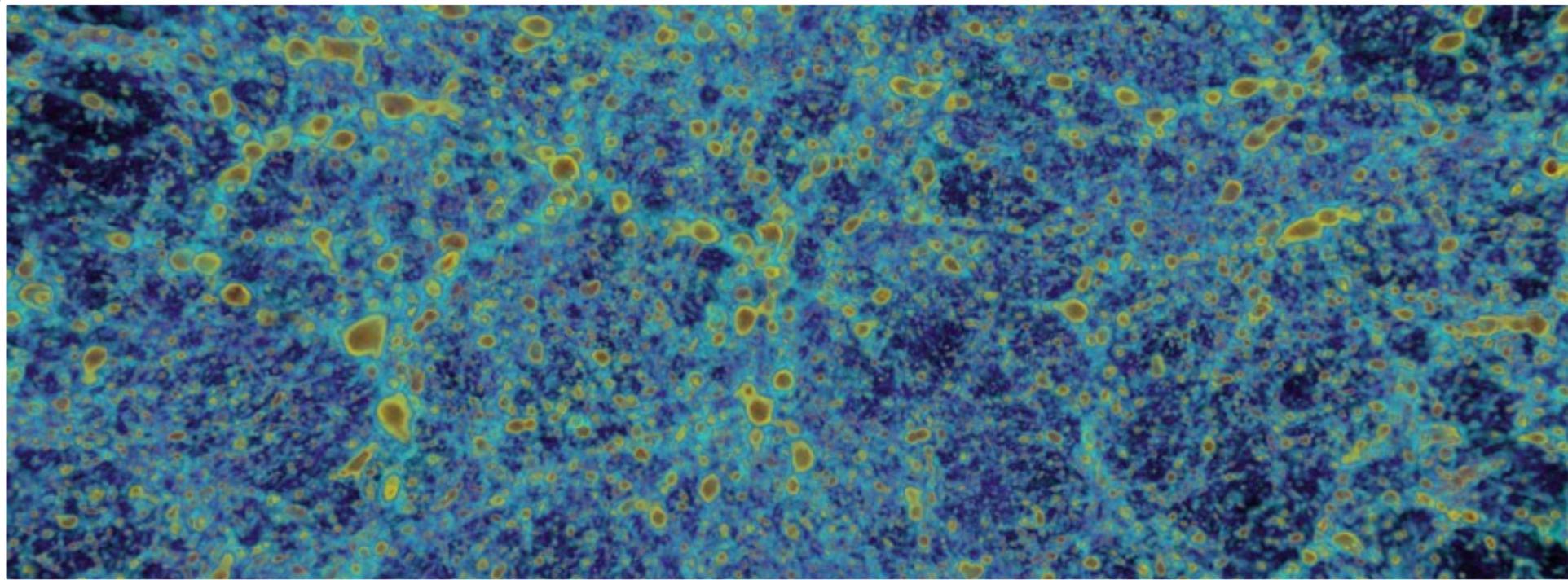


Il Modello Cosmologico Standard e il mistero dell'**Inflazione**



Paola M. Battaglia

"L'universo in fiore 2018-2019"
INAF - Osservatorio Astronomico di Brera
19 marzo 2019

Il cielo stellato



La Via Lattea: un fiume di stelle in cielo

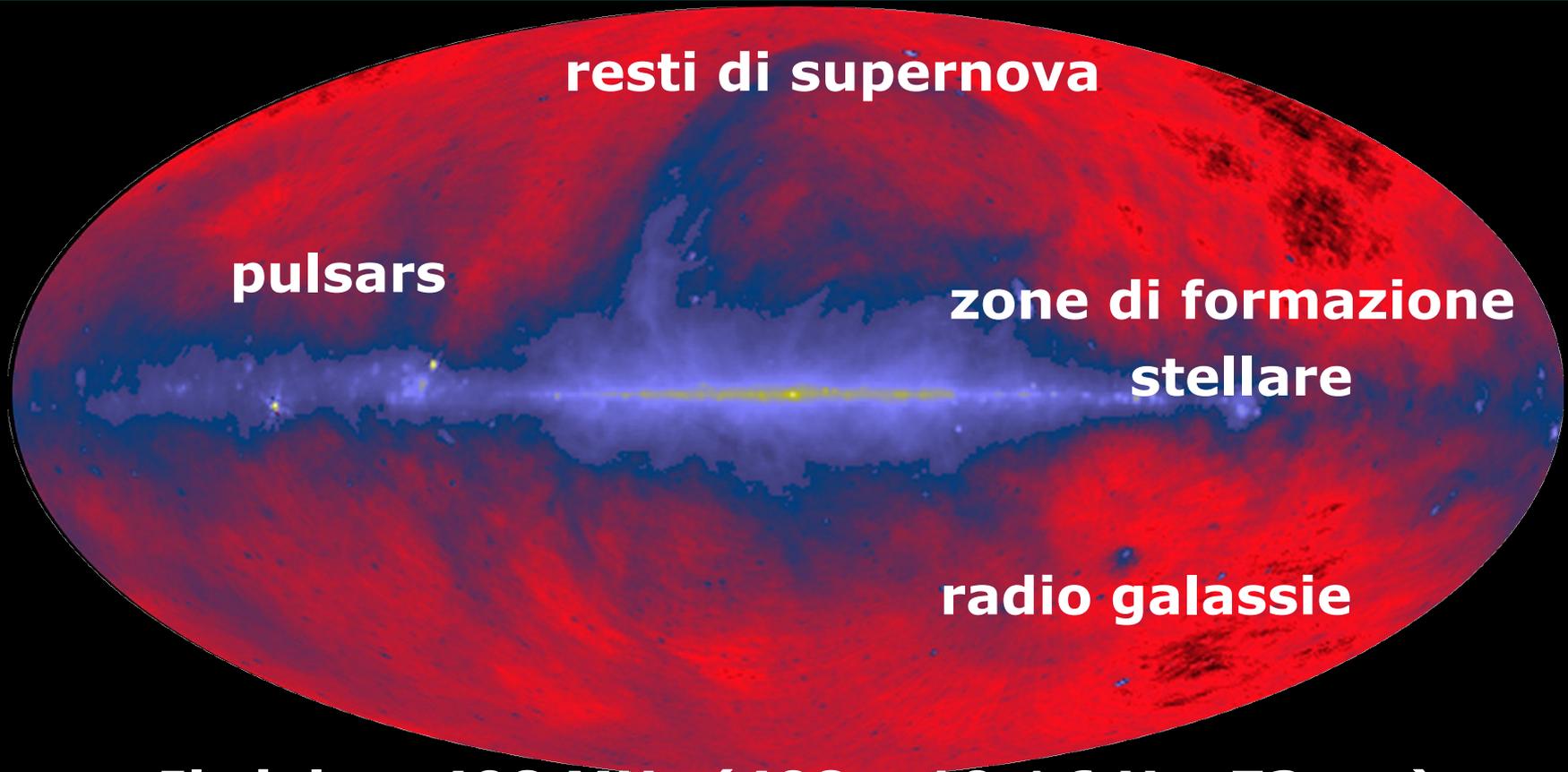
Miliardi di galassie



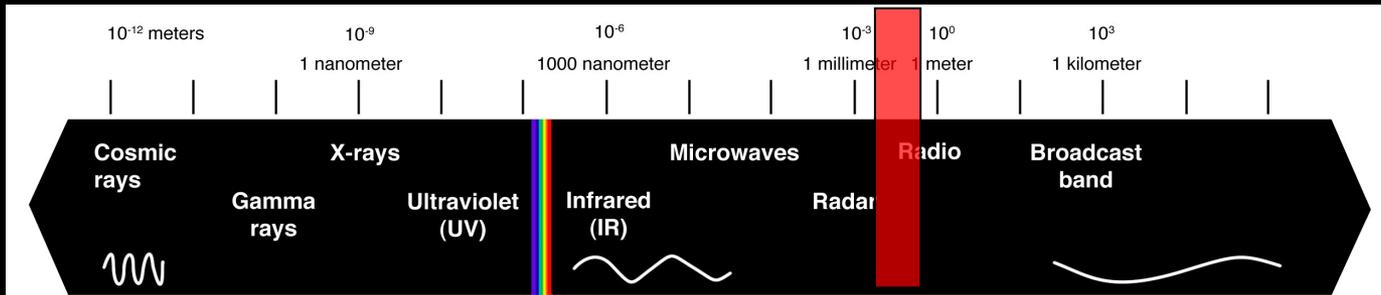
Immagine:
NASA, ESA, G. Illingworth, D. Magee, and P. Oesch
(University of California, Santa Cruz), R. Bouwens
(Leiden University), and the HUDF09 Team

HST – eXtreme Deep Field

Non solo galassie!



Il cielo a 408 MHz (408×10^6 Hz, 73 cm)



Glossario: λ , ν , IR, UV, ...

10^{-12} meters

10^{-9}

10^{-6}

10^{-3}

10^0

10^3

1 nanometer

1000 nanometer

1 millimeter

1 meter

1 kilometer

Cosmic rays

X-rays

Microwaves

Radio

Broadcast band

Gamma rays

Ultraviolet (UV)

Infrared (IR)

Radar



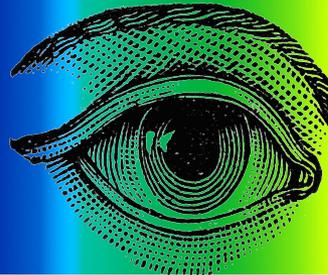
Short Wavelengths

Long Wavelengths

Visible Light

Ultraviolet (UV)

Infrared (IR)

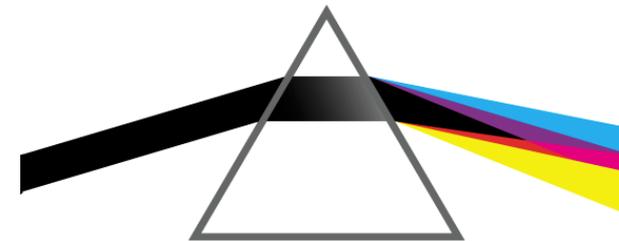


400 nanometers

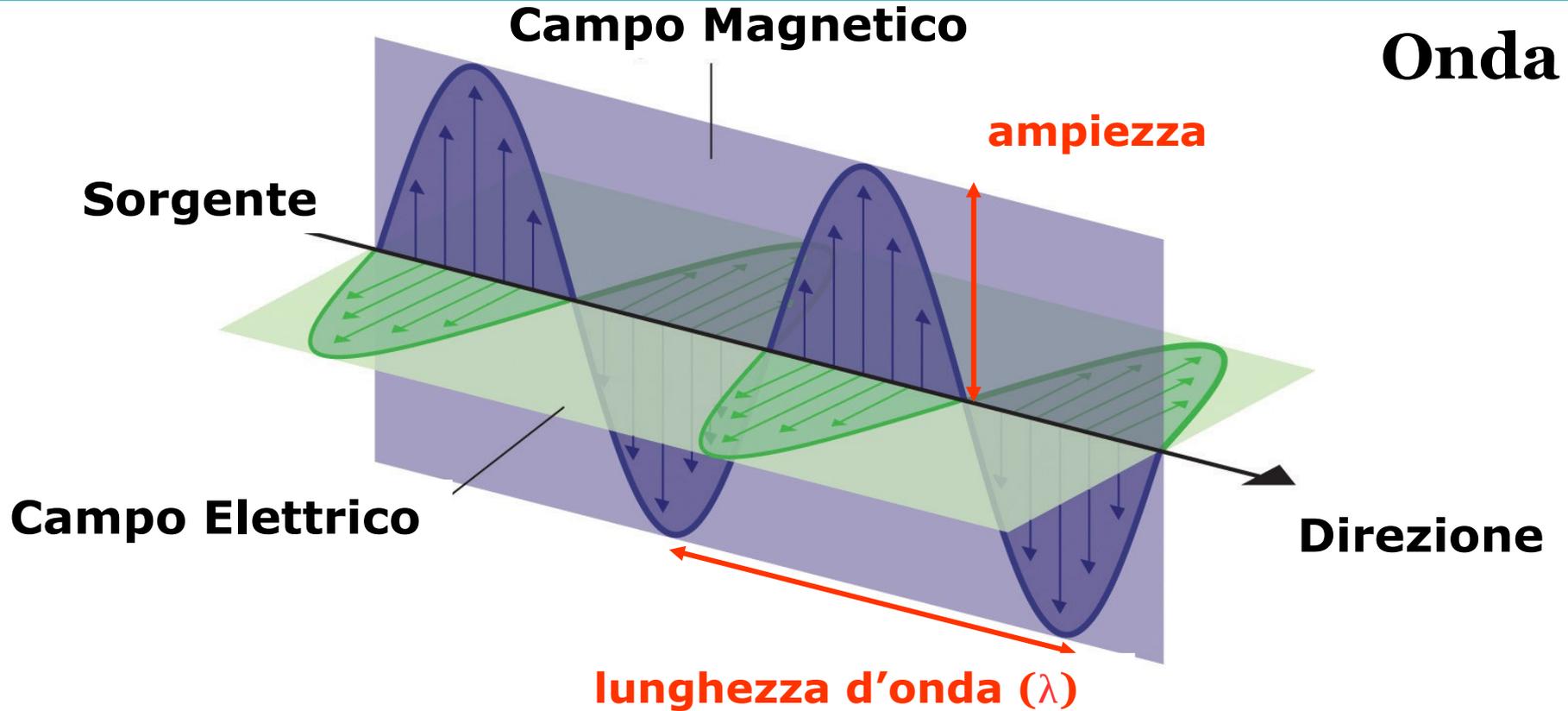
500 nanometers

600 nanometers

Tutti i "colori" della luce!



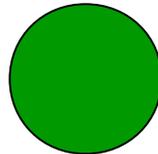
Glossario: λ , ν , IR, UV, ...



Particella (fotone)

massa nulla

$E = \text{costante } (h) \times \text{frequenza}$



$\lambda \cong 400 \times 10^{-9} \text{ m}$

freq $\cong 8 \times 10^{14} \text{ 1/sec (Hz)}$

$E \cong 5 \times 10^{-19} \text{ Joule}$



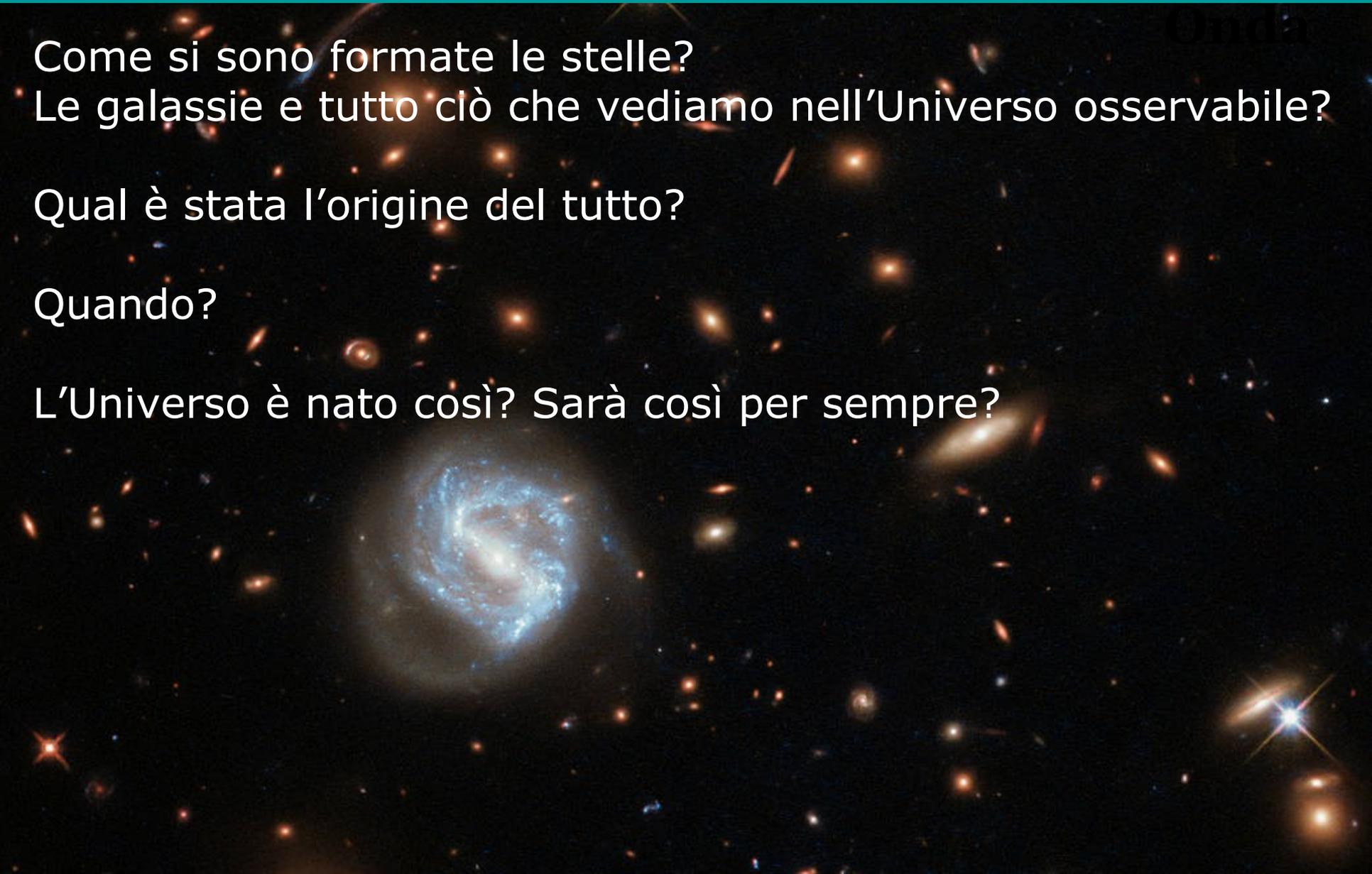
Come si sono formate le stelle?

Le galassie e tutto ciò che vediamo nell'Universo osservabile?

Qual è stata l'origine del tutto?

Quando?

L'Universo è nato così? Sarà così per sempre?

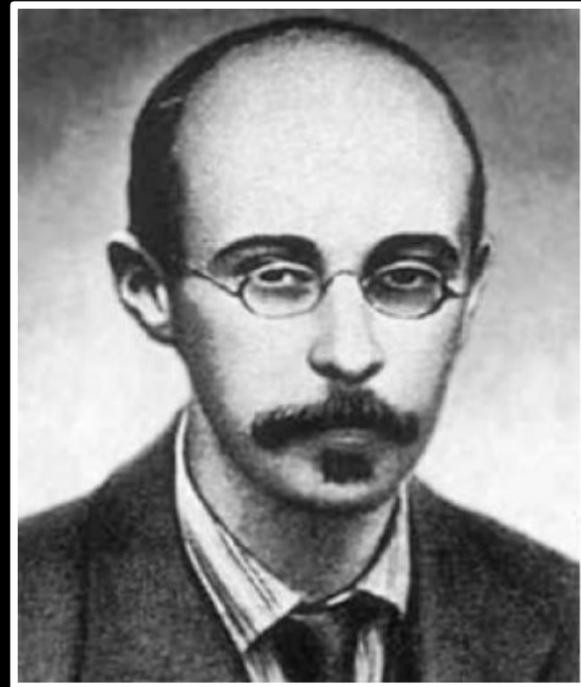


Cosmologia Moderna

- A. Einstein, "Teoria Generale Relatività" (1915)
- Diverse *teorie cosmologiche*
- Cosmologie di Friedmann
- Modello di **Big Bang**



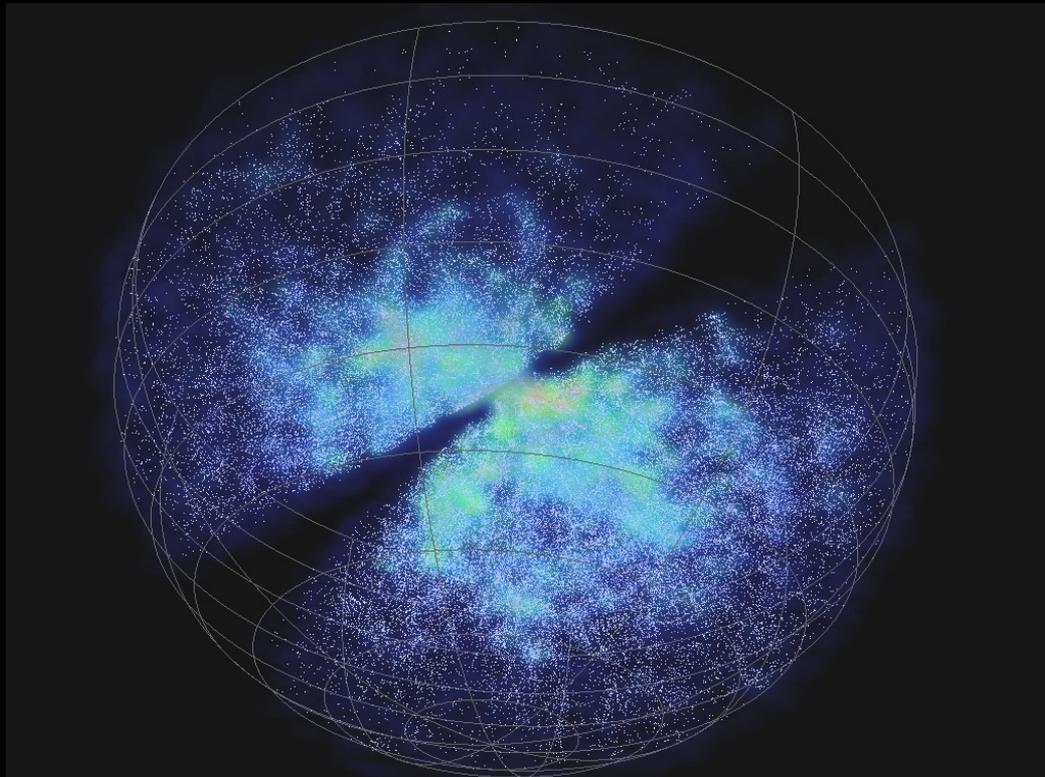
A. Einstein



A. Friedmann

Principio Cosmologico

- Postulato:
“ su scale di distanze opportunamente grandi, l'universo è **omogeneo** e **isotropo**”.
- Strutture a larga scala (100 milioni di pc*).



6dF, Anglo-Australian Observatory

*1pc = $\sim 3 \times 10^{13}$ km

Equazioni di Friedmann

- Due equazioni "semplici" che descrivono l'universo:

$$\frac{d}{dt} \frac{a^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi\rho G}{3}$$

$$\left(\frac{d^2}{dt^2} a\right) = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$\frac{1}{a} \left(\frac{d}{dt} a\right) = H$$

$$H^2 \left(\frac{8\pi G}{3H^2} \rho - 1\right) = H^2 (\Omega - 1)$$

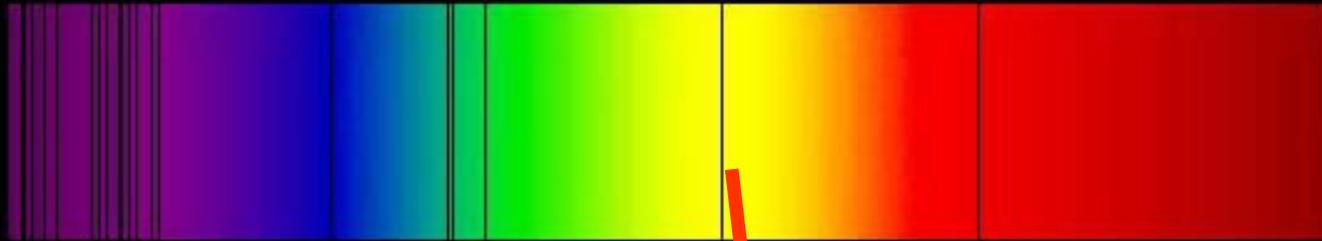
$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$$

- costanti universali: G , c
- costante cosmologica Λ
- funzioni del tempo: a , ρ , p
- k , curvatura dello spazio
- Ω densità totale di materia

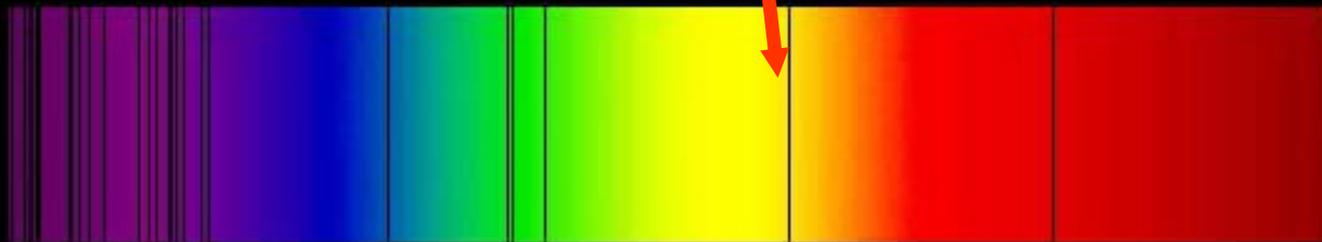
L'universo è in espansione

- 15 marzo 1929: E. Hubble, "*A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*"

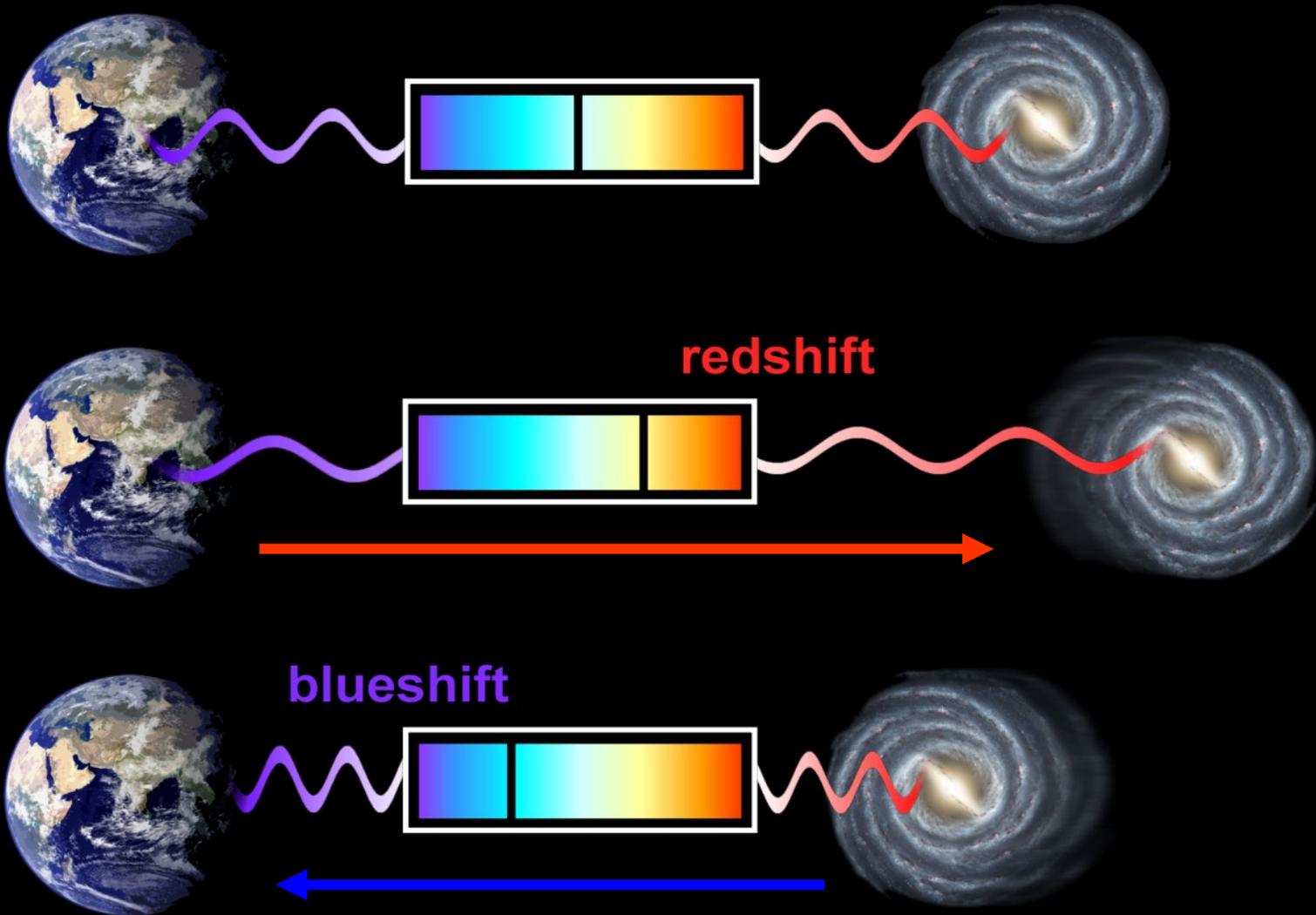
Absorption Lines from our Sun



Absorption Lines from a supercluster of galaxies, BAS11
 $v = 0.07 c$, $d = 1$ billion light years



L'universo è in espansione



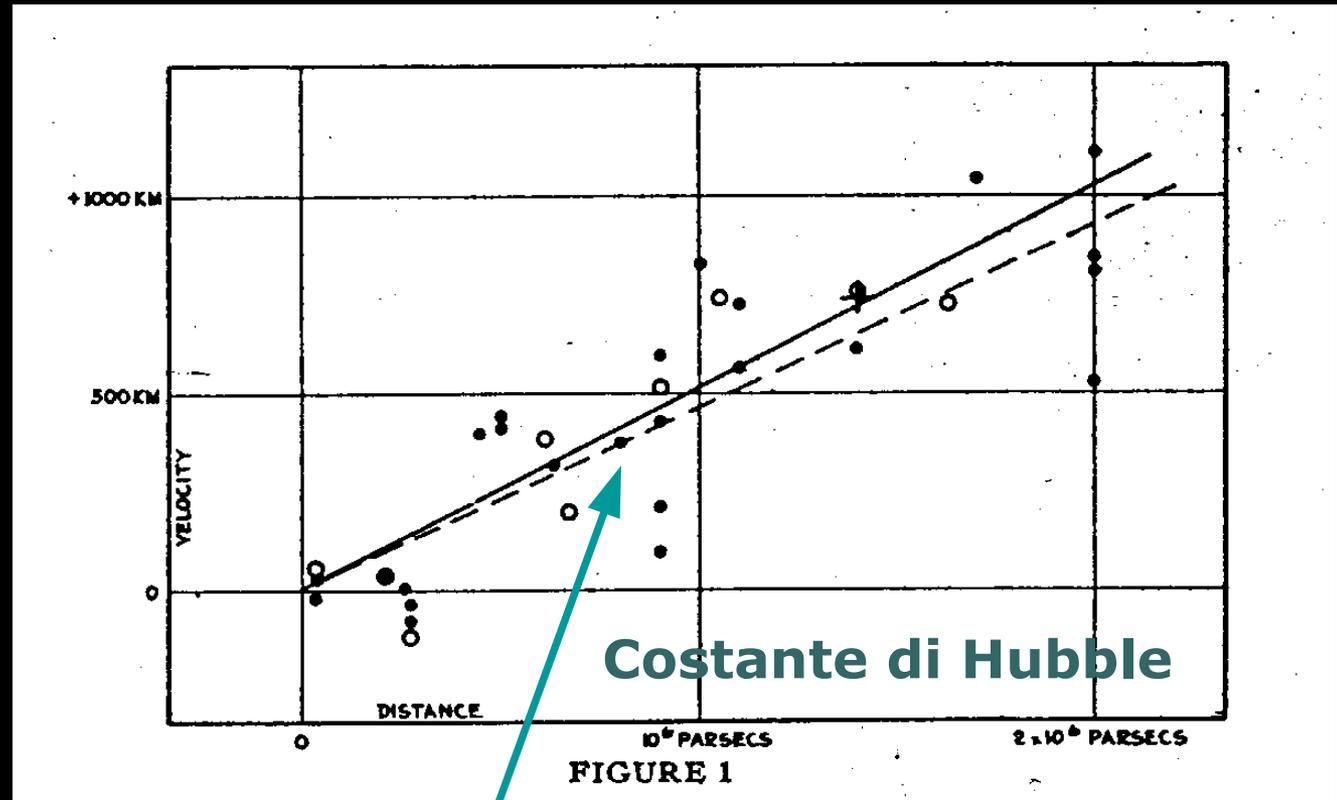
L'universo è in espansione

- Redshift

$$z = \frac{\lambda'}{\lambda_0} - 1$$

- Se $v \ll c$

$$z = \frac{v}{c} \propto d$$



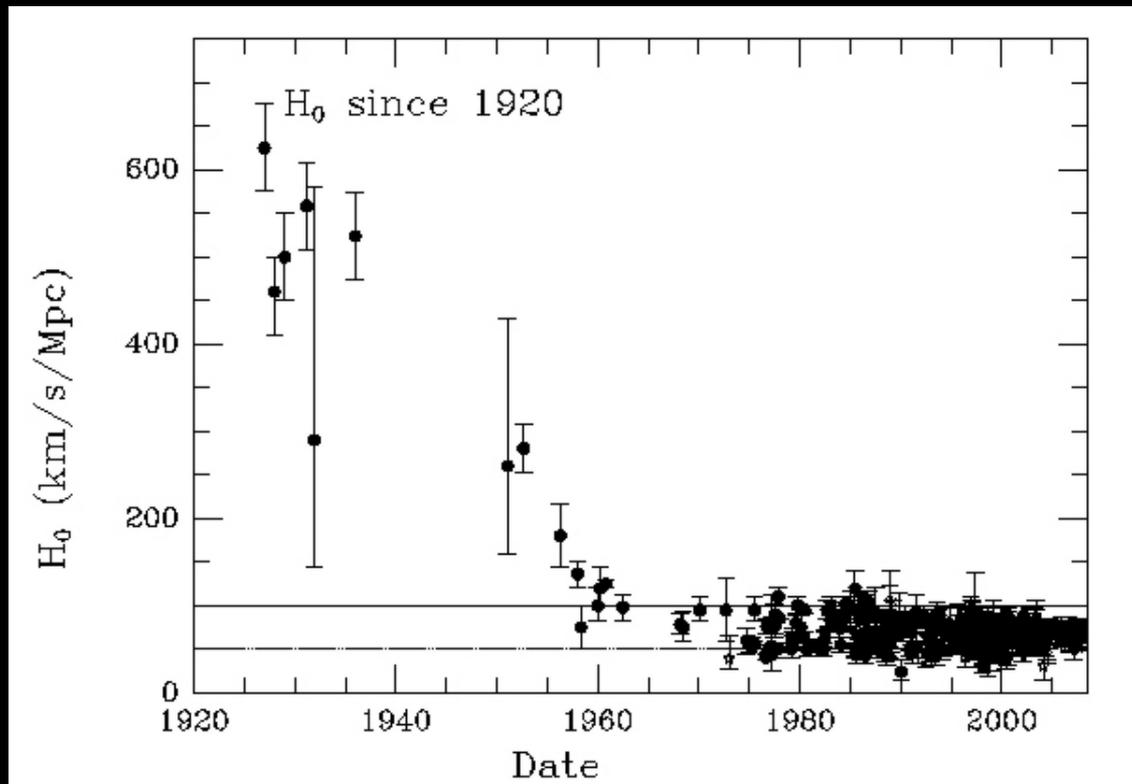
Distanza:

- metodo delle **Cefeidi**
- difficile da determinare

$$v = H_0 d$$

$$z = H_0 d / c$$

Costante...ma non troppo



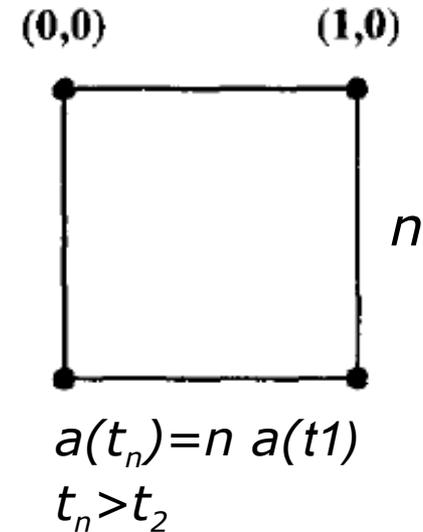
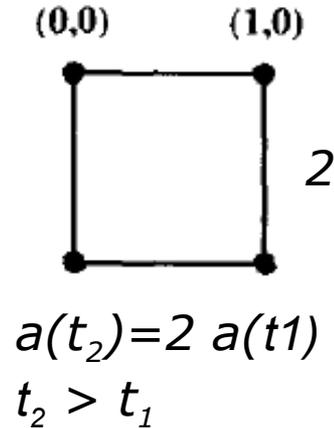
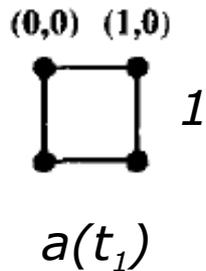
- permette di stimare l'età dell'Universo (tempo di Hubble; $1/H_0$)
- prima misura di H_0 : 500 km/s/Mpc → l'universo ha solo 2 mld anni
- ci sono rocce vecchie di 3 mld anni...

Le osservazioni di Planck hanno permesso una stima molto precisa di H_0 usando la prima luce emessa dall'Universo.

Costante...ma non troppo

Costante di Hubble (H_0) km/s/Mpc	Tempo di Hubble ($1/H_0$) 10^9 anni
500	2
180 (1956 Humason et al.)	5,5
75 (1958 Sandage)	13,3
55 (1970 Sandage)	18
70 (WMAP)	14,2
67 (PLANCK)	14,9

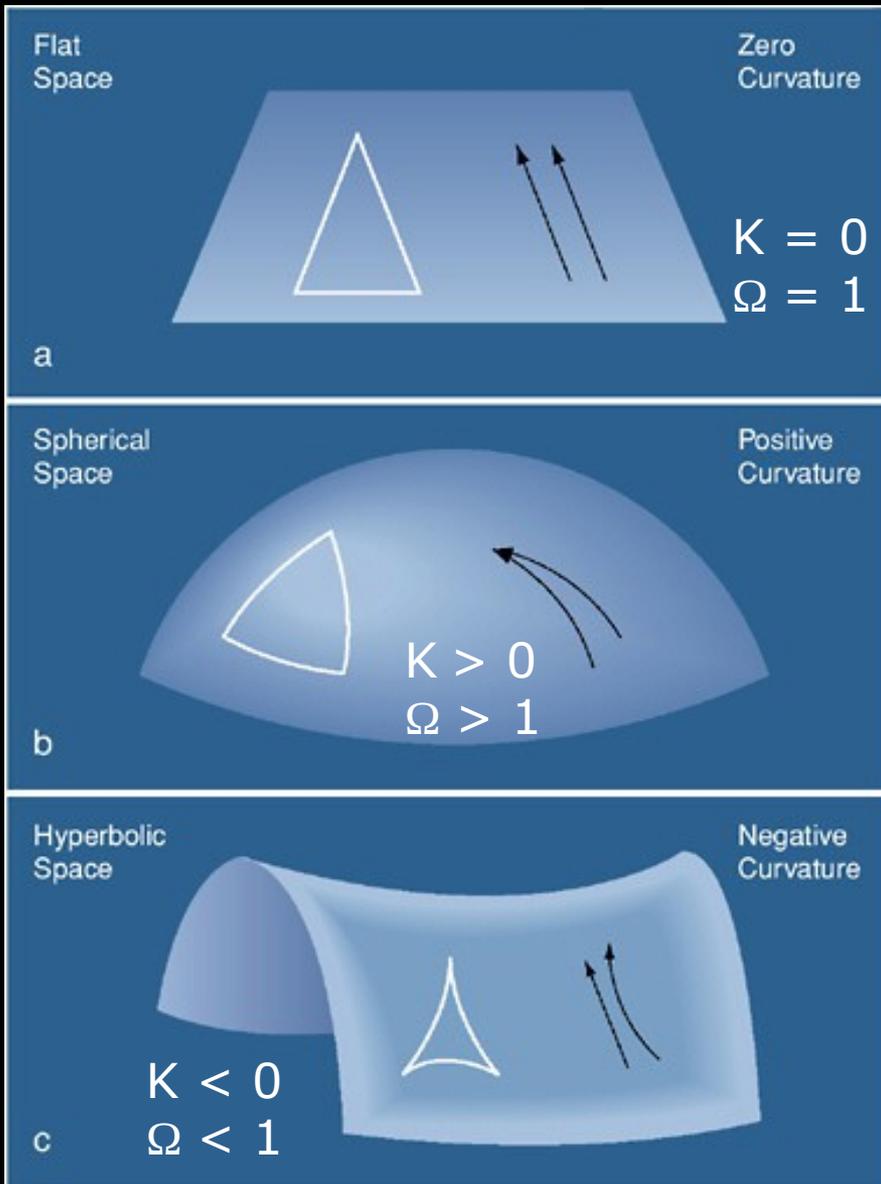
a – Fattore di scala



tempo

- descrive l'andamento delle dimensioni dell'universo nel tempo
- nel passato aveva un valore più piccolo di adesso
- la distanza fisica evolve nel tempo
- le coordinate sono fisse

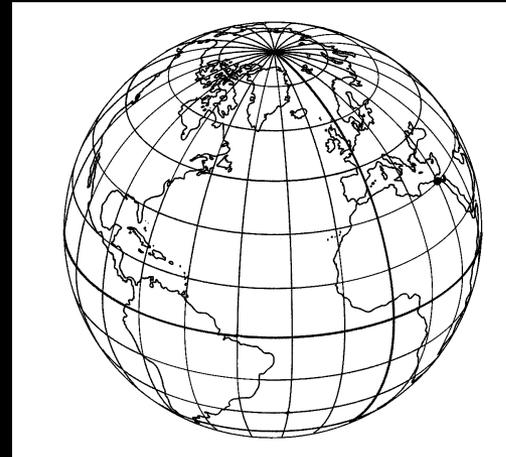
k – Parametro di curvatura



□ geometria e densità di materia (energia) sono in relazione

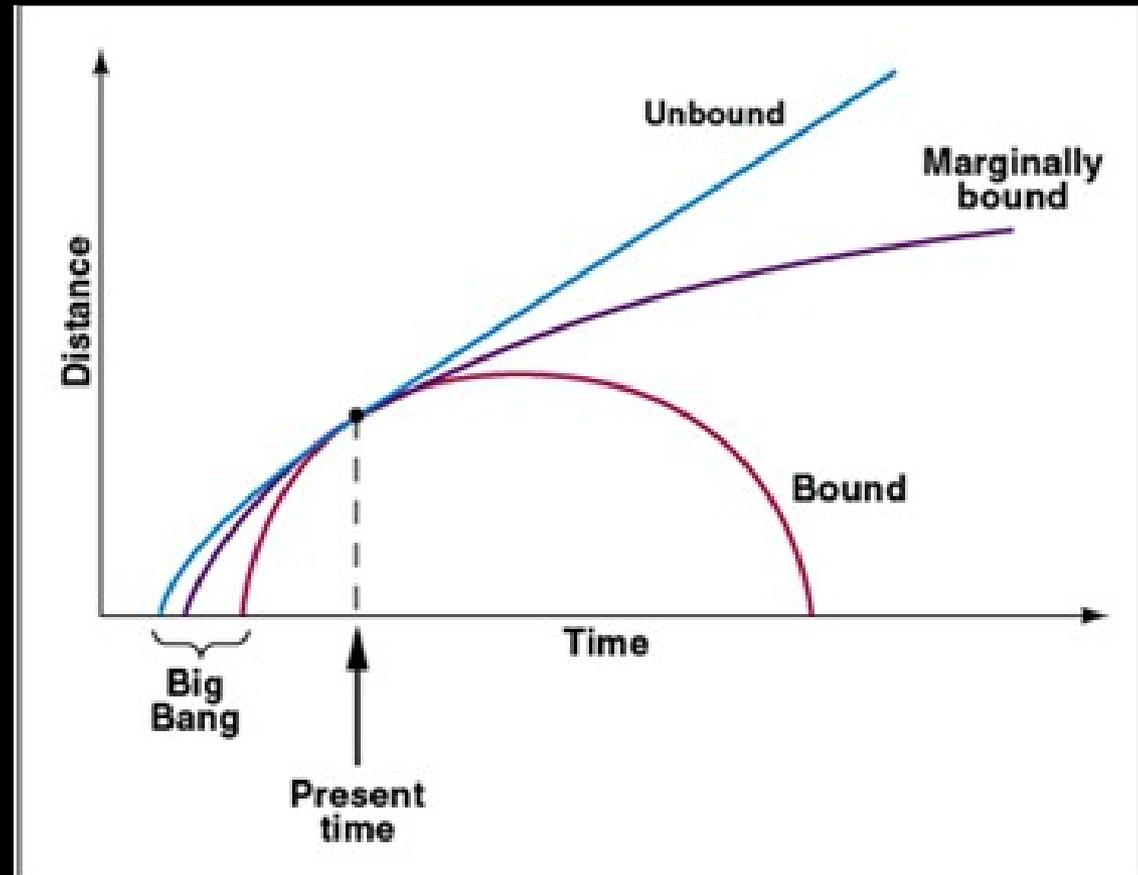
□ geometria legata alla densità di materia ρ rispetto alla densità critica ($\rho_c = 10^{-29}$ g/cm³)

□ **densità totale materia Ω**



Big Bang

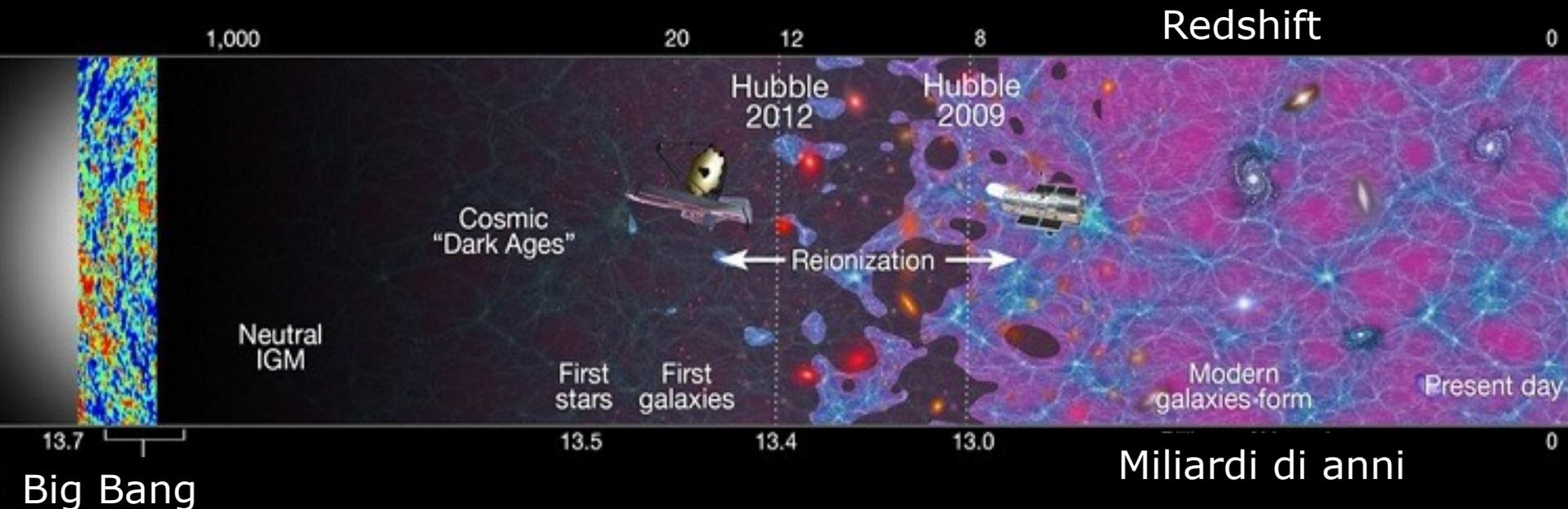
- punto a densità di energia e temperatura infinita
- Big Bang (singolarità)
- Gamow (1946): cosmologia di **Big Bang**
- $t \rightarrow 0, a \rightarrow 0$
- Radiazione di fondo cosmico nelle microonde



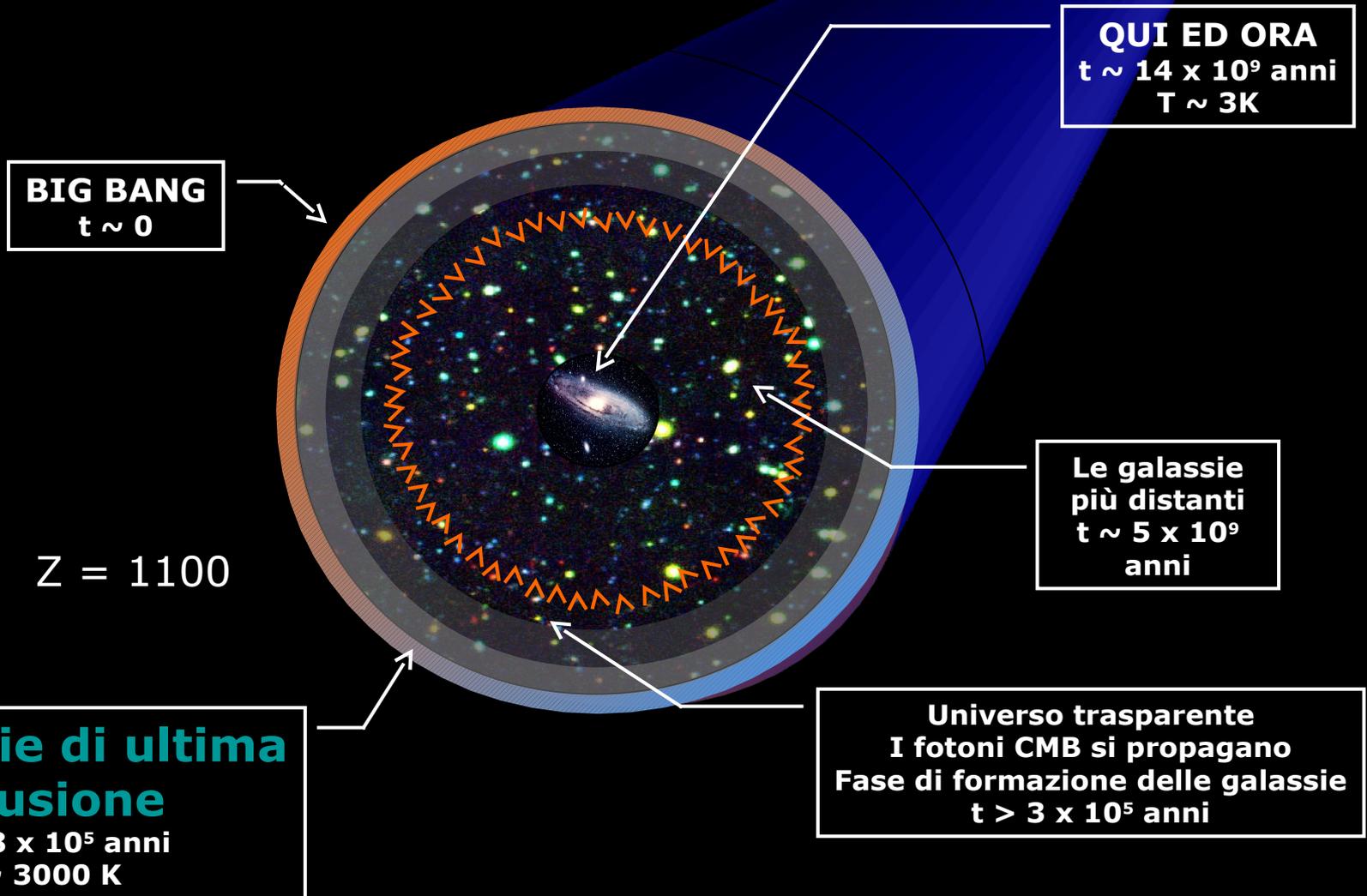
La storia dell'universo

Cosa abbiamo ricostruito fino ad oggi?

