Istituto Nazionale di Astrofisica
Osservatorio astronomico di Brera
INAF
ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA
NATIONAL INSTITUTE FOR ASTROPHYSICS
Universo in fiore
Il modello cosmologico standard
e l'enigma dell'espansione
Luigi Guzzo
Luigi.guzzo@brera.inaf.it
INAF-Osservatorio Astronomico di Brera
8 Aprile 2015

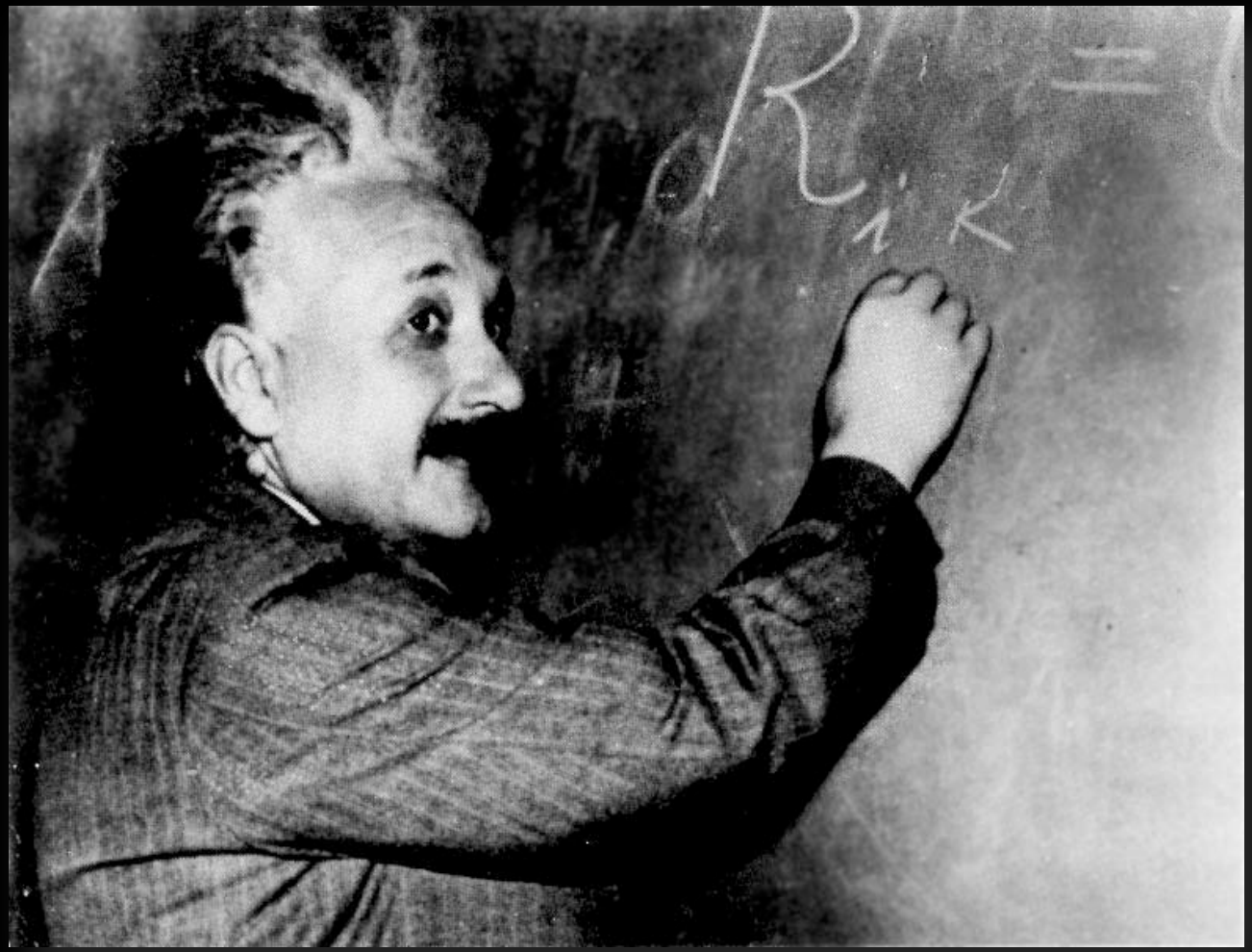
Se guardiamo l'Universo a grandissima scala

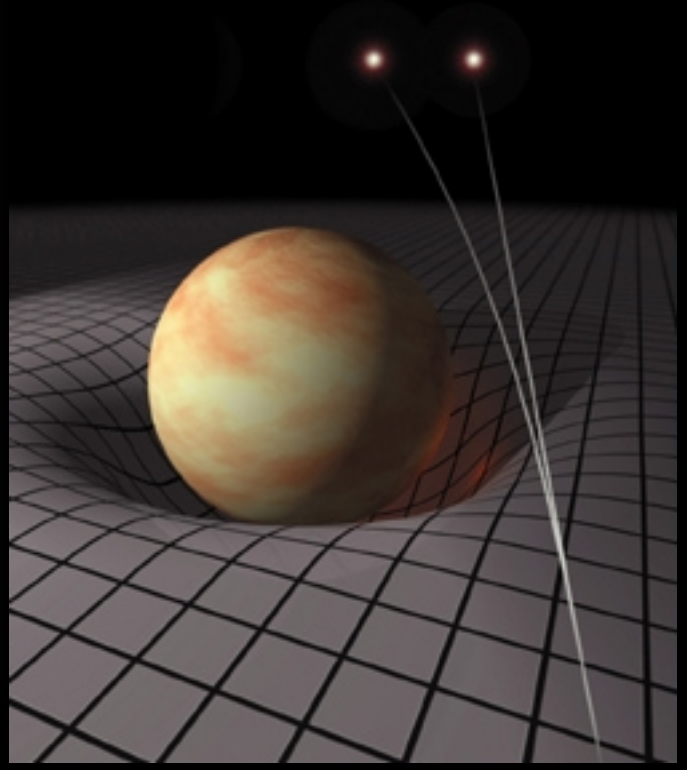
1) L'Universo e' lo stesso in ogni direzione (su scale grandi)
2) Non siamo in un punto privilegiato

→ **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

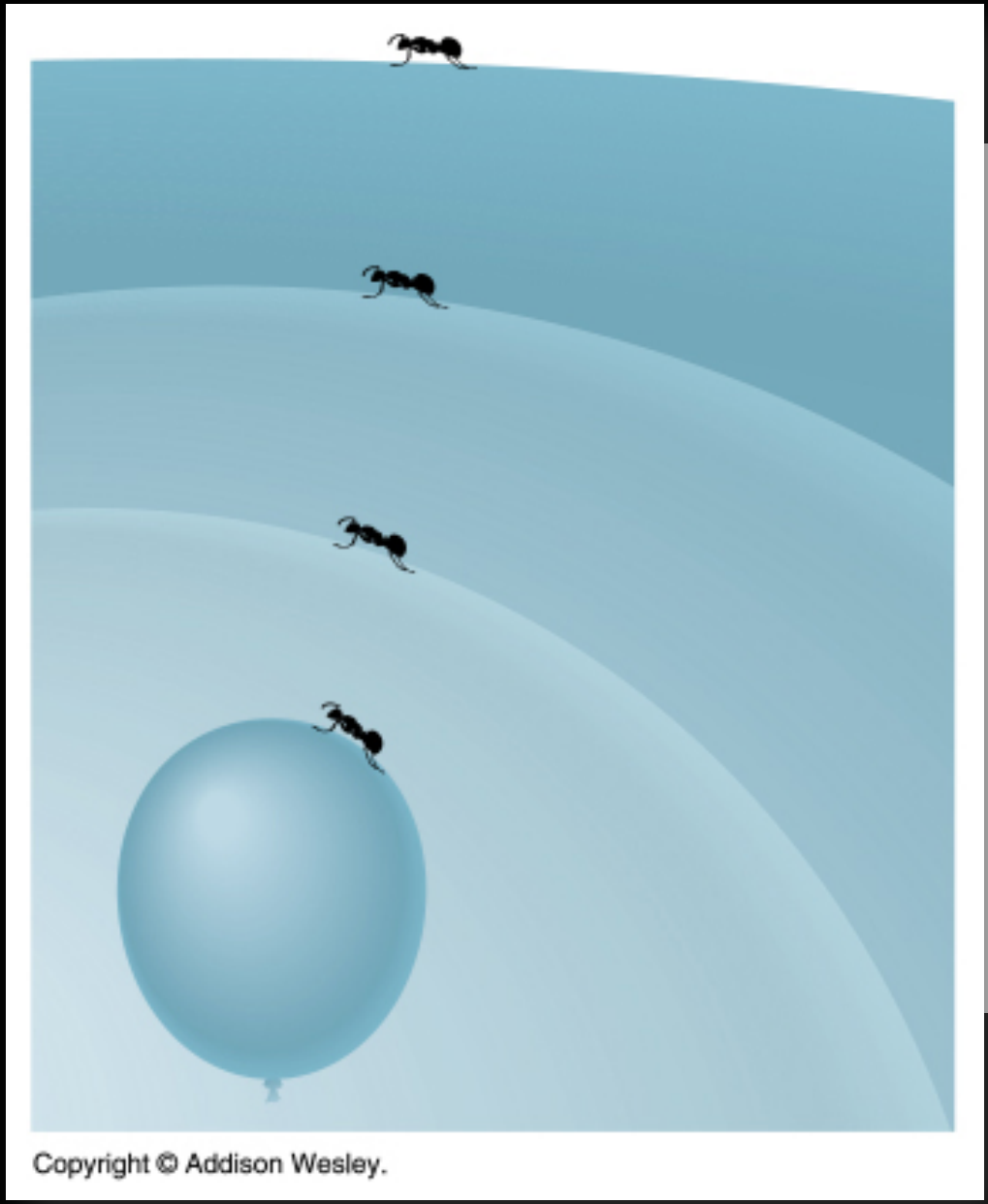




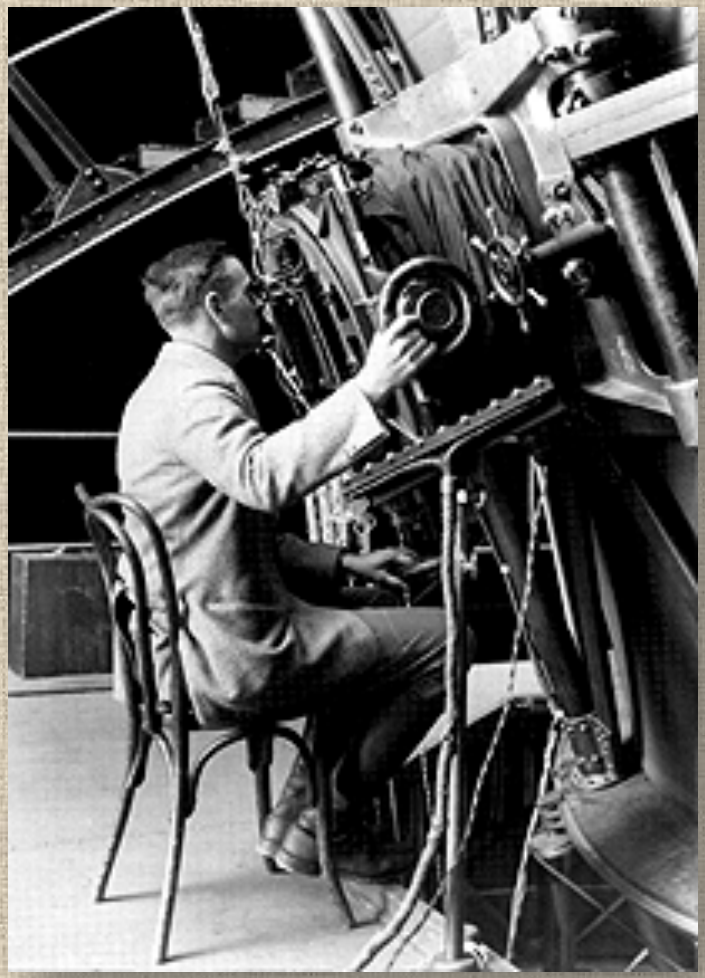
Einstein nota due cose applicando la sua teoria all'Universo intero:

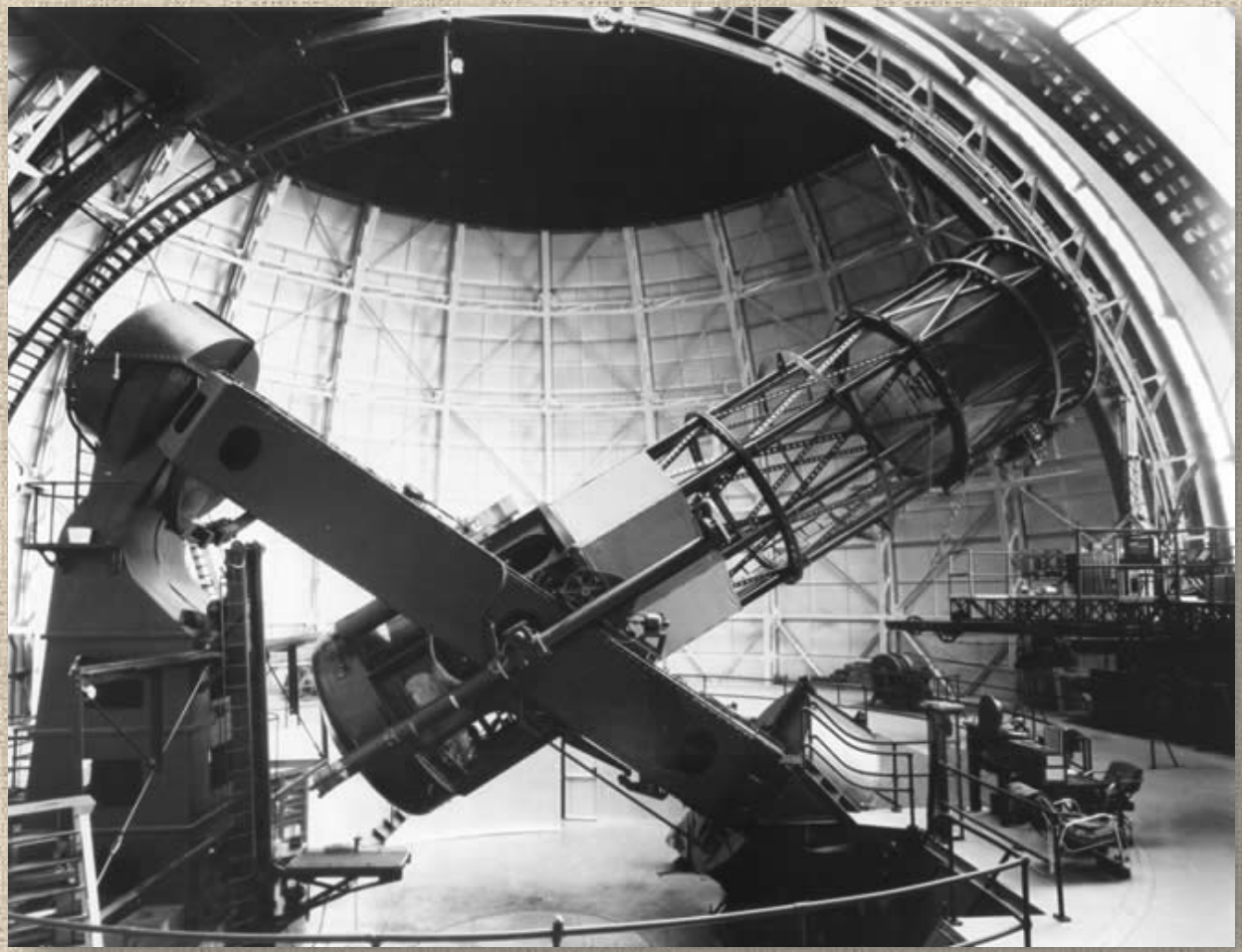
1. L'Universo "fa fatica" a stare fermo: se lo lasciamo libero comincia a contrarsi sotto l'effetto della propria gravita'

2. la sua "geometria" dipende dalla quantita' di materia e energia che esso contiene

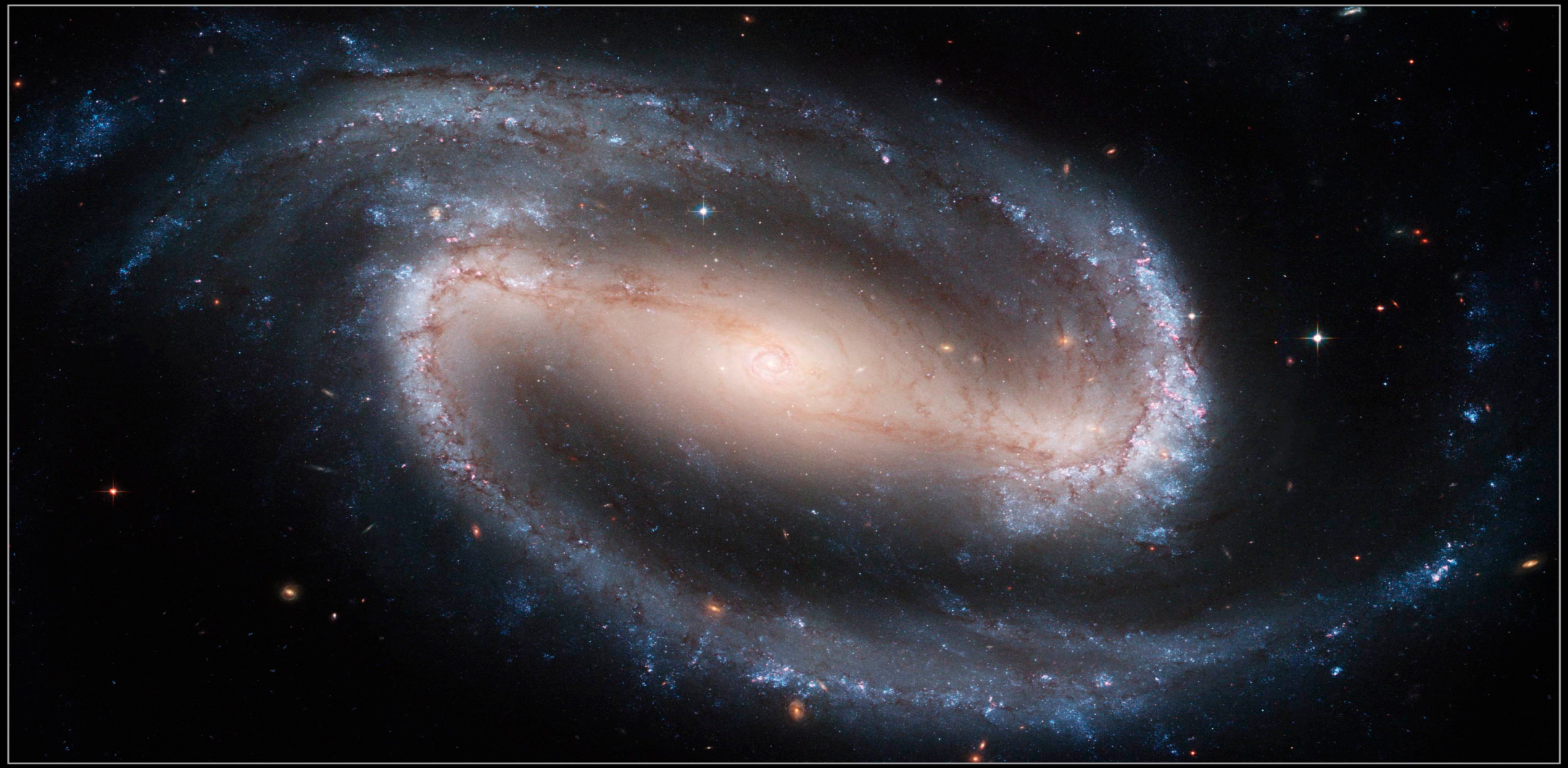


E. Hubble, 1929….



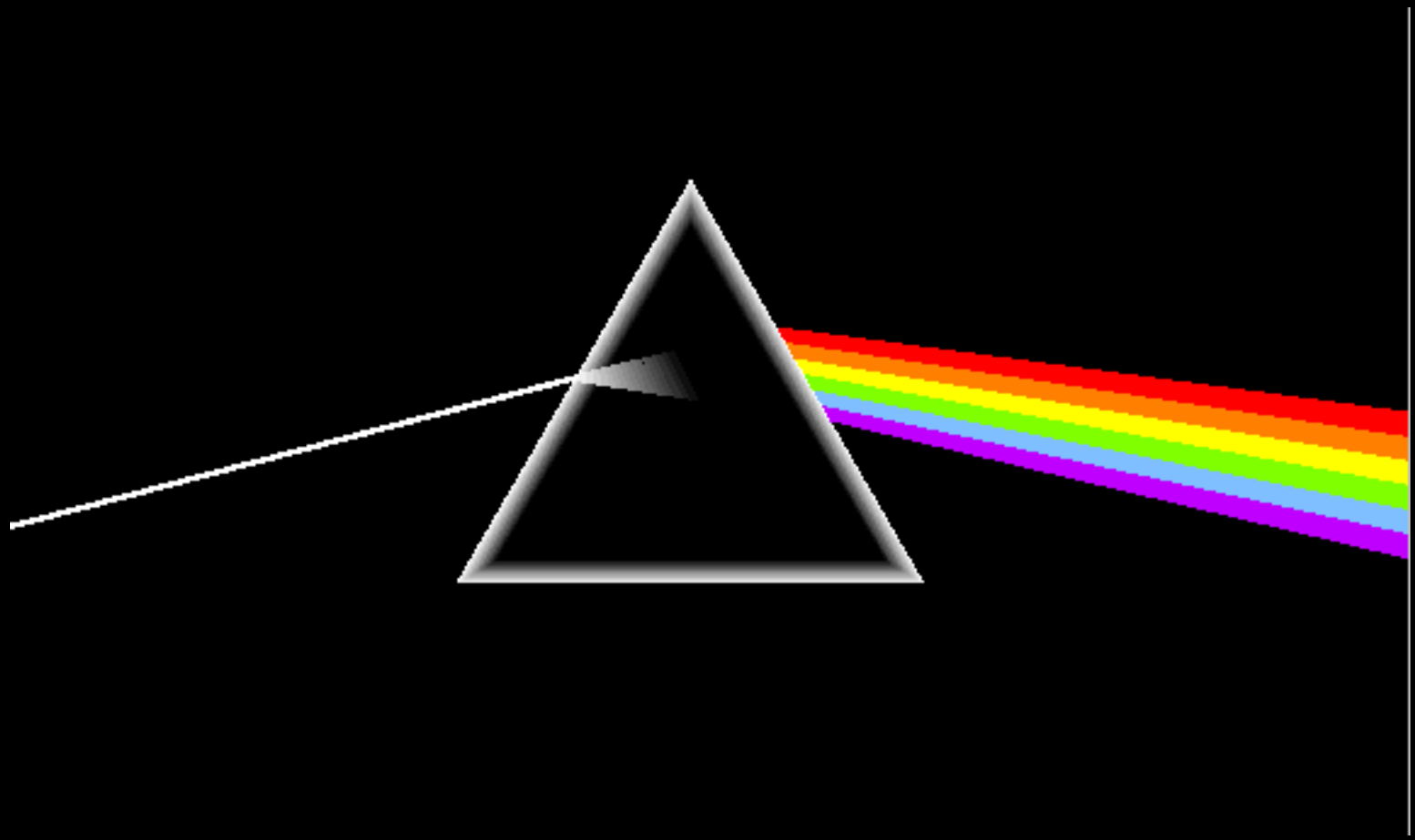


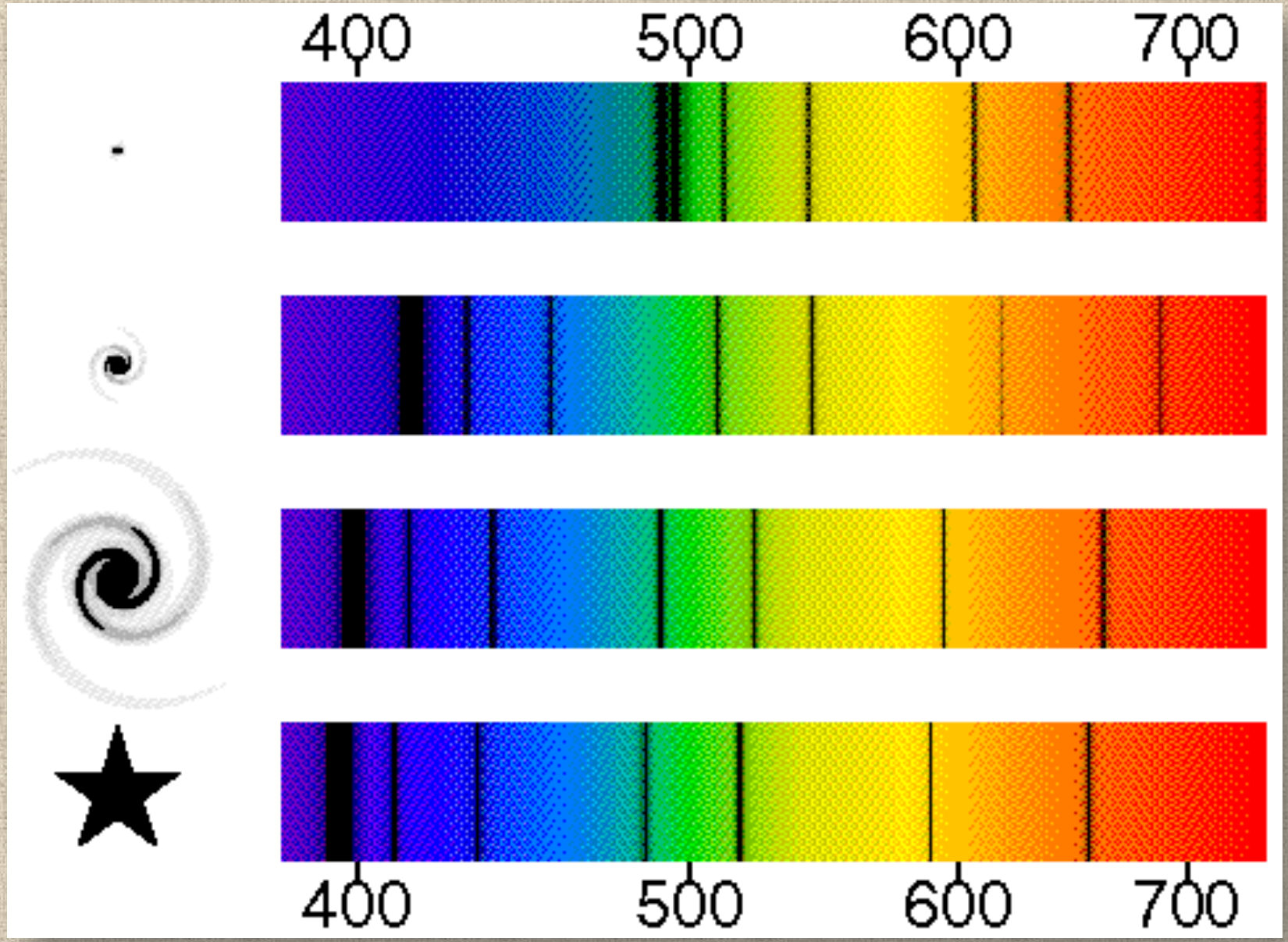
Barred Spiral Galaxy NGC 1300



Hubble Heritage

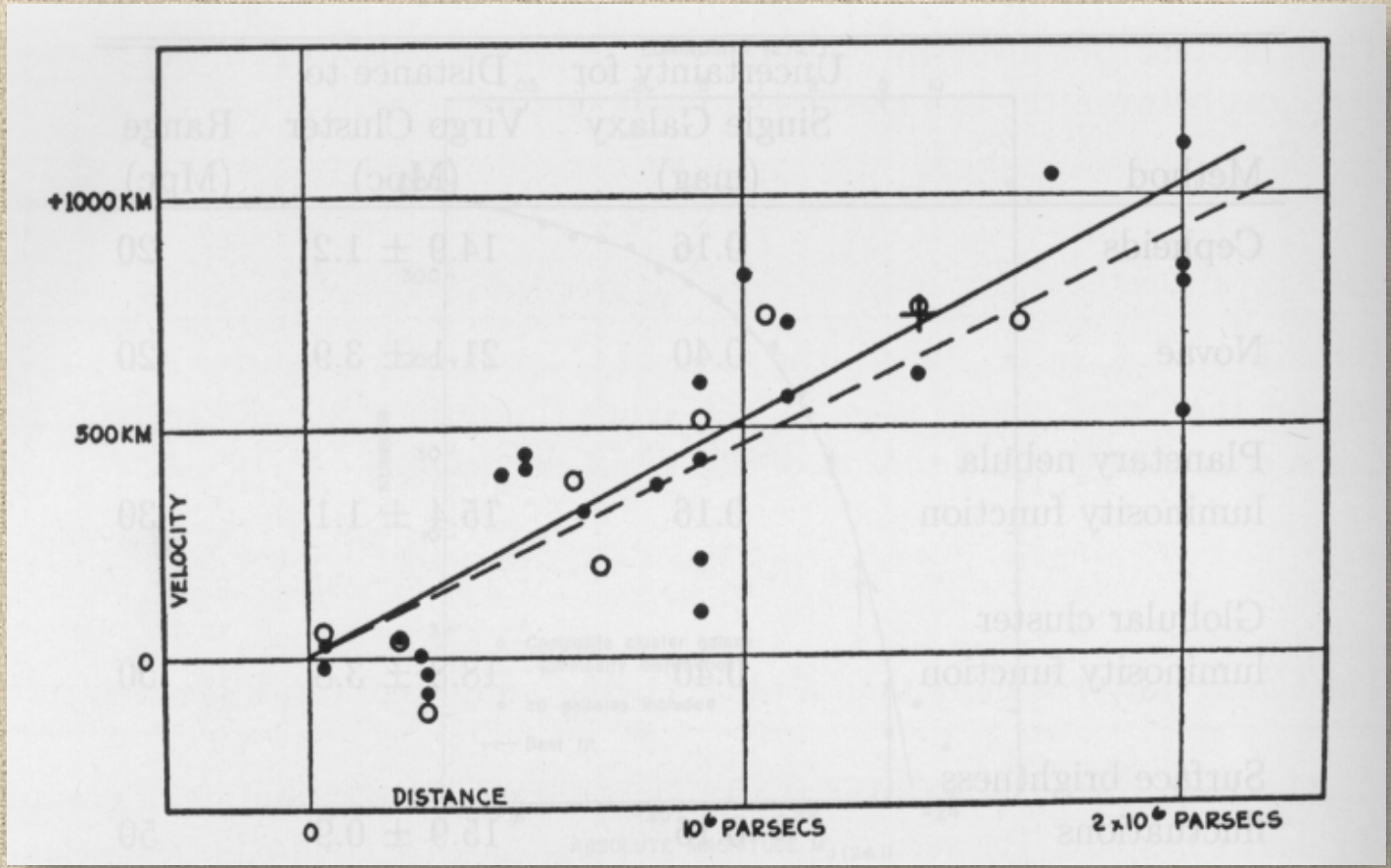
Lo spettro della luce: semplicemente l'arcobaleno




400
500
600
700
400
500
600
700

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

$$Velocita' = H_o \times distanza$$

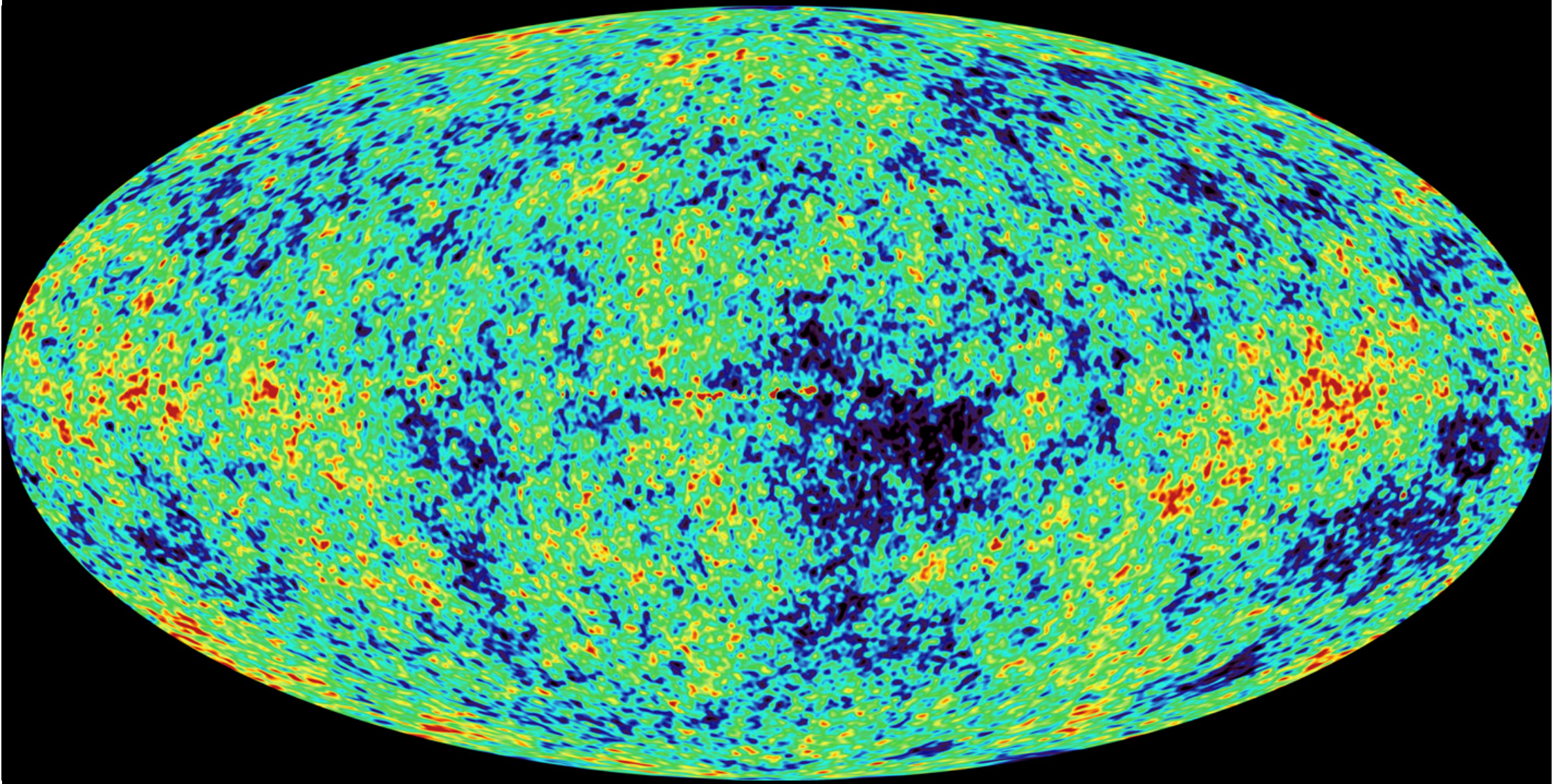


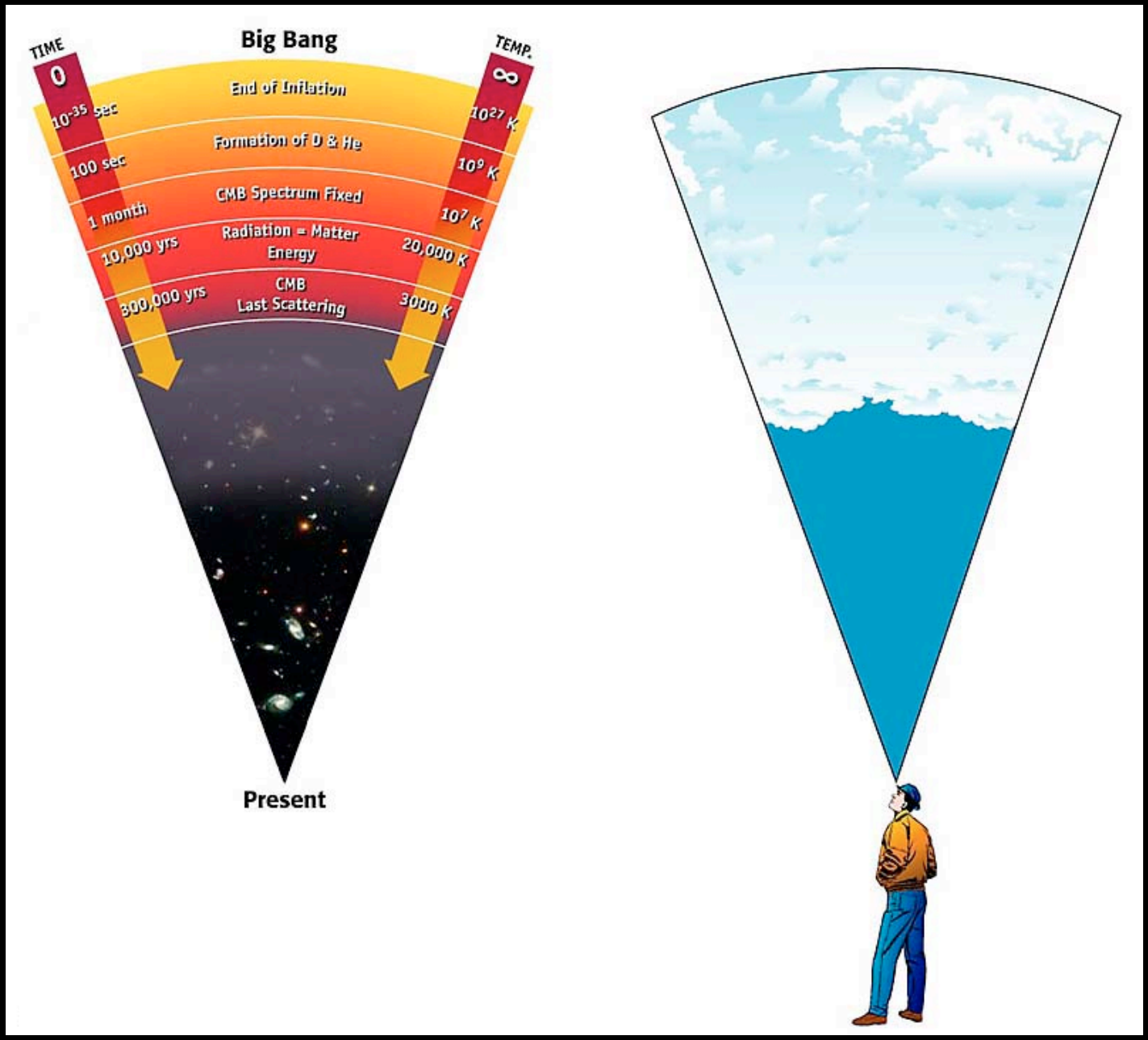
Velocita' apparente di allontanamento

Distanza

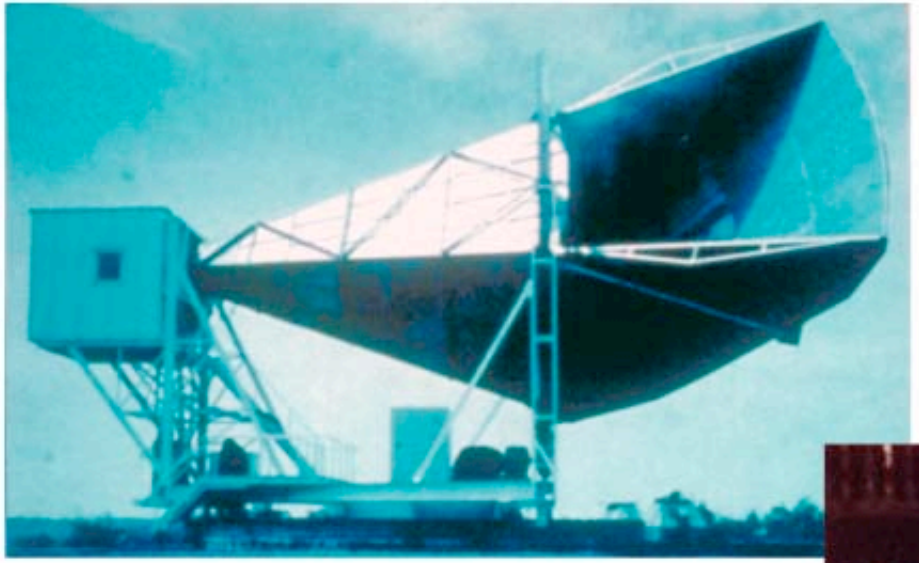
Quindi l'Universo non e' fermo, proprio come suggeriva la relativita'. Ma allora, andando indietro nel tempo tutto doveva essere sempre piu' denso e caldo, fino ad arrivare ad un istante iniziale: il **Big Bang**

Il residuo fossile del Big Bang: la radiazione di fondo nelle microonde



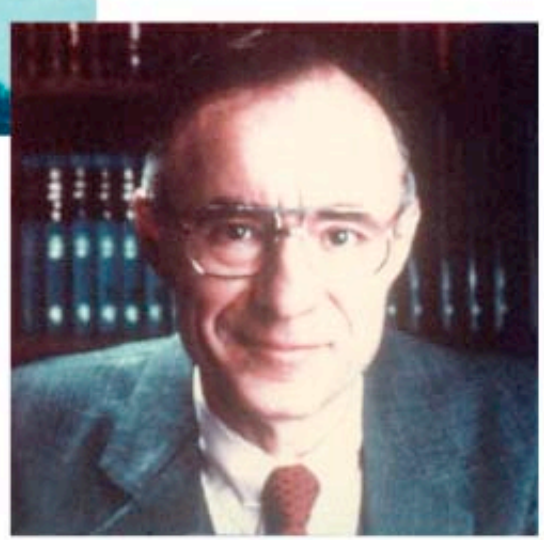

Big Bang
TIME
0
TEMP.
∞
End of Inflation
10-35 sec
1027 K
Formation of D & He
100 sec
109 K
CMB Spectrum Fixed
1 month
107 K
Radiation = Matter
Energy
10,000 yrs
20,000 K
CMB
Last Scattering
300,000 yrs
3000 K
Present

