

La misura della radiazione cosmica di fondo: uno sguardo ai primi istanti di vita dell'Universo

**Giovanni Signorelli
INFN Sezione di Pisa**







Perchè il cielo di notte ci appare scuro? (Paradosso di Olbers, 1823)

$$I \sim \frac{1}{r^2}$$

$$Ndr \sim 4\pi r^2 dr$$

$$N \times I = \text{cost}$$

Due osservazioni:

1. Slipher (1912) La luce proveniente dalle stelle lontane ci appare più 'rossa'



Due osservazioni:

