

Universo in Fiore 2018

CORSO BASE

IL MODELLO COSMOLOGICO E L' ENIGMA DELL'ESPANSIONE

Sabrina De Grandi

INAF

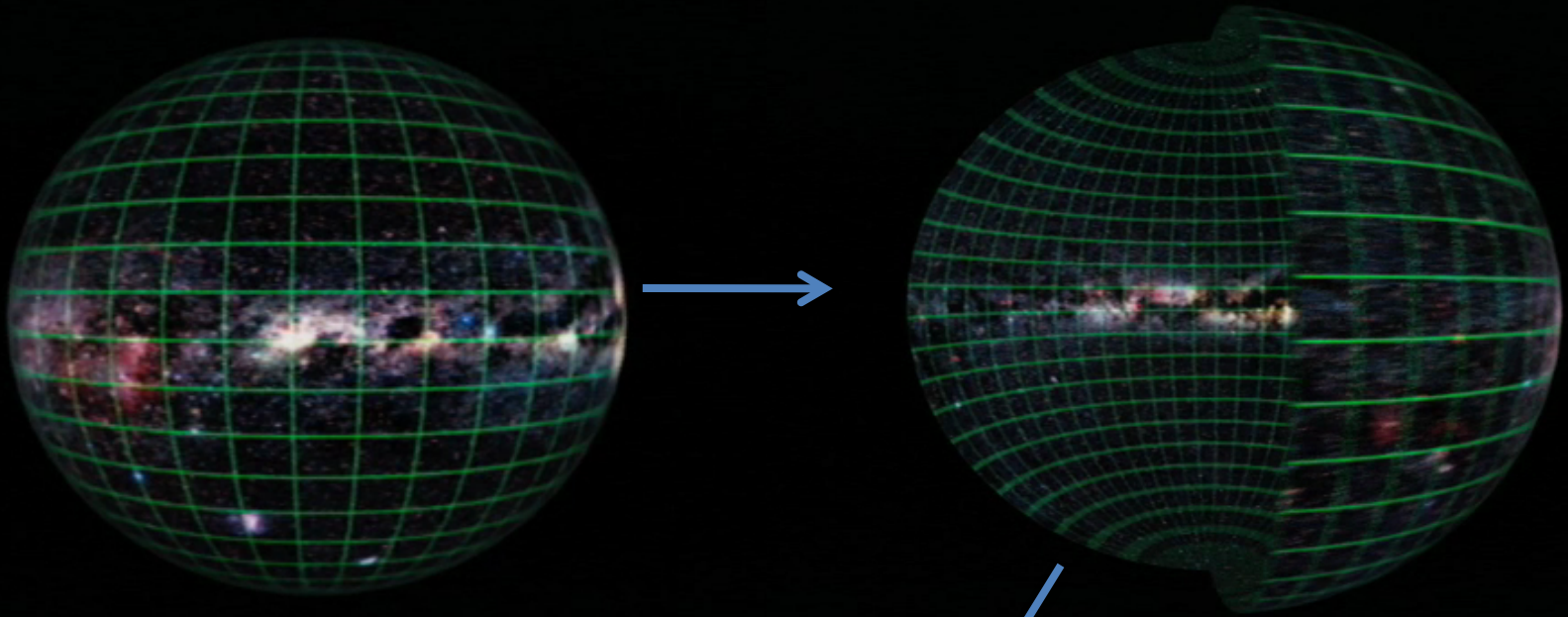


Osservatorio
Astronomico
di

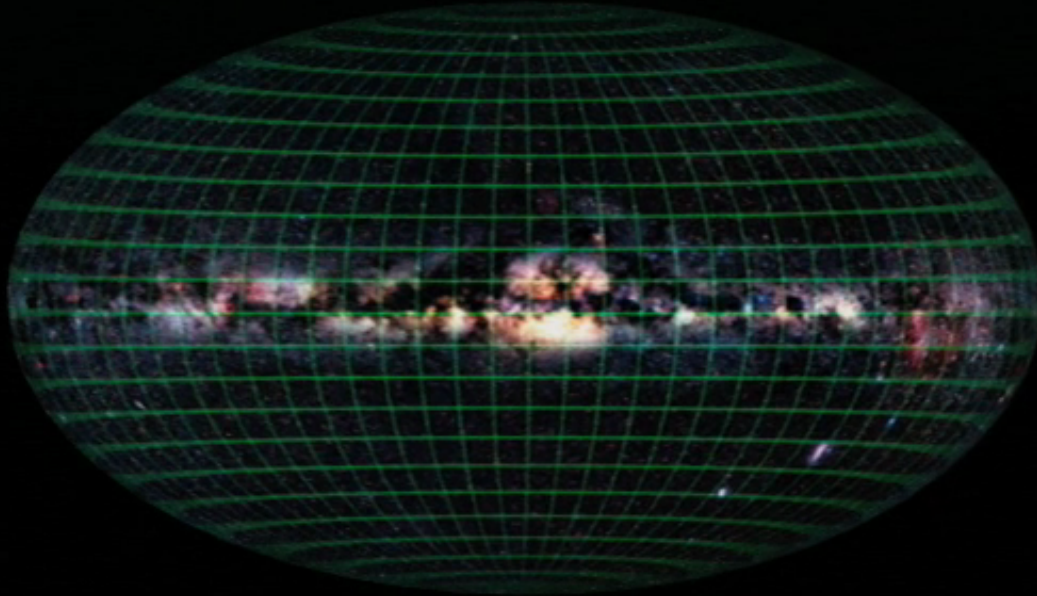
Brera

INAF

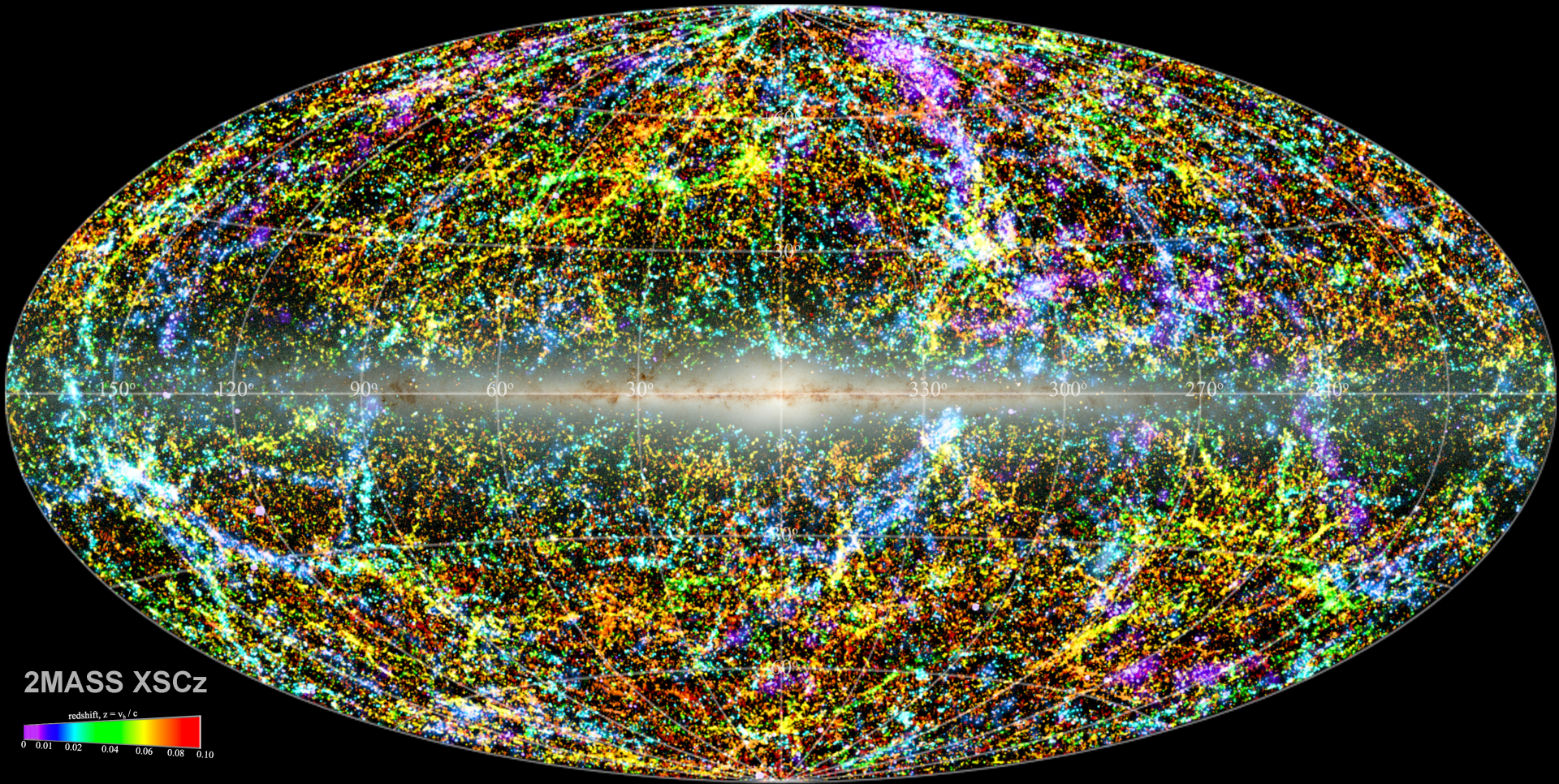
sabrina.degrandi@brera.inaf.it



“Srotoliamo” la Volta Celeste



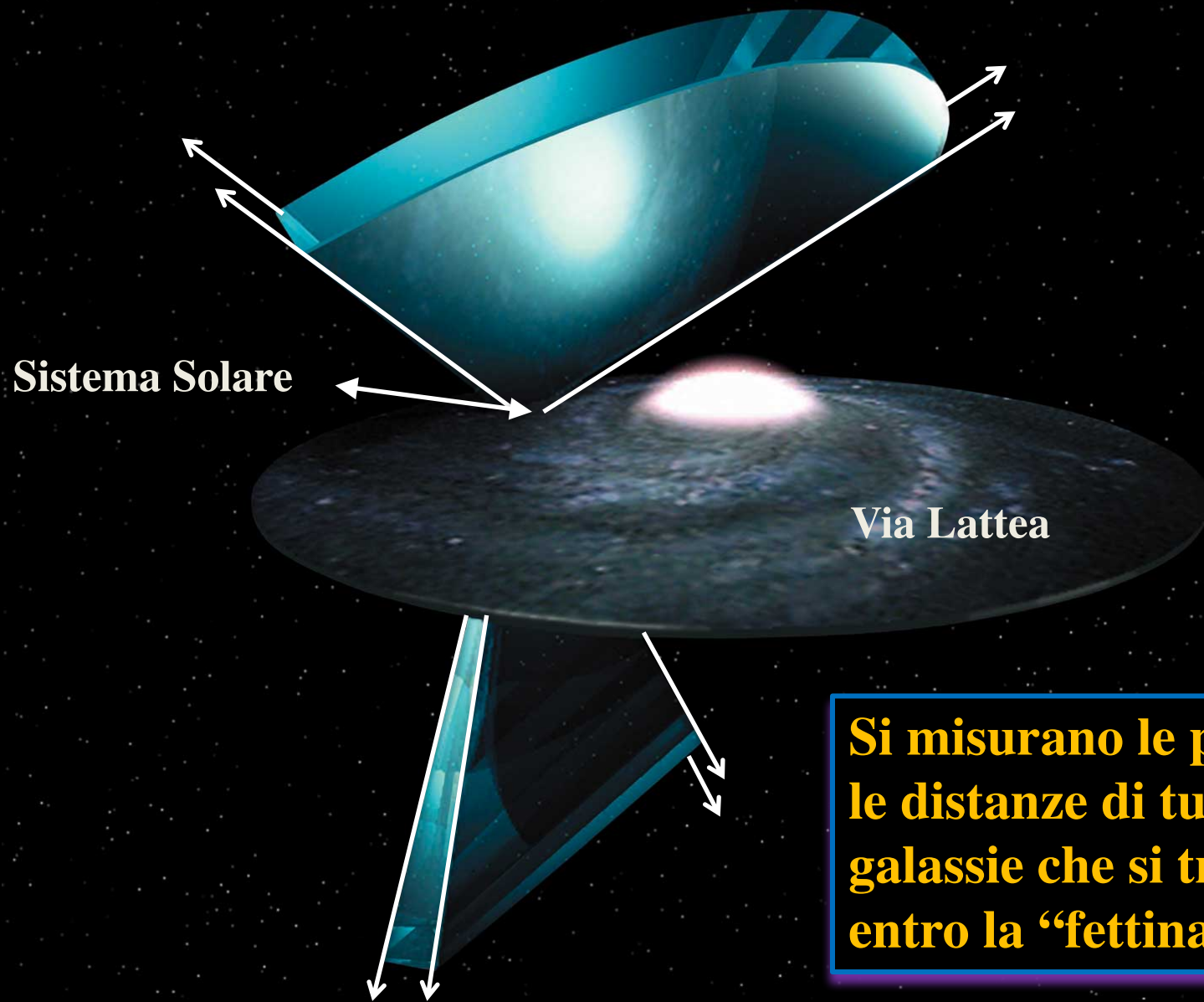
Universo Locale ($D < 200$ Mpc)



2MASS (2 Micron All Sky Survey):

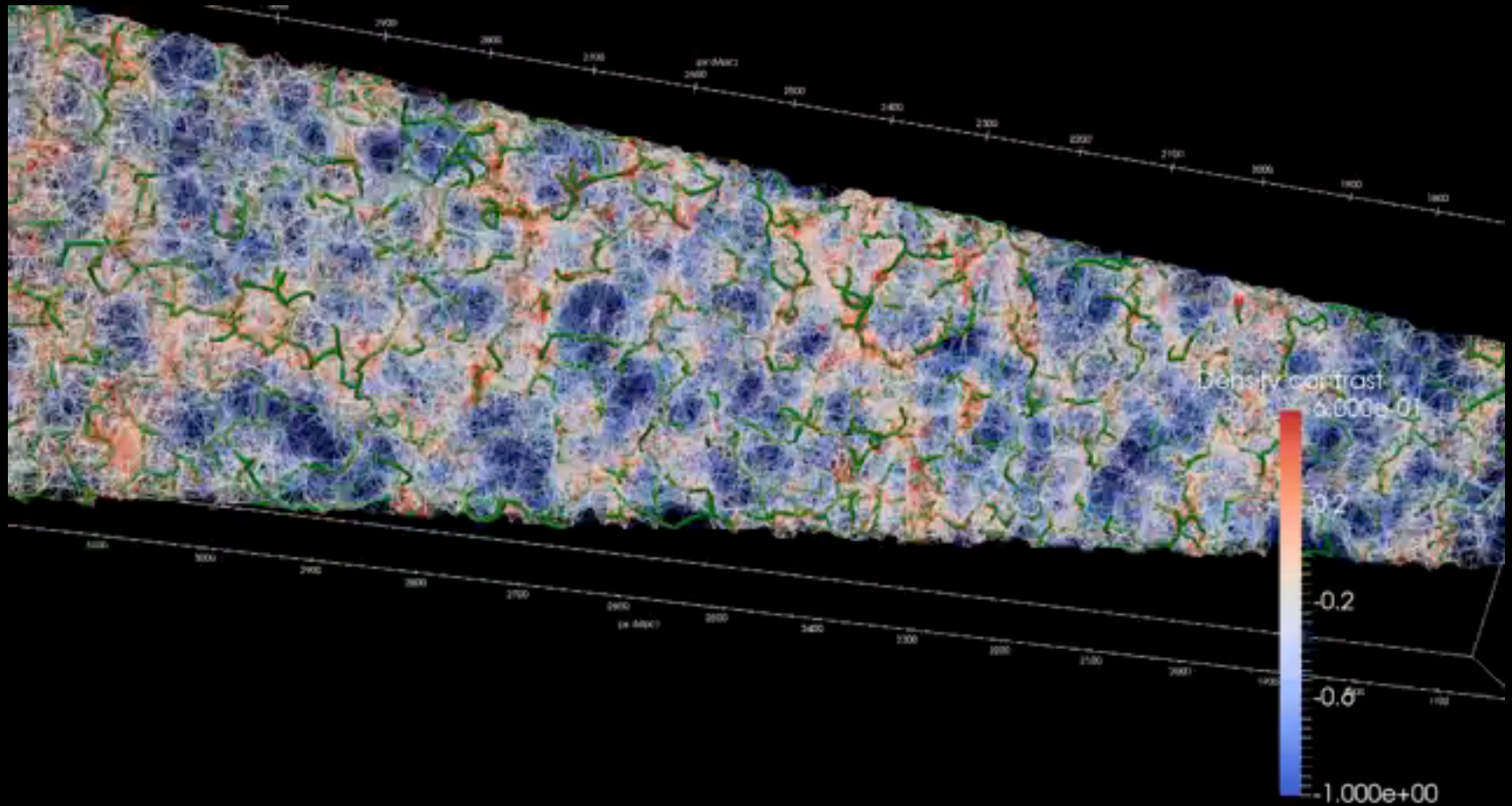
**osservate 1.6 milioni di galassie, rilevati centinaia (~500) di ammassi
(Mt Hopkins, Arizona, Cerro Tololo Cile, 1997-2001)**

Per spingersi un po' più lontano: campagne osservative in “fettine” di cielo



Si misurano le posizioni e
le distanze di tutte le
galassie che si trovano
entro la “fettina” di cielo

La “Fettina” di Universo del catalogo VIPERS



<http://vipers.inaf.it/>

VIMOS(@ESO/VLT) Public Extragalactic Redshift Survey
~90,000 galassie con distanza misurata fino a $z=1$

The background of the slide is a deep space image showing a vast field of galaxies. In the upper left, there is a prominent cluster of galaxies, including a bright, irregularly shaped galaxy. Other smaller, more distant galaxies are scattered across the dark, star-filled background. The overall color palette is dominated by deep blues and purples, with bright white and yellow points of light representing stars and distant galaxies.

**Qual'è l'origine di questa
Struttura su Grande Scala
che osserviamo?**

Il Modello Cosmologico Standard

Il Principio Cosmologico

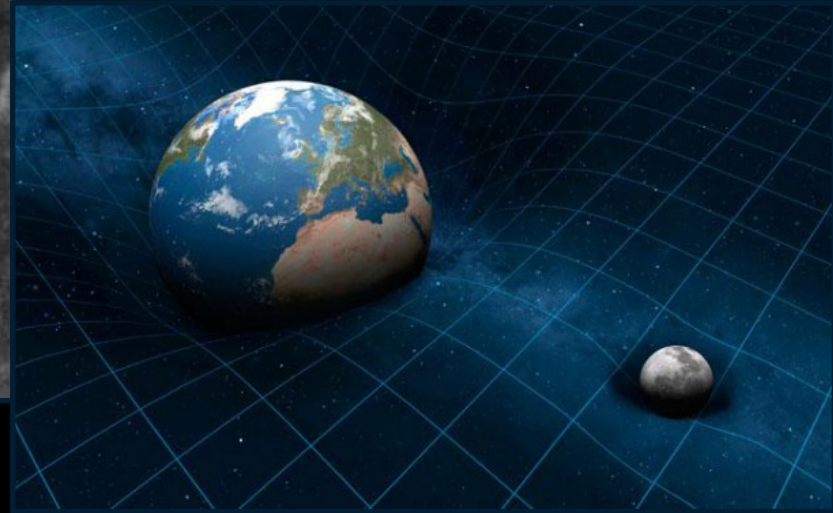
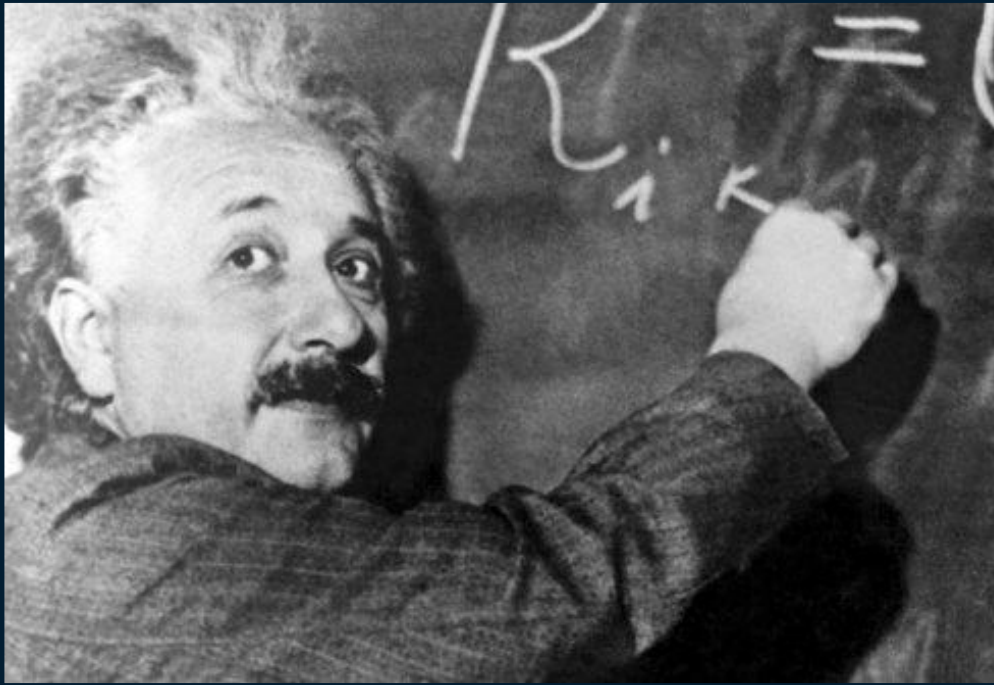
A Grandi Scale l'Universo è:



- 1) **ISOTROPO**: cioè lo stesso in ogni direzione
- 2) **OMOGENEO**: cioè non ha un punto privilegiato

Su queste scale l'unica forza ad avere importanza è la Forza Gravitazionale (Newton, Einstein...)

**1915: Einstein elabora e pubblica
la Teoria della Relativita' Generale,
cioe` la Teoria che spiega la Forza Gravitazionale**



**La Gravita' in RG e' una proprieta' (geometrica) dello Spazio-Tempo
Le eq. della RG descrivono come la massa deforma lo spazio-tempo**

Einstein apre la porta alla comprensione dell' Universo

**La Relatività Generale è alla base dei moderni
Modelli Cosmologici della Struttura a Grande Scala
dell'Universo e della sua evoluzione.**

Einstein (1917) nota due cose applicando
la sua teoria all'Universo intero
(Hp. Principio Cosmologico):

1. L'Universo “fa fatica” a stare fermo:
lasciato libero comincia a contrarsi sotto
l'effetto della propria gravita' (“evolve”).
Per ottenere un **Universo statico**
introduce nei conti una costante, **Λ** ,
che modifica le equazioni della R.G.
2. La sua “**geometria**” dipende dalla
quantita' di materia e energia che esso
contiene (Universo chiuso/aperto)

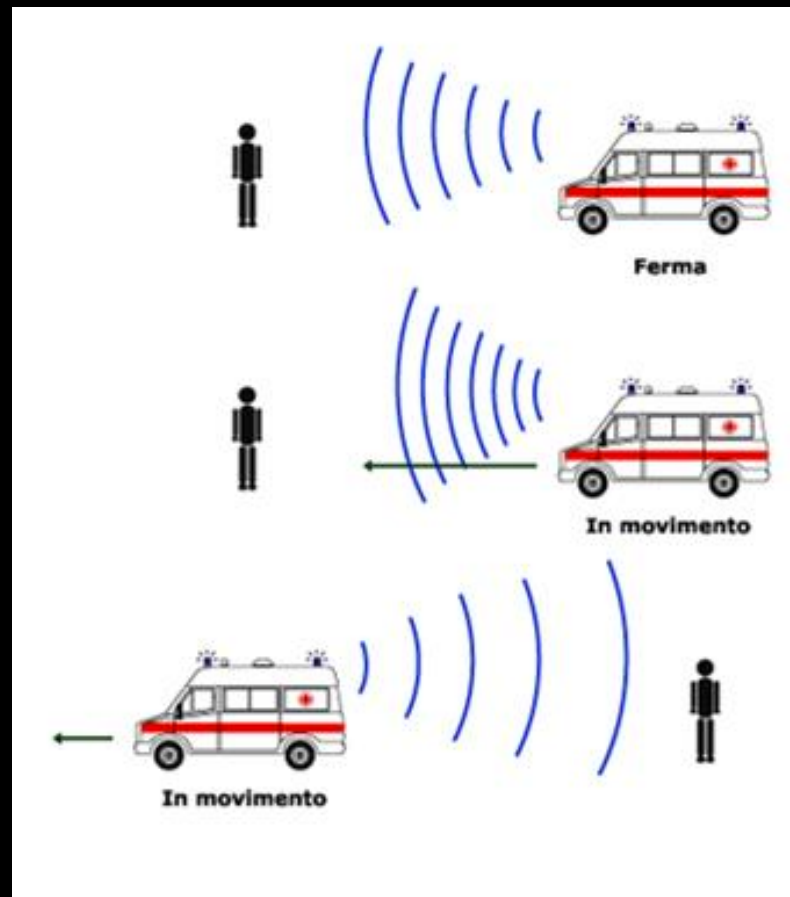


Nel frattempo.... E. Hubble (1929)



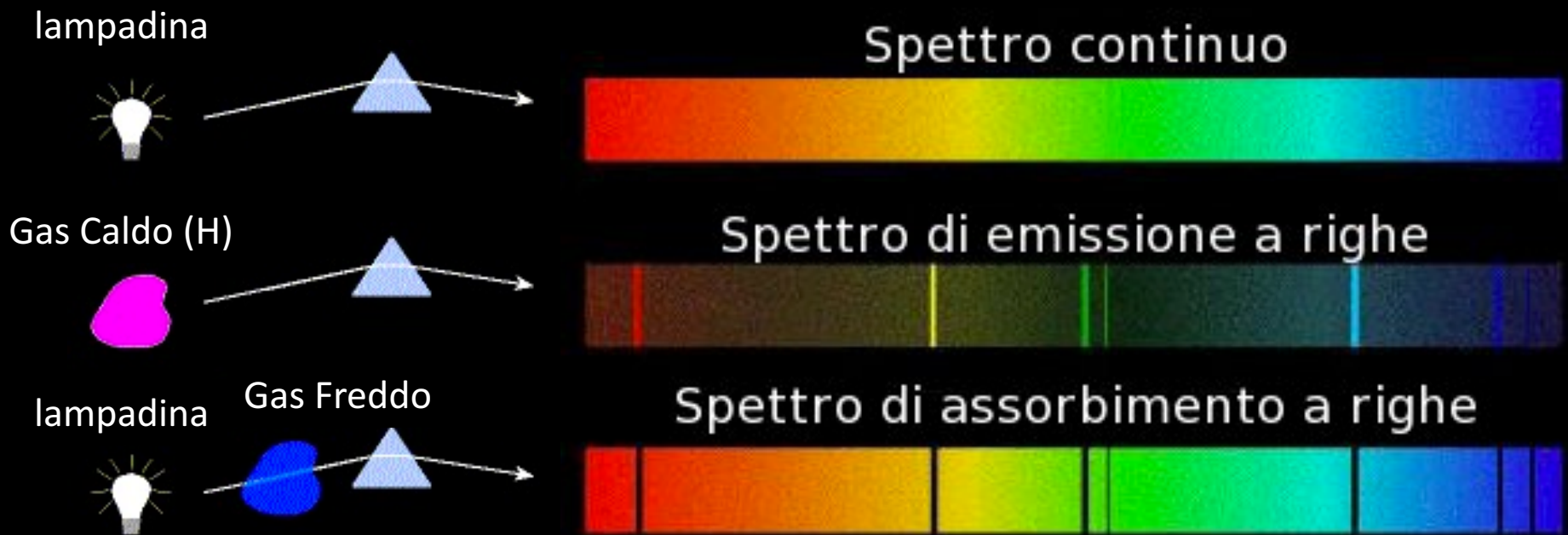
Nel frattempo.... E. Hubble (1929)

Misura della distanza: effetto Doppler

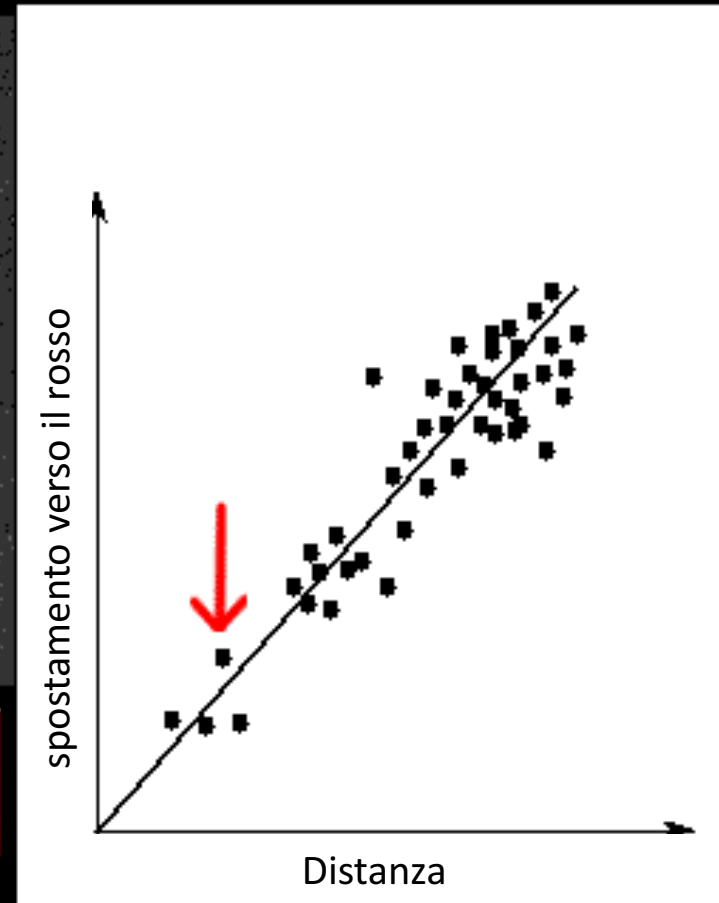
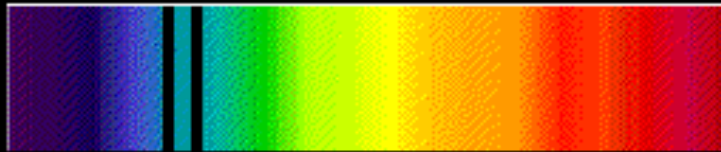


Nel frattempo.... E. Hubble (1929)

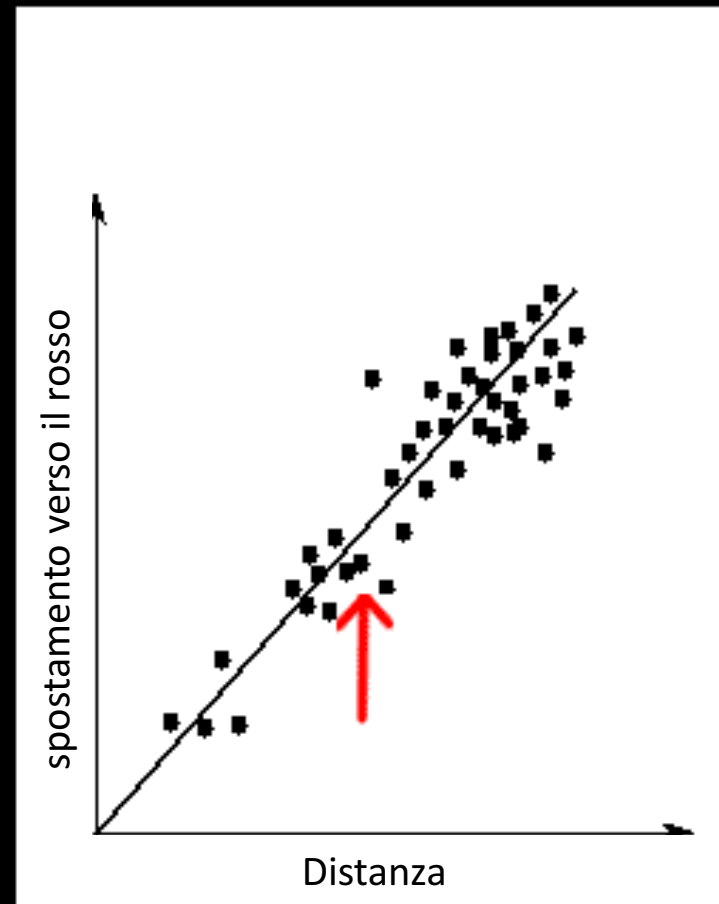
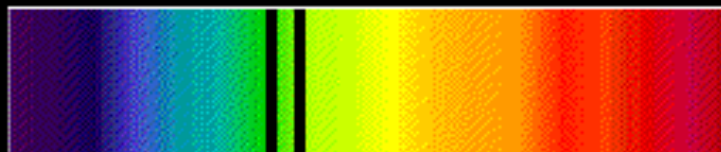
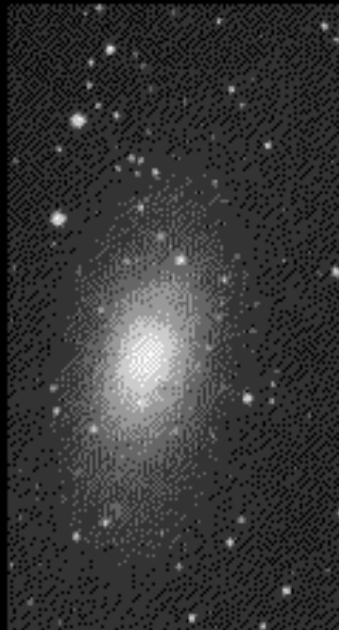
Misura della distanza: la luce e le righe



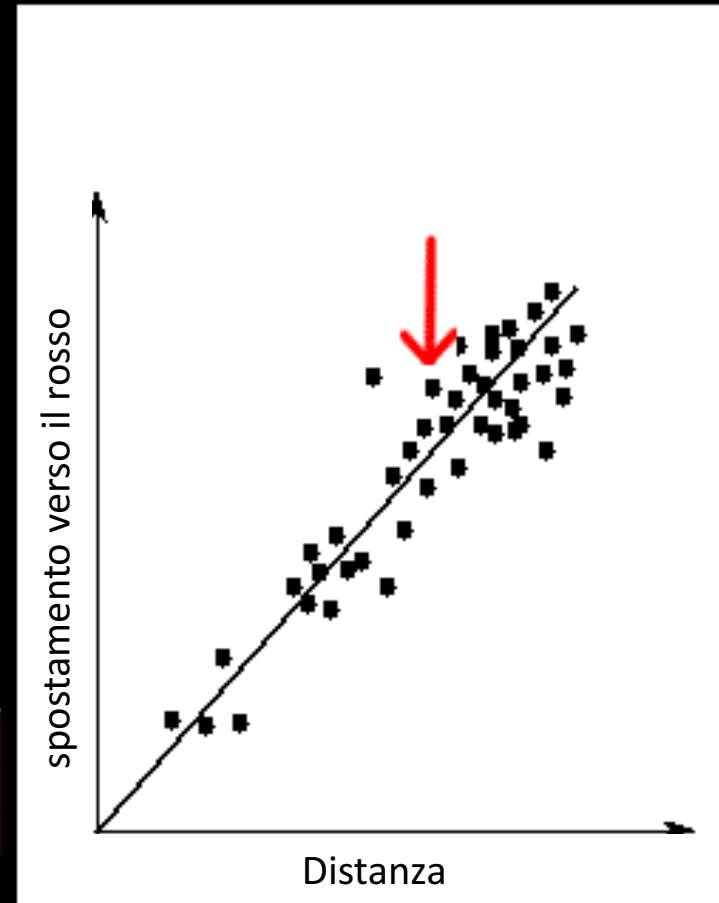
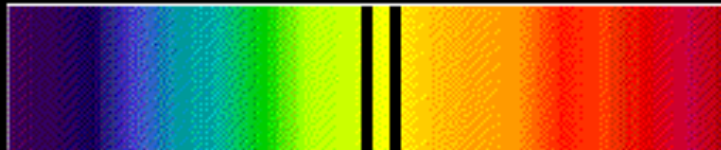
Nel frattempo.... E. Hubble (1929)



Nel frattempo.... E. Hubble (1929)



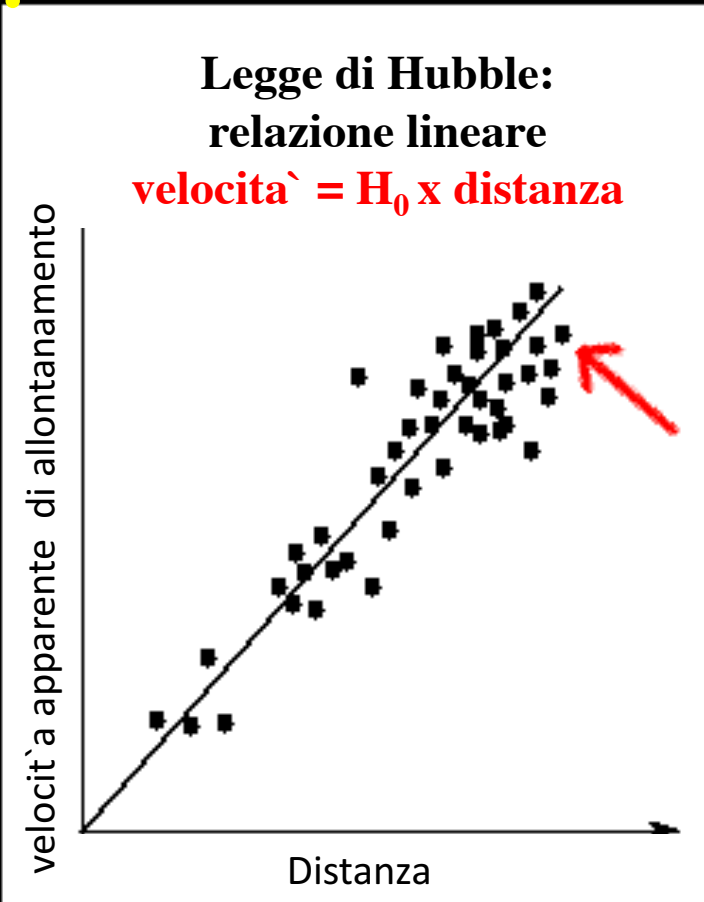
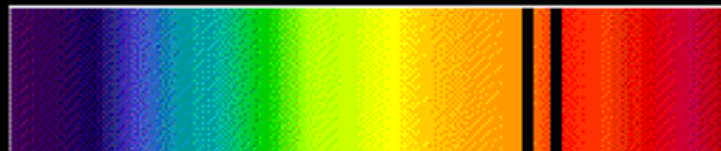
Nel frattempo.... E. Hubble (1929)



Nel frattempo.... E. Hubble (1929)

Le galassie si allontanano le une dalle altre

L'Universo si sta espandendo!

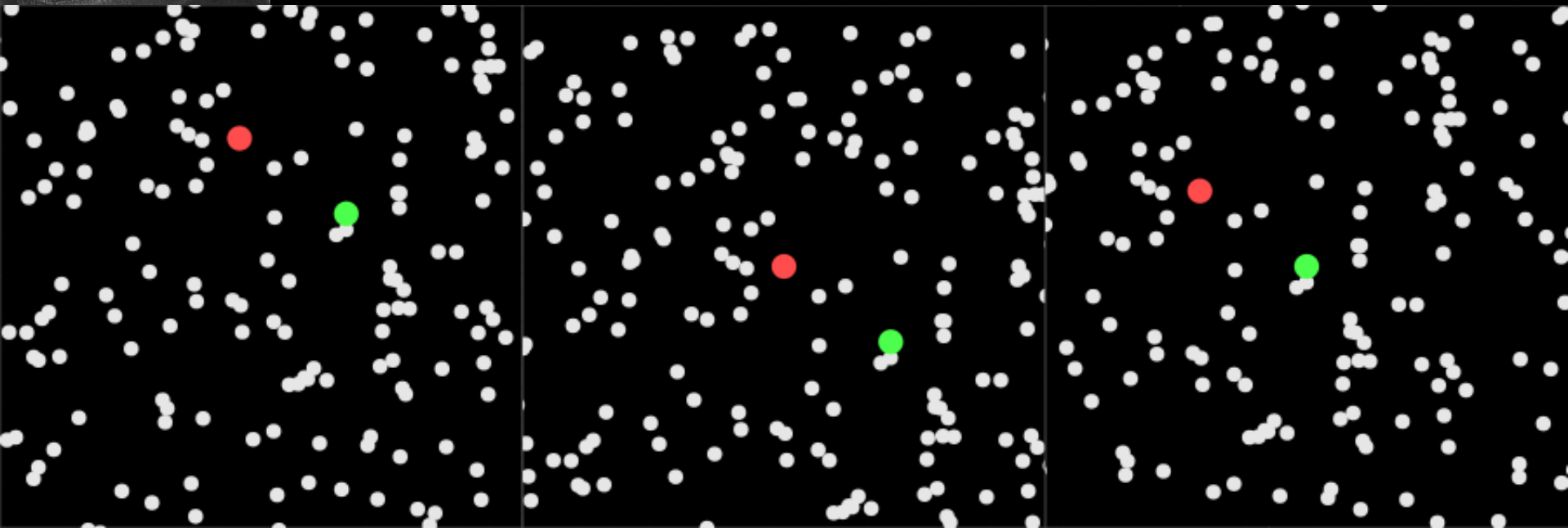


**Effetto Doppler della luce:
In tutte le Galassie le Righe si
spostano verso il Rosso**



$$V = H_0 D$$

L'Universo si espande





$$V = H_0 D$$

A che velocità si espande?



$$H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

una galassia distante 3 milioni di a.l. si allontana a 70 km/s, una galassia a 6 milioni di a.l. si allontana a 140 km/s, e così via: è una relazione “lineare”

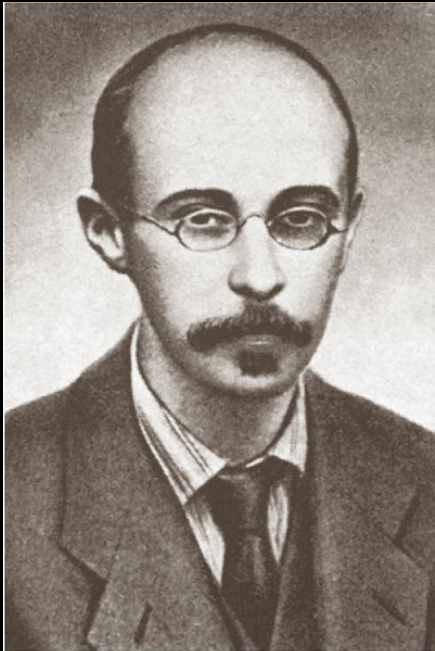
Quindi l'Universo non e' statico, proprio come suggeriva la Relativita'

- Se l'Universo si espande, allora un tempo era più **compresso**;
- Se era più compresso, era anche più **caldo, più energetico**
- La materia era in uno stato **diverso**



Teoria del BIG BANG

Modelli di Friedmann-Lemaitre-Walker:



Alexander Friedmann



Georges Lemaitre



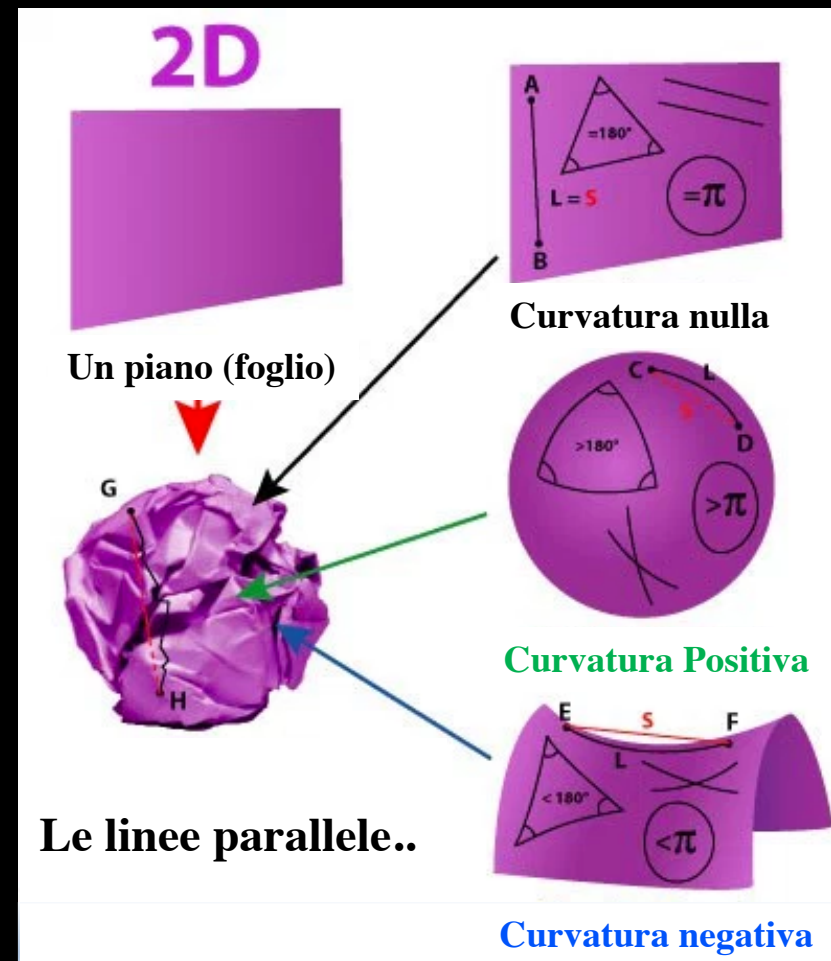
Arthur Walker

descrivono l'espansione dell'Universo a partire da un momento iniziale, “atomo primordiale” (Lemaitre) o **BIG BANG**, a seconda della **densità totale di materia**

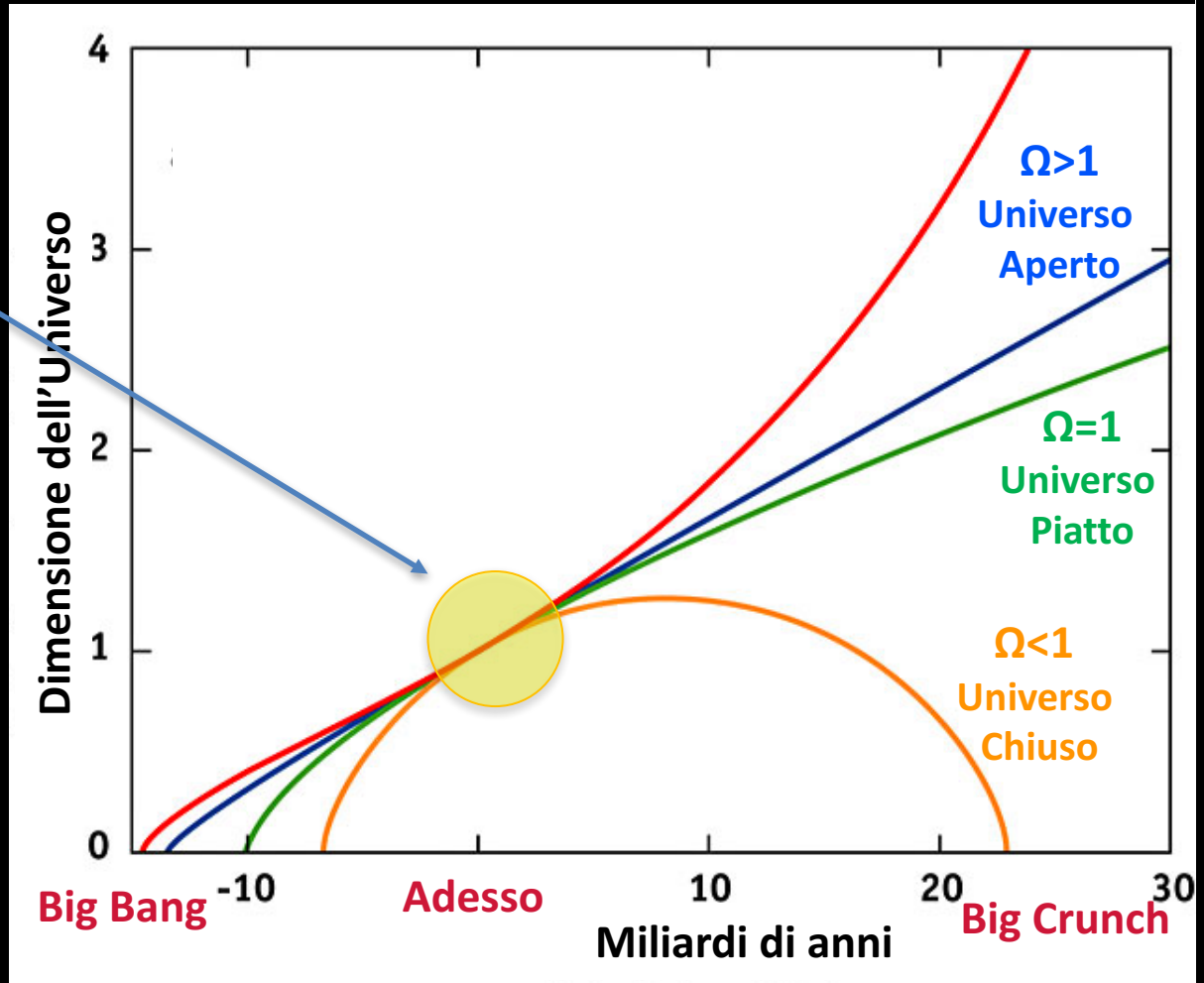
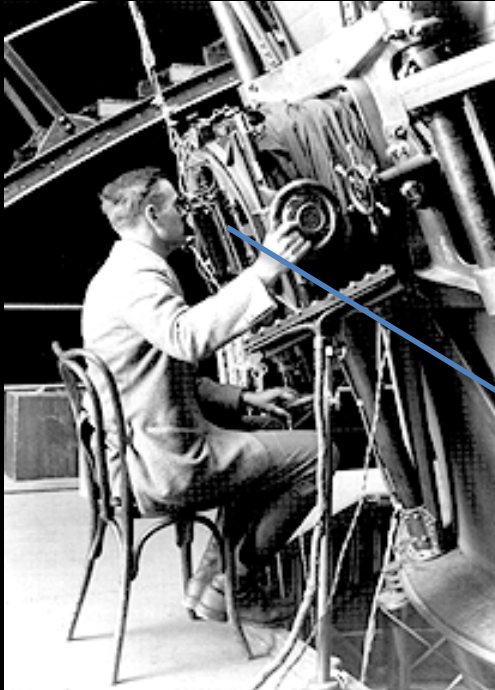
Qual'è la Geometria dell' Universo?

Ω = densità totale della materia / densità critica

- $\Omega > 1$ (alta densità); la geometria dello spazio è **CHIUSA**: l'universo è sferico e con il tempo ricollassa su sé stesso.
- $\Omega < 1$ (bassa densità); la geometria dello spazio è **APERTA**: l'universo si espande in eterno con una legge di tipo iperbolico.
- $\Omega = 1$; la geometria dello spazio è **PIATTA**: l'universo è critico e l'espansione è ancora infinita.

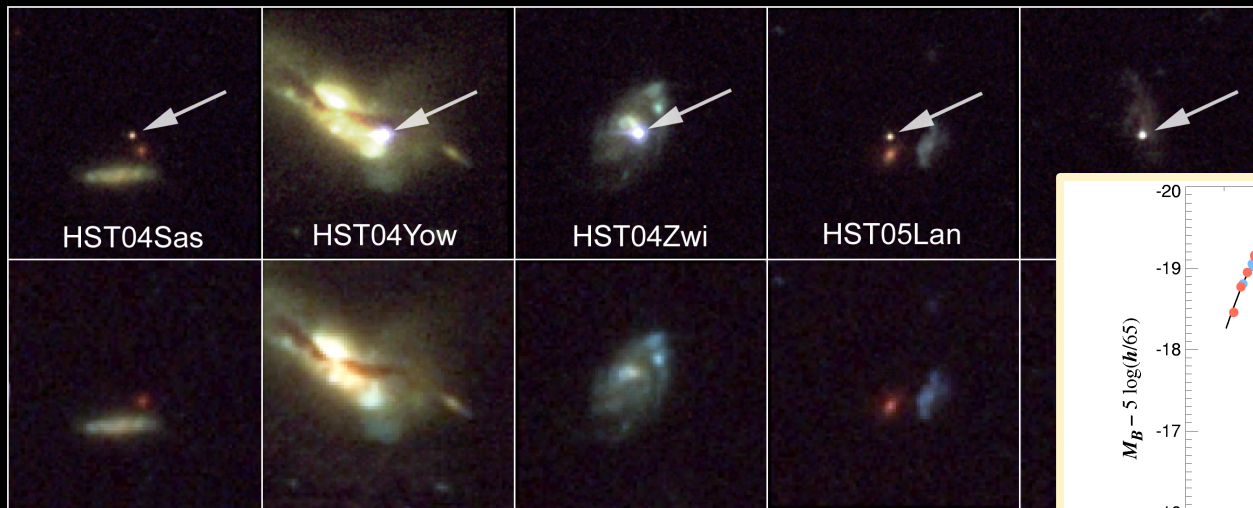


Qual'è la Geometria dell' Universo?



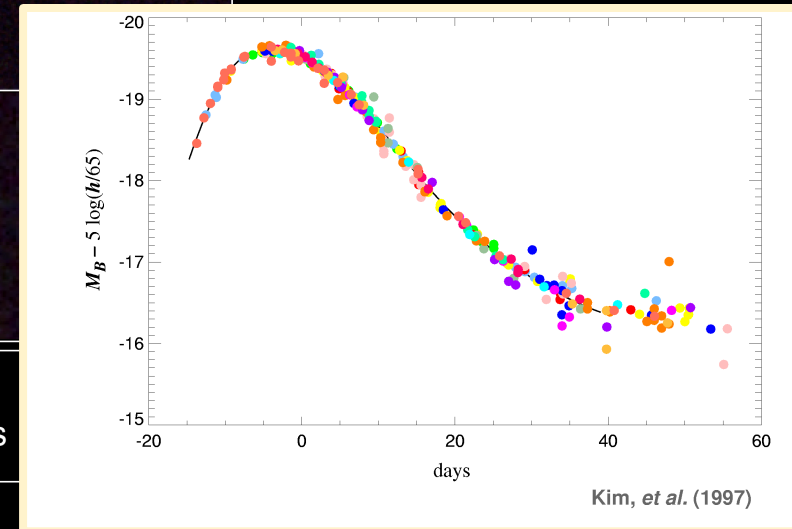
1997: una svolta inaspettata

Misure della Legge di Hubble fatta con SN di tipo Ia (ottime candele standard, perché sono così luminose da essere visibili a distanze cosmologiche) indicano che sono più lontane di quanto ci si aspetterebbe nel caso di un Universo aperto.



Host Galaxies of Distant Supernovae
Hubble Space Telescope ■ Advanced Camera for Surveys

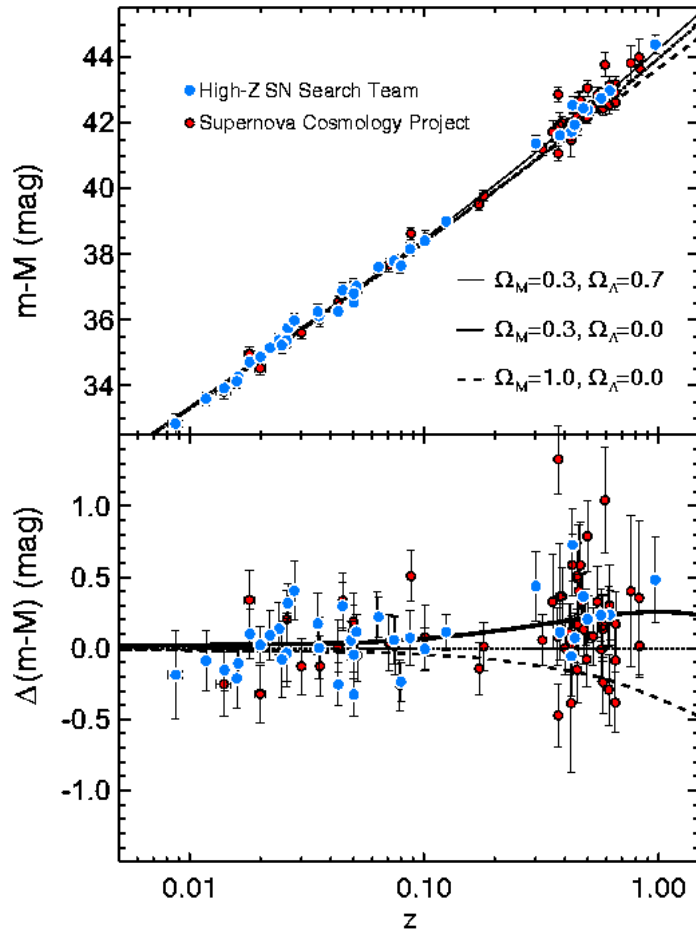
NASA, ESA, and A. Riess (STScI)



Kim, et al. (1997)

Questo può significare solo una cosa:
l'Universo sta accelerando!

L'accelerazione e` cominciata circa 7 miliardi di anni fa !!



Premio NOBEL per la Fisica 2011
Perlmutter, Schmidt, Riess



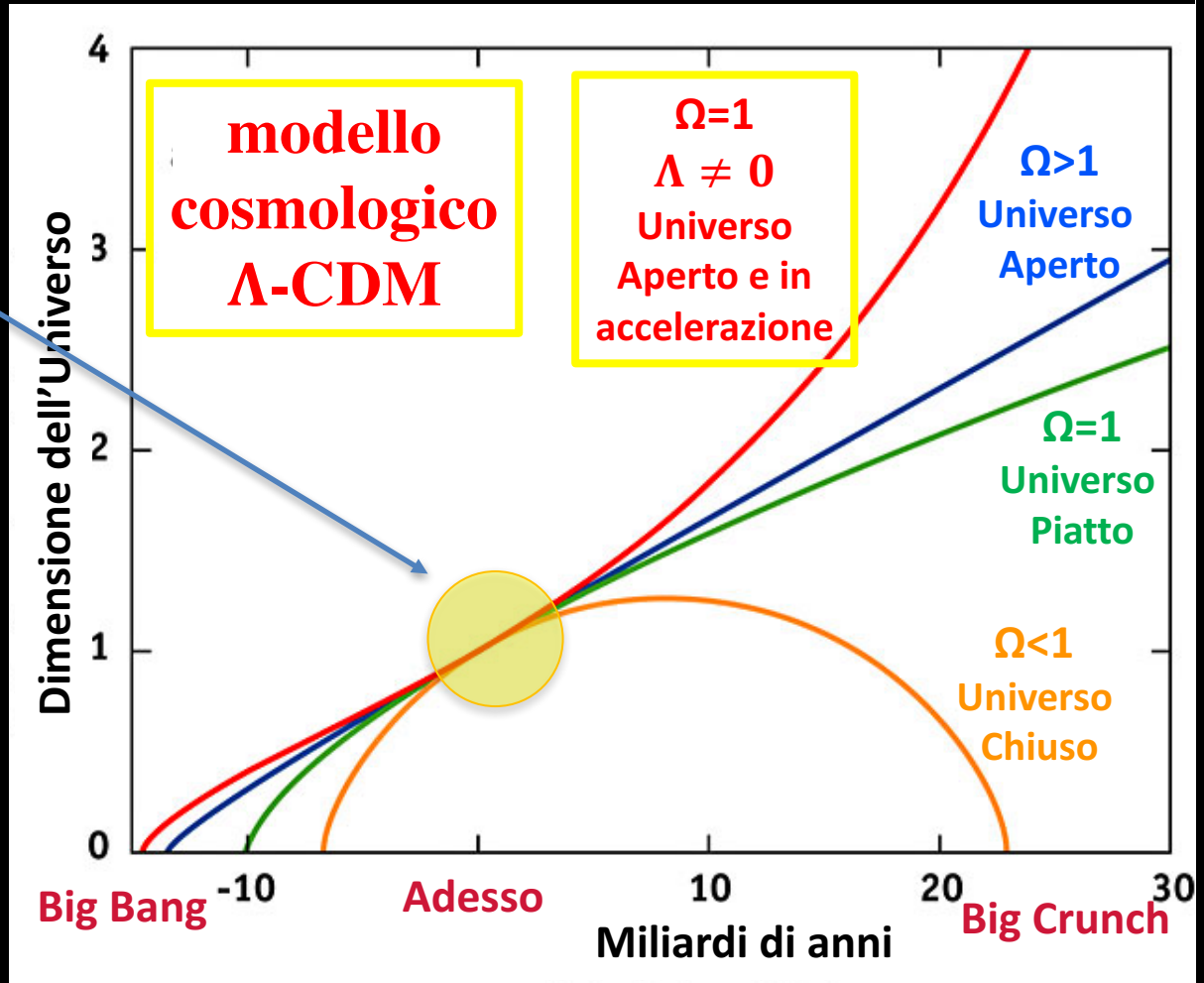
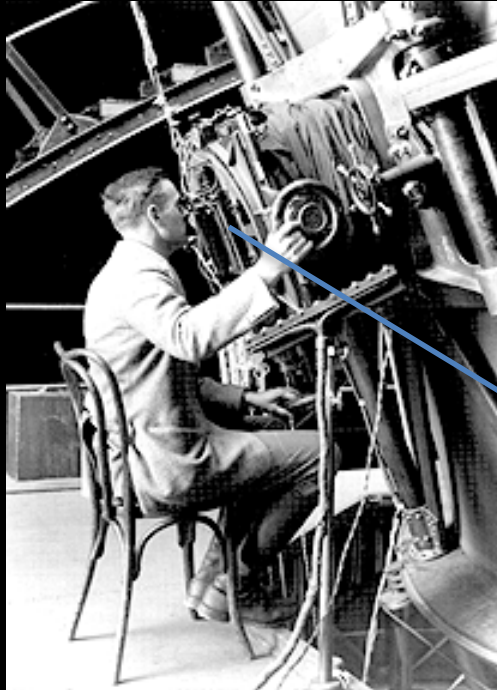
... entra in gioco
la
DARK ENERGY

A close-up, front-facing image of Darth Vader's helmet and upper torso. The helmet is black with a silver grille and a central silver stripe. The background is dark and out of focus.

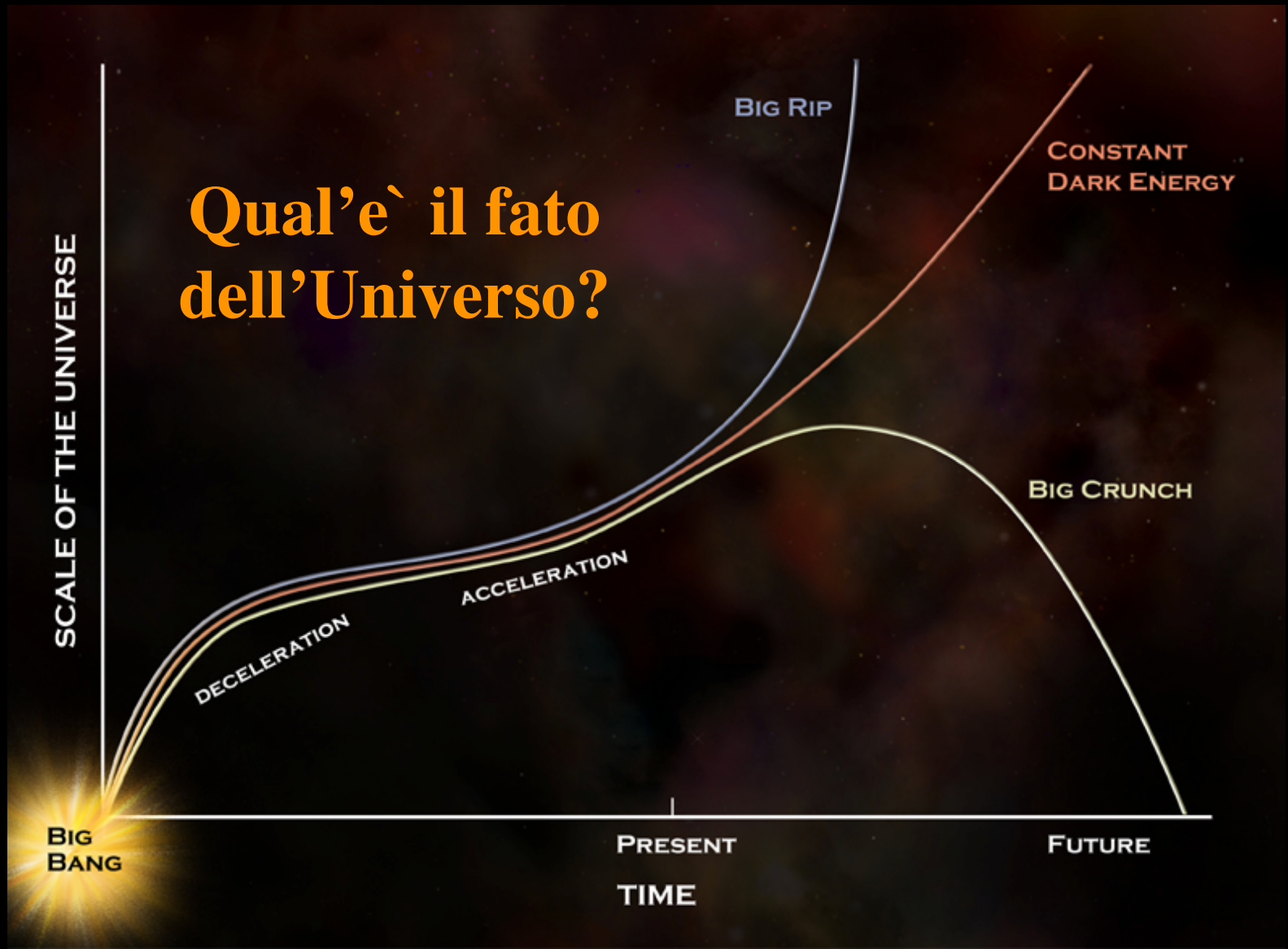
Una forma invisibile ed ipotetica di
“energia” o “antigravità”
che permea quello che pensavamo fosse vuoto
e che accelera l’espansione dell’ Universo.

Una tale forma di energia è per ora “oscura”
alla scienza (nelle eq. dipende da Λ).

Qual'è la Geometria dell' Universo?



L'Universo in espansione accelerata: l'era dell' Energia Oscura



L'Universo in espansione accelerata: l'era dell' Energia Oscura

**Qual'è il fato
dell'Universo?**

SCALE OF THE UNIVERSE

BIG
BANG

DECELERATION

ACCELERATION

PRESENT

FUTURE

TIME

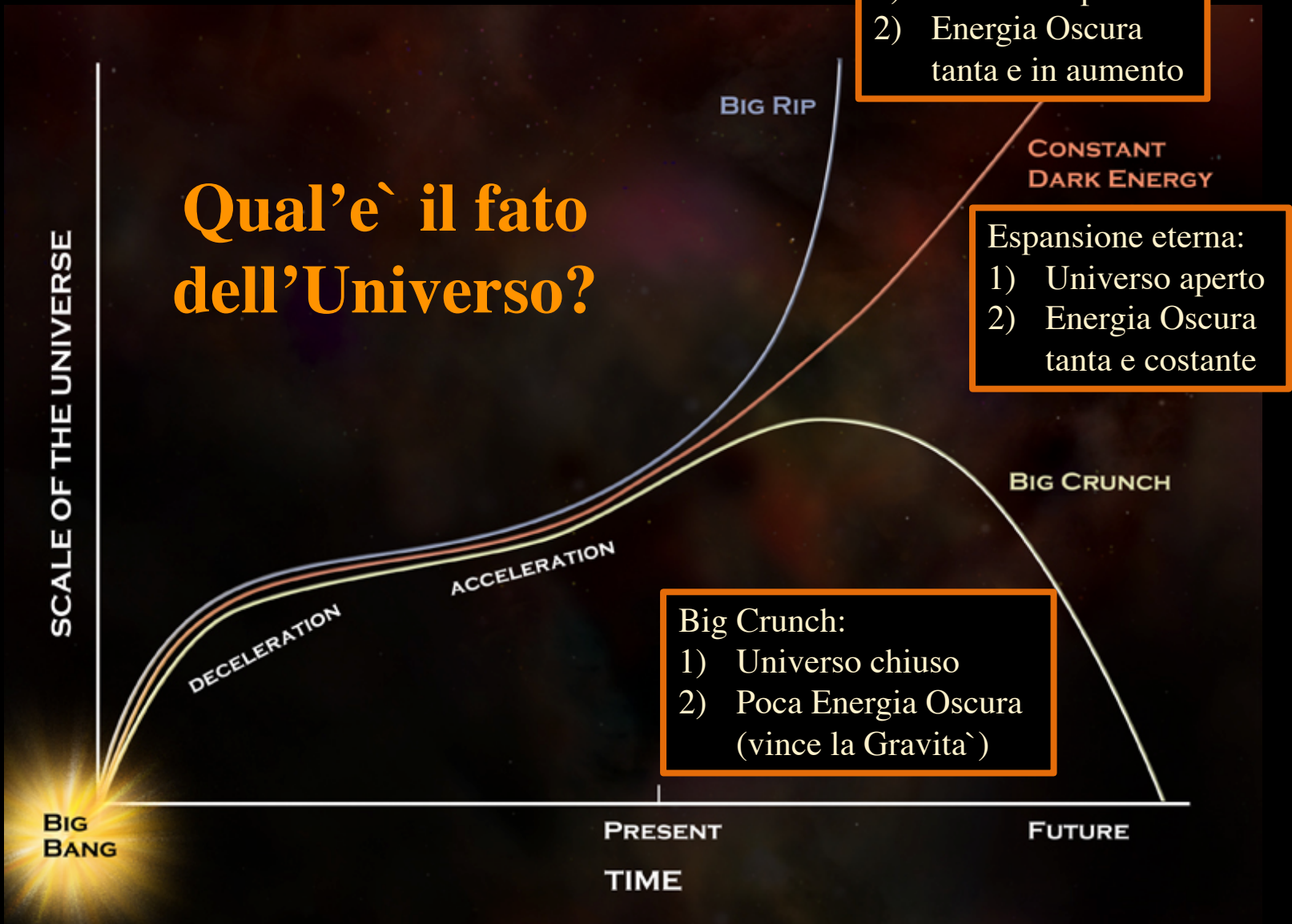
Nessuno lo sa!

Ma esistono tante Ipotesi.

Per affermarlo con certezza servono ancora progressi nella fisica fondamentale, però il fato dipenderà essenzialmente da:

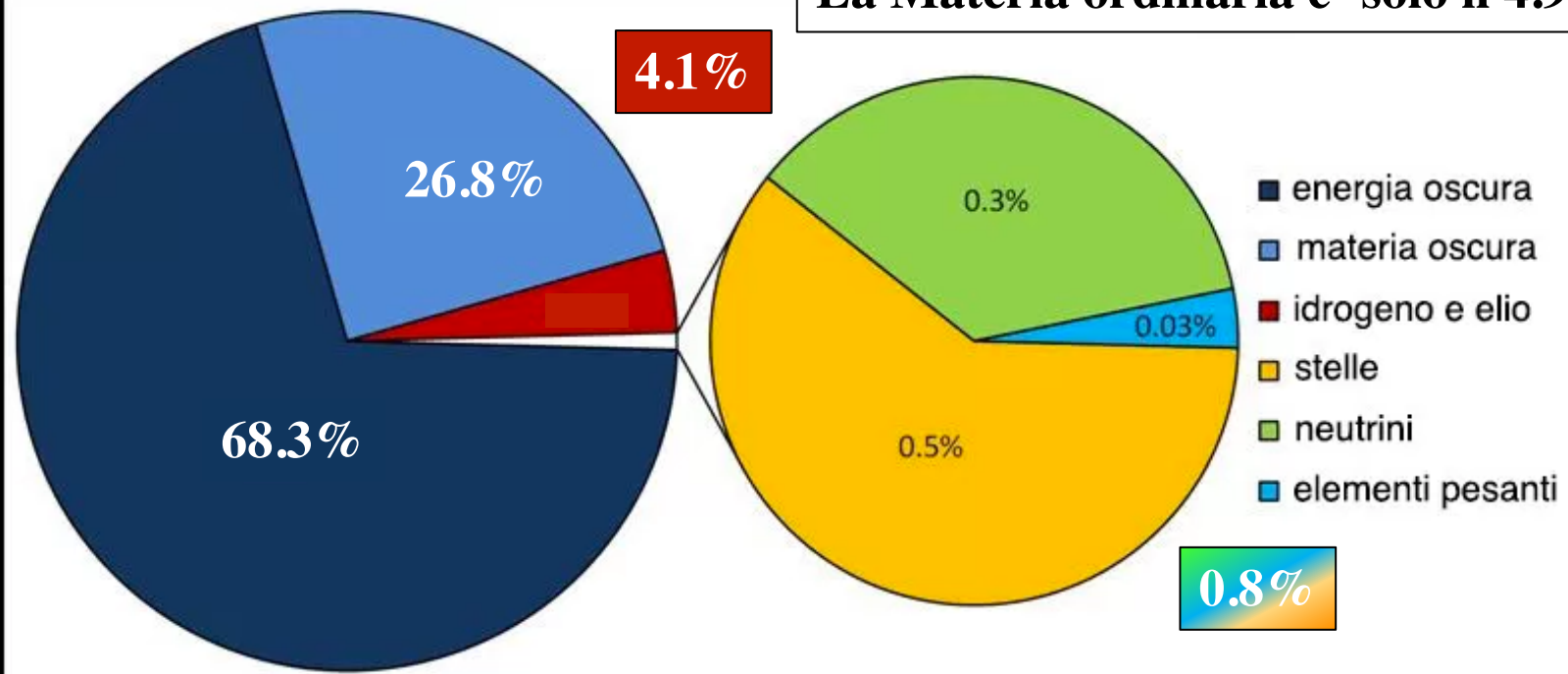
- 1) La geometria (forma) dell' Universo
- 2) La quantità, le proprietà e l' evoluzione dell' Energia Oscura

L'Universo in espansione accelerata: l'era dell' Energia Oscura



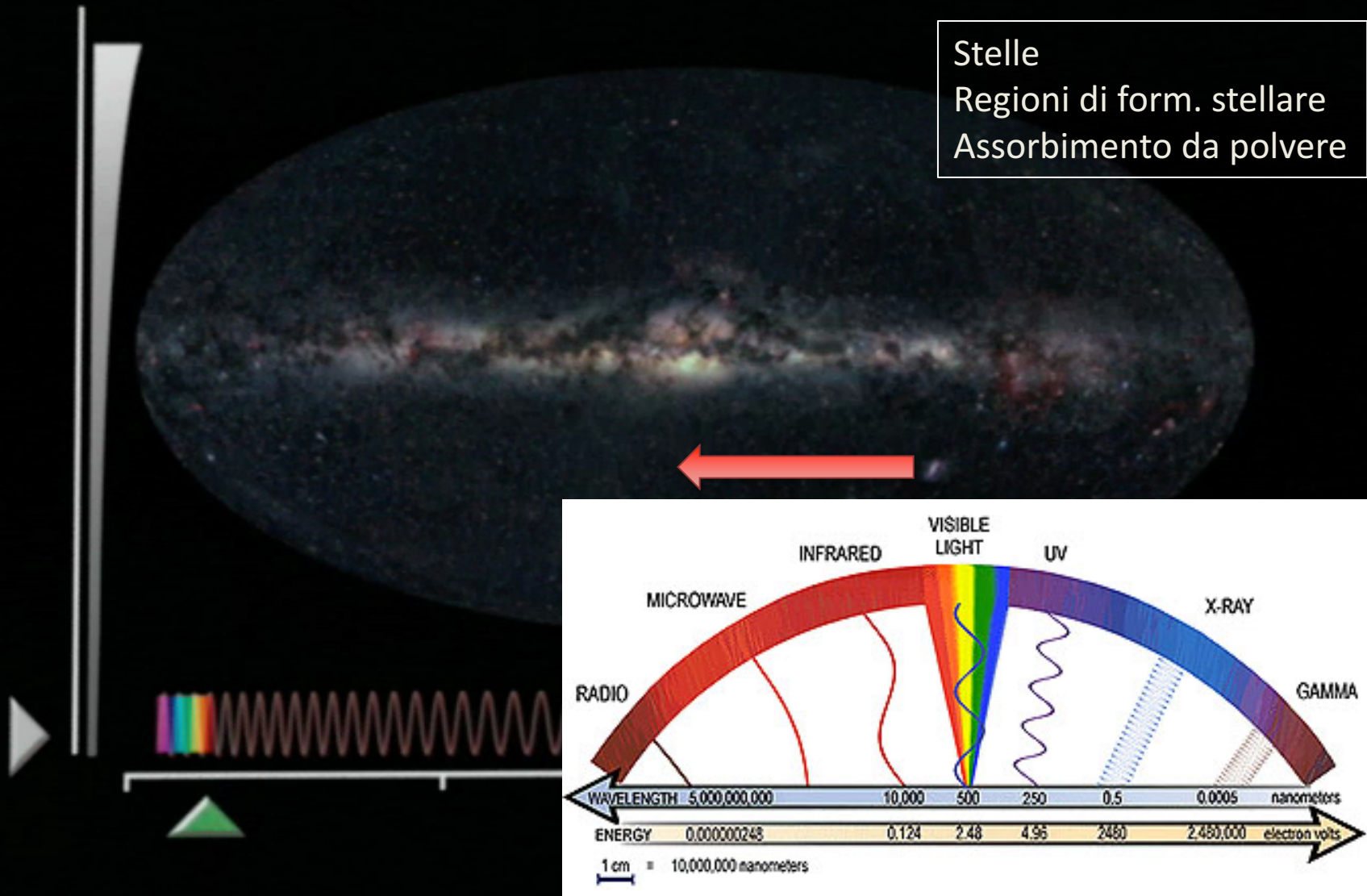
La Composizione dell'Universo

La Materia ordinaria è solo il 4.9%

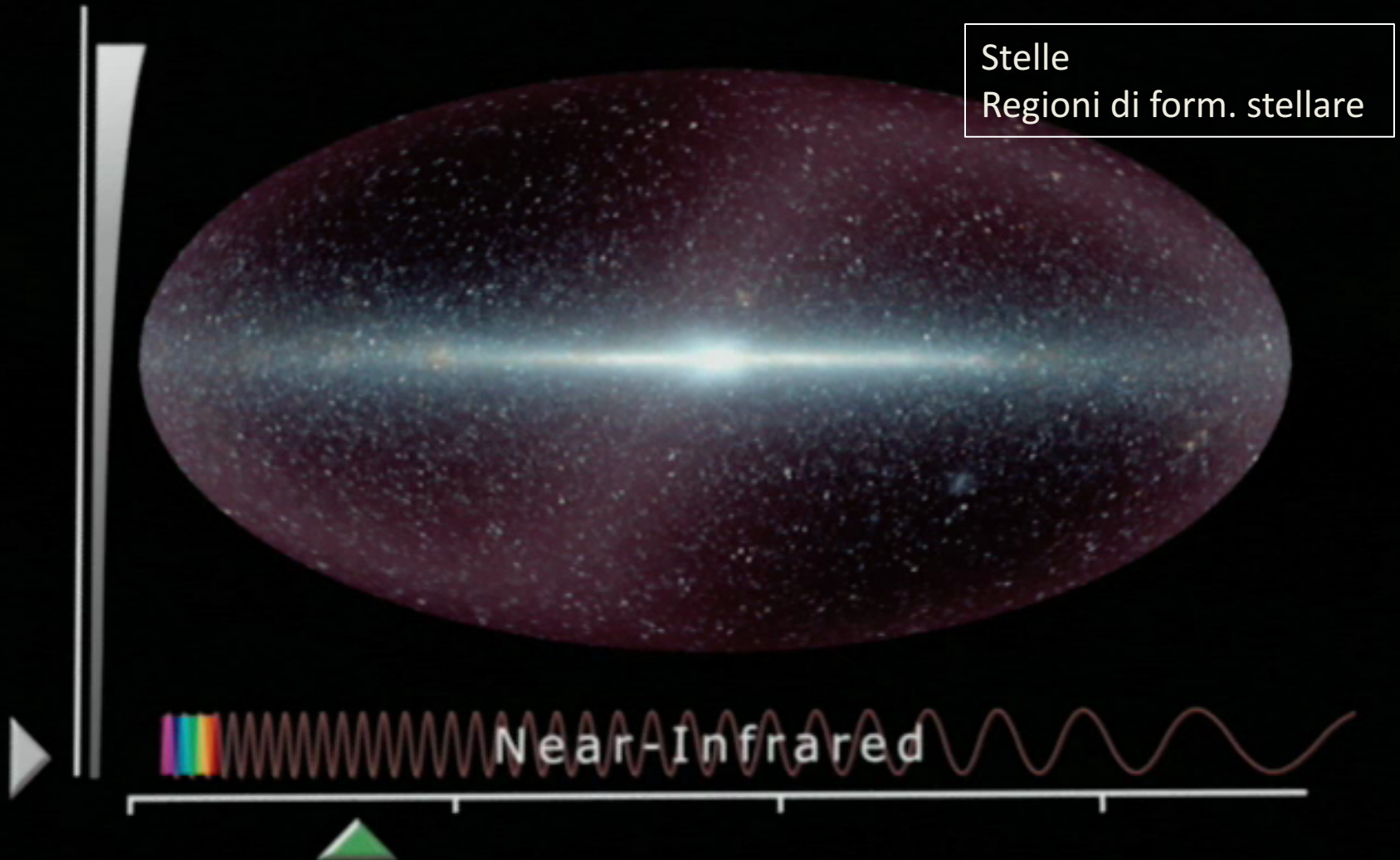


Torniamo alla Mappa del Cielo

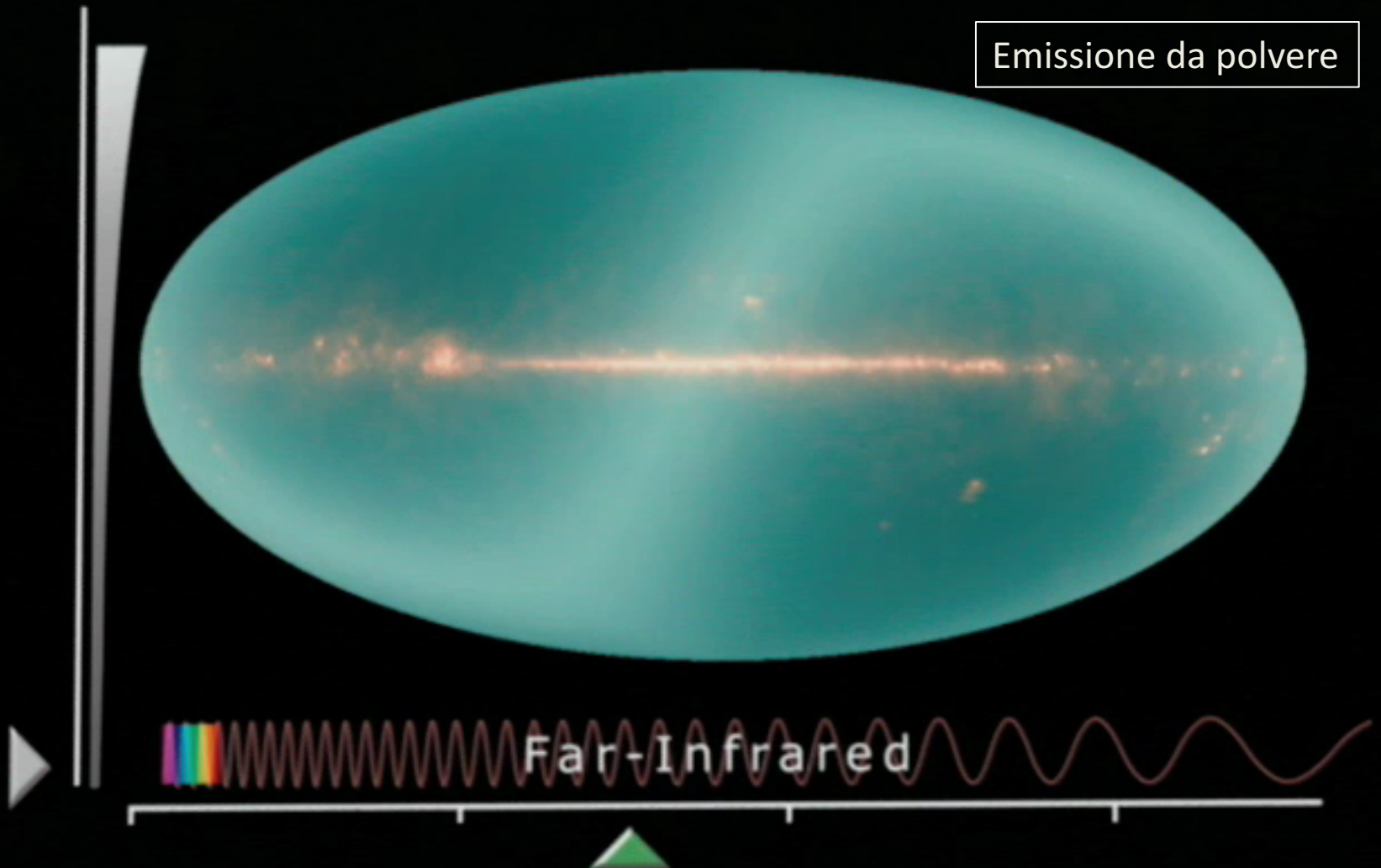
Stelle
Regioni di form. stellare
Assorbimento da polvere



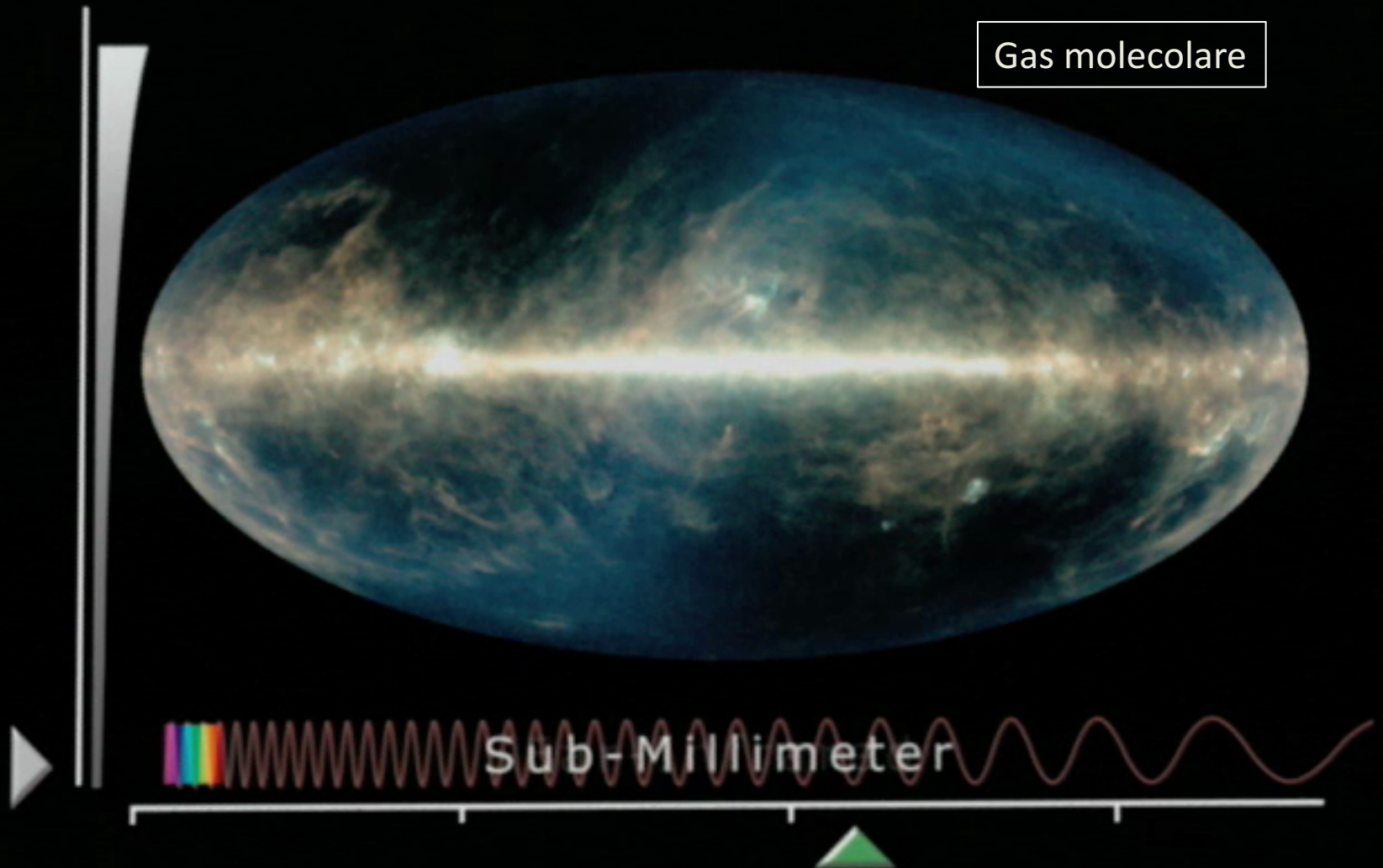
Mappa del cielo



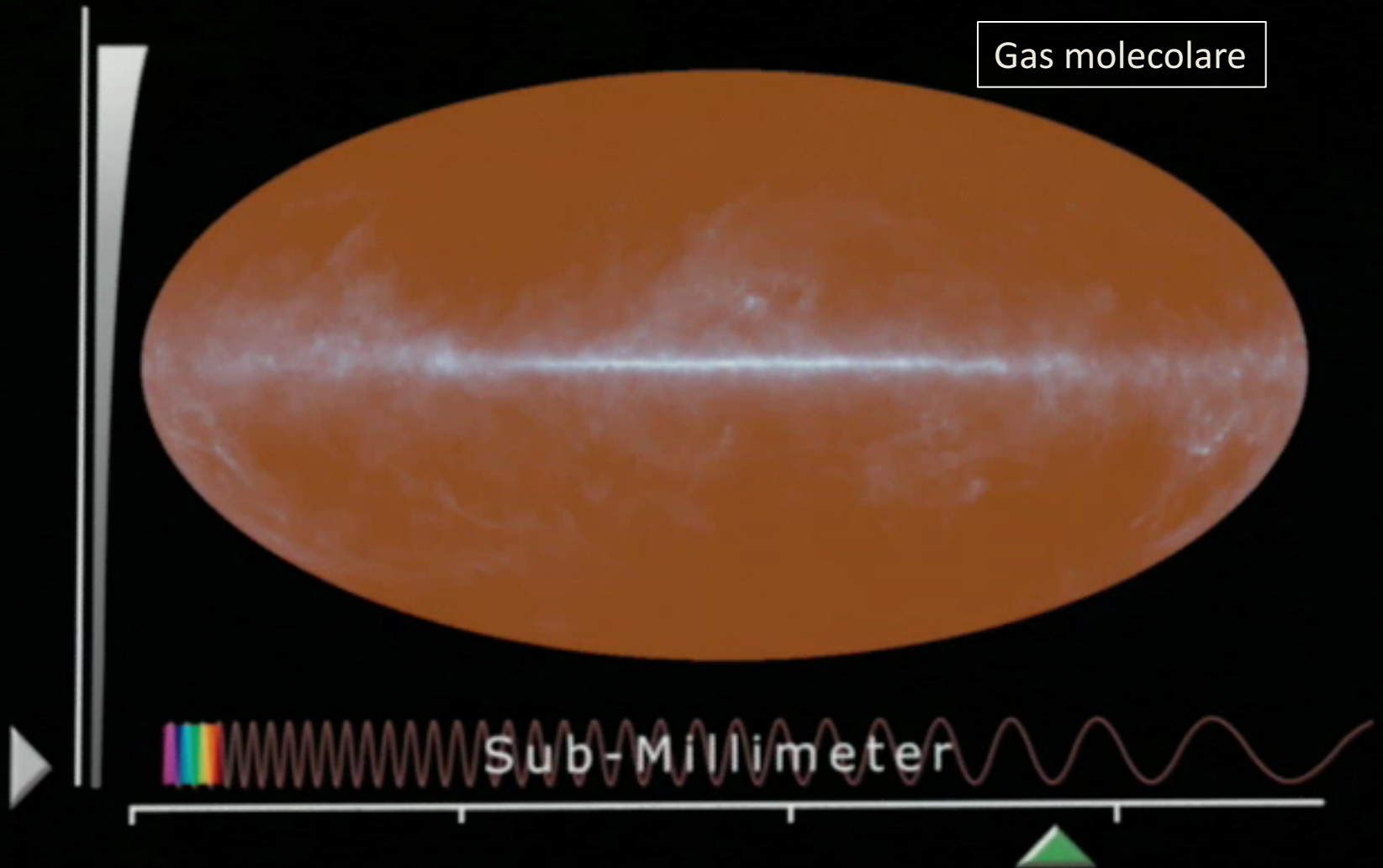
Mappa del cielo



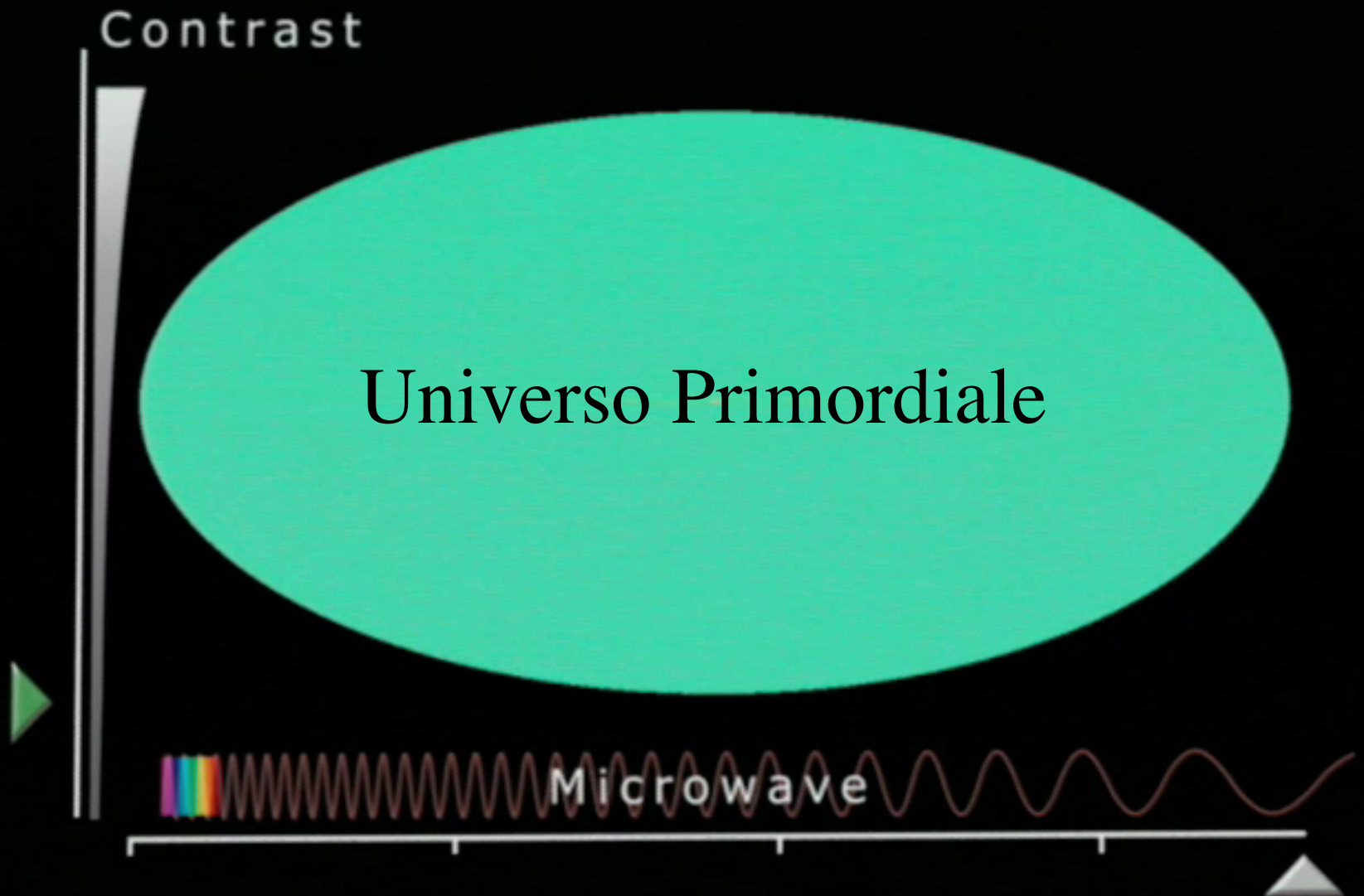
Mappa del cielo



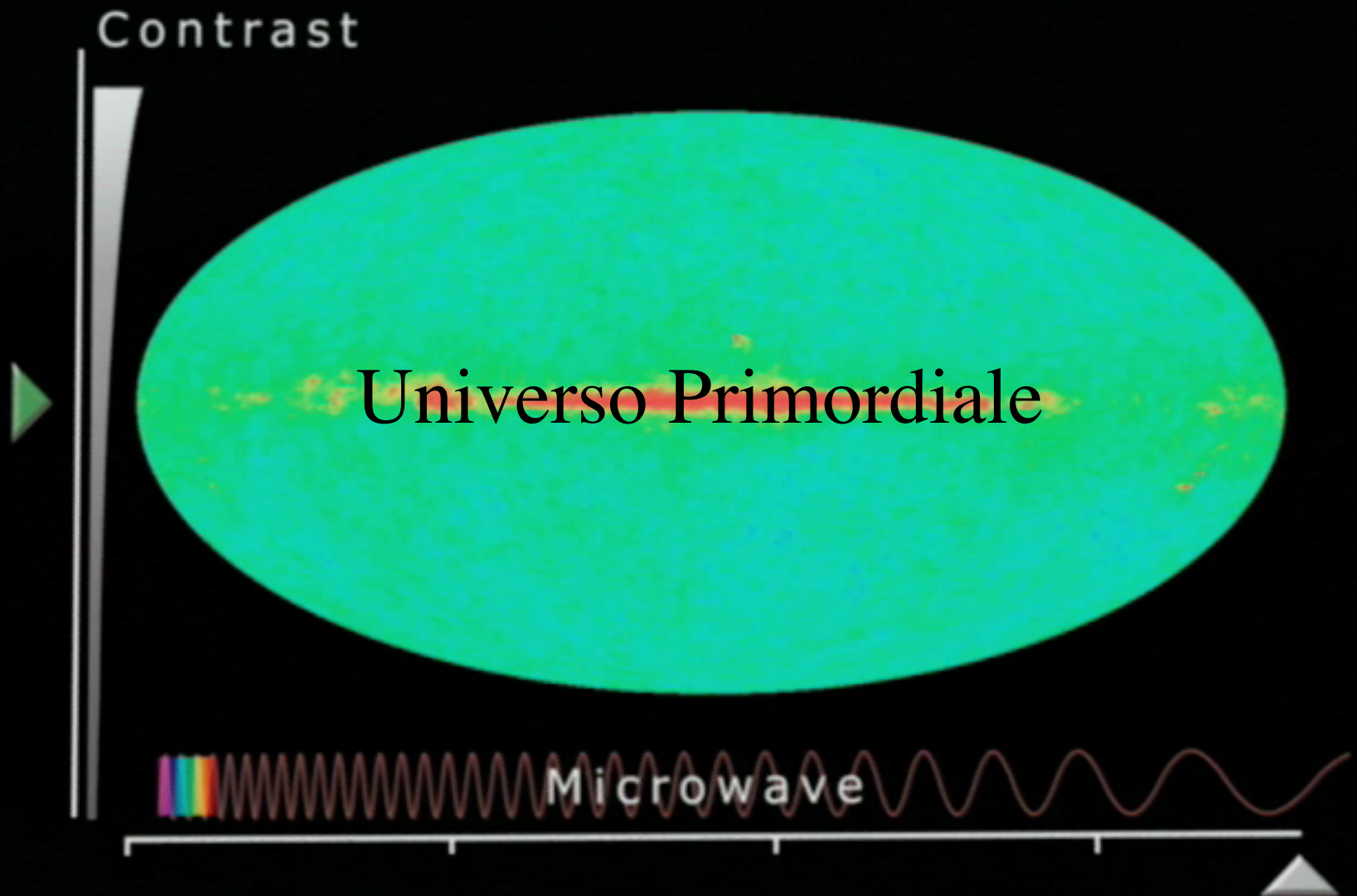
Mappa del cielo



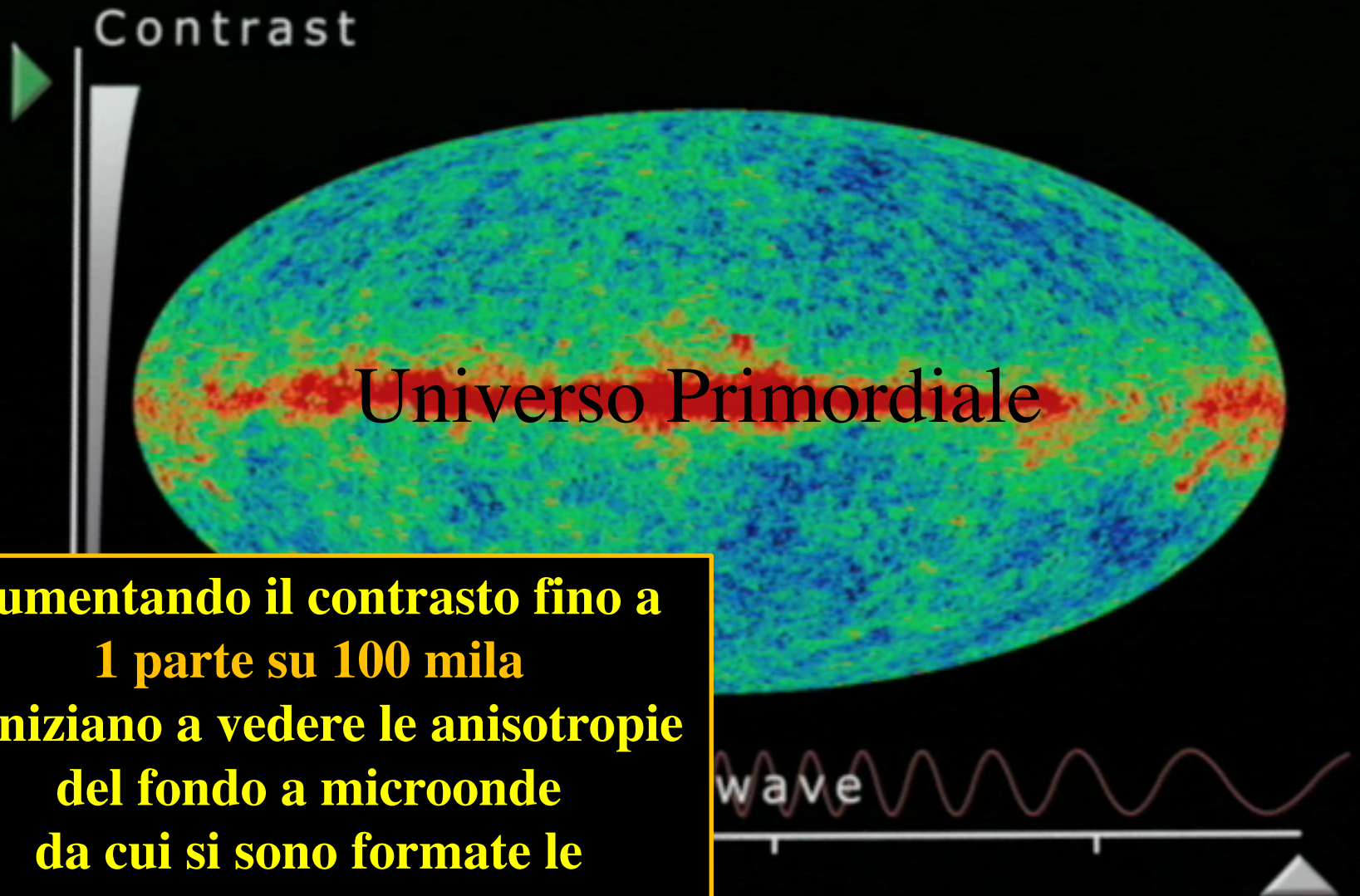
Radiazione di Fondo Cosmica (2.7K)



Radiazione di Fondo Cosmica (2.7K)

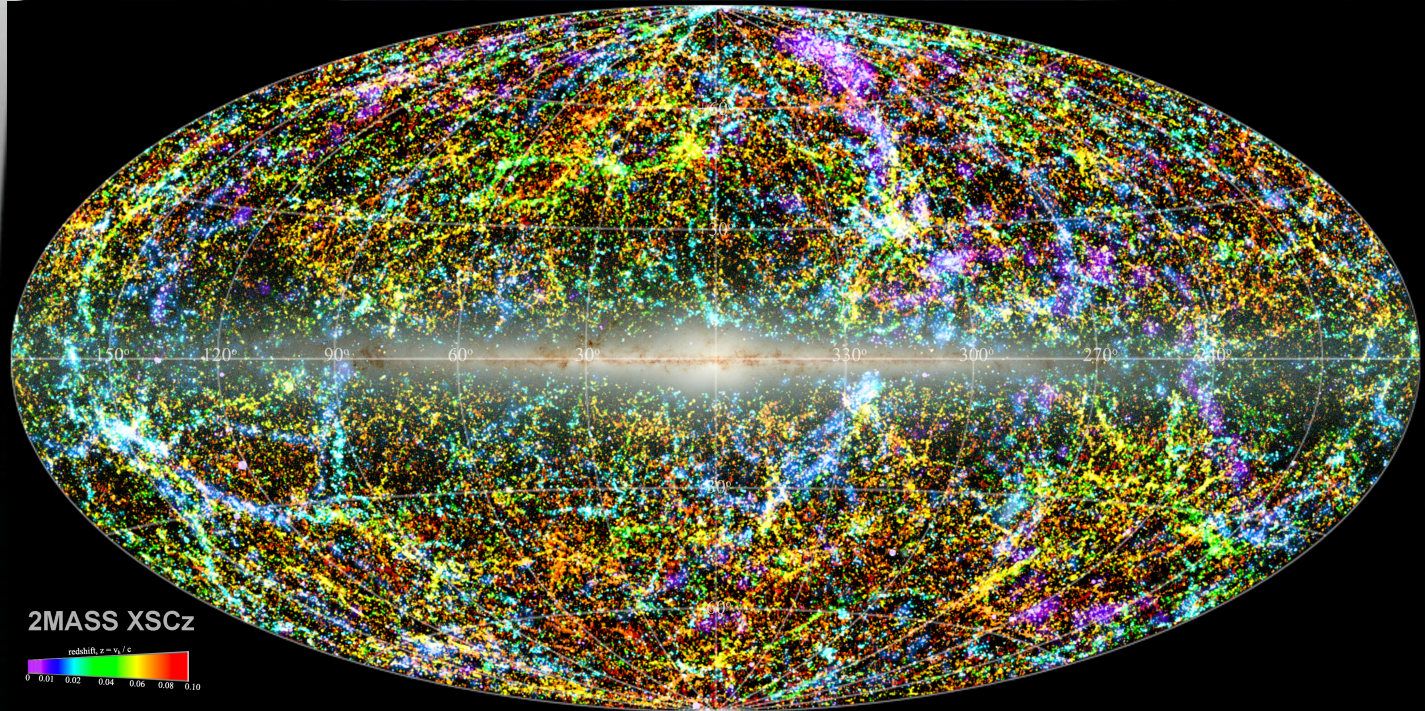


Radiazione di Fondo Cosmica (2.7K)

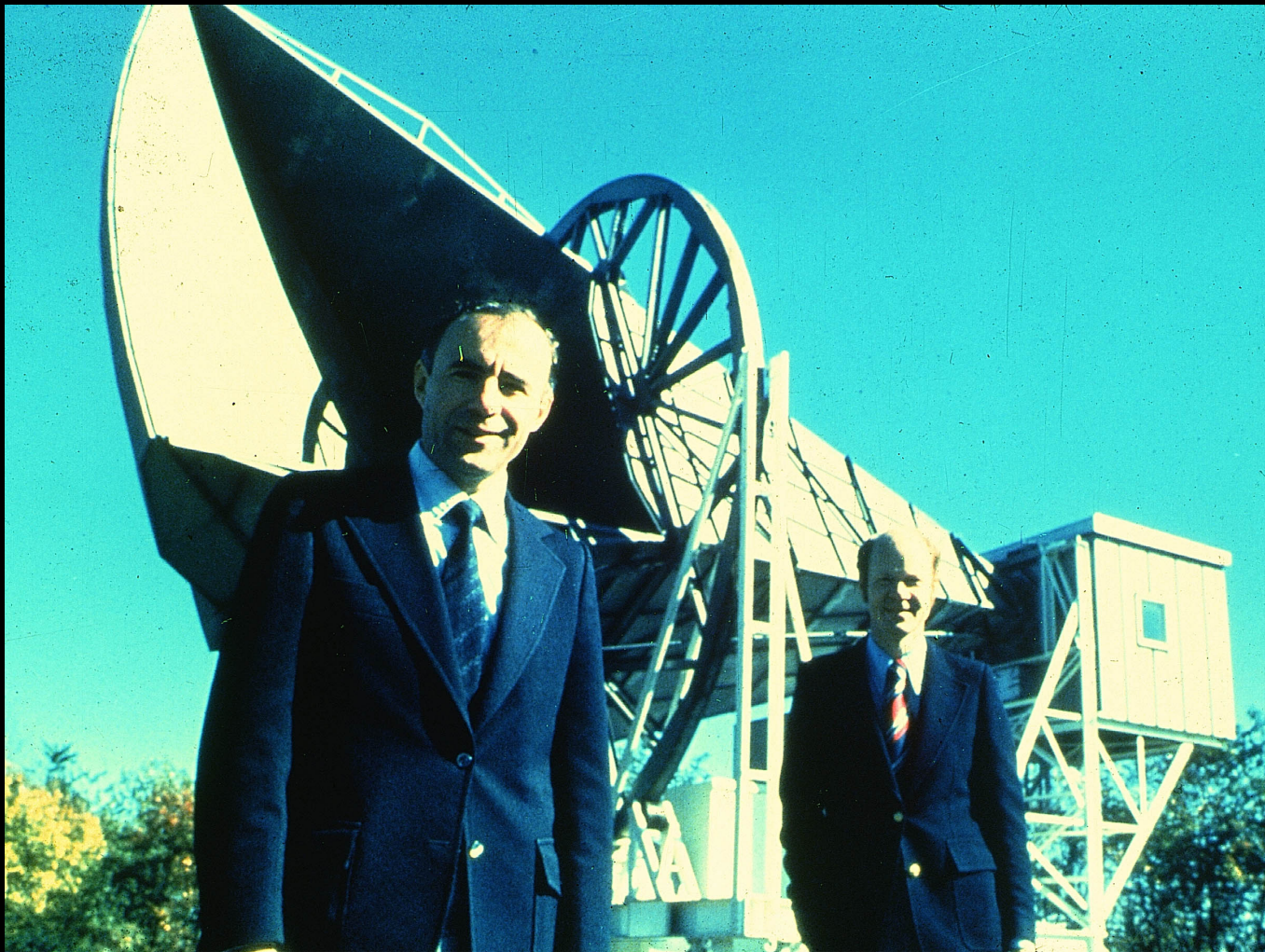


**Aumentando il contrasto fino a
1 parte su 100 mila
si iniziano a vedere le anisotropie
del fondo a microonde
da cui si sono formate le
strutture cosmiche**

**OGGI : Le variazioni della densita` locale
oggi sono maggiori di quelle primordiali
di molti ordini di grandezza!**



**La sfida della Cosmologia moderna:
capire come le PICCOLISSIME differenze di densita`
della Radiazione di Fondo Cosmica si sono potute
trasformare nelle ENORMI strutture odierne**



1964 Bell Labs, New Jersey

**A. Penzias e B. Wilson misurano un “eccesso di rumore”
con la loro antenna radio (microonde, 7.35 cm).**

Dai piccioni al Premio Nobel per la Fisica 1978

“Arno Penzias and Bob Wilson were trying to find the source of excess noise in their antenna, where pigeons were roosting. They spent hours searching for and removing the pigeon dung. Still the noise remained, and was later identified with the Big Bang. Thus, they looked for dung but found gold, which is just opposite of the experience of most of us.”

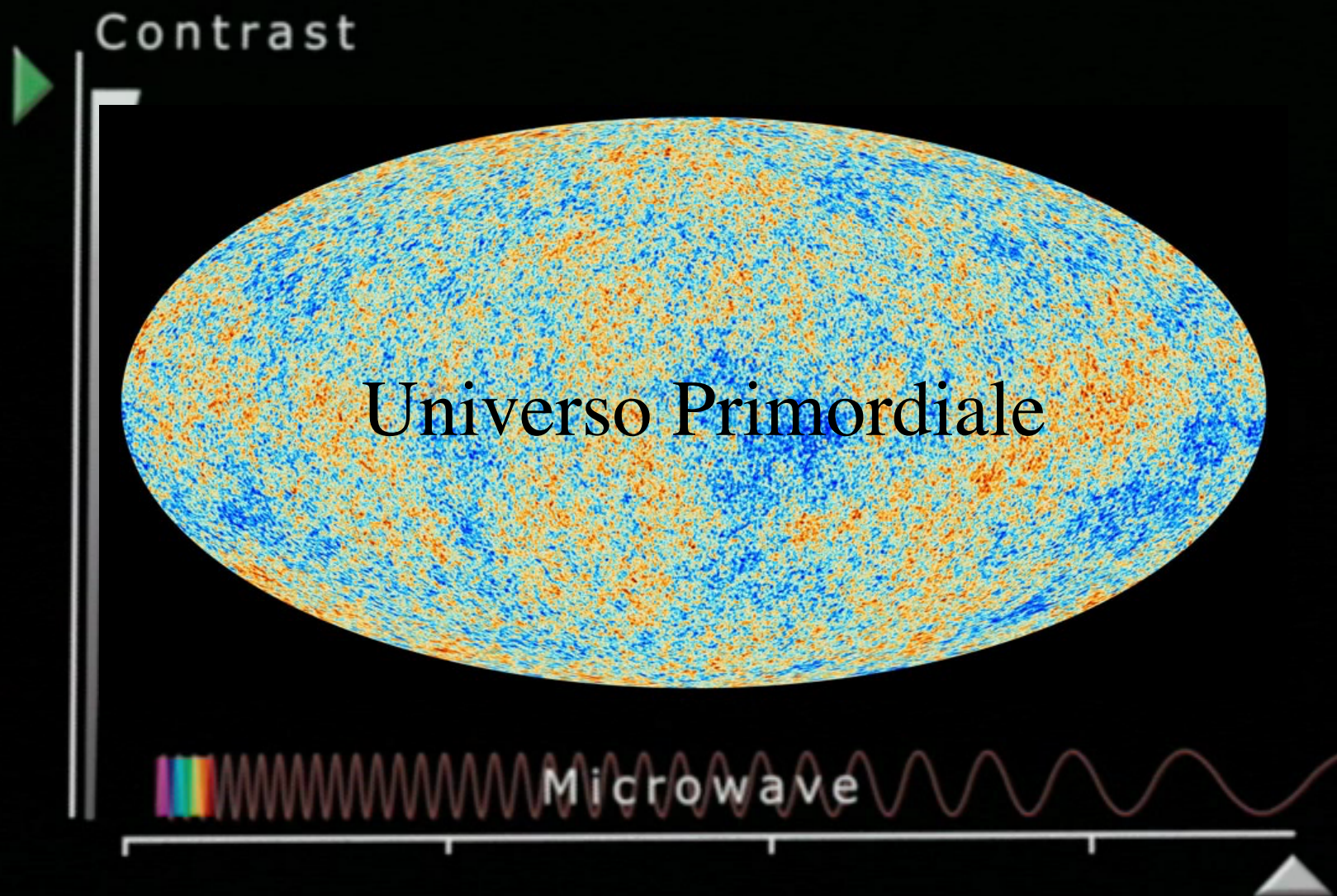


**La Radiazione di Fondo Cosmica:
era predetta dalla Teoria del BIG BANG e loro
l'hanno osservata!**

COBE – NASA 1990: La prima immagine della Radiazione di Fondo Cosmica (2.7K)

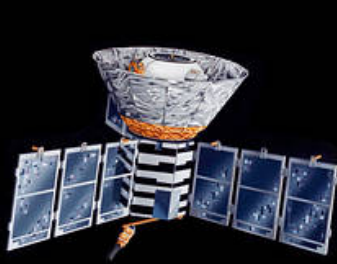


Planck– ESA 2013: l'immagine più dettagliata della Radiazione di Fondo Cosmica (2.7K)

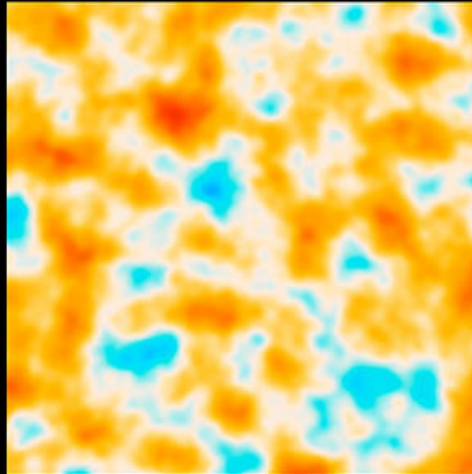


Radiazione di Fondo Cosmica vista da COBE, WMAP e Planck

Messa a fuoco sull'Universo Primordiale

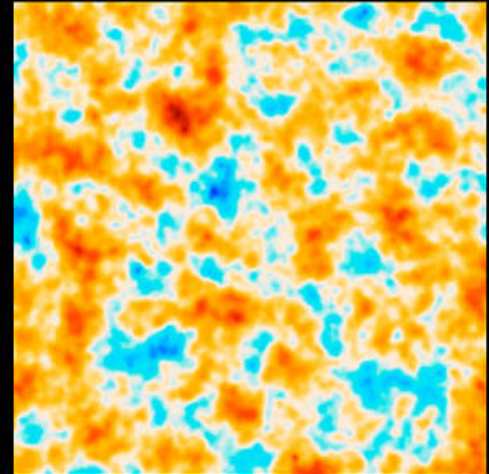


COBE



WMAP

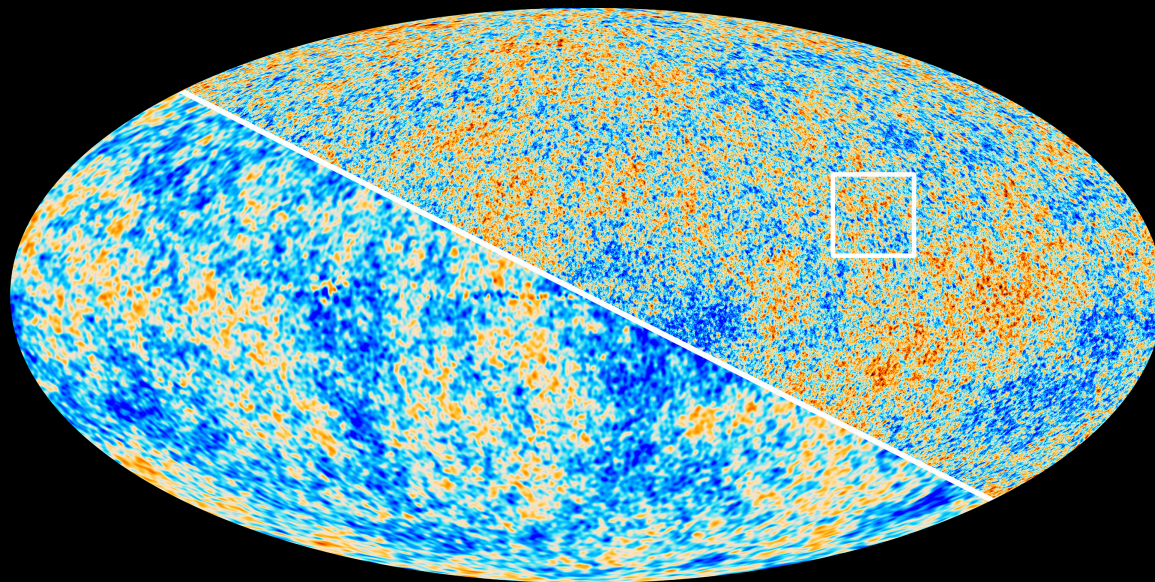
NASA/2003
9 anni di dati



Planck

ESA/2013
16 mesi di dati

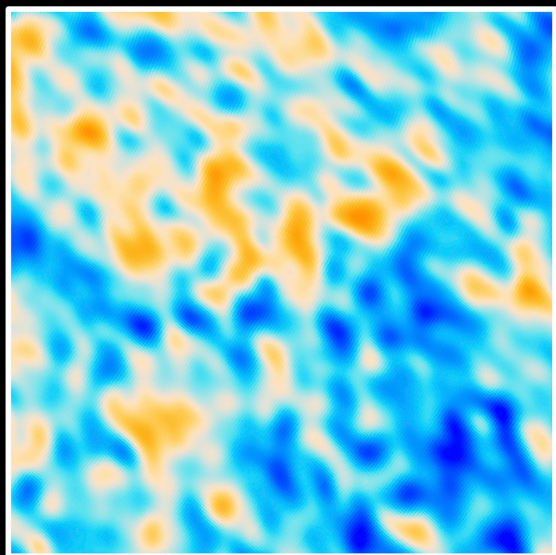
Radiazione di Fondo Cosmica vista da WMAP e Planck



WMAP

**NASA
2003**

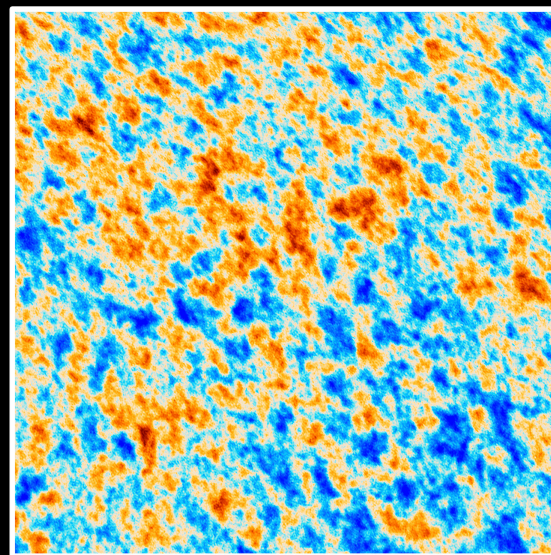
9 anni di dati



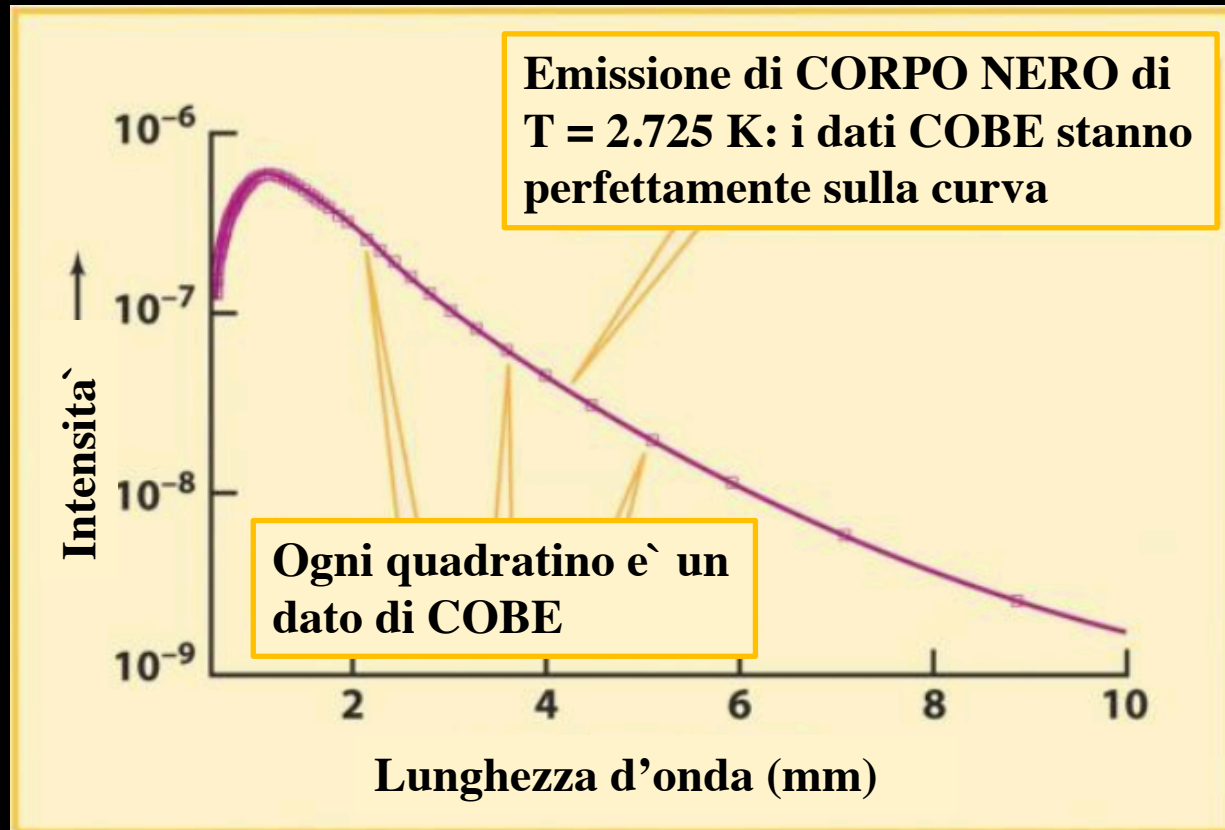
Planck

**ESA
2013**

**16 mesi di dati
Variazioni di
densita`
di 0.00001**

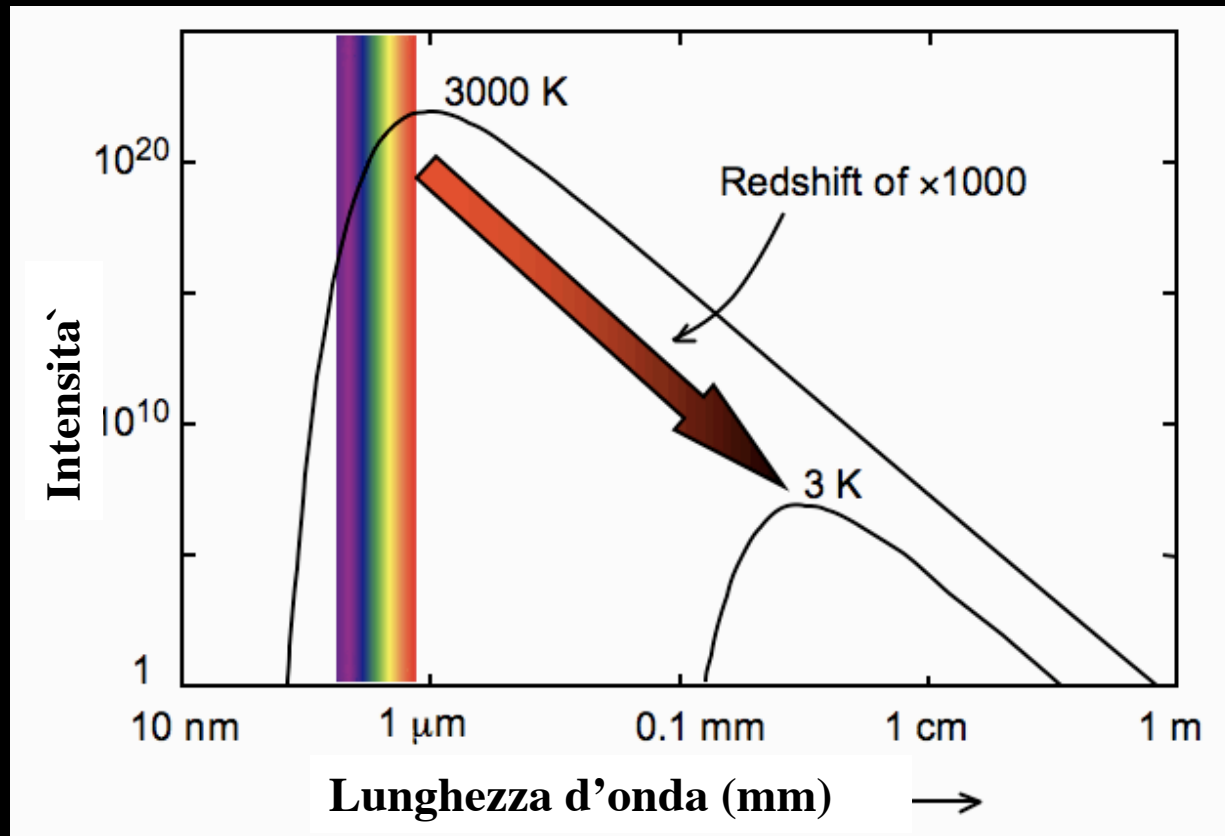


Lo Spettro della Radiazione di Fondo Cosmica



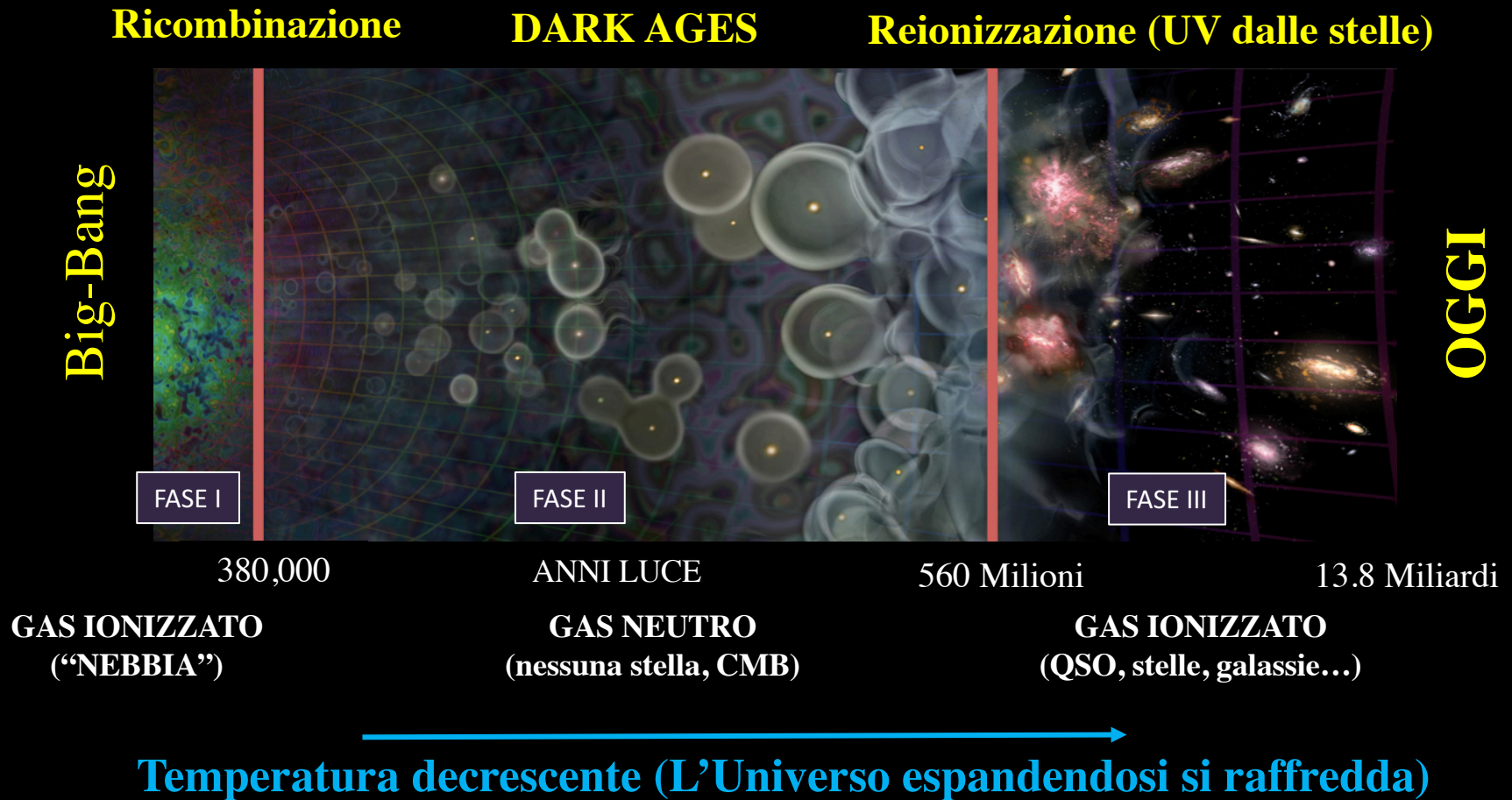
Quello che osserviamo oggi a temperatura $\sim 2.7\text{K}$ è il resto spostato verso il rosso dell'Universo caldissimo che esistette $\sim 380,000$ anni dopo il Big Bang

Lo Spettro della Radiazione di Fondo Cosmica



**Quello che osserviamo oggi a temperatura ~ 2.7 K
è il resto redshiftato dell'Universo caldissimo che
esistette $\sim 380,000$ anni dopo il Big Bang**

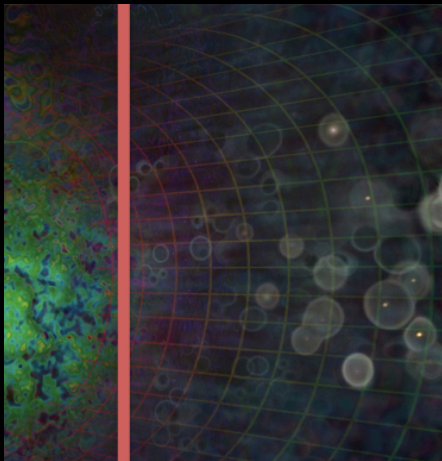
La Storia dell' Universo in breve



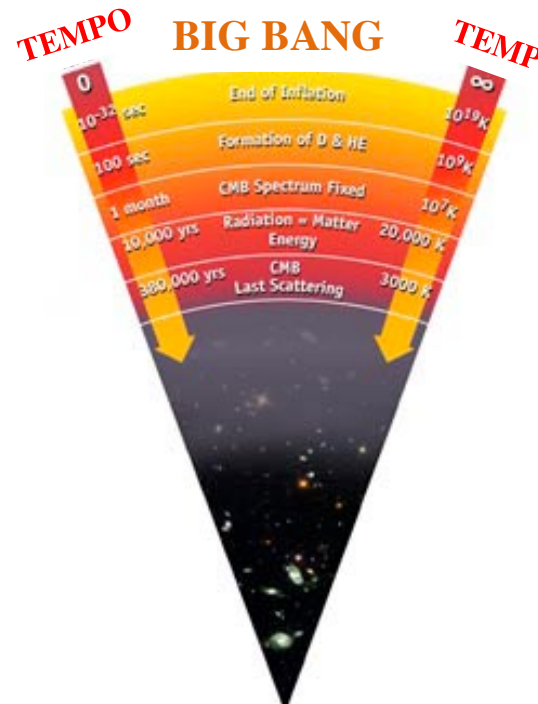
La Storia dell'Universo in breve

Big-Bang

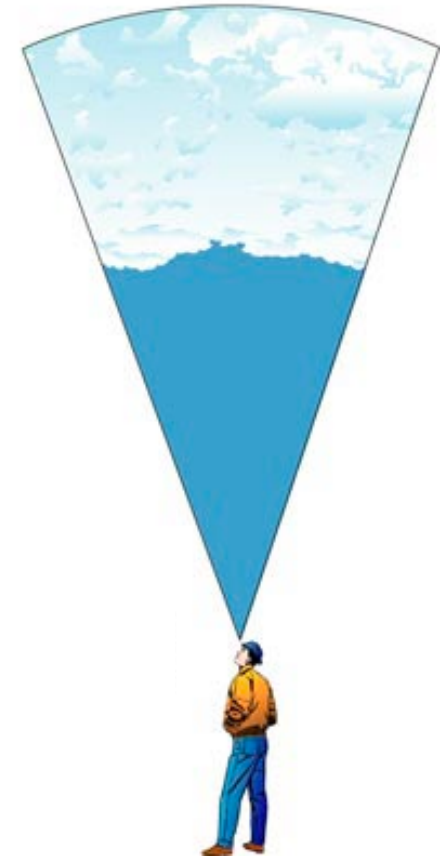
Ricombinazione



La Radiazione di Fondo
proveniente dalla
“superficie di ultimo scattering”
è analoga alla luce che arriva ai
nostri occhi da una nube in un
giorno nuvoloso



PRESENTE
13.8 miliardi di anni
dopo il BIG BANG

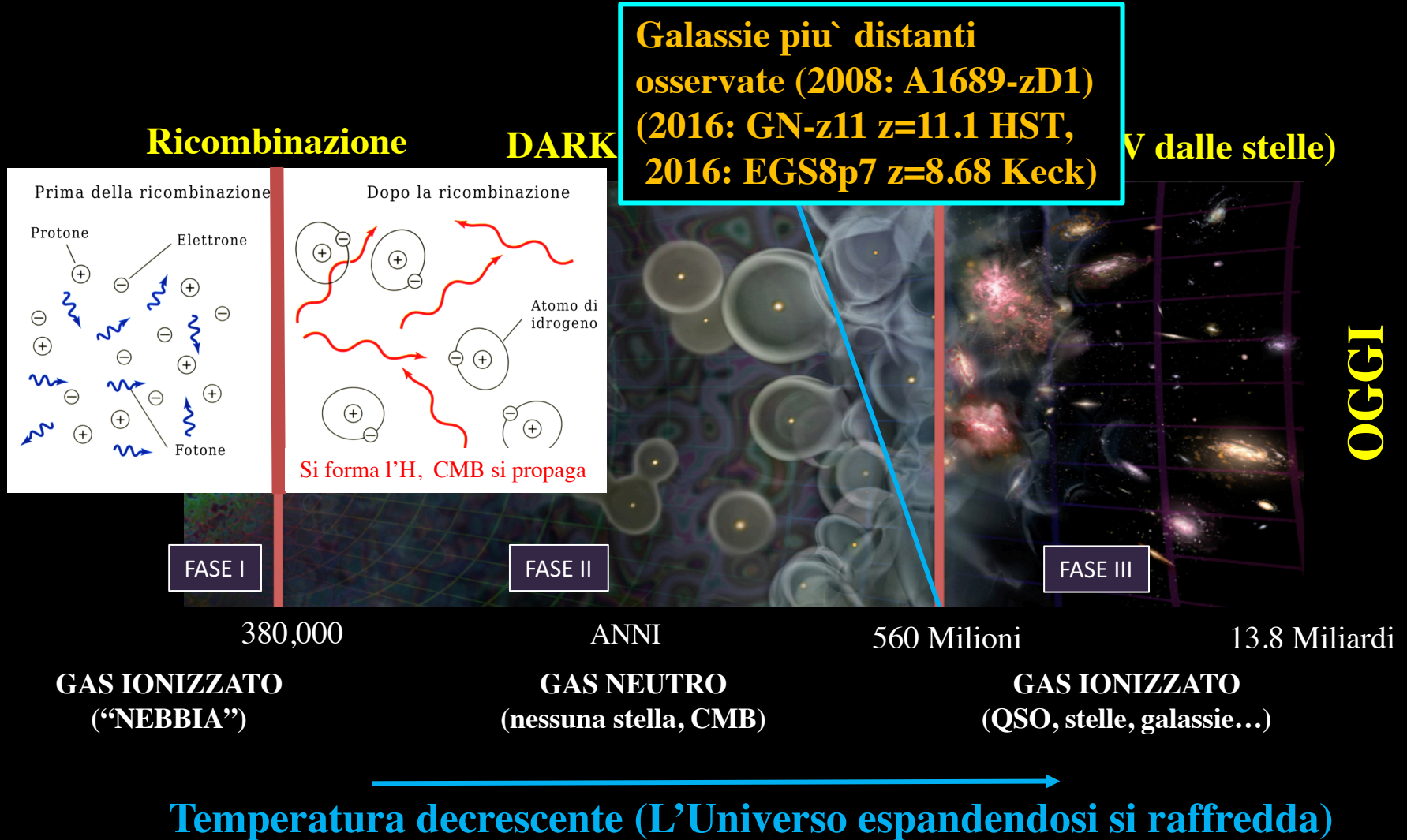


(stella, CMB)

(QSO, stelle, galassie...)

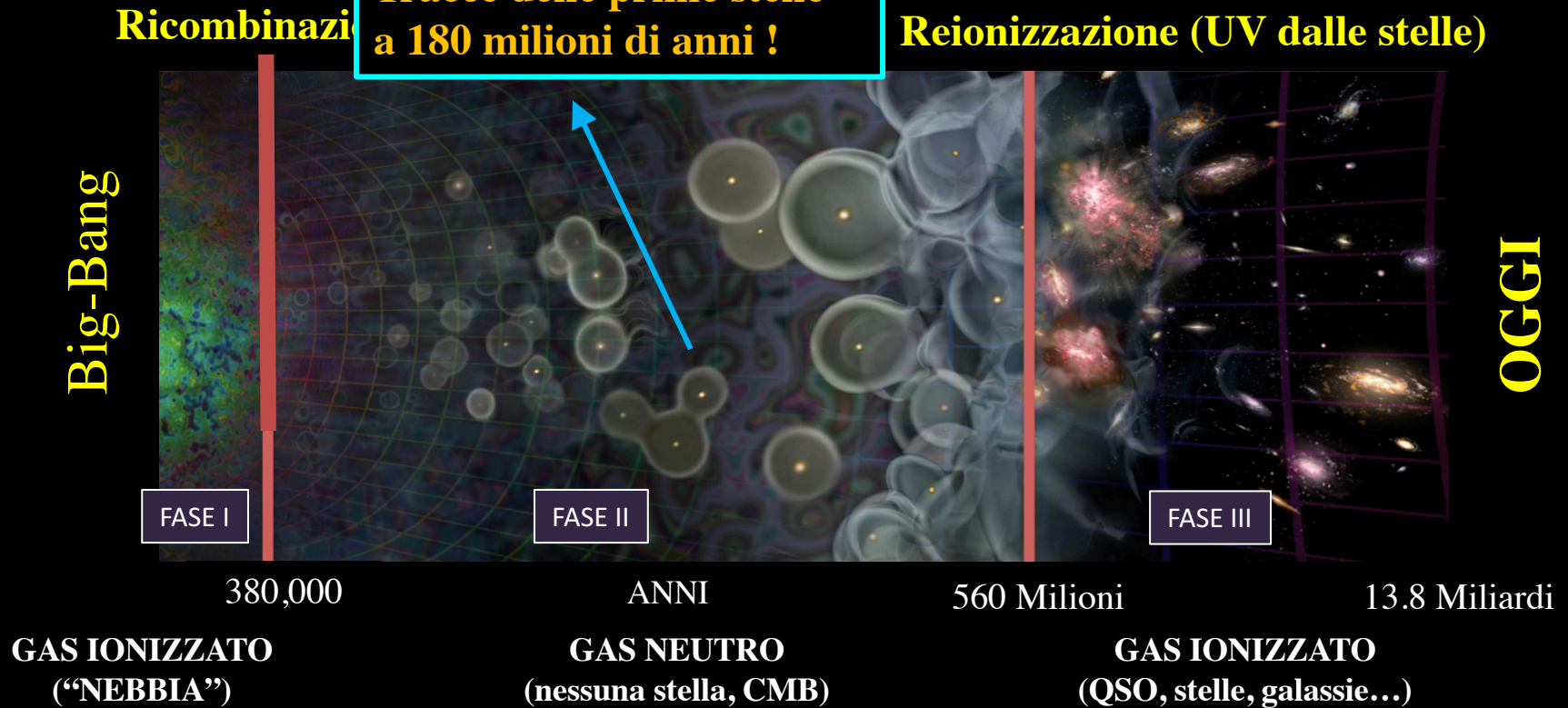
(L'Universo espandendosi si raffredda)

La Storia dell' Universo in breve



La Storia dell' Universo in breve

**1 Marzo 2018 – Nature
(EDGES Australia):
Tracce delle prime stelle
a 180 milioni di anni !**



Temperatura decrescente (L'Universo espandendosi si raffredda)

$z = 0.0$



Per capire come si è evoluto l'Universo
usiamo Simulazioni fatte coi super-computer

50 Mpc/h



Völker Springel
Max-Planck-Institute
for Astrophysics

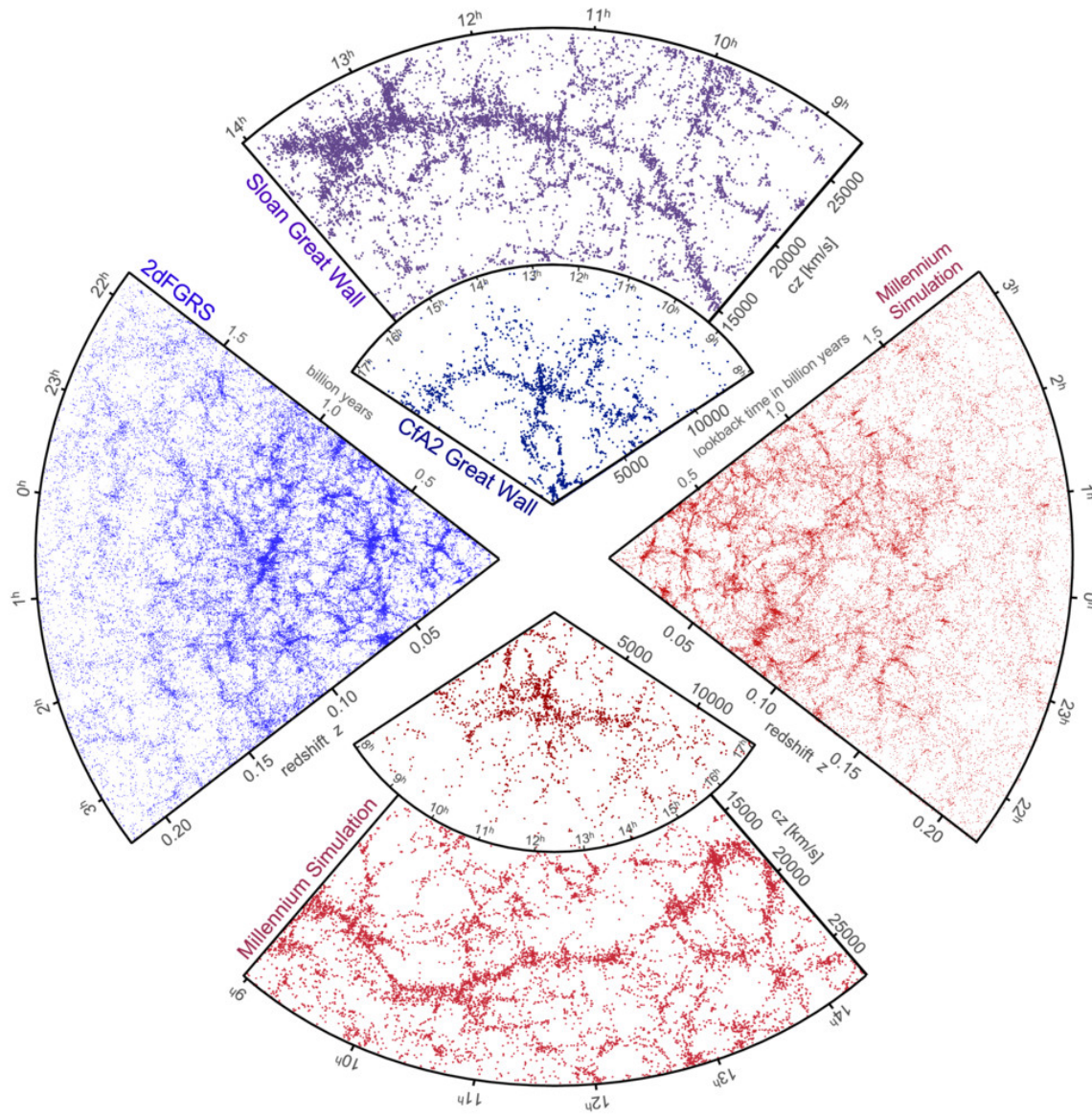


A visualization of the cosmic web, showing a dense network of purple filaments and nodes of yellowish-orange light against a dark blue background. A horizontal scale bar is positioned in the upper center.

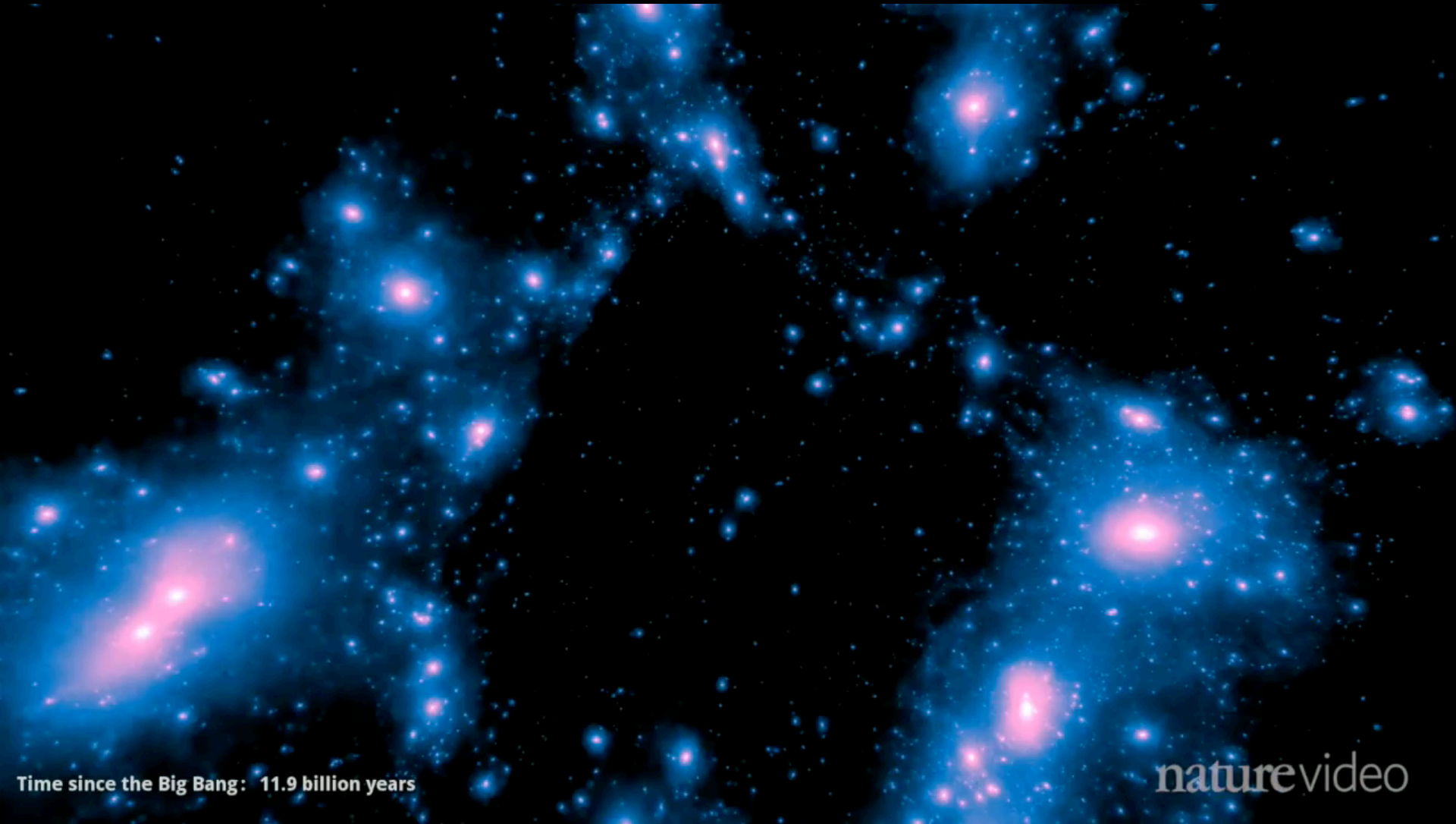
125 Mpc/h

**Gli Ammassi di Galassie, che sono le strutture piu`
grandi nell'Universo tenute legate dalla forza di
gravita`, si formano nei NODI dei filamenti cosmici**

Simulazione Millennium (in rosso) a confronto con le osservazioni (in blu)



La simulazione idrodinamica piu` recente: il progetto ILLUSTRIS



Time since the Big Bang: 11.9 billion years

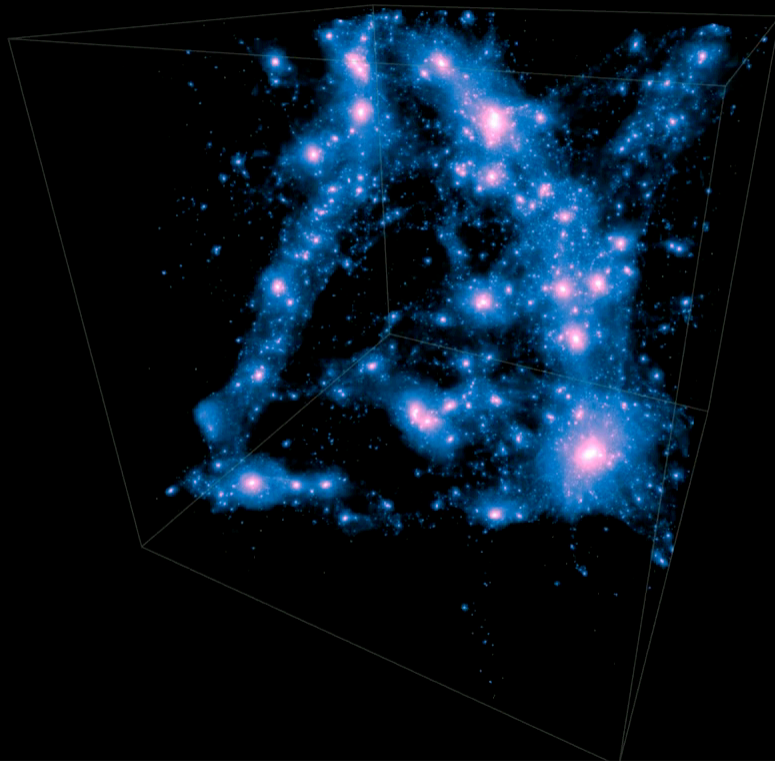
naturevideo

La simulazione idrodinamica piu` recente: il progetto ILLUSTRIS

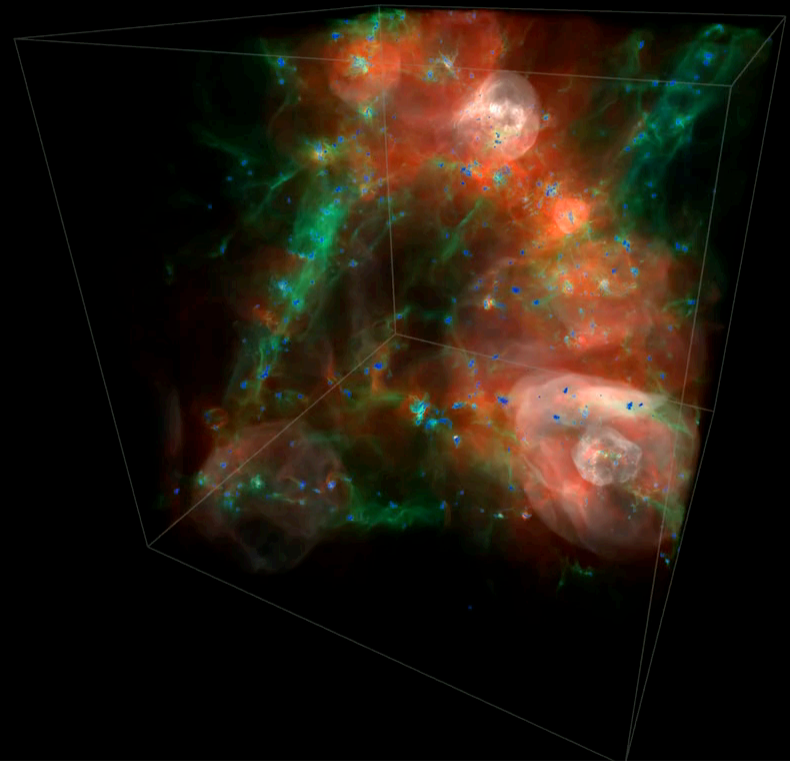
Il modello ovviamente non e` perfetto e dove fallisce ci da` indicazioni su dove indagare per capire cosa stiamo ci perdendo.

La simulazione idrodinamica piu` recente: il progetto ILLUSTRIS

Dark Matter



Gas Temperature



redshift : 0.63
Time since the Big Bang: 7.9 billion years

stellar mass : 60.7 billion solar masses

ILLUSTRIS

Quanto e' grande l'Universo?

L' Universo e' infinito e rimane sempre tale, anche quando si espande o si contrae.

L'Universo esiste da un tempo **finito**, quindi anche se e' infinito noi siamo in grado di osservarne solamente quella parte che ha fatto in tempo a inviarci particelle o radiazioni.

Esiste un Orizzonte Cosmologico, cioe' possiamo vedere solo fino a distanze pari alla distanza massima percorsa dalla luce dal Big Bang ad oggi.



Il Problema dell' Orizzonte nella Teoria del Big Bang standard

**Orizzonte
Cosmologico**

Eta' dell' Universo
13.8 miliardi di a.l.



10 miliardi a.l.

13.4 miliardi a.l.

23.4 miliardi di a.l.

33 volte piu'
veloce della luce?

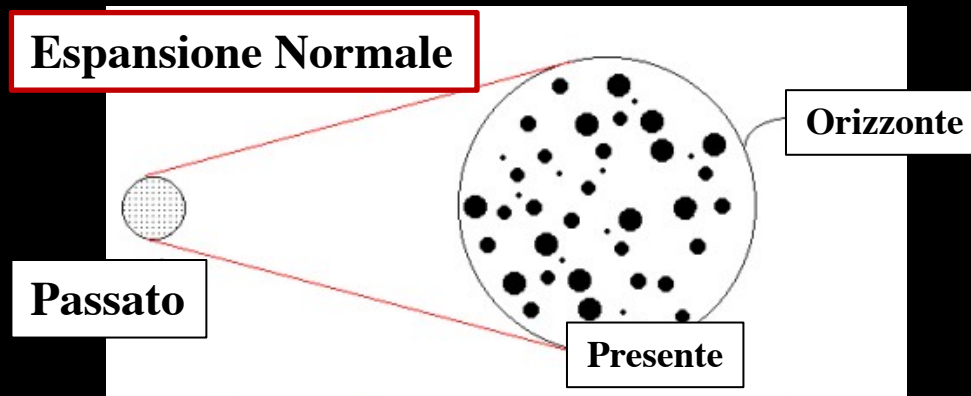
Mai in contatto
(nessun rapporto casuale),
ma stesse proprieta' fisiche?

Big Bang

La luce di questa
galassia non ha
raggiunto l'altra
parte dell'Universo

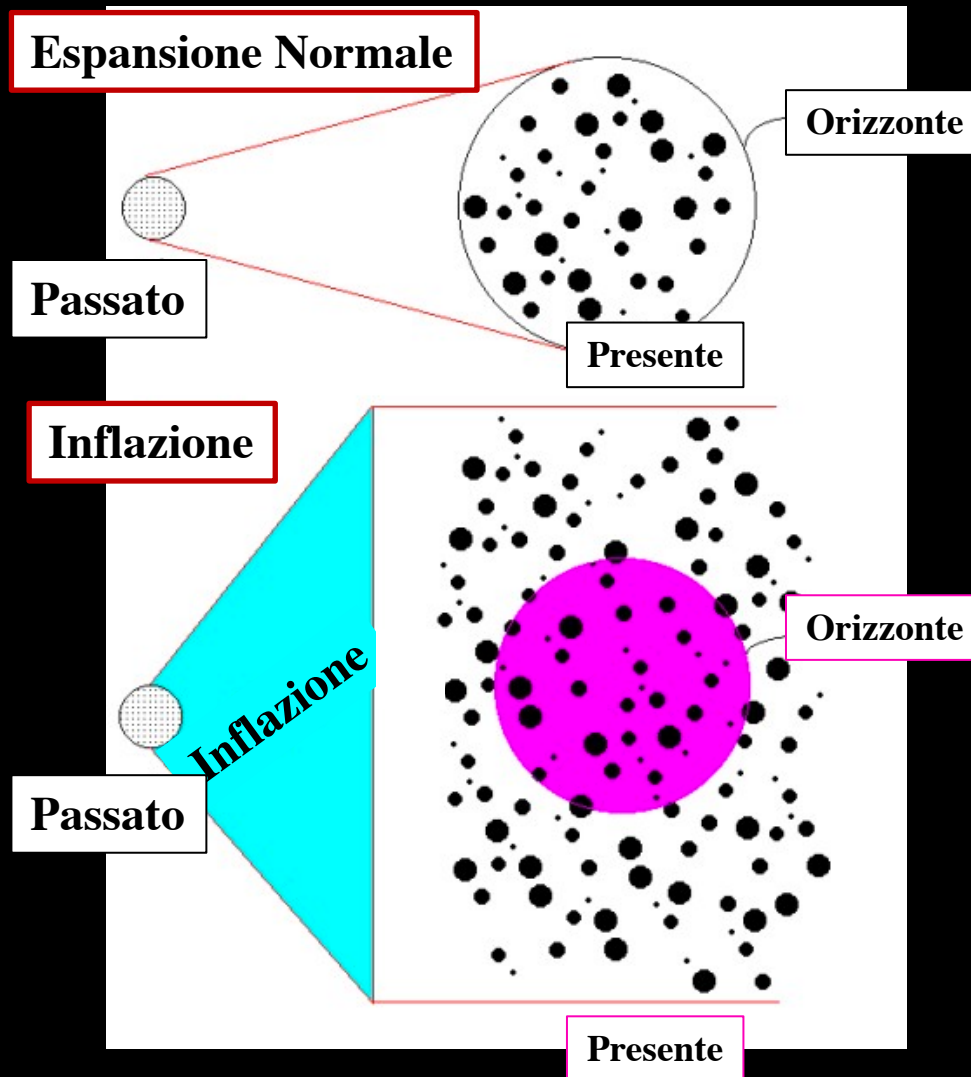
Galassia piu'
antica osservata
da Terra

La Teoria dell' Inflazione



**Mai in contatto
(nessun rapporto casuale),
ma stesse proprietà fisiche?**

La Teoria dell' Inflazione



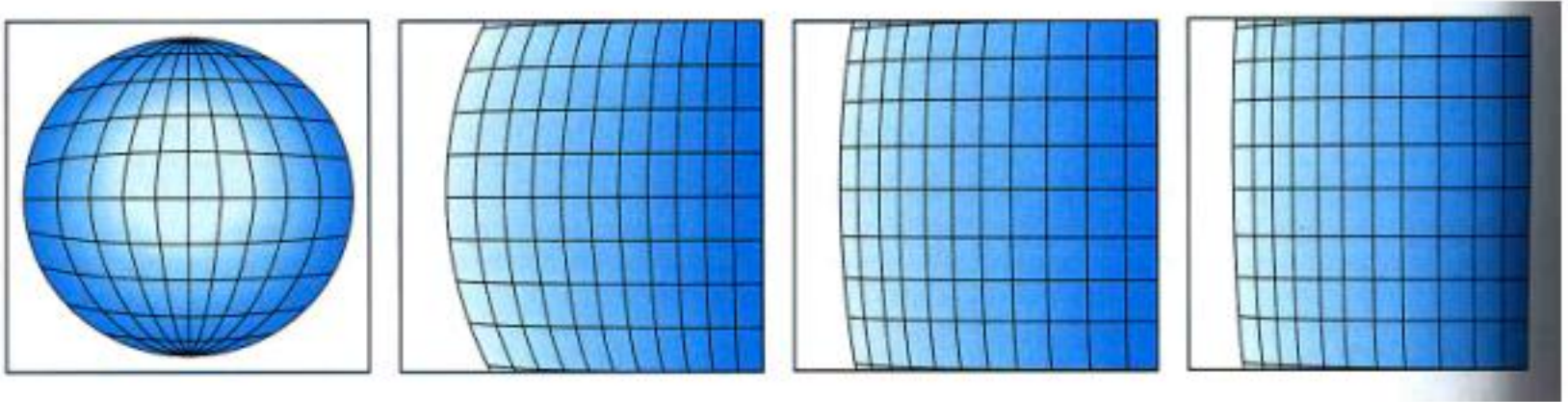
Espansione esponenziale dell' Universo 10^{-35} secondi dopo il Big Bang.

Aumento dimensionale enorme dell'Universo: circa un miliardo di miliardi di miliardi di volte (fra 10^{25-30} volte).

La teoria inflazionistica prevede che $\Omega = 1$ (cioè che la geometria del cosmo sia piatta).

Risultato confermato da WMAP /Planck: $\Omega = 1 \pm 2\%$.

la Teoria dell' Inflazione: risolve anche il “paradosso della piattezza”



- **Sfere espanse di un fattore 3 in ogni figura**
- **La curvatura diventa insignificante sulle scale della figura**
- **l'Inflazione produce un Universo localmente piatto**

Cosa ricordare?

- **Il modello Cosmologico Standard (Big Bang con l'aggiunta dell'Inflazione e Energia Oscura) ad oggi spiega tutte le osservazioni:**
 - L'espansione (accelerata) dell'Universo
 - La Radiazione di Fondo Cosmico
 - La Struttura Cosmica su Grande Scala
 - La Piattezza dell'Universo...
- **Domande aperte fondamentali:**
 - Cos'è la misteriosa energia che sta facendo accelerare l'Universo?
 - Cos'è la materia oscura?