Discovery of Cosmic Background



Microwave Receiver

Robert Wilson

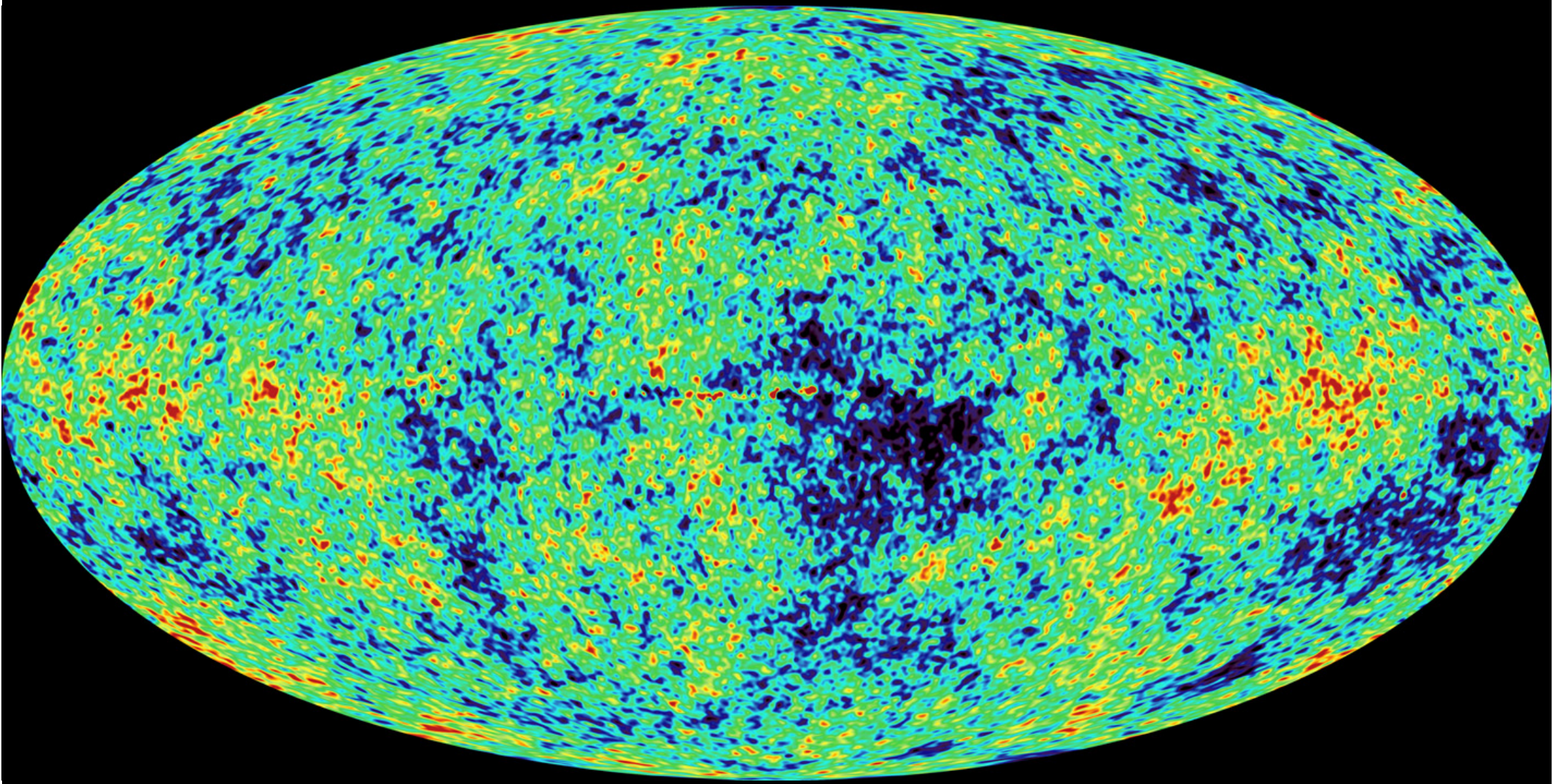


Arno Penzias

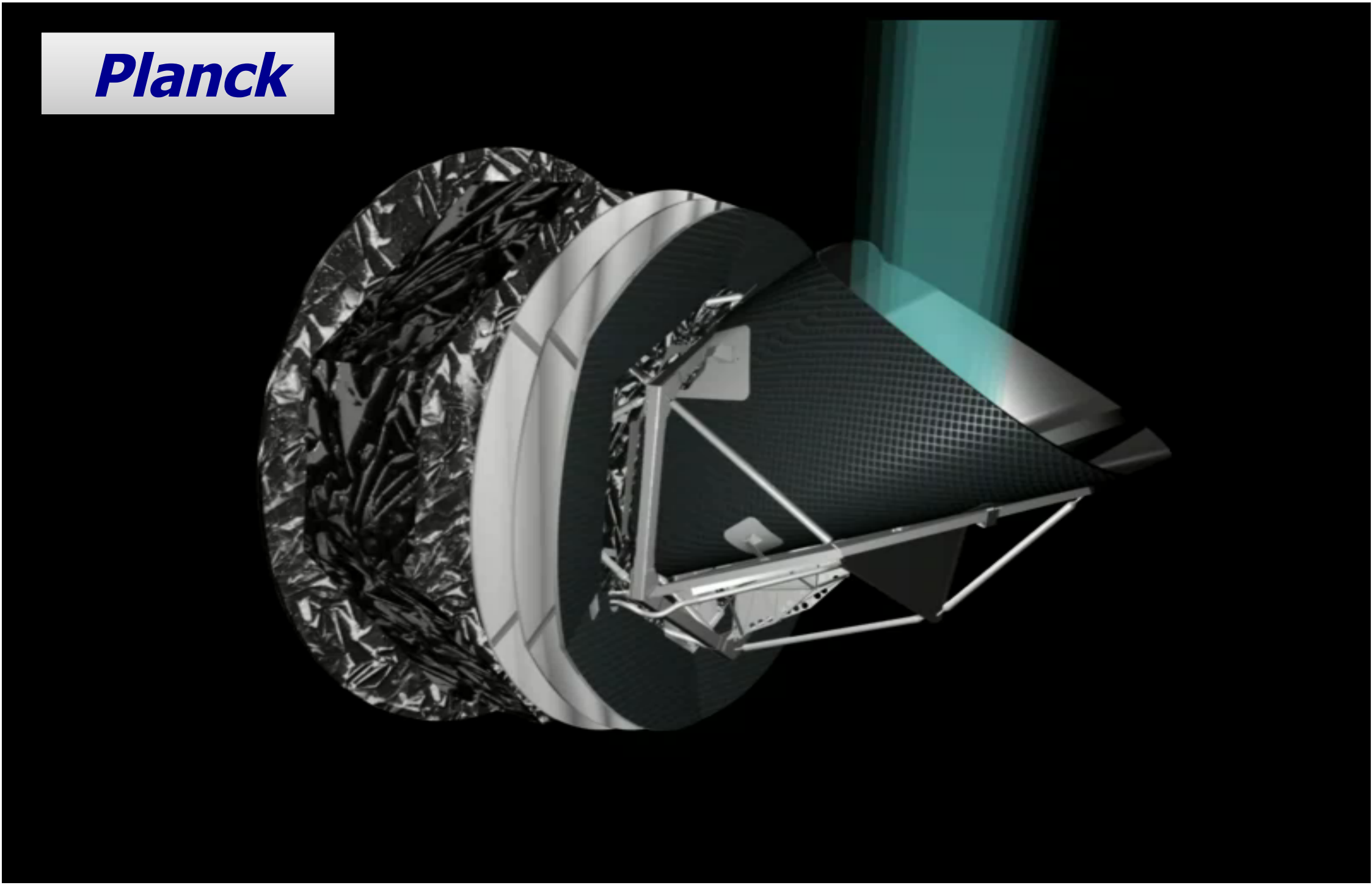
MAP990045

1964

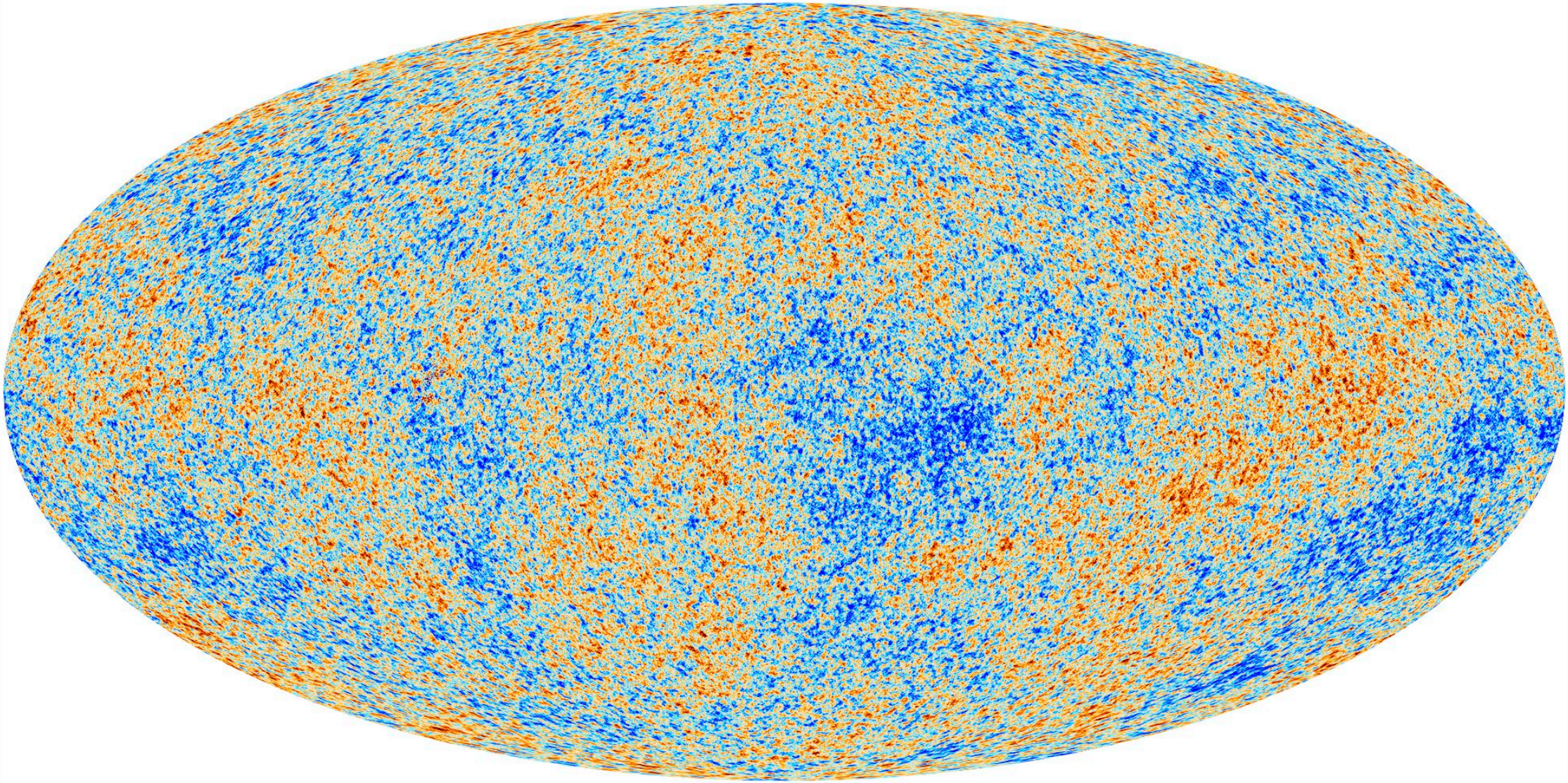
Distribuzione sul cielo dell'intensita' della radiazione di fondo (WMAP)



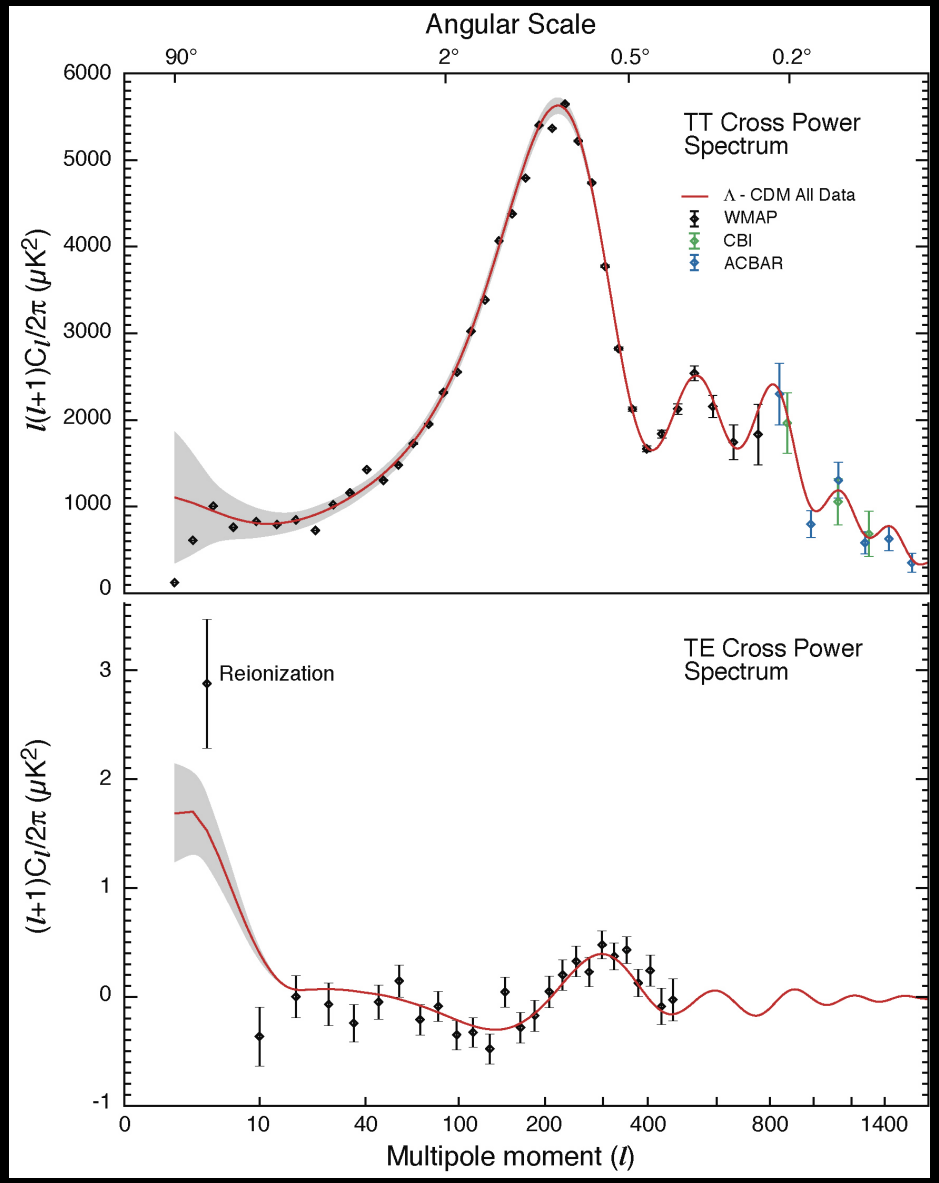
Planck



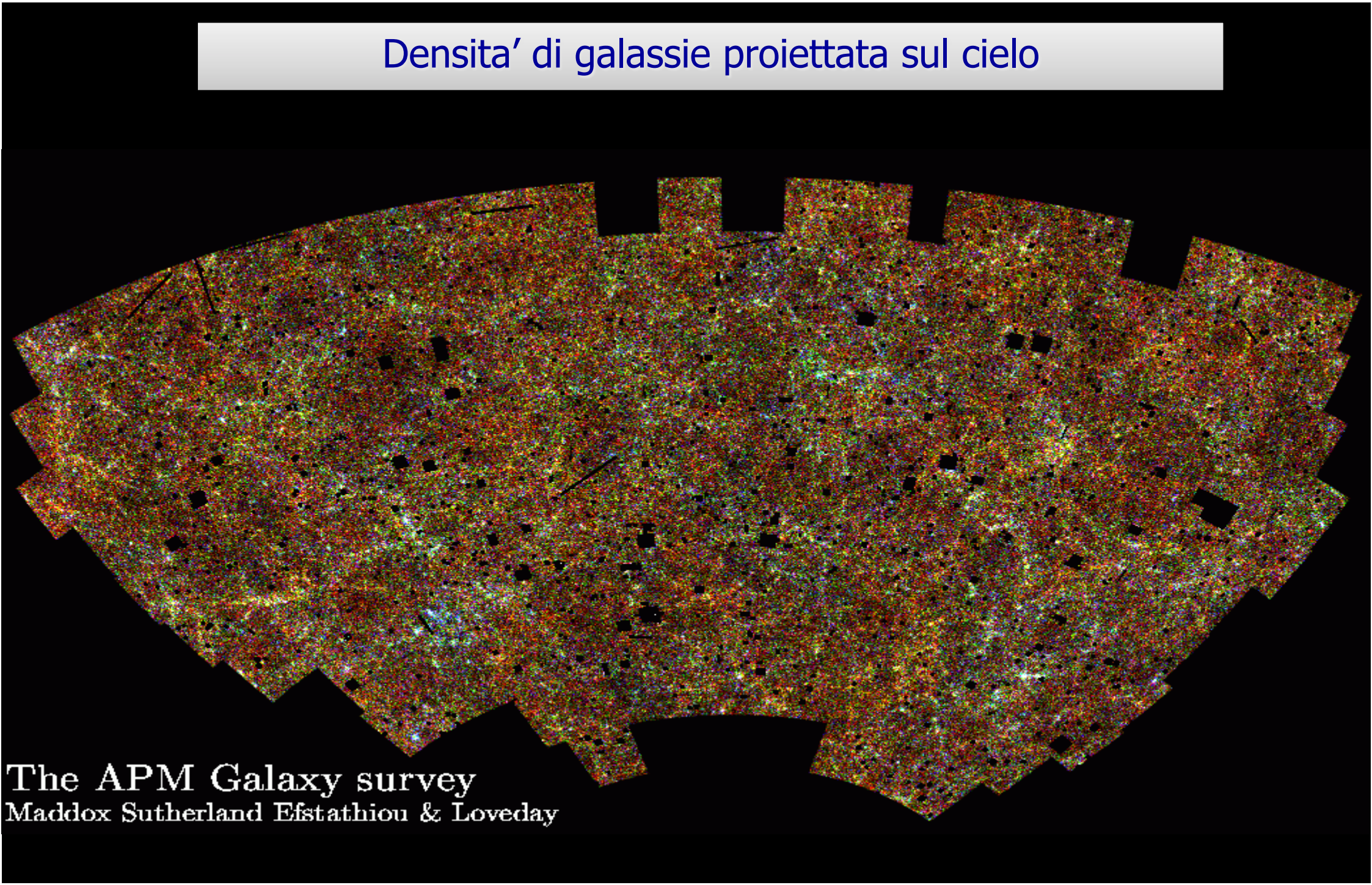
Distribuzione sul cielo dell'intensita' della radiazione di fondo (Planck)

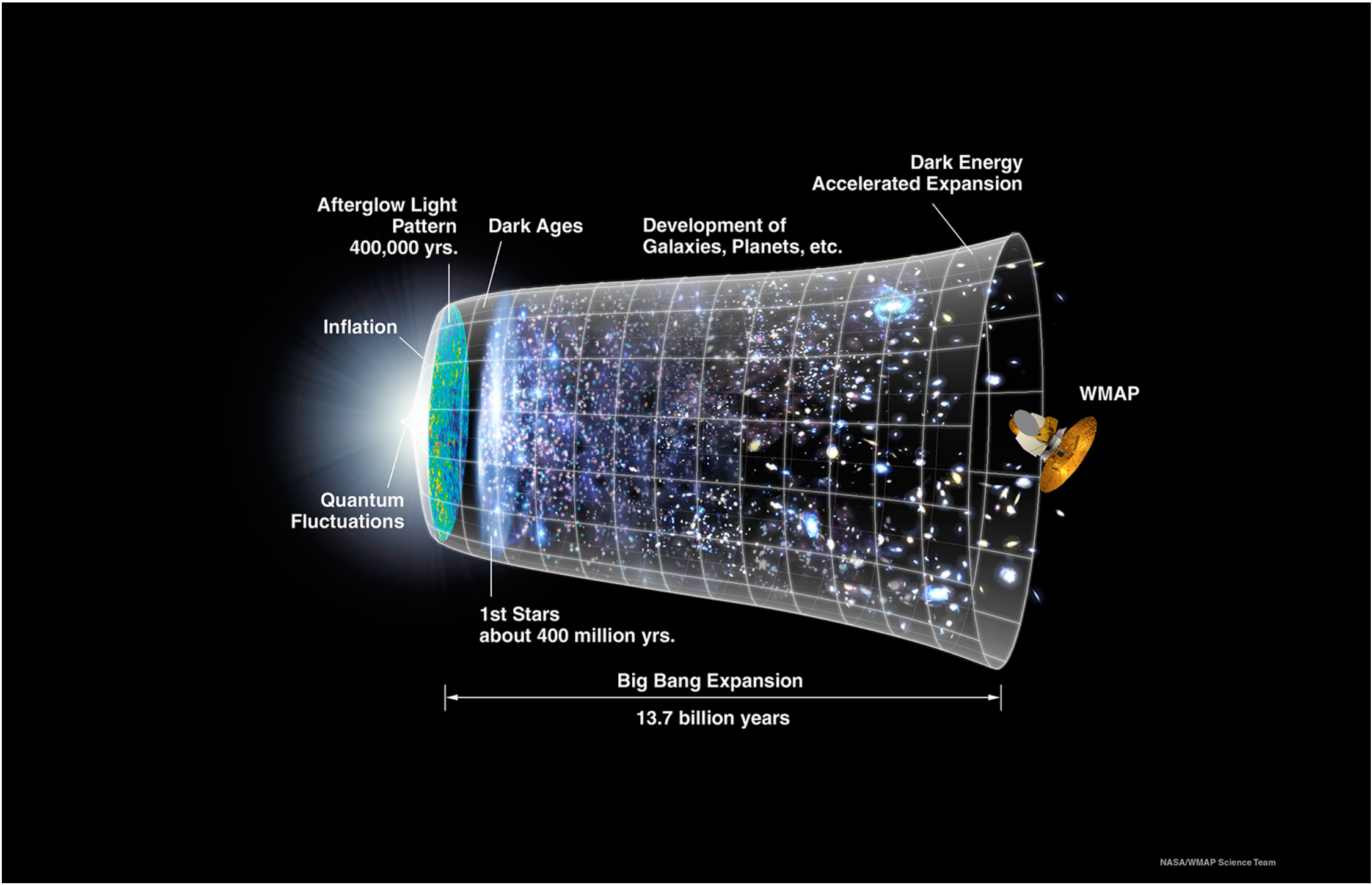


Quanto contano le disomogeneita' a diverse scale angolari?



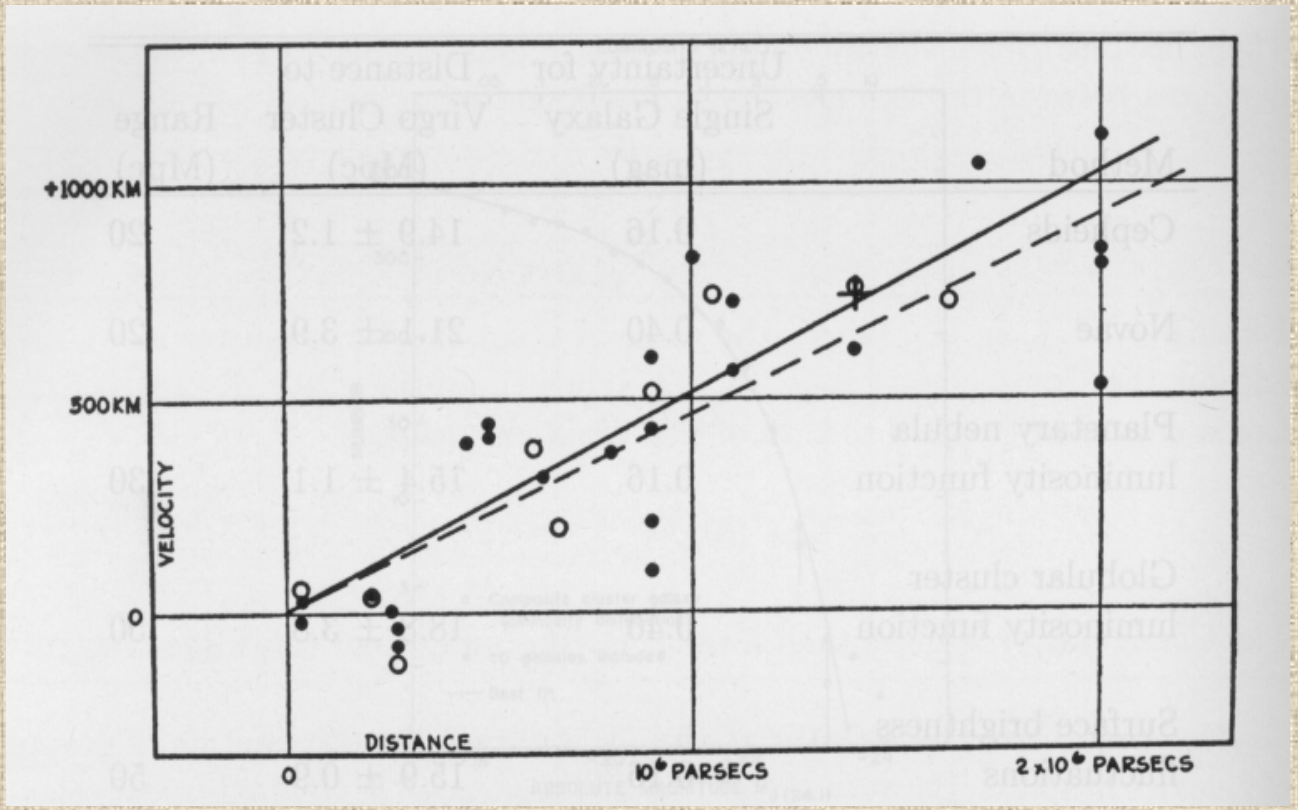
Densita' di galassie proiettata sul cielo