La **Radiazione Cosmica di Fondo**:
uno strumento prezioso!



Radiazione Cosmica nelle Microonde



L'universo diventa trasparente

L'Universo "bambino"...le strutture in divenire!

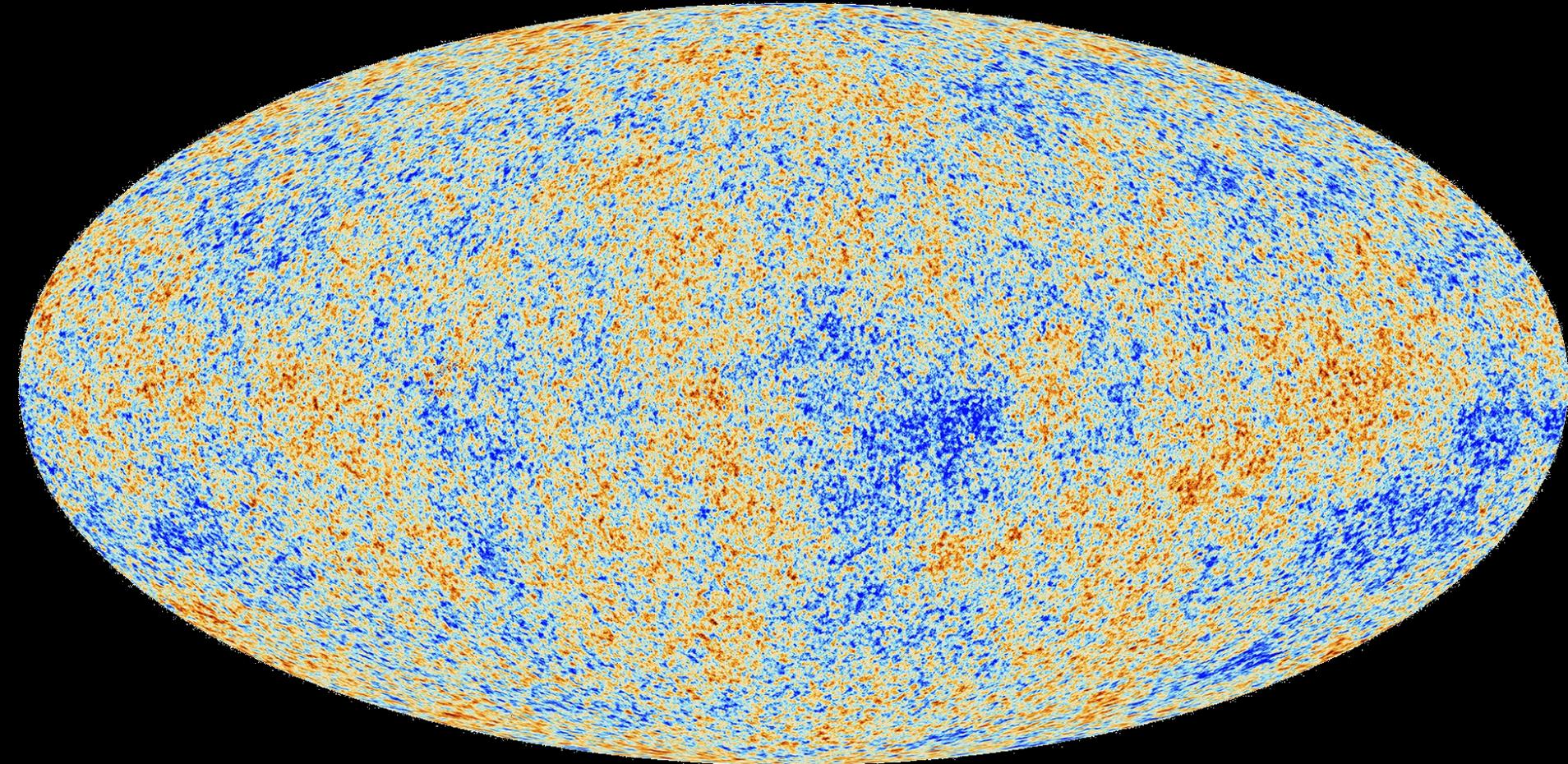
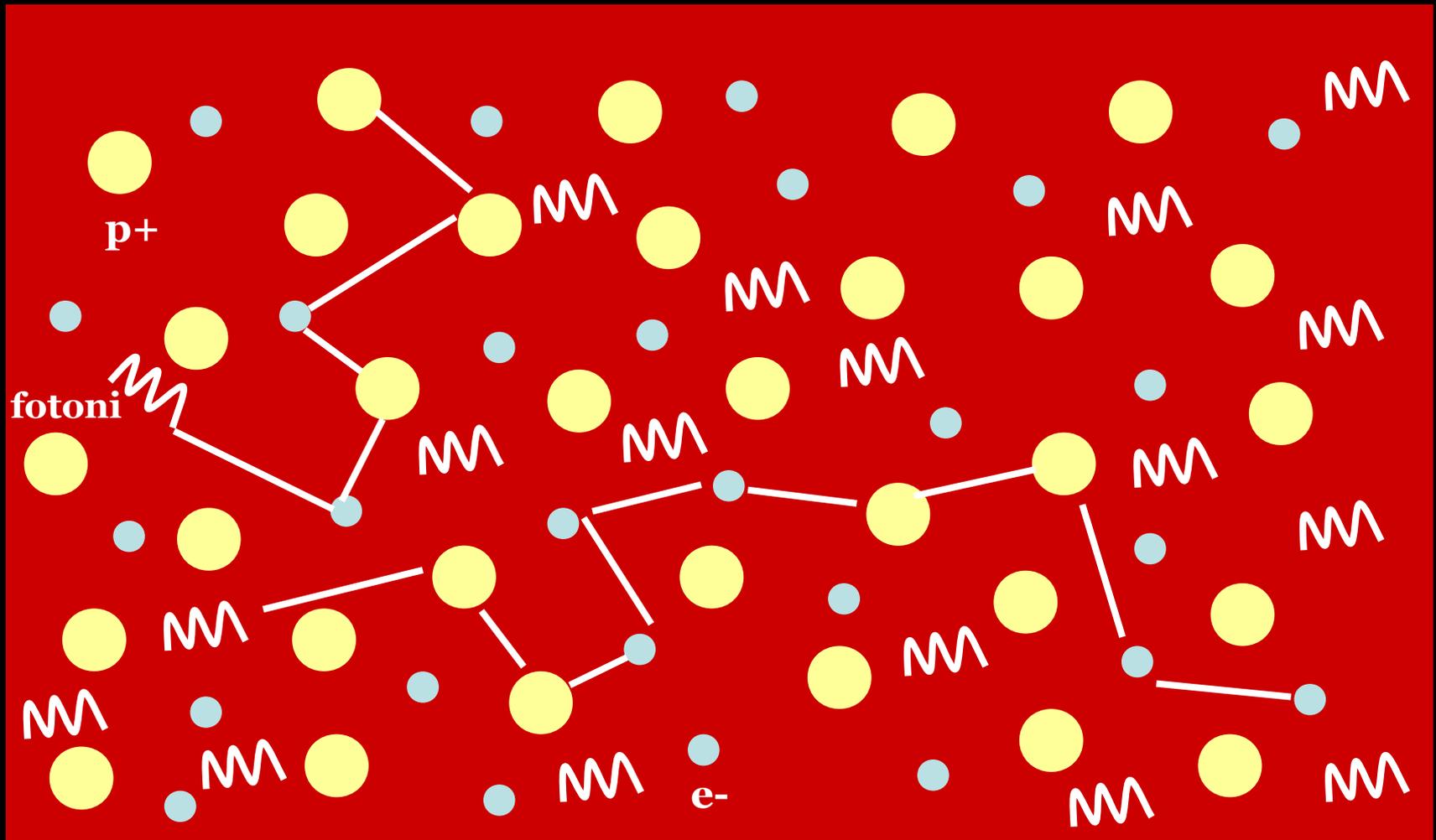


Immagine: Planck Collaboration, 2013

Universo opaco

tempo < 380.000 anni dopo il Big Bang



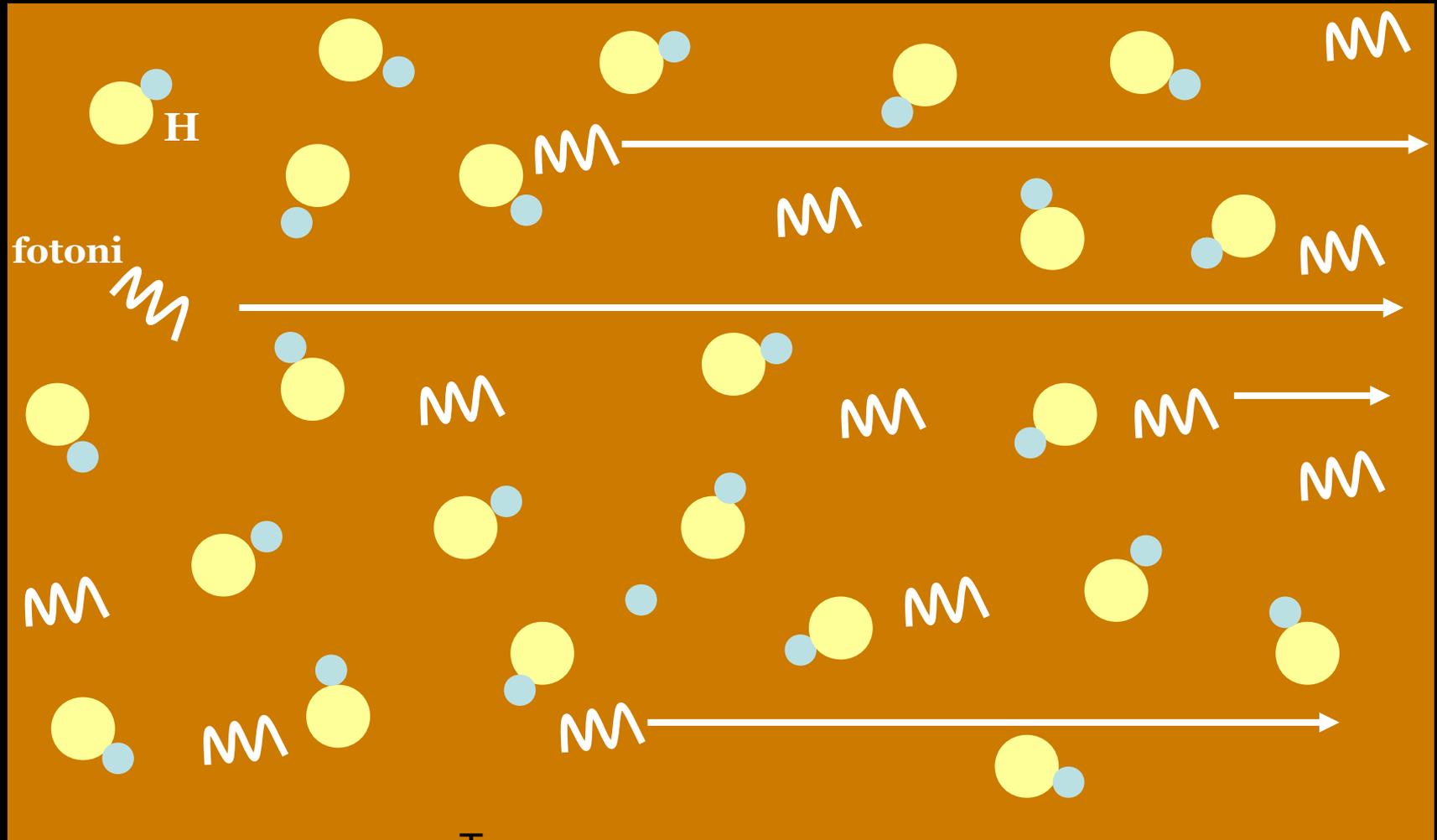
Temperatura > 3000 K

(kelvin = scala con zero posto a -273.15 °C)

La prima luce

tempo \approx 380.000 anni dopo il Big Bang

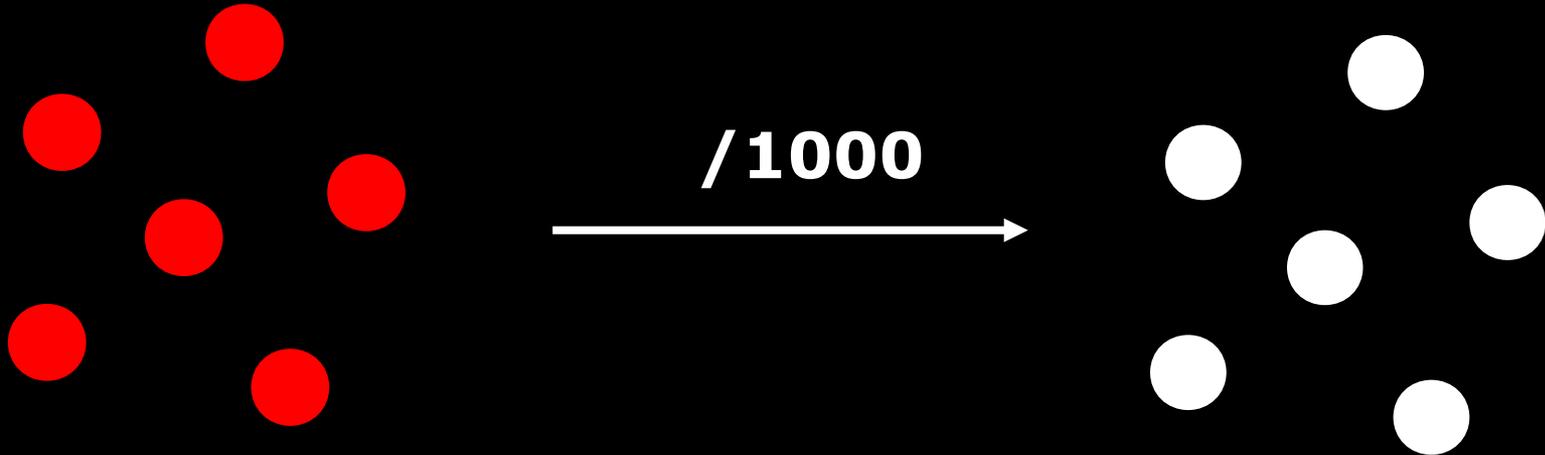
RICOMBINAZIONE



Temperatura \approx 3000 K

Segnale nelle microonde

L'Universo, dalla ricombinazione si è espanso di un fattore 1000



RICOMBINAZIONE

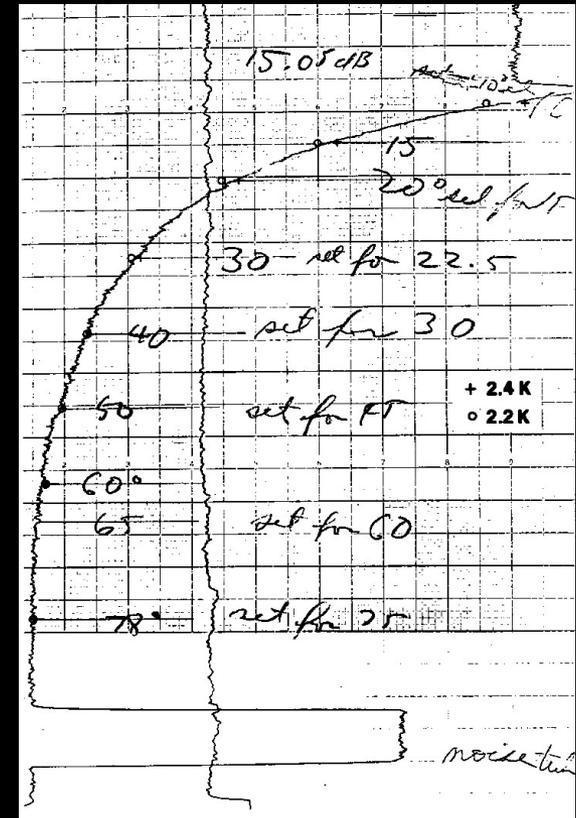
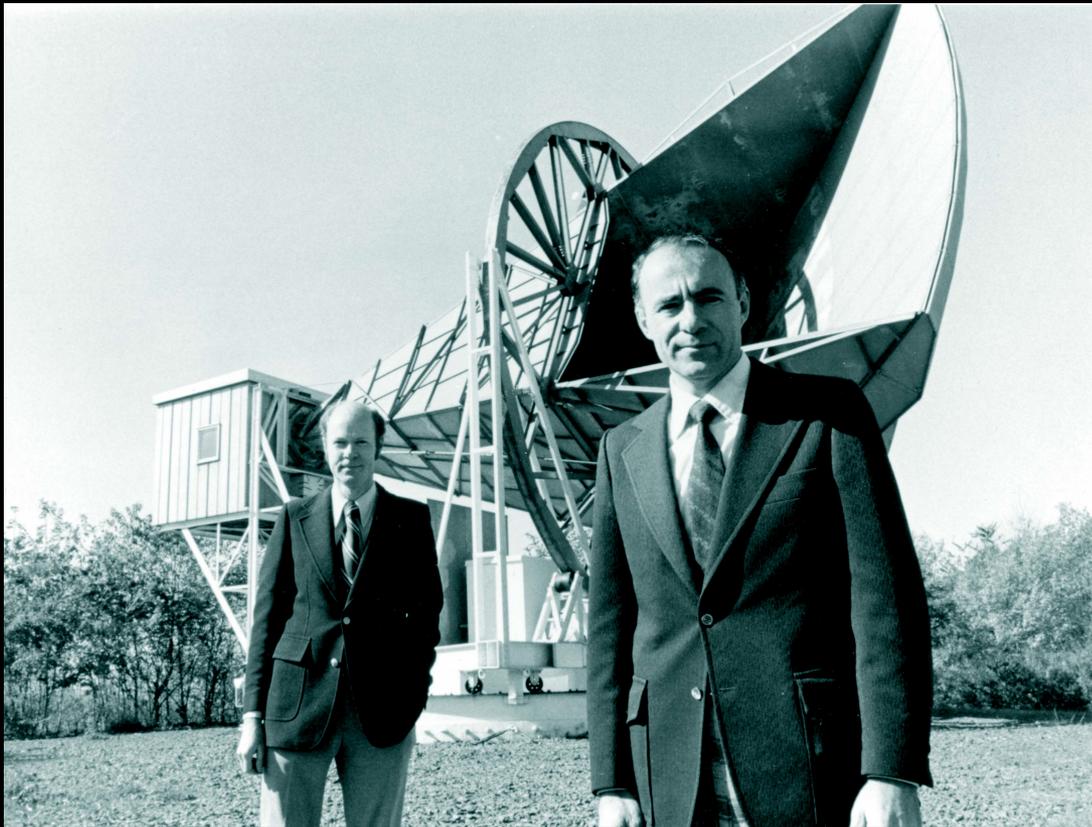
t= 380.000 anni dopo Big Bang
T= 3000K
Fotoni infrarossi

