerazione cosmica.

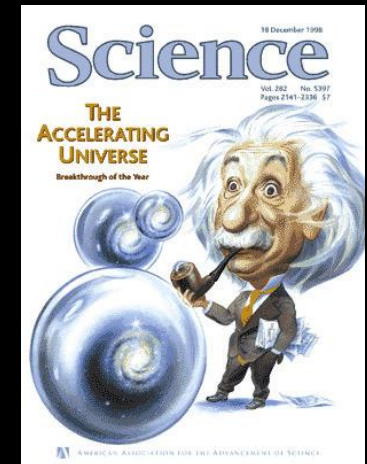
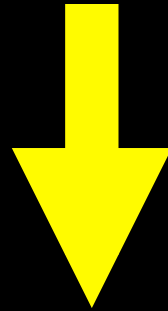


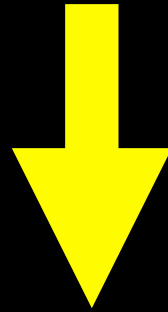
Diagramma di Hubble delle Sn Ia



$\Lambda \neq 0$: CAMPO DI ENERGIA REPULSIVA

$$\Omega_{\Lambda} \approx 0.7$$

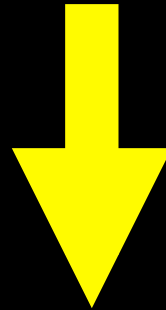
... ma ricordiamo che le
osservazioni del Fondo Cosmico
nelle Microonde implicano



$$\Omega_{\text{TOT}} = \Omega_{\text{materia}} + \Omega_{\text{rad}} + \dots + \Omega_{\Lambda} = 1$$

(CURVATURA NULLA)

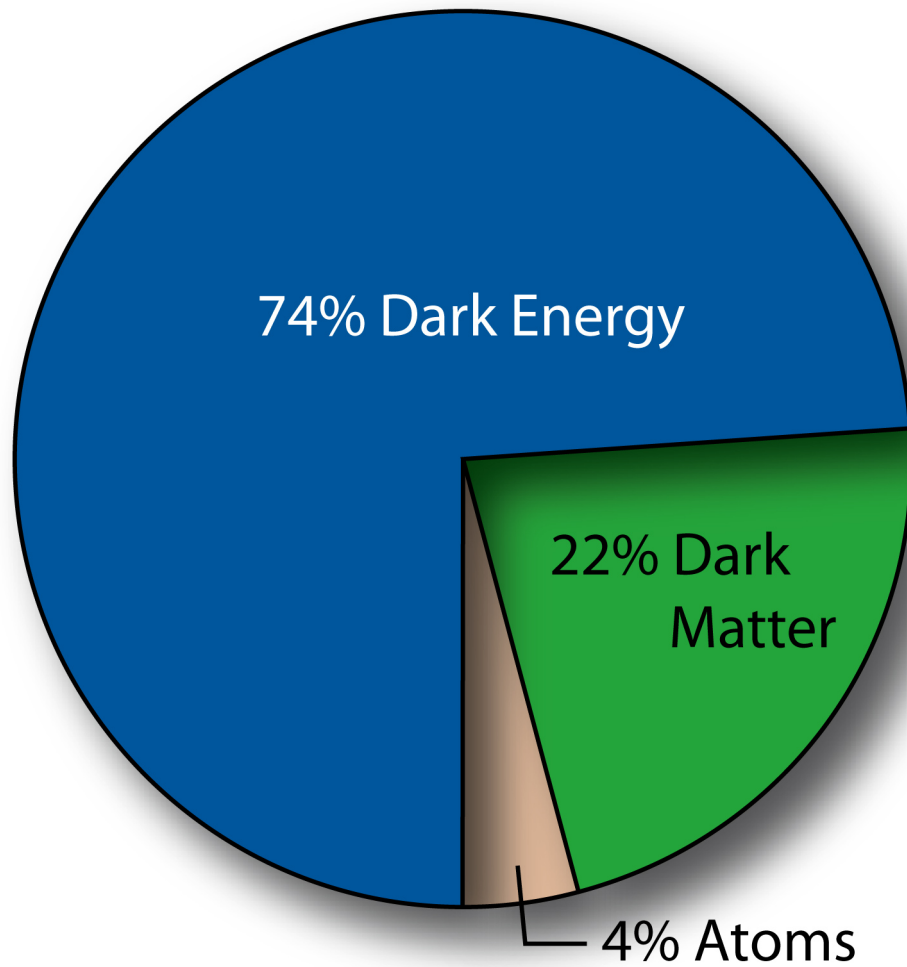
... e poiche' altre osservazioni
indipendenti danno un parametro di
densita' di materia attuale $\Omega_{\text{mat}} \approx 0.3$



$$\Omega_{\text{TOT}} = \Omega_{\text{mat}} + \cancel{\Omega_{\text{rad}}} + \Omega_{\Lambda} = 0.3 + 0.7 = 1$$

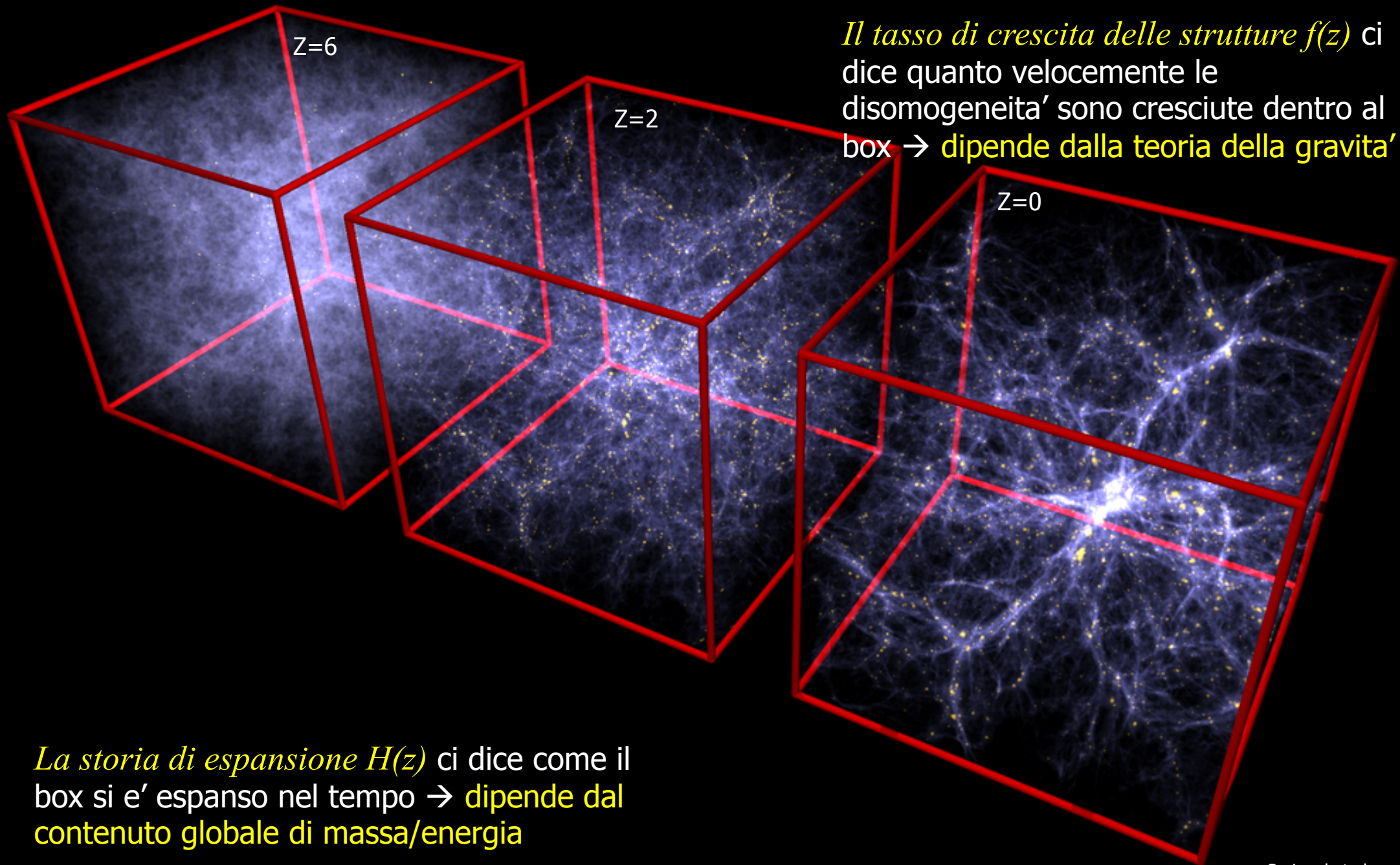
→ Quindi la costante cosmologica fornisce esattamente il contributo di
energia (oscura) che serve per avere curvatura nulla

Il budget energetico attuale dell'Universo



E' questa l'unica possibile spiegazione?

Si, se la Relativita' Generale e' la teoria giusta della gravita' a tutte le scale



“La cosa piu’ bella che l’uomo possa sperimentare e’ il senso del mistero. Il senso del mistero e’ la sorgente di tutta la vera arte e la vera scienza.

Coloro che non conoscono questa emozione, che non sono piu’ capaci di meravigliarsi e lasciarsi rapire ammirati, sono per me come morti: i loro occhi sono chiusi”

Albert Einstein