Dark Energy
Accelerated Expansion
Afterglow Light
Pattern
400,000 yrs.
Dark Ages
Development of
Galaxies, Planets, etc.
Inflation
WMAP
Quantum
Fluctuations
1st Stars
about 400 million yrs.
Big Bang Expansion
13.7 billion years
NASA/WMAP Science Team

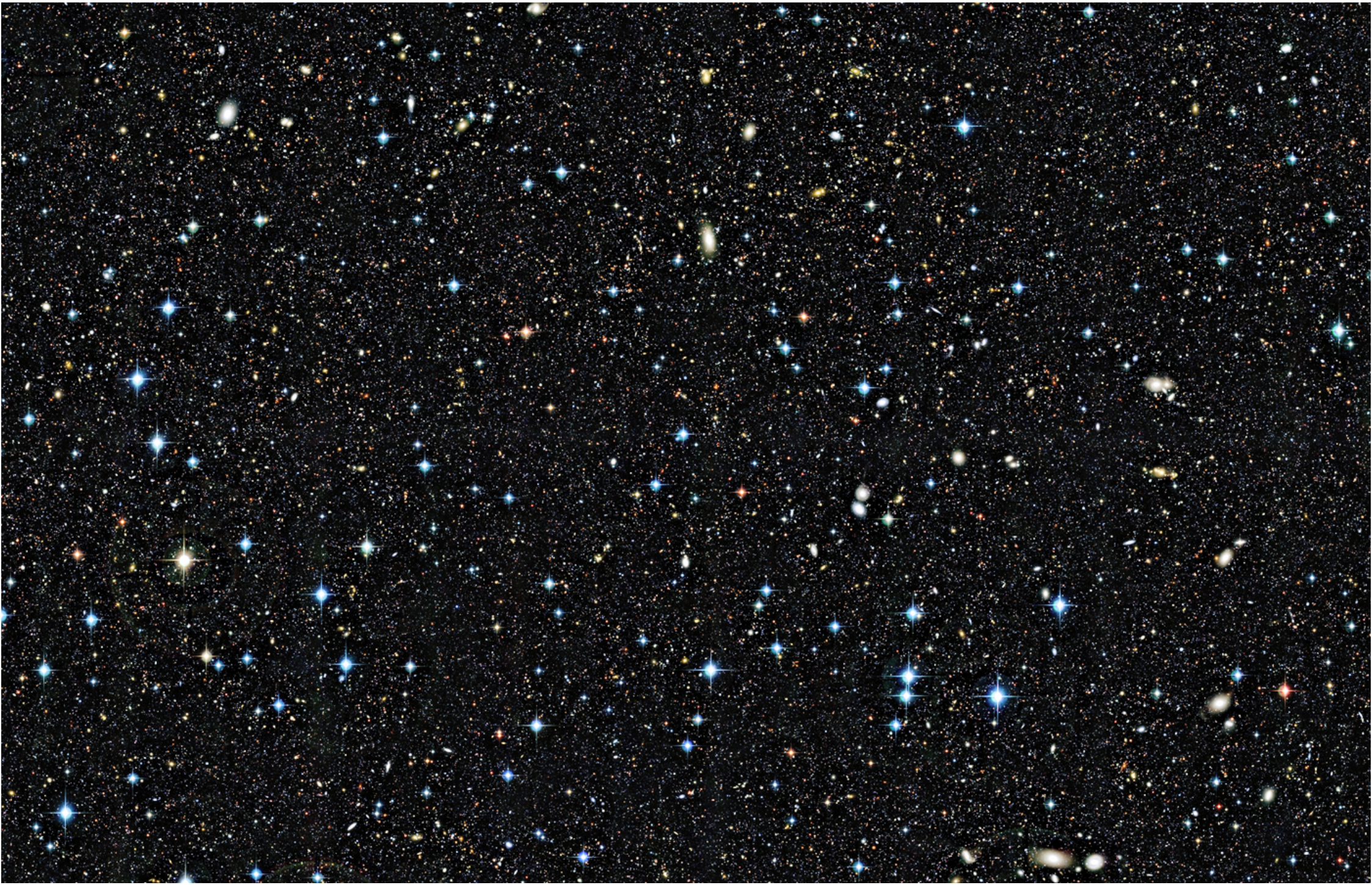
Se rovesciamo la legge di Hubble possiamo ottenere la distanza delle galassie misurando il loro *redshift*. E quindi ricostruirne la distribuzione tridimensionale nello spazio!