OGGI

t= 13,8 mld anni dopo Big Bang
T= 3K
Fotoni microonde

Radiazione Cosmica nelle Microonde

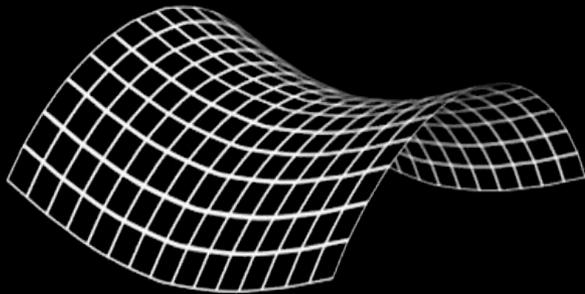
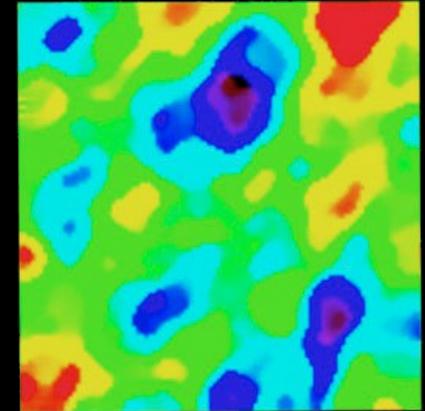
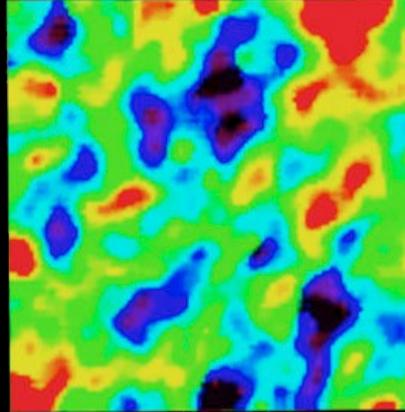
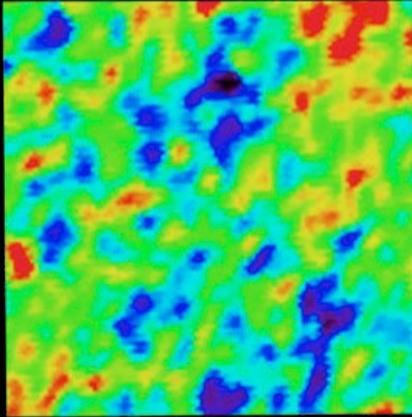
- *Eccesso di rumore a $\lambda = 7,35 \text{ cm}$*
- *Radiazione con $T \sim 3\text{K}$ proveniente da tutte le direzioni in cielo*



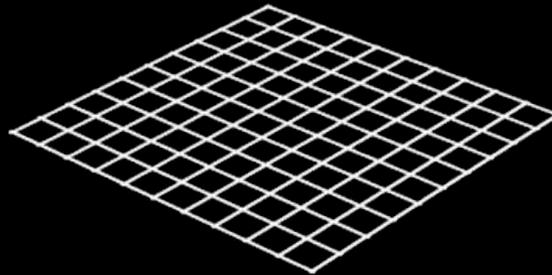
1965, A. Penzias, R. Wilson

Un universo piatto

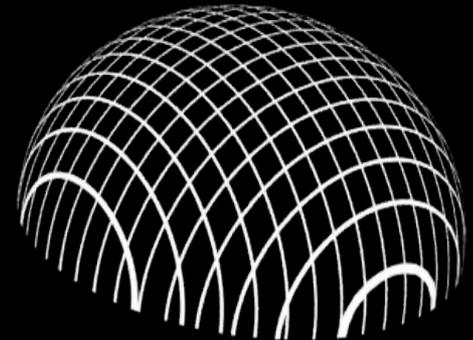
PLANCK, 2013



OPEN



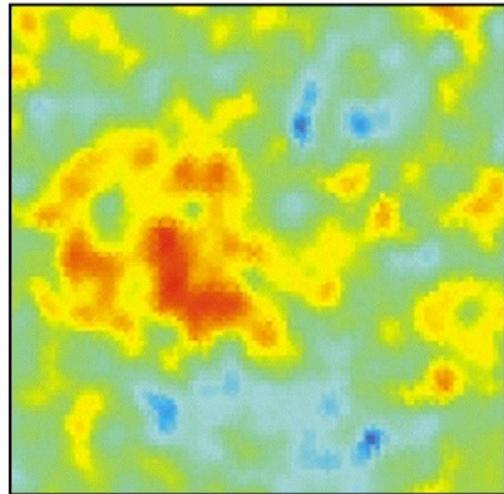
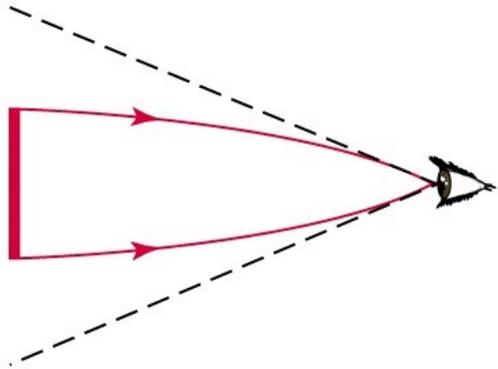
FLAT



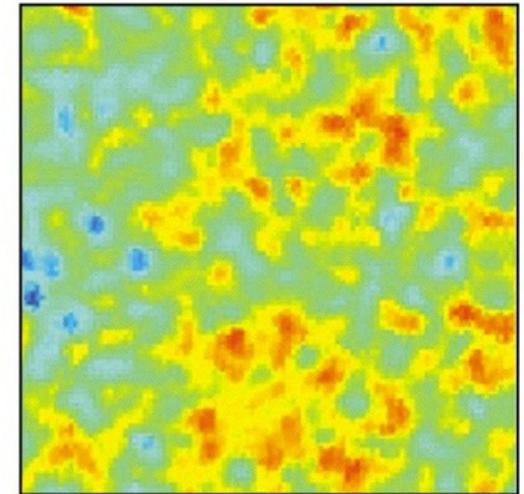
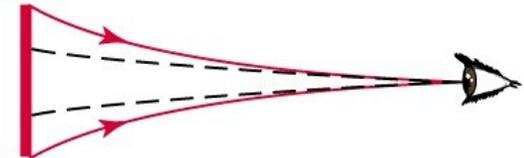
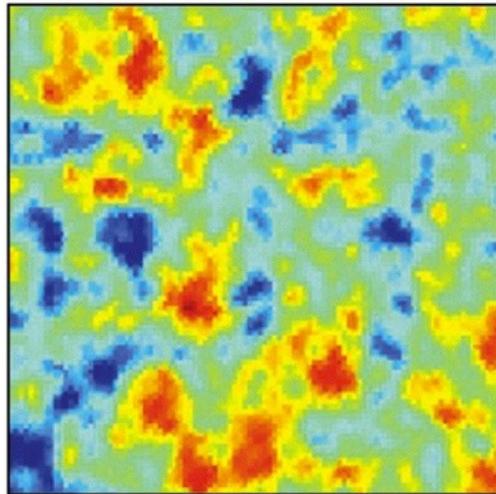
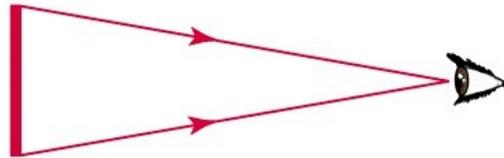
CLOSED

Un universo piatto

PLANCK, 2013

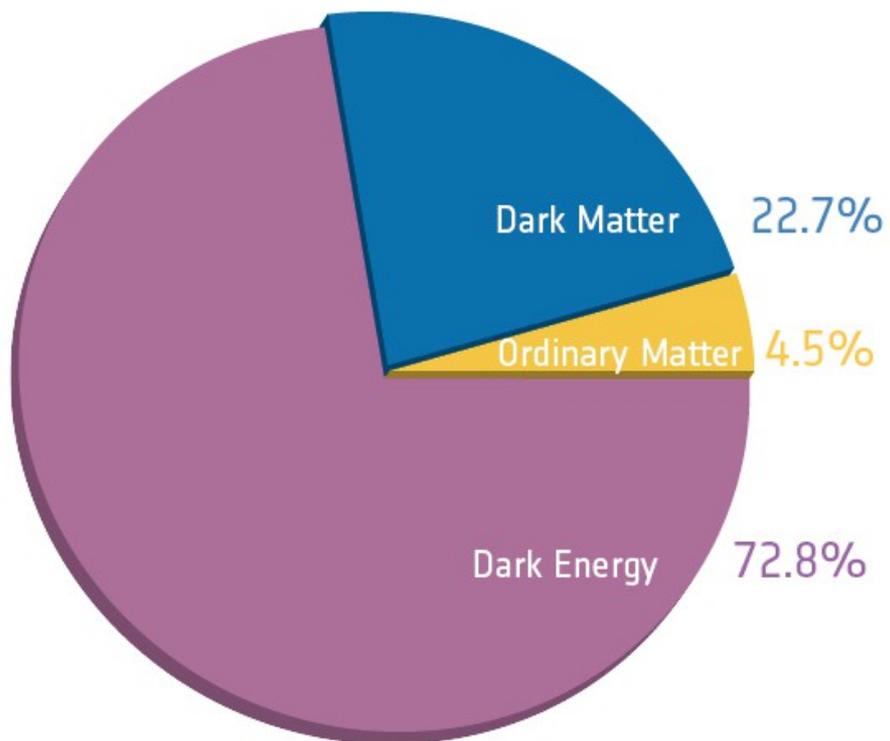


Universo chiuso:
le zone calde appaiono
più ampie del reale

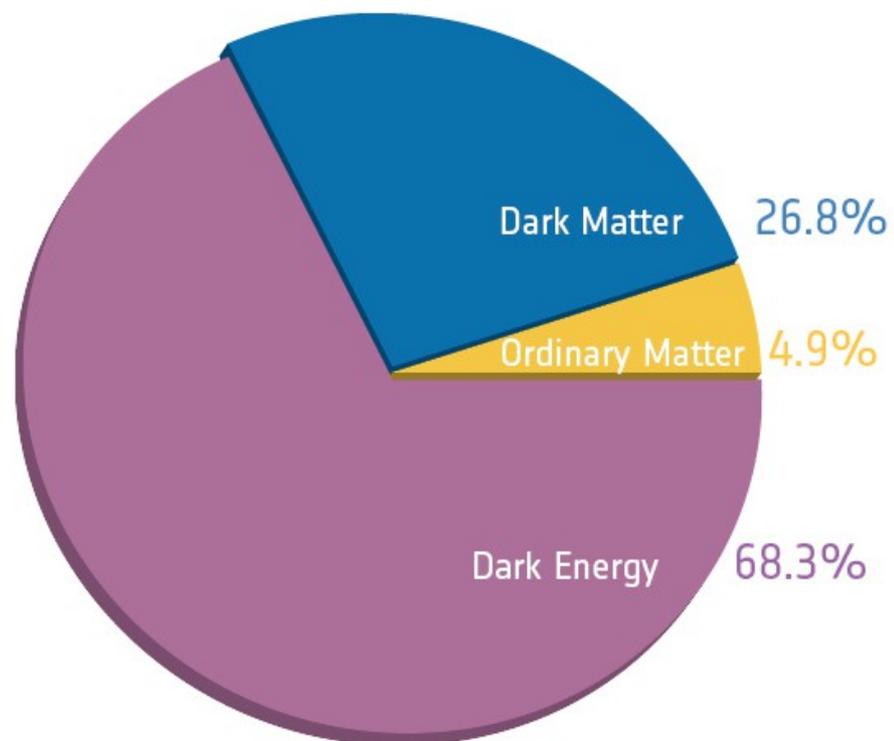


Universo aperto:
le zone calde appaiono
meno ampie del reale

Un universo oscuro



Before Planck



After Planck

Materia Oscura

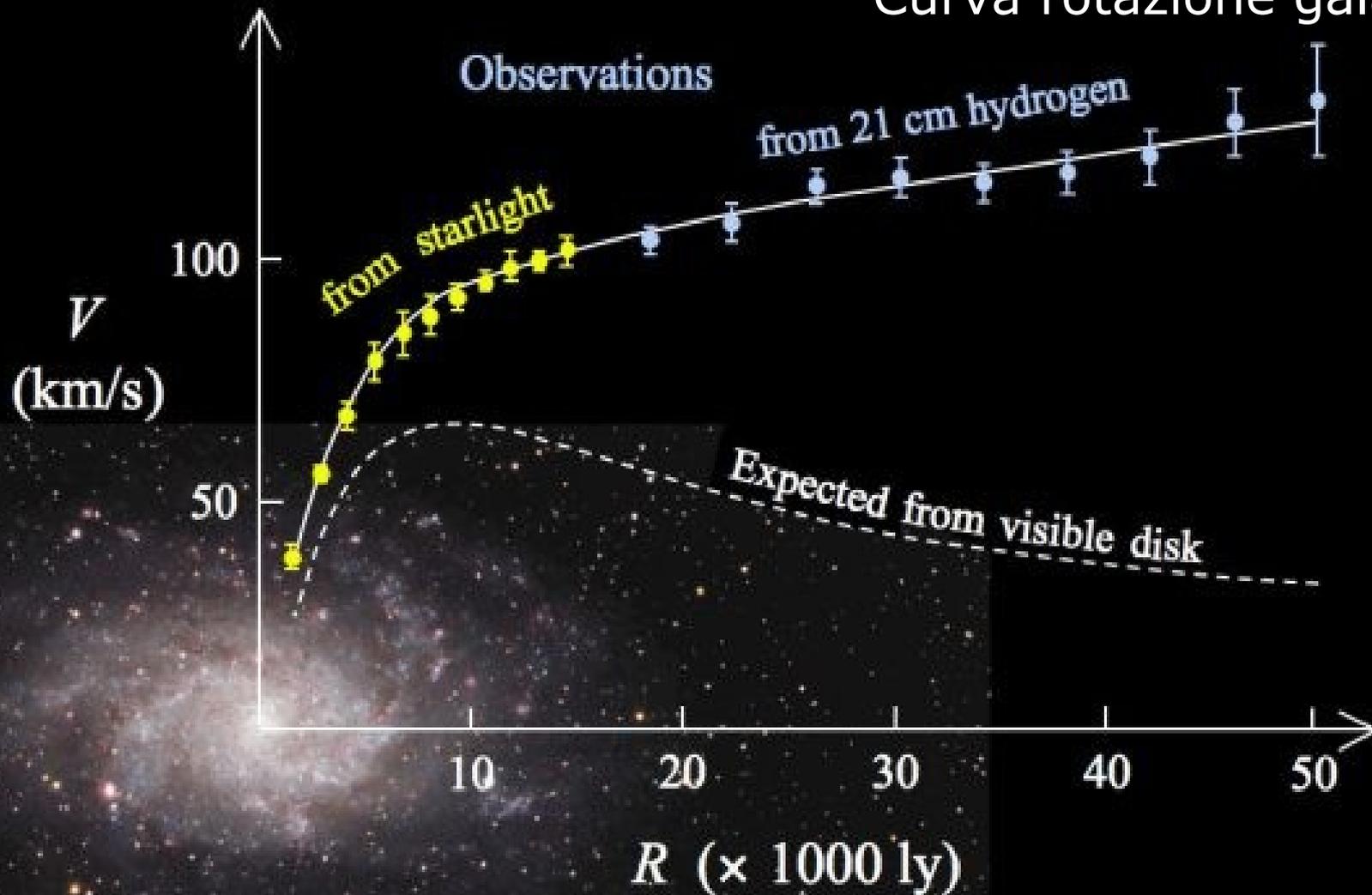
1933

F. Zwicky, Ammasso della Chioma

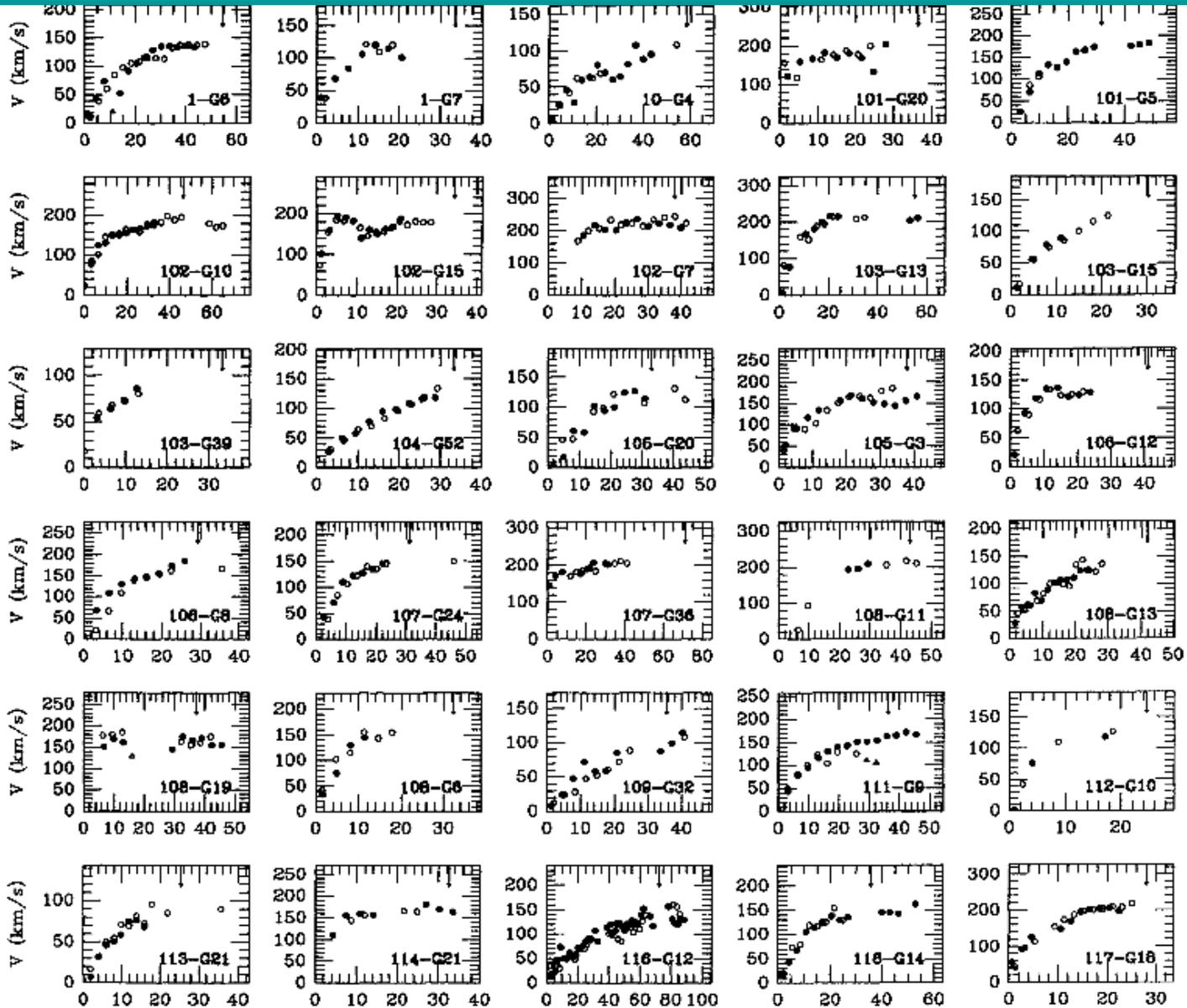


Materia Oscura

Curva rotazione galassie



Materia Oscura



Materia Oscura



Normal Matter ($\Omega_b = 0.05$)



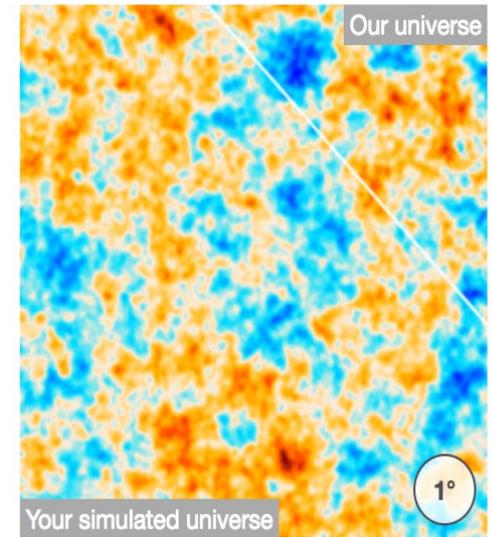
Dark Matter ($\Omega_c = 0.275$)



Dark Energy ($\Omega_\Lambda = 0.675$)



Normal matter only



13.8 billion years old - just right

flat universe

Fundamental scale $\sim 0.8^\circ$

Universe similarity **100%** - the same as our universe

Materia Oscura

planck CMB Simulator



Normal Matter ($\Omega_b = 0.05$)



Dark Matter ($\Omega_c = 0.025$)

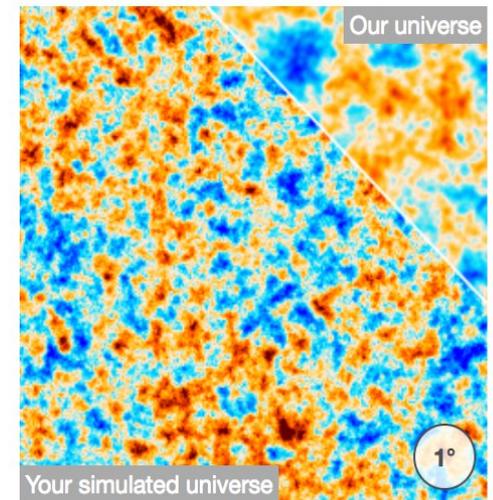


Dark Energy ($\Omega_\Lambda = 0.675$)



Normal matter only

Flatten



17 billion years old - too old

open universe

Fundamental scale $\sim 0.34^\circ$ - too small and too bright

Universe similarity **55%** - not like our universe

Cold, warm o hot?

Varie ipotesi per la *materia oscura* :

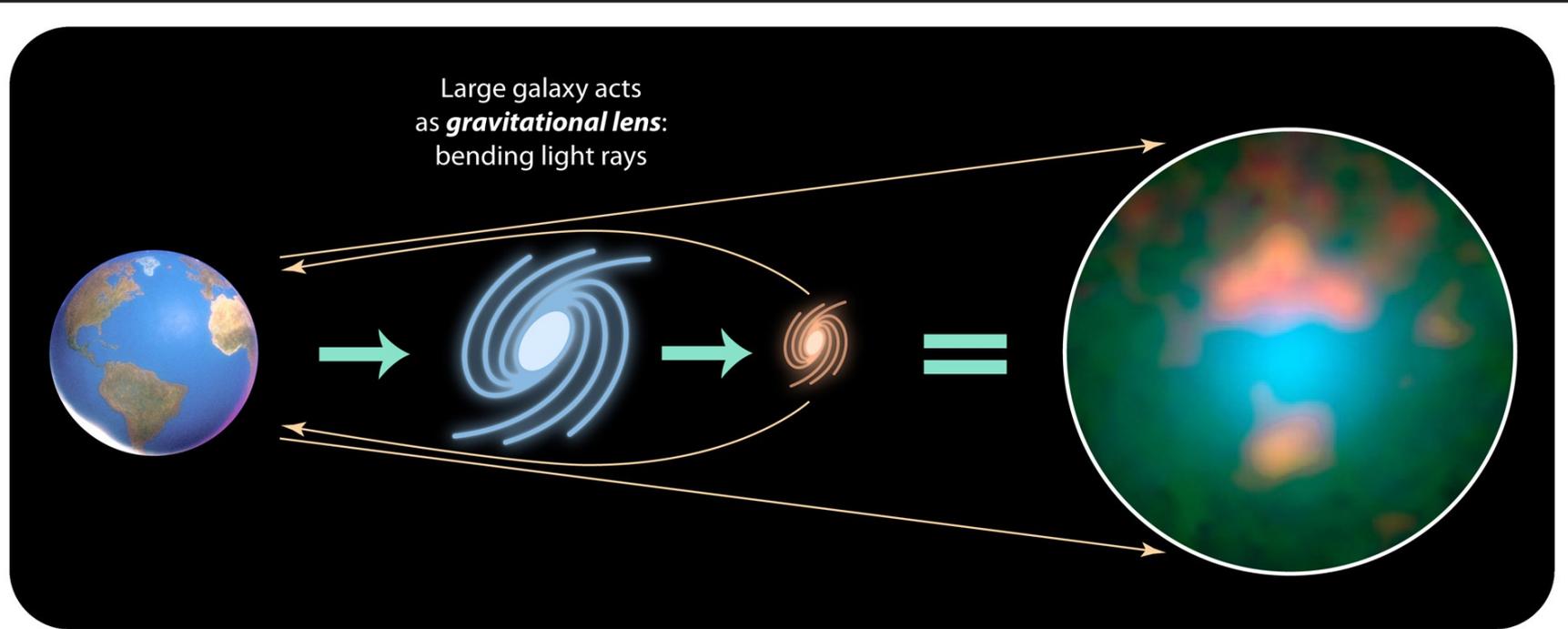
Hot – Particelle leggere, relativistiche fino a poco prima della ricombinazione (***neutrino***).

Warm – Particelle un po' più pesanti, che hanno velocità più basse rispetto a quelle dei neutrini (***gravitino, fotino***)

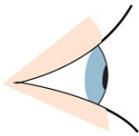
Cold – Particelle (o oggetti) molto massive e lente (***WIMPS, assioni, MACHOS, RAMBOS***)

La ***Cold Dark Matter*** è quella che offre le spiegazioni più semplici alle osservazioni cosmologiche effettuate (anisotropie radiazione di fondo).

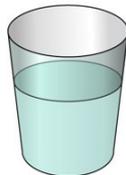
Lente gravitazionale



Point of view



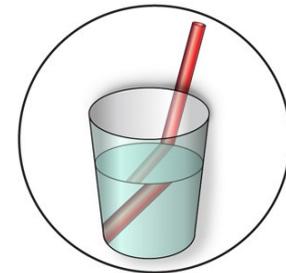
Large object in foreground



Small object in background

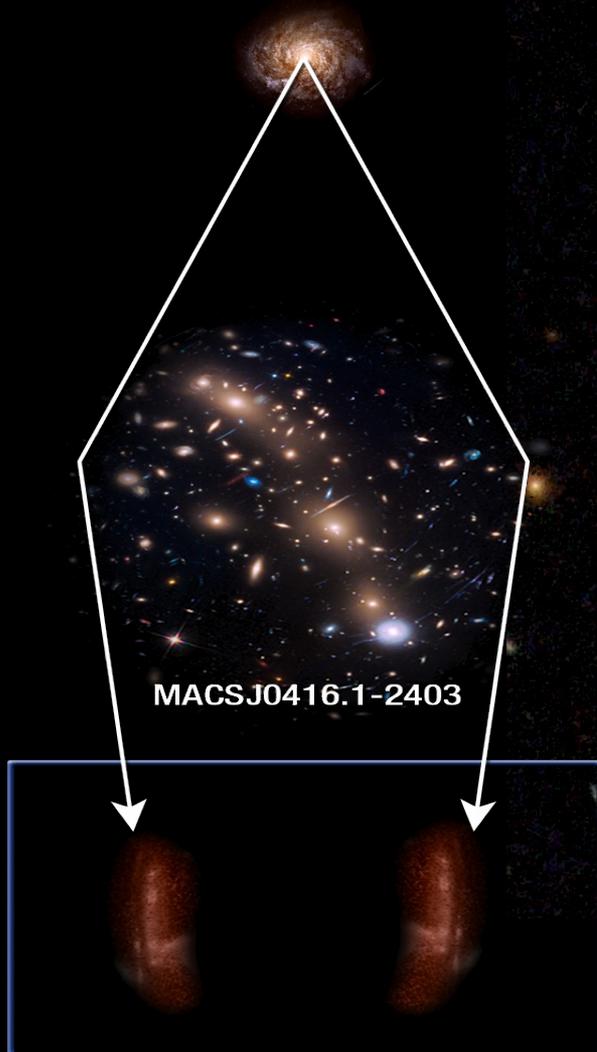


As seen:
small object distorted

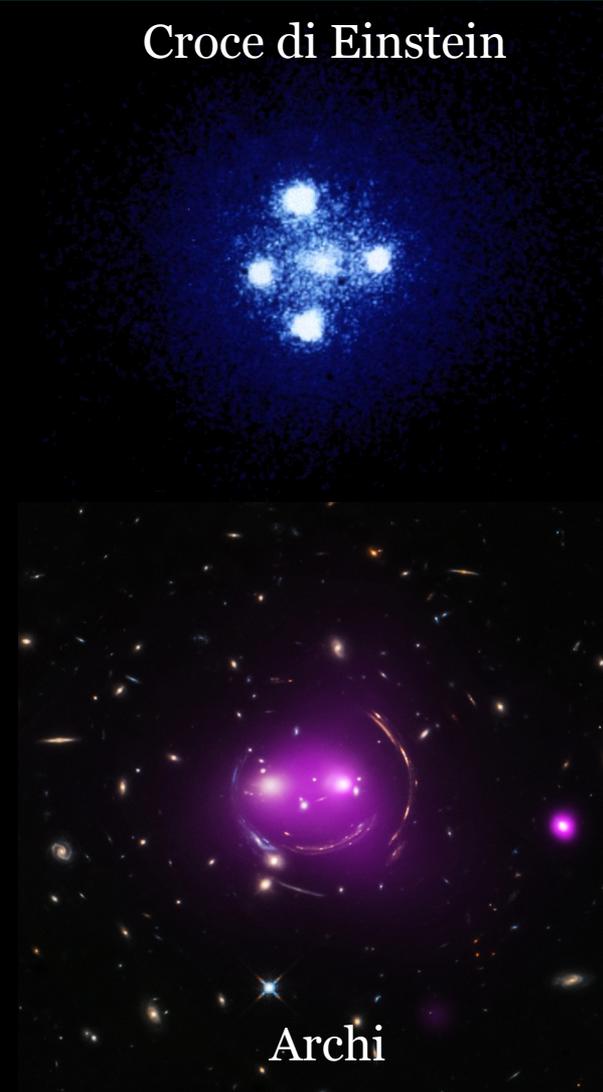


Lente gravitazionale

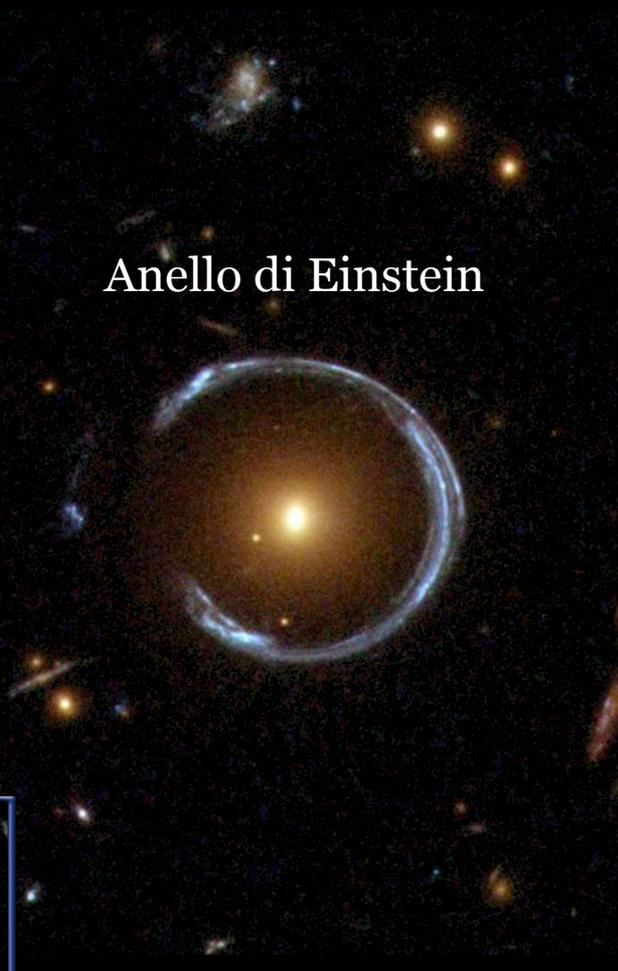
Strong lens



Croce di Einstein



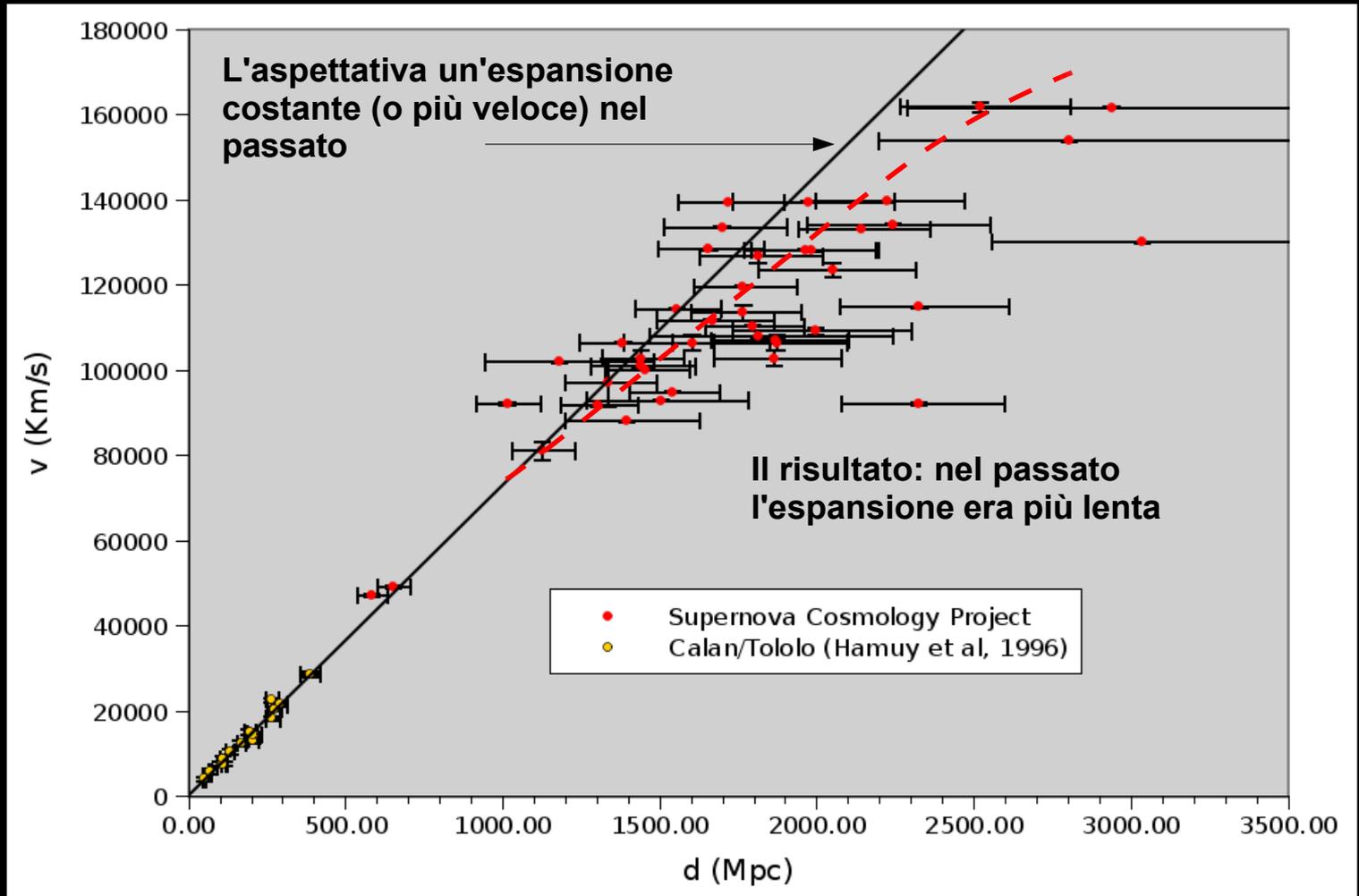
Anello di Einstein



Energia Oscura

HST, 1998: espansione accelerata universo

2011, Premio Nobel Fisica (Riess, Perlmutter, Schmidt)

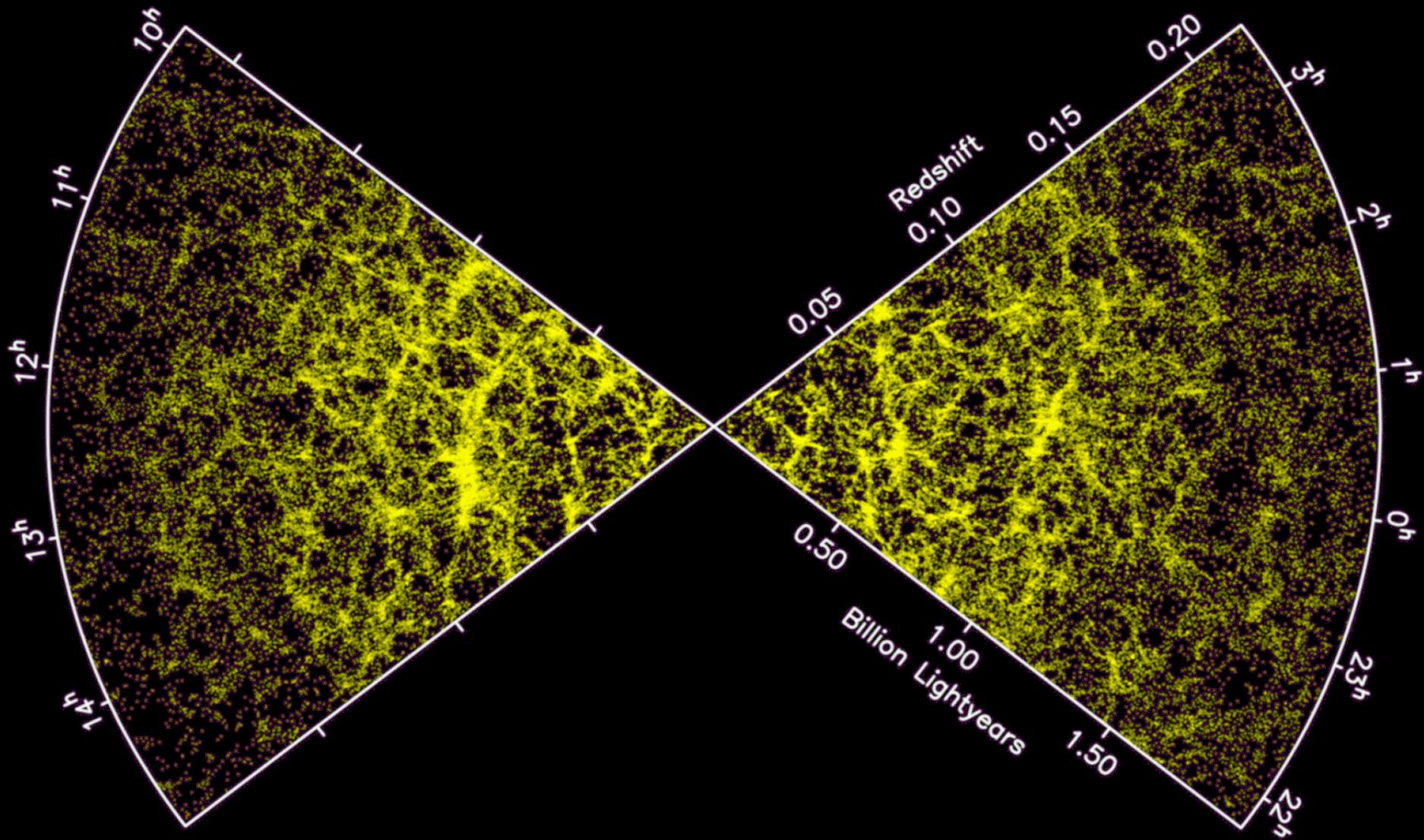


Energia Oscura

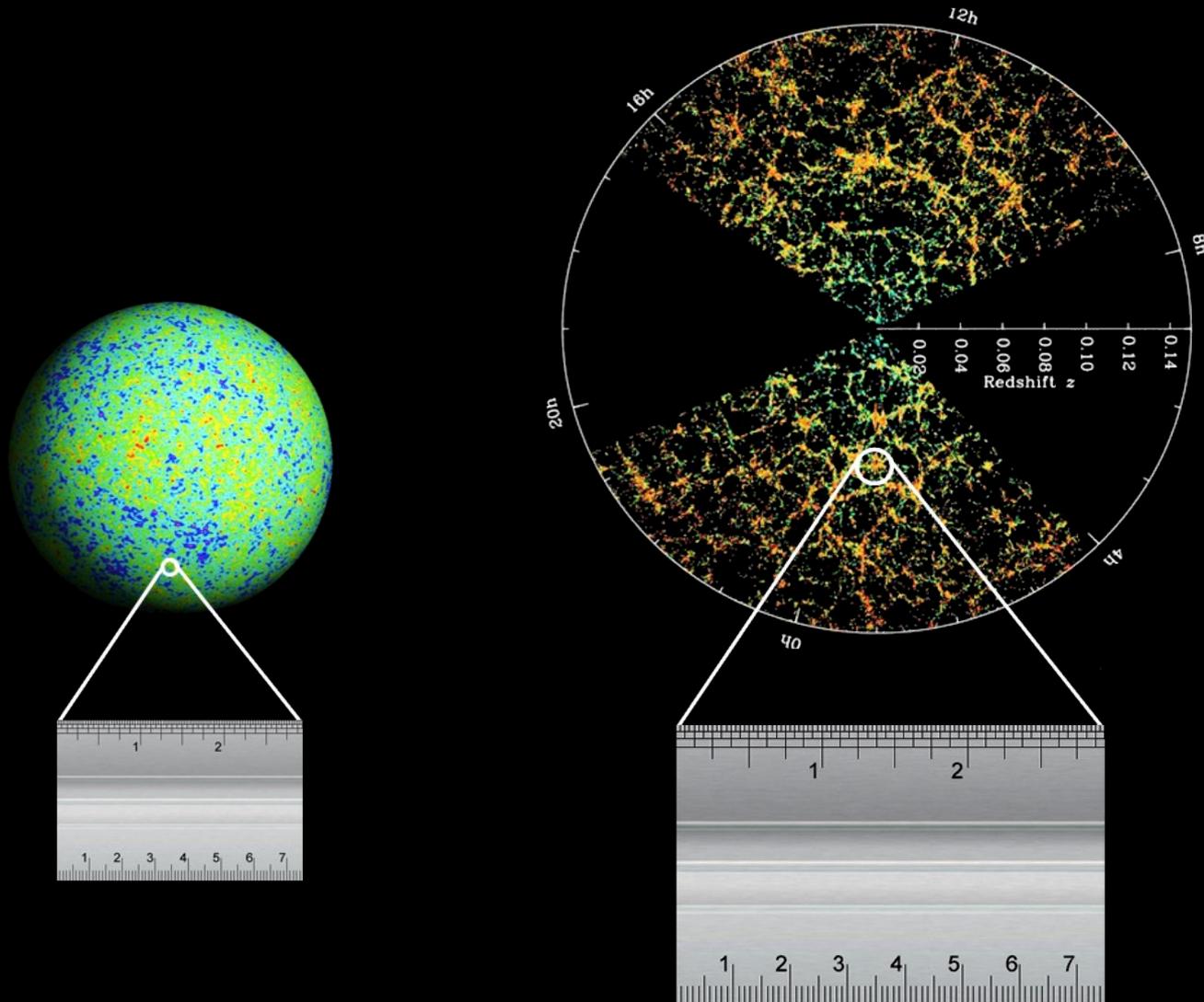
$$\frac{\left(\frac{d^2}{dt^2} a\right)}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

- Eq. Einstein con Λ descrivono universo con espansione accelerata
- Proprietà dello spazio? (energia di vuoto)
- Se calcolo energia vuoto che deriva dai campi della fisica delle particelle ottengo valori da 10^{60} a 10^{120} volte la Λ osservata
- Nuovo campo di natura sconosciuta?
- Modifiche delle teorie fondamentali?
- Planck, osservando la radiazione di fondo, ha permesso di ottenere le misure più precise fino a questo momento e di scremare tra le ipotesi, eliminando alcune tra le più esotiche.

Strutture a grande scala



Strutture a grande scala



Modello di Big Bang: limiti

Le osservazioni condotte sulla CMB, sulle galassie e sulle supernovae lontane mostrano un universo:

OMOGENEO e **ISOTROPO** (CMB)

PIATTO (CMB)

con **MATERIA OSCURA** (26,8 % del totale, galassie + CMB)

con **ENERGIA OSCURA** (68,3 % del totale, supernovae + CMB)

?? Il modello di Big Bang non spiega l' **OMOGENEITA'** dell'Universo.

In particolare, non spiega quali sono le condizioni iniziali che hanno portato alle fluttuazioni di densità nell'Universo primordiale.

Modello di Big Bang: limiti

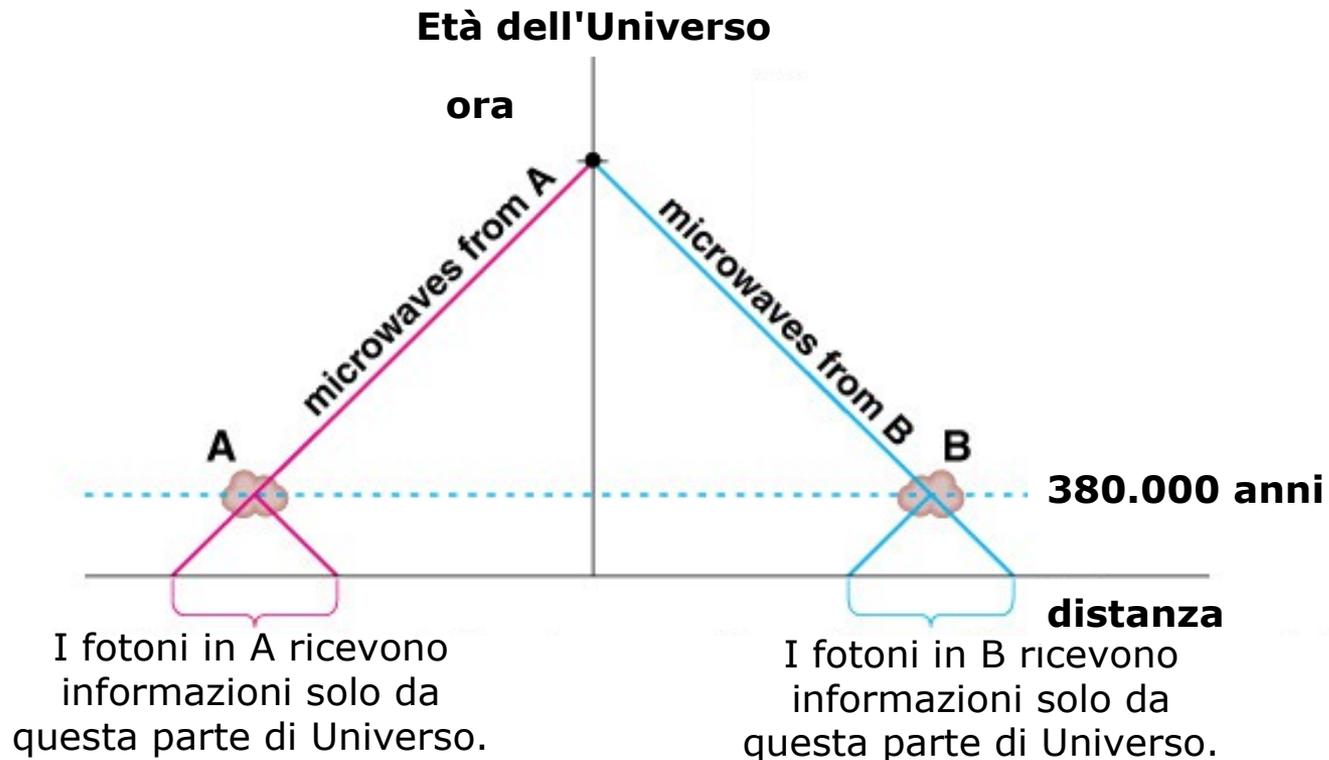
?? Il modello di Big Bang non spiega la **PIATTEZZA** dell'Universo.

In questo modello sono necessarie delle condizioni iniziali molto particolari sulla curvatura dell'Universo per ottenere la piattezza che Planck ha osservato.

Modello di Big Bang: limiti

PROBLEMA DELL'ORIZZONTE

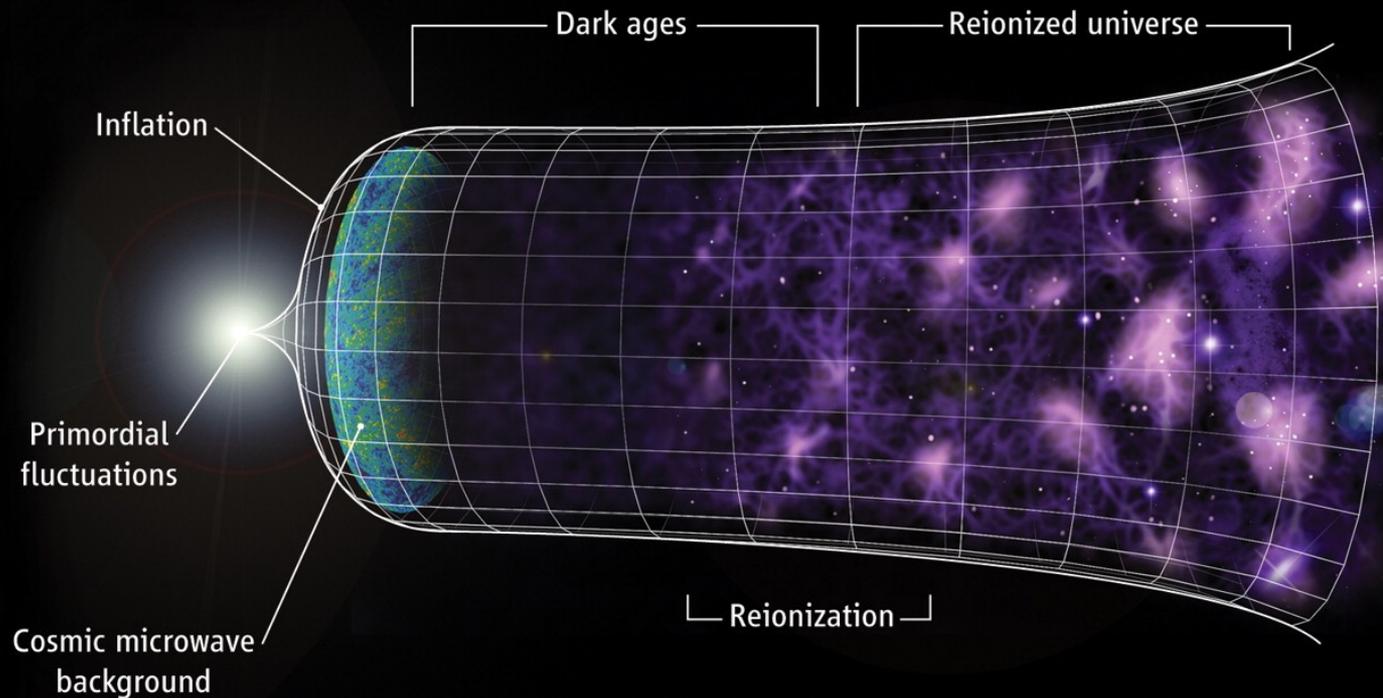
Se l'Universo si fosse espanso a ritmo costante, zone di cielo che adesso sono separate di 180° dovrebbero avere temperature molto diverse tra loro, perchè non sarebbero mai state in contatto.



Inflazione

1981

A. Guth, A. Linde propongono il **modello inflazionario** per spiegare le tre incongruenze del Modello di Big Bang.



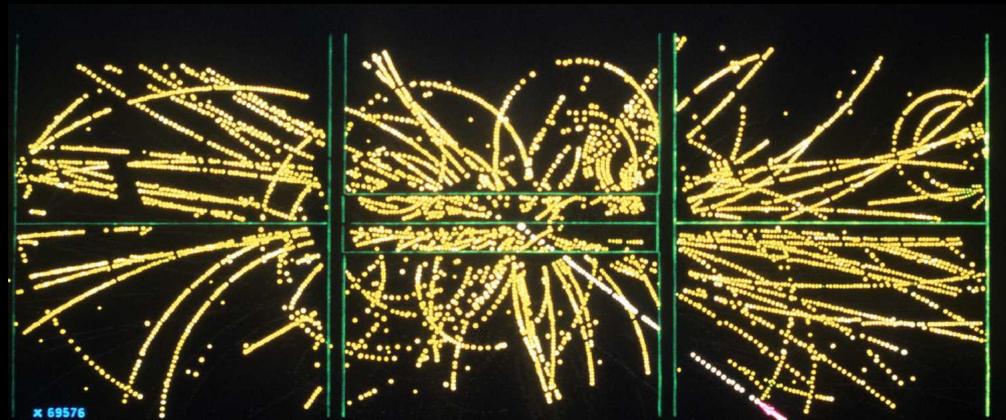
Inflazione

- **Transizione di fase**
- **L'Universo si è riempito di energia di vuoto**
- **Gravità diviene repulsiva**
- **L'Universo aumenta le sue dimensioni di un fattore $10^{50} - 10^{60}$.**



INFLATON??

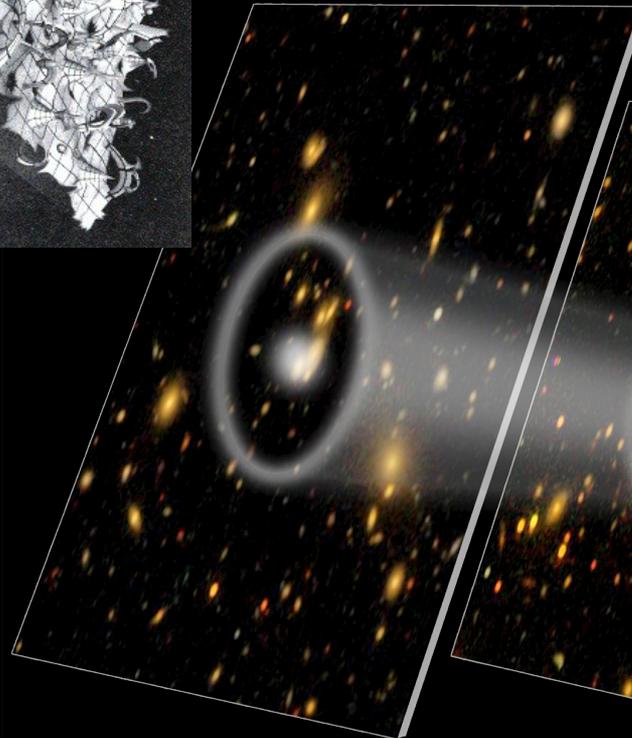
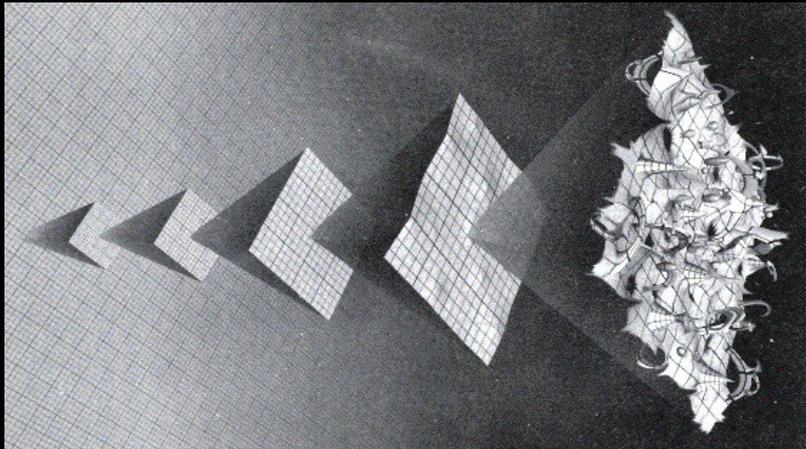
Bosone W e Z



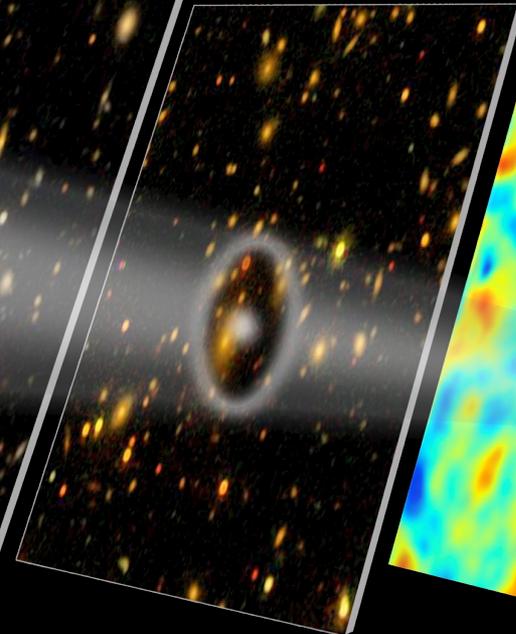
**Esperimento UA1, 1983, C. Rubbia
(Nobel per la Fisica 1984).**

Inflazione: disomogeneità

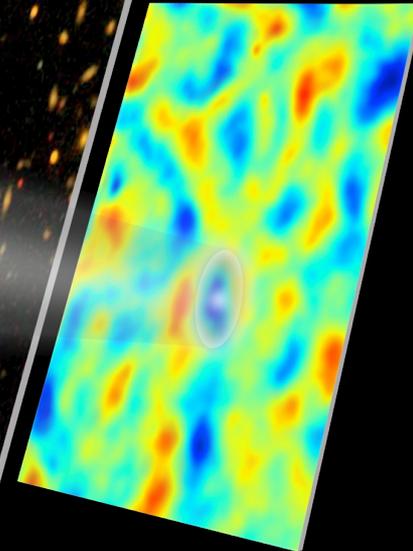
Le piccole disomogeneità che vediamo nella CMB si sarebbero originate da fluttuazioni quantistiche enfatizzate dall'Inflazione.



Galaxy map 3.8 billion years ago

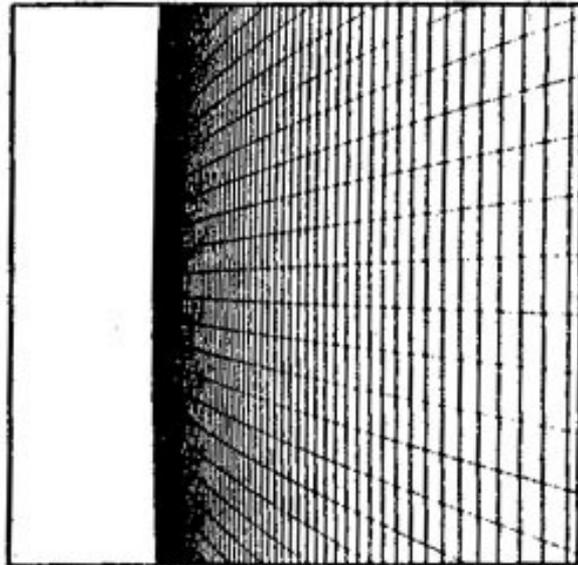
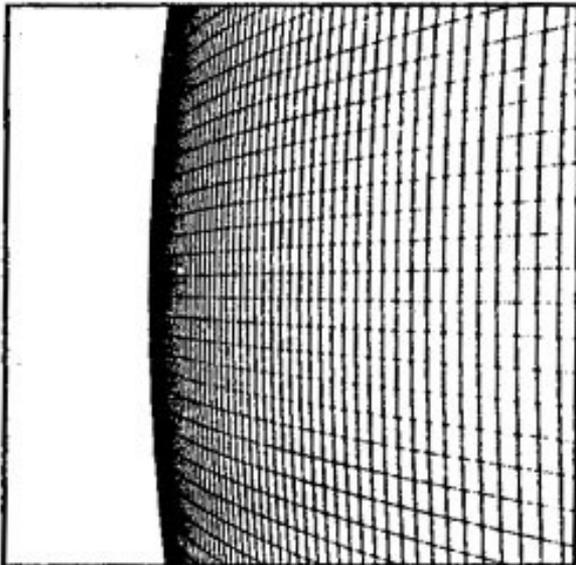
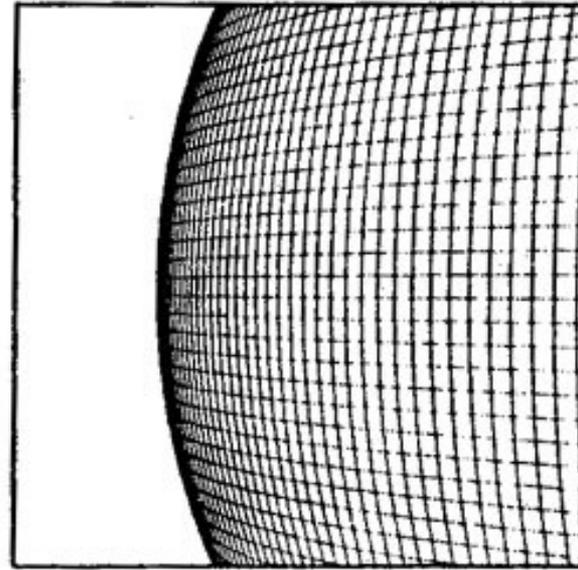
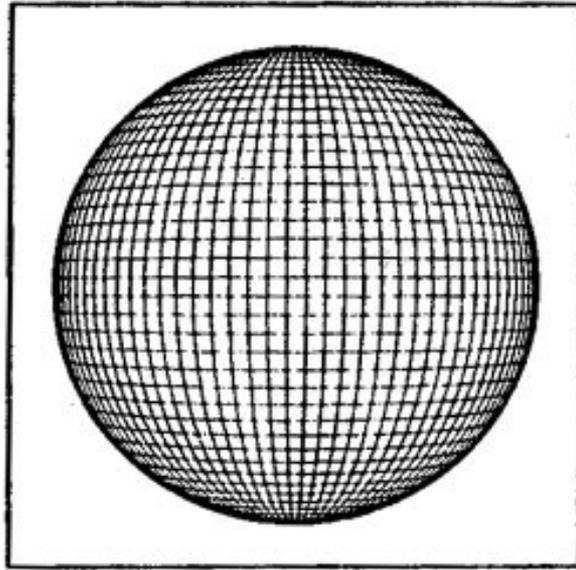


Galaxy map 5.5 billion years ago



CMB 13.7 billion years ago

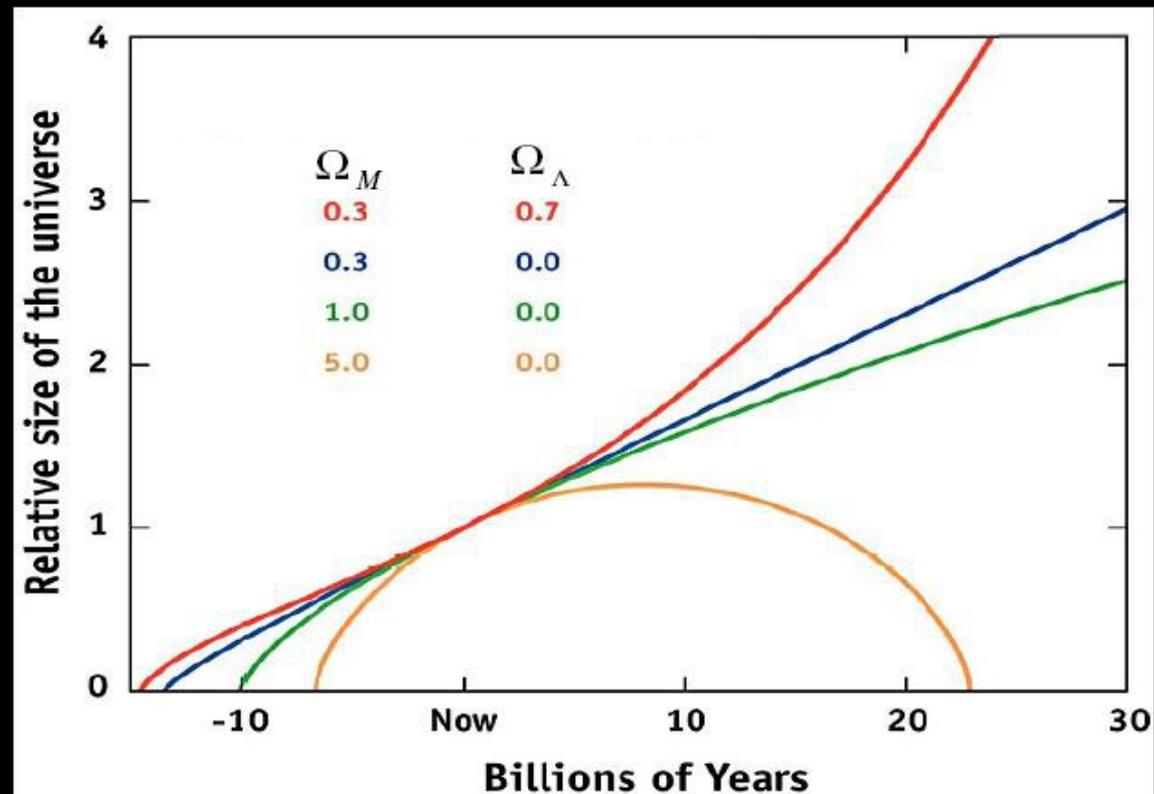
Inflazione: orizzonte



Concludendo: Λ CDM

Il modello cosmologico che include il Big Bang, la materia oscura, l'energia oscura e l'inflazione si chiama **Modello Cosmologico Standard** o Λ CDM.

$$\Omega = \Omega_b + \Omega_c + \Omega_\Lambda \approx 1$$



Riassumendo

- **Osservazioni cosmologiche:**

1. l'Universo è nato 13.8 miliardi di anni fa da un Big Bang
2. l'Universo è in espansione accelerata (**energia oscura**)
3. c'è una grande quantità di materia che non emette luce, non interagisce in modo apprezzabile con la materia barionica (**materia oscura**).

Tutto questo è descritto nel modello cosmologico di **Lambda Cold Dark Matter**

- **Modello standard della fisica delle particelle:**

è stato totalmente confermato (**bosone di Higgs**) e spiega perfettamente tutti i fenomeni relativi alla materia ordinaria, non prevede nessuna particella che possa dare luogo alla materia oscura.

- Ci sono molti modelli teorici che ipotizzano varie possibilità

Riassumendo

- L'unico modo per cui possiamo rilevare le grandi distribuzioni di materia oscura è tramite l'effetto gravitazionale sulla luce e sulla materia nell'Universo.
- Resta comunque la possibilità di un'osservazione diretta (se ci va bene!) cercando particelle oltre il modello standard della fisica.

GRAZIE!