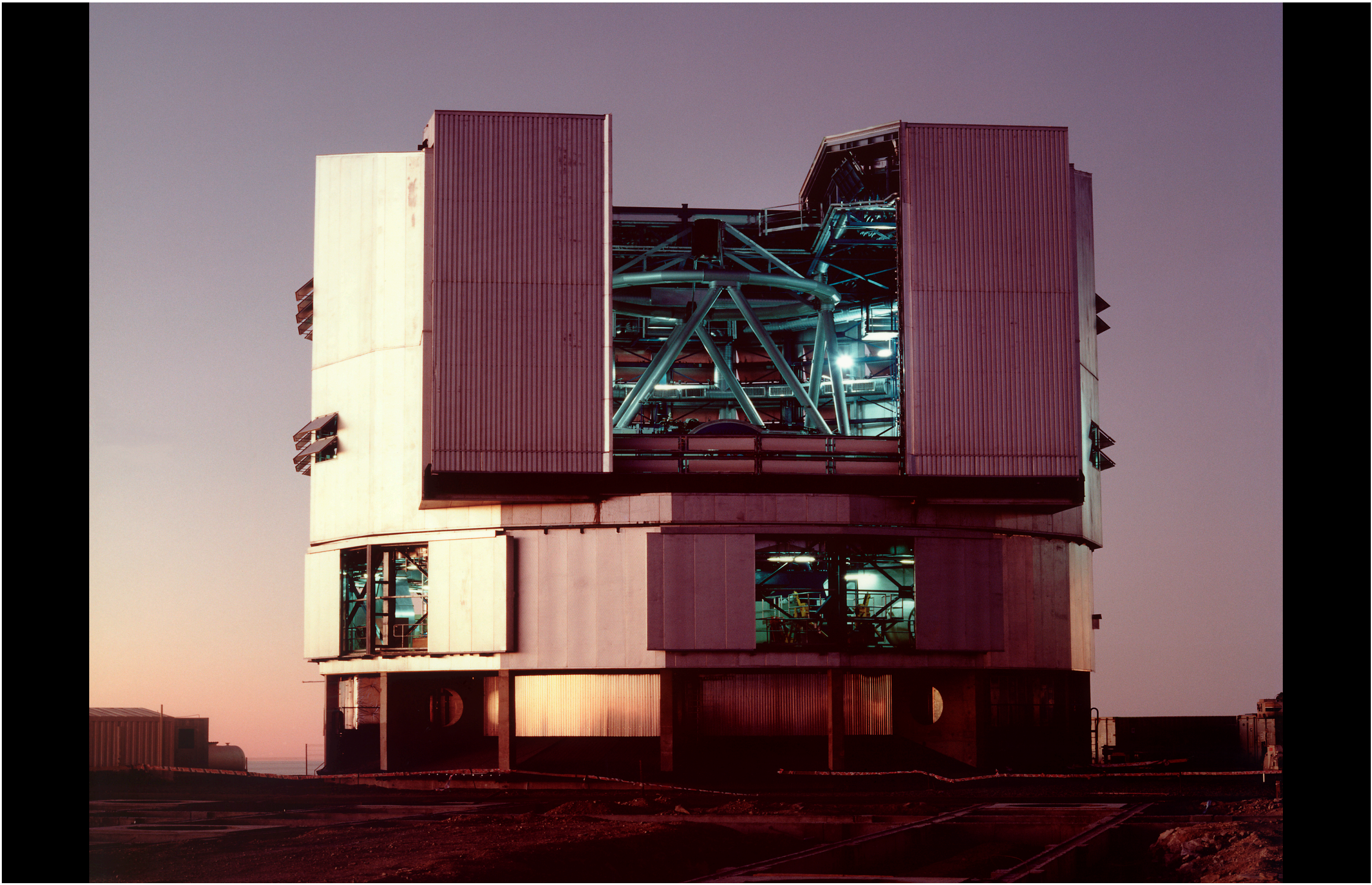
$$Distanza = Velocita' / H_o$$

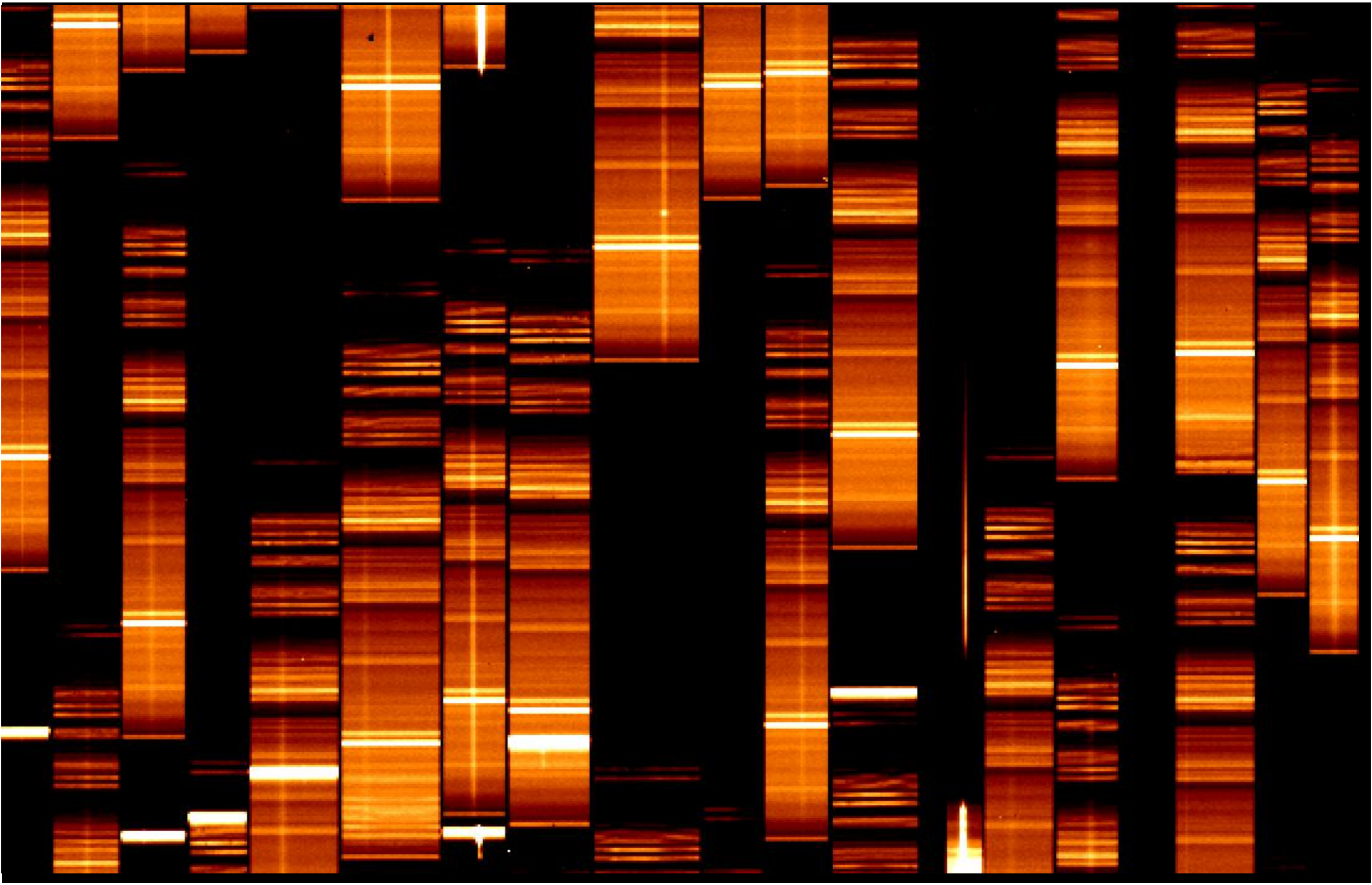


Redshift

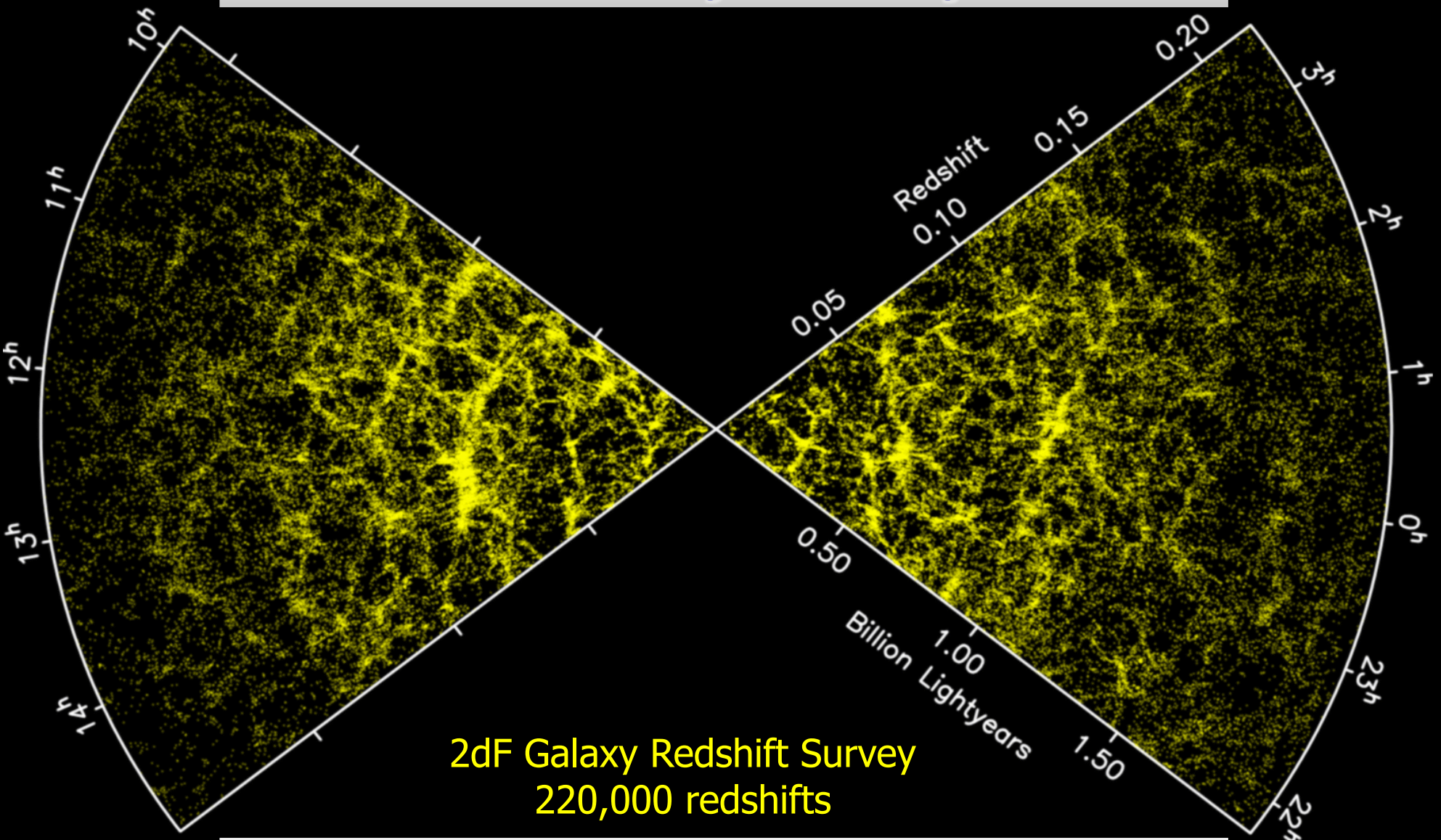
Distanza







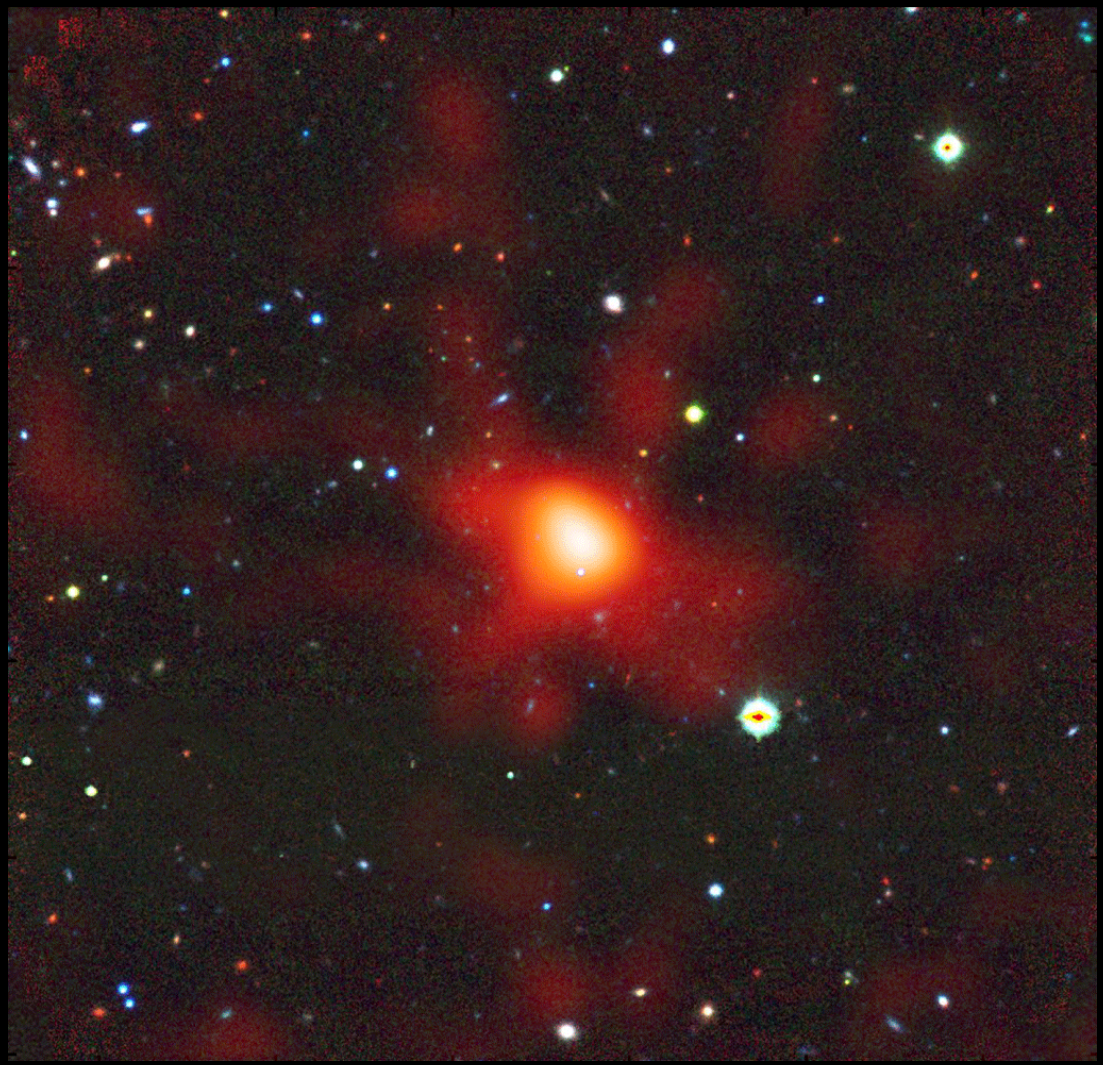
La distribuzione delle galassie su grande scala



2dF Galaxy Redshift Survey
220,000 redshifts

Ma questo e' tutto?

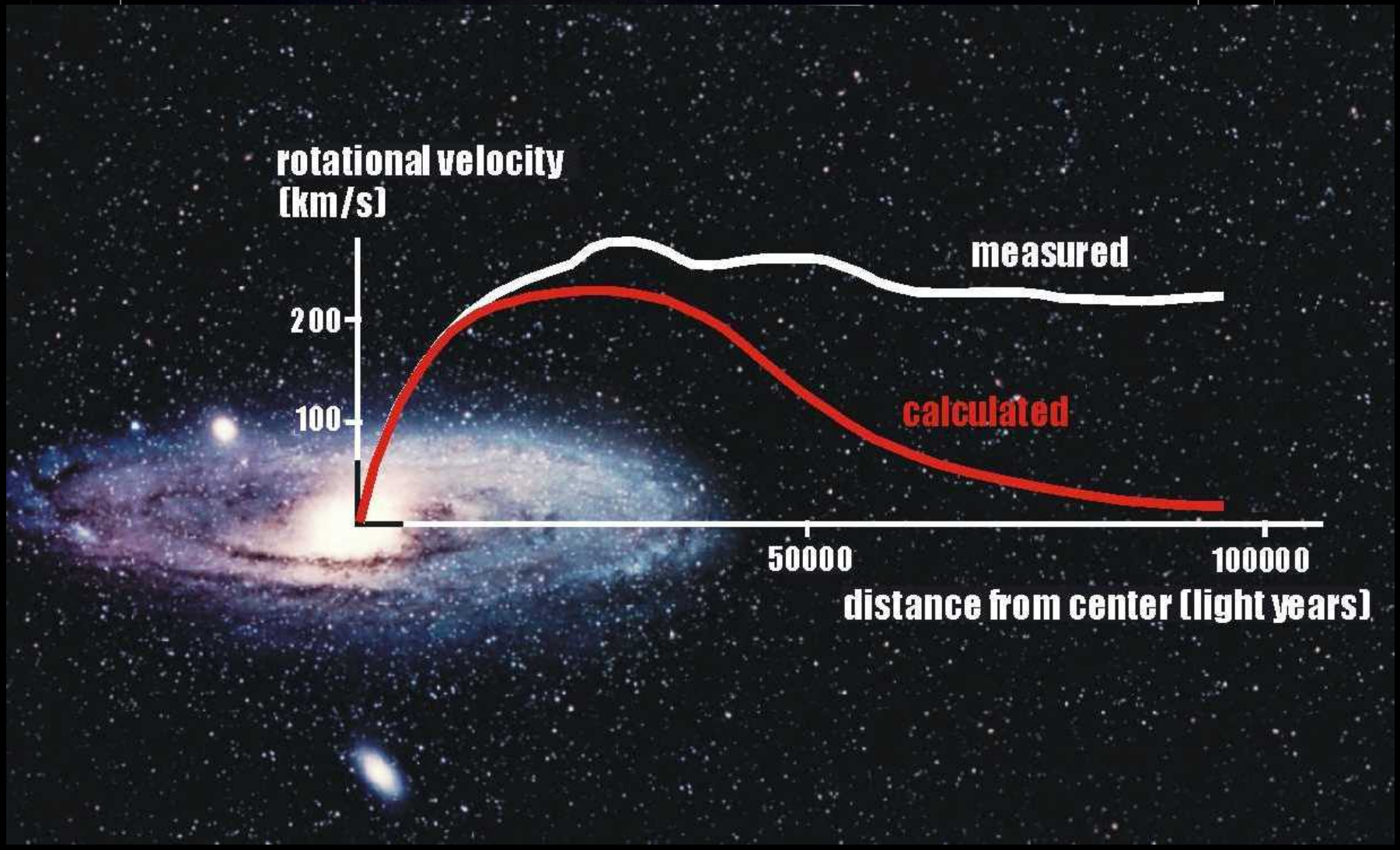
Sicuramente c’e’ dell gas diffuso al di fuori delle galassie, come quello caldo negli ammassi di galassie, che emette nei raggi X

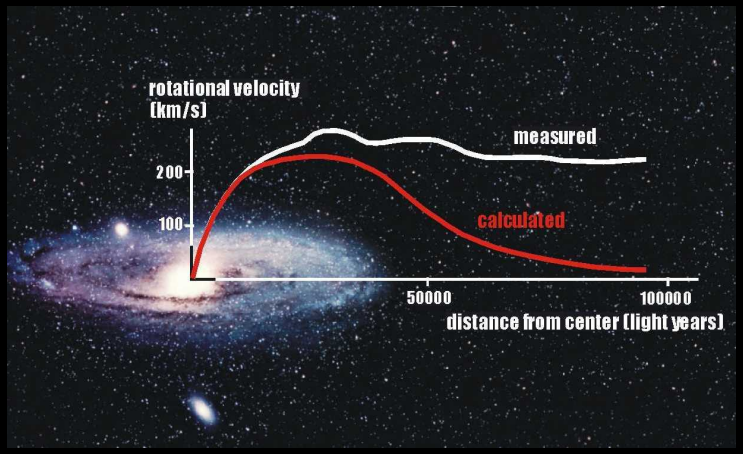


Ma non basta. Qualcos'altro che non emette luce di alcun tipo fa muovere le galassie piu' velocemente di quanto ci si aspetti: deve esserci dell'altra massa che non vediamo, oltre a galassie e gas

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

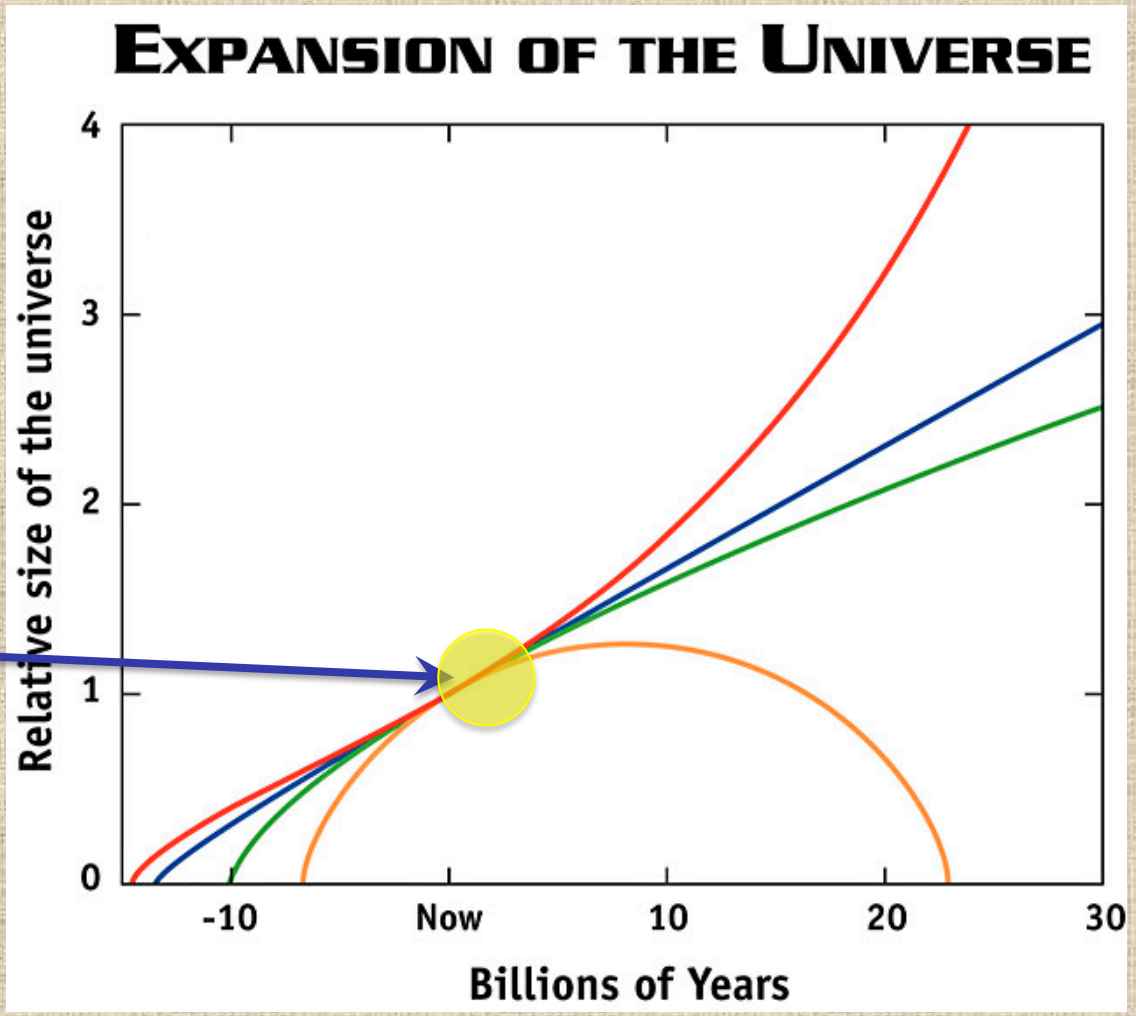
Analogamente, le parti esterne delle galassie spirali ruotano piu' velocemente di quanto ci si aspetterebbe dalla distribuzione di luce: e' necessario un alone di **materia oscura**



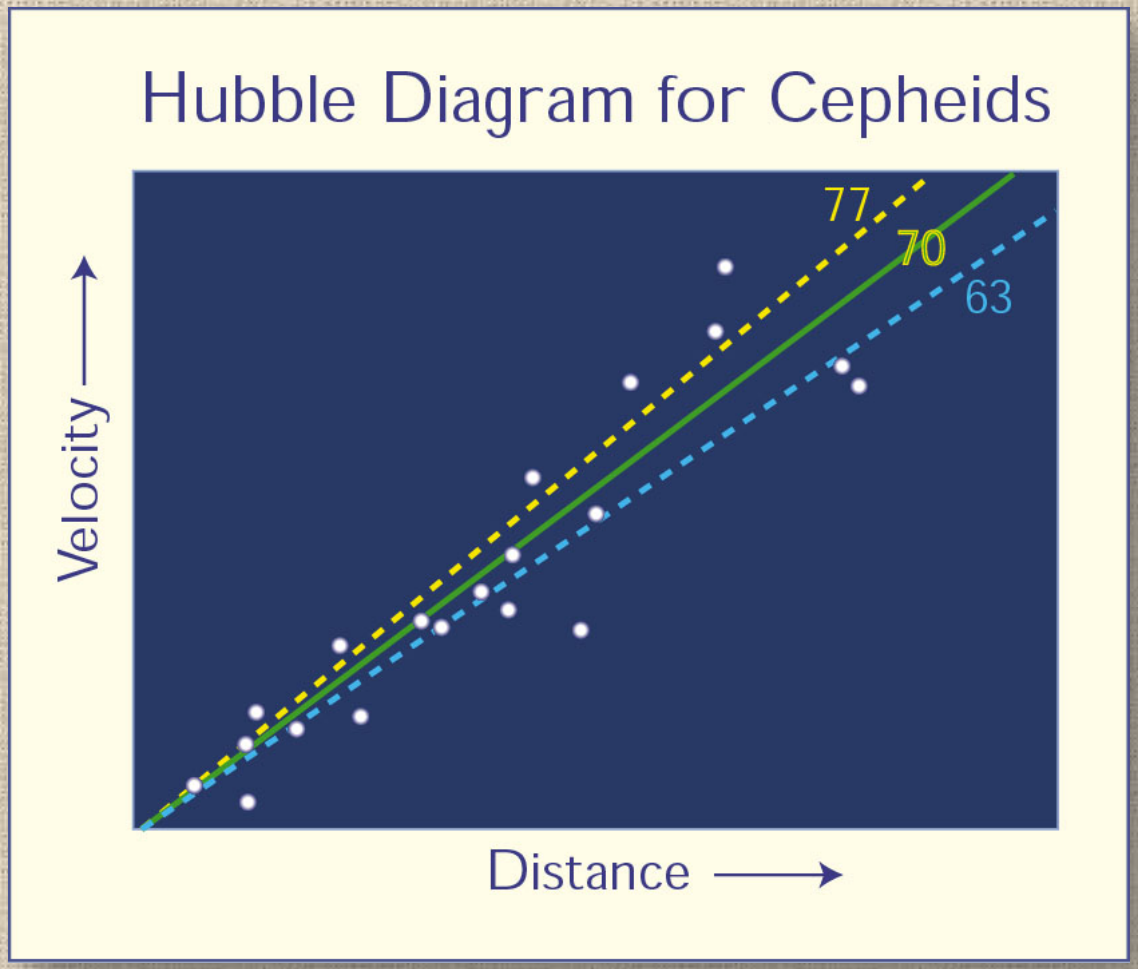


La quantita' di materia oscura risulta essere circa 5 volte quella della materia ordinaria che conosciamo

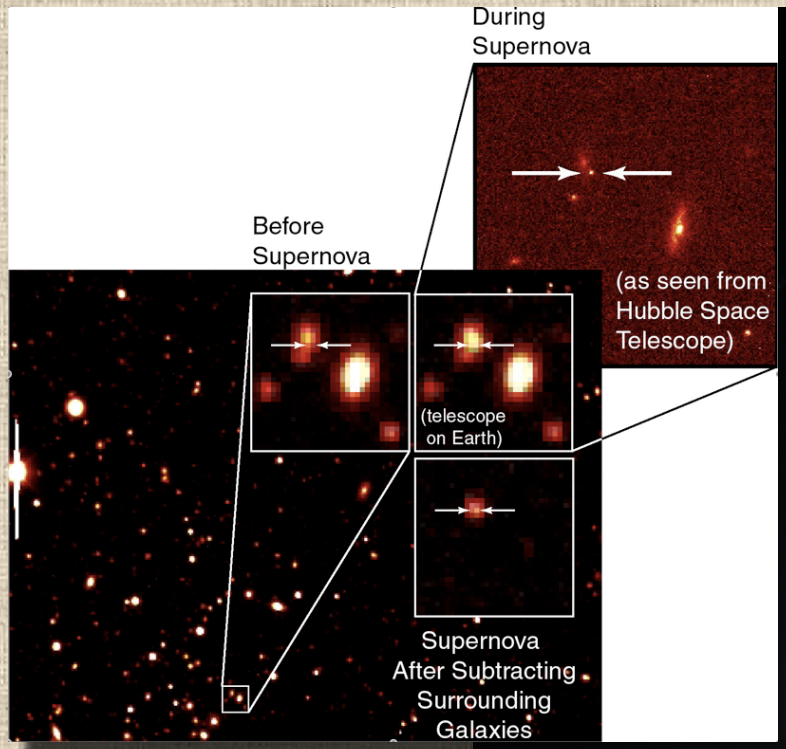
Cosa sappiamo della velocita' di espansione nel passato?

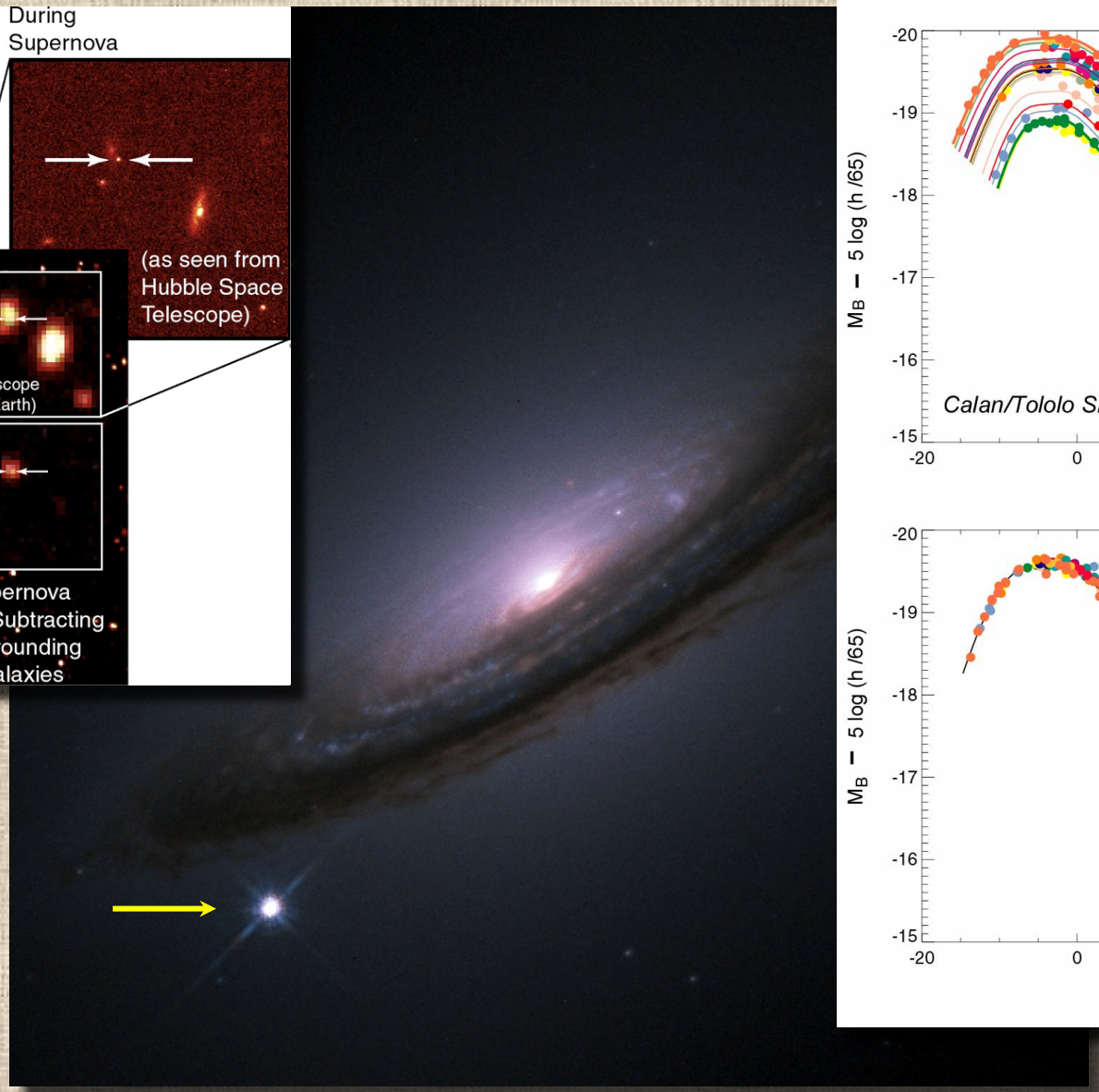


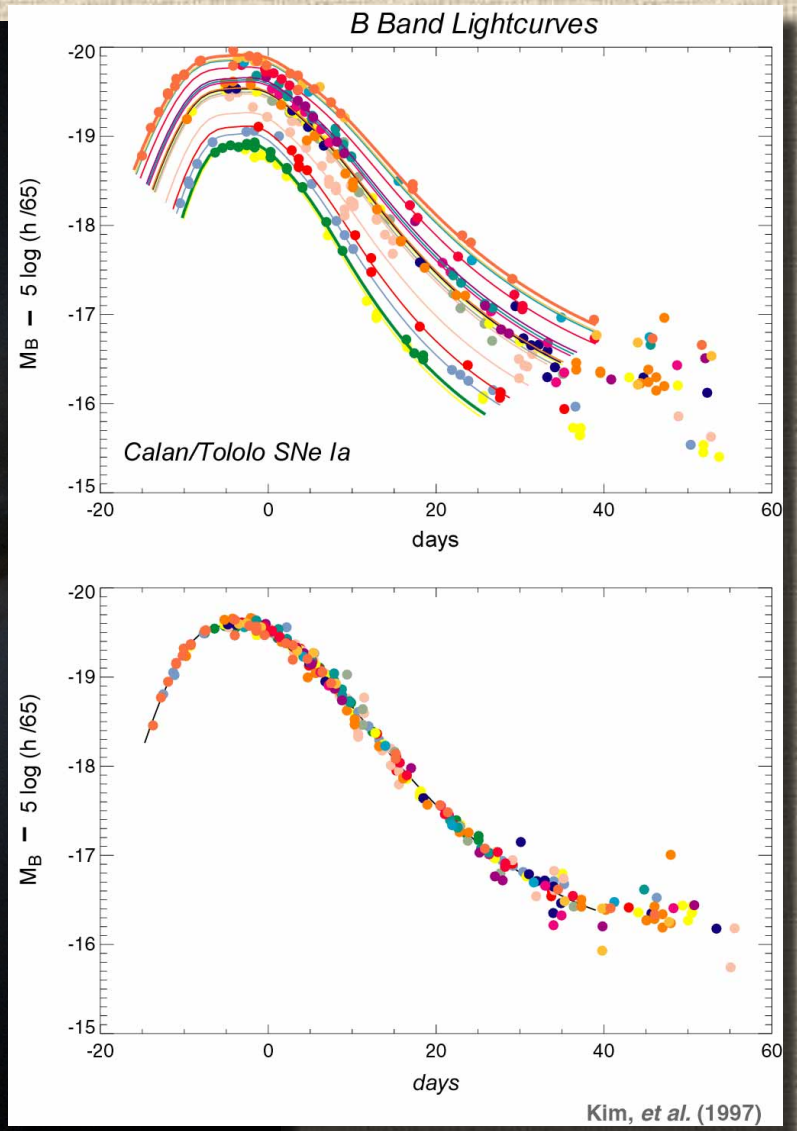
Candele standard: stelle di cui conosciamo a priori la luminosita' assoluta: misurando la loro luminosita' apparente otteniamo la loro distanza! Hubble uso' le stelle CEFEIDI, una classe di stelle variabili



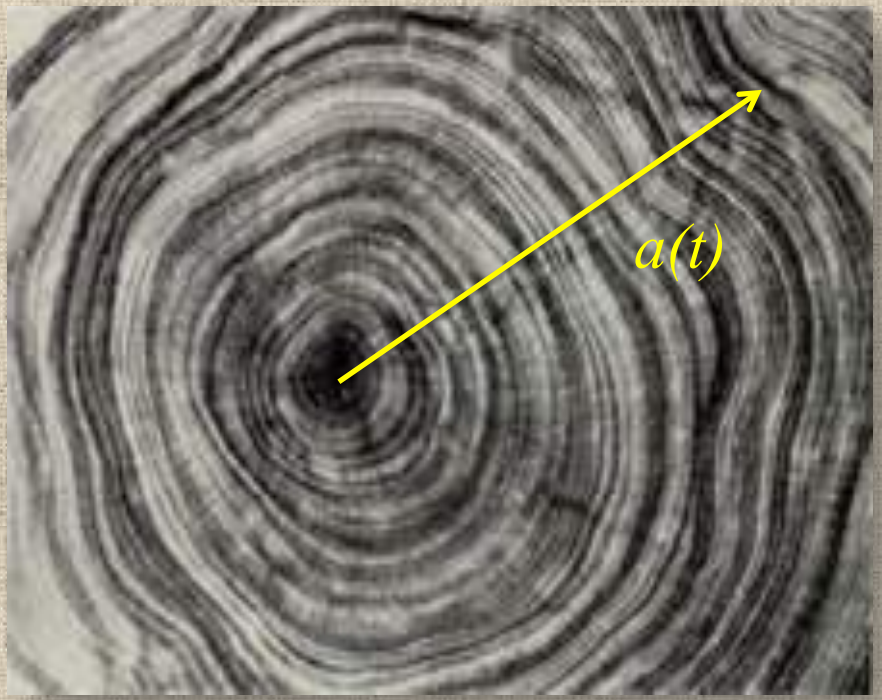
Se vogliamo andare ancora piu' lontano, dobbiamo trovare delle candele standard intrinsecamente molto luminose: le supernove di Tipo Ia



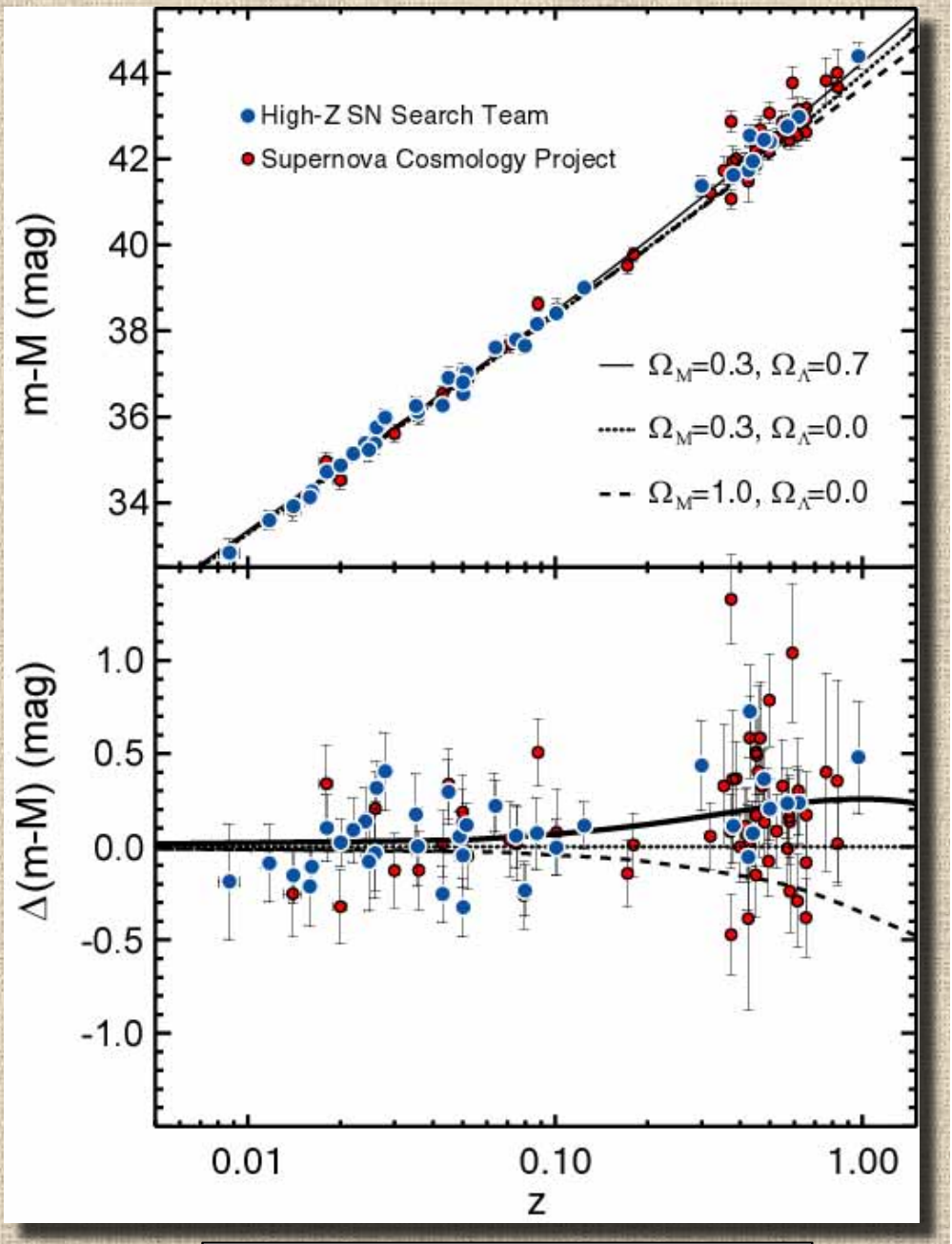




E il loro diagramma di Hubble ci da' un risultato sorprendente: l'espansione dell'Universo non sta rallentando, bensi' accelerando

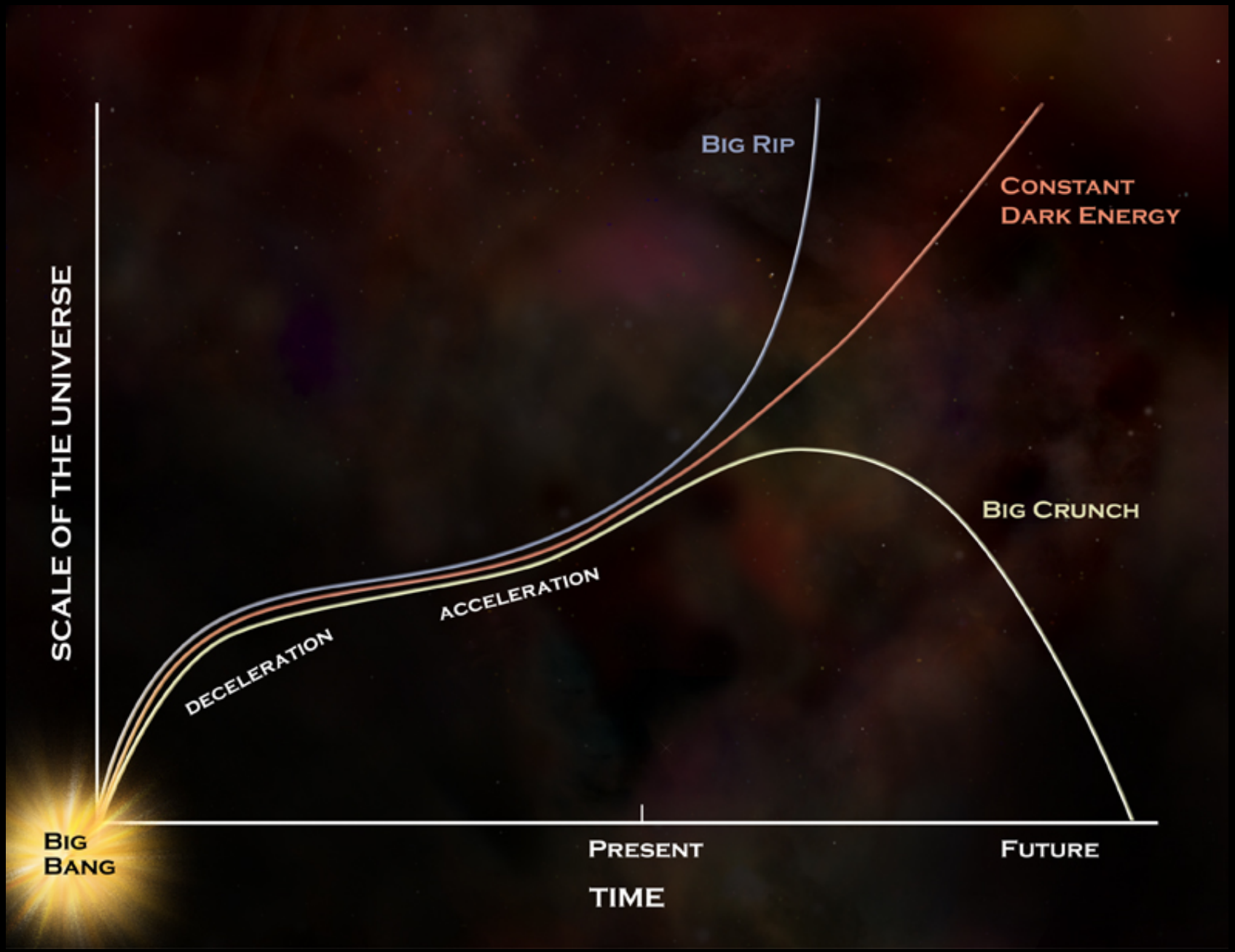


log(*Distanza*)

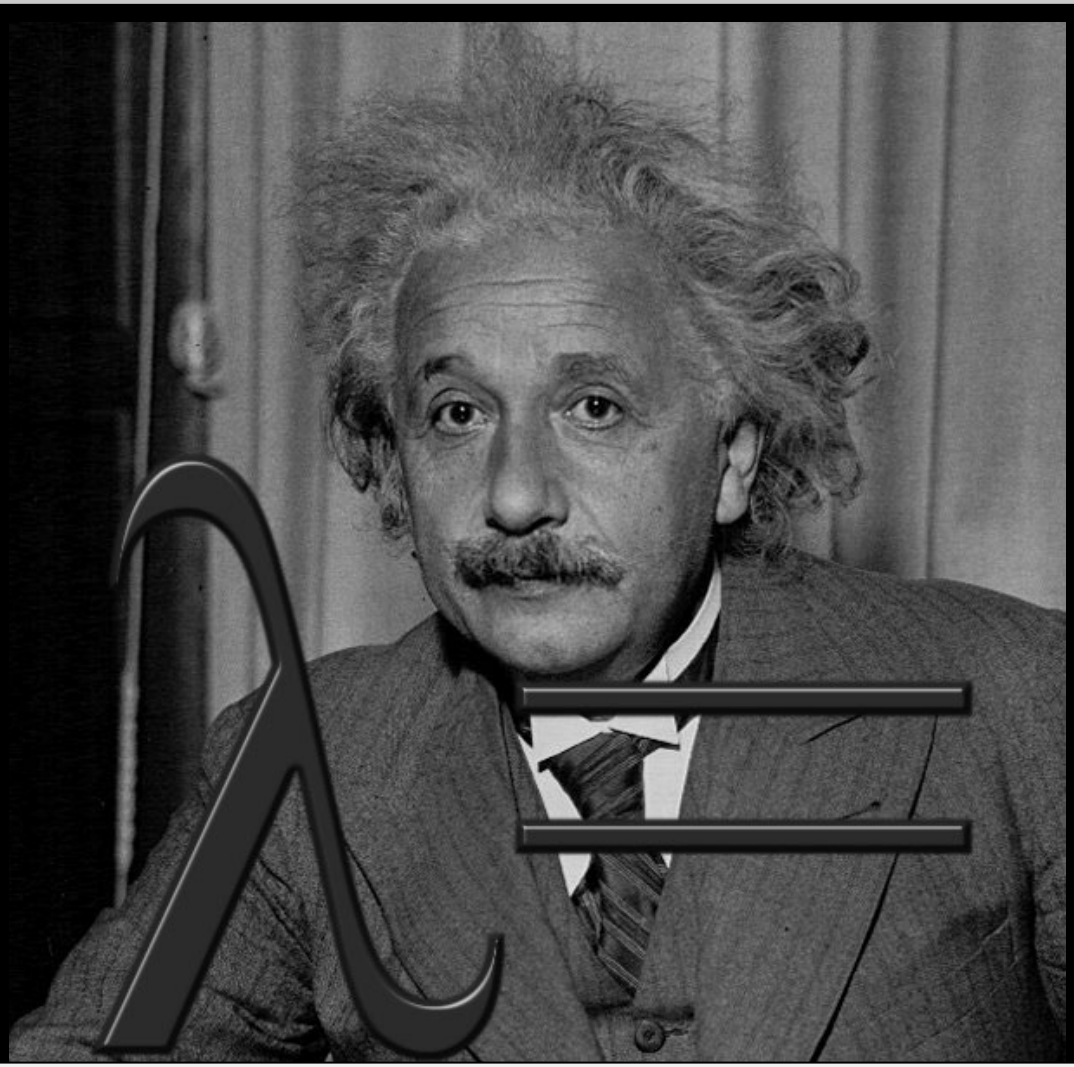


Redshift delle linee spettrali

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


SCALE OF THE UNIVERSE
BIG RIP
CONSTANT
DARK ENERGY
BIG CRUNCH
DECELERATION
ACCELERATION
BIG
BANG
PRESENT
FUTURE
TIME

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

Brian Schmidt

Adam Riess

Saul Perlmutter

... per la scoperta dell'accelerazione cosmica.

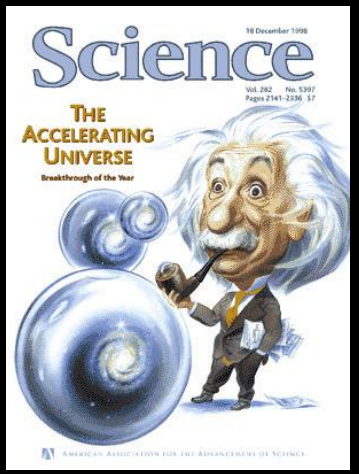
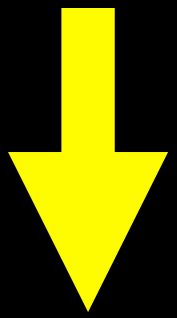


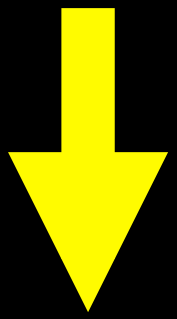
Diagramma di Hubble delle Sn Ia



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

$\Omega_\Lambda \approx 0.7$

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



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

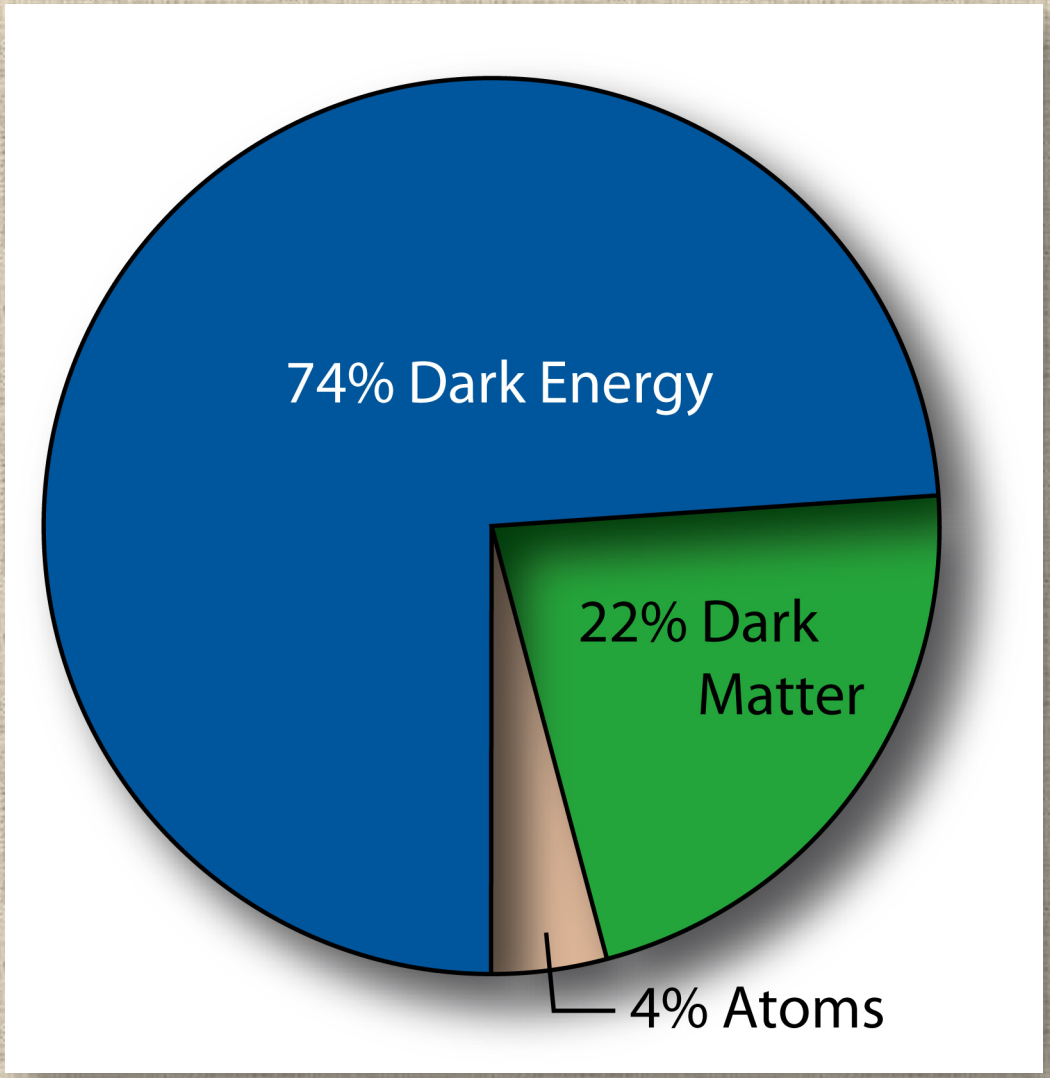
(CURVATURA NULLA)

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

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

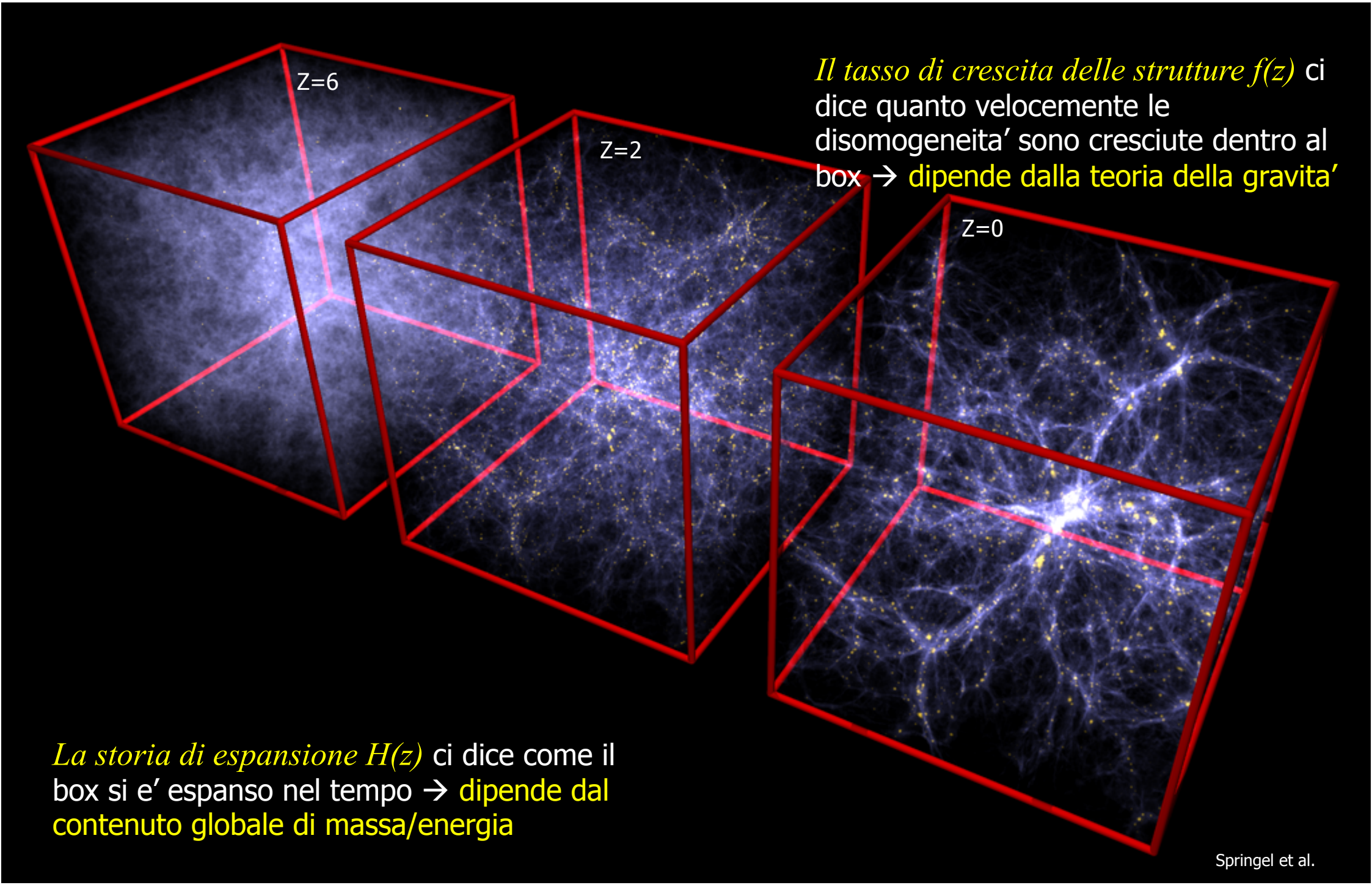
→ Quindi la costante cosmologica fornisce esattamente il contributo di energia (oscura) che serve per avere curvatura nulla

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

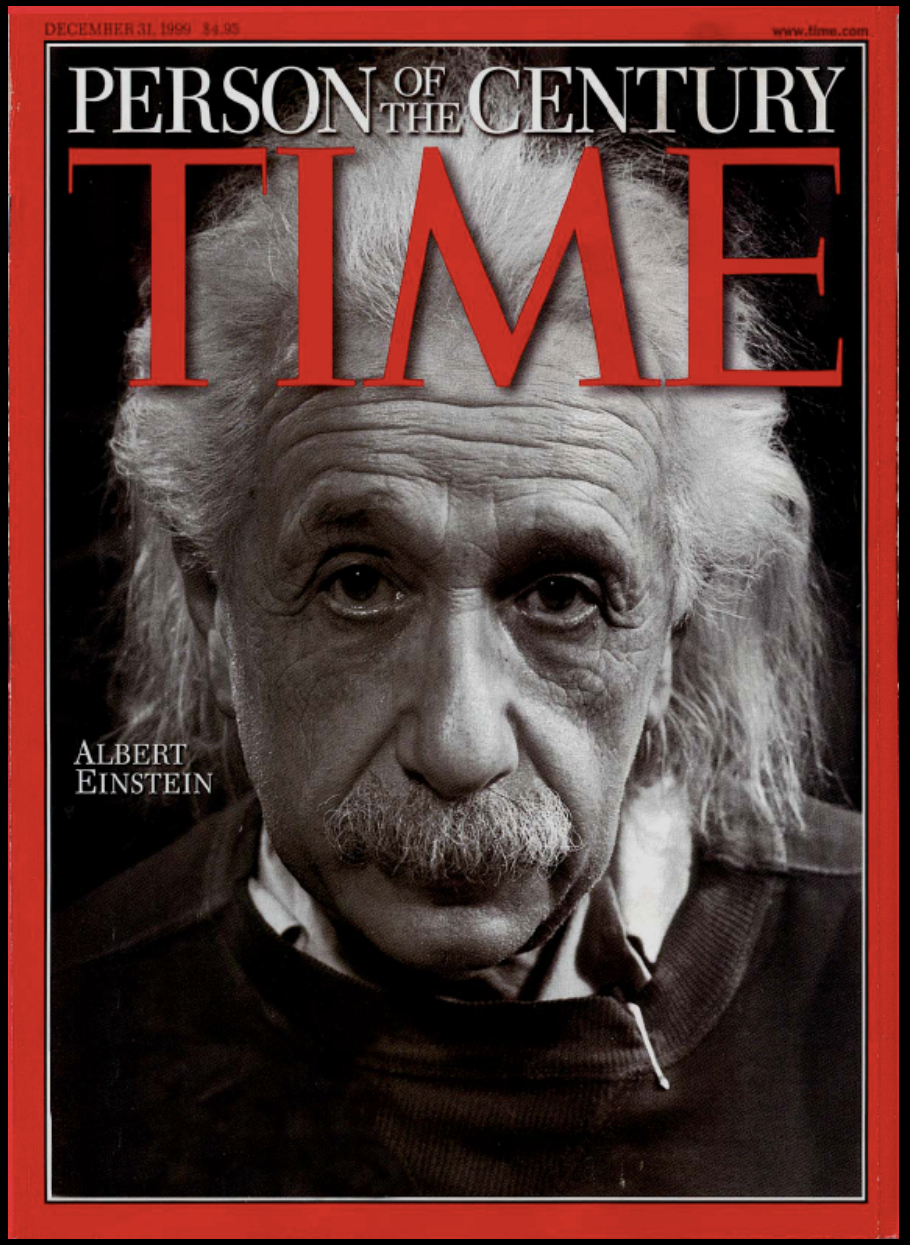


Il tasso di crescita delle strutture f(z) ci dice quanto velocemente le disomogeneita' sono cresciute dentro al box → dipende dalla teoria della gravita'

La storia di espansione H(z) ci dice come il box si e' espanso nel tempo → dipende dal contenuto globale di massa/energia

Springel et al.

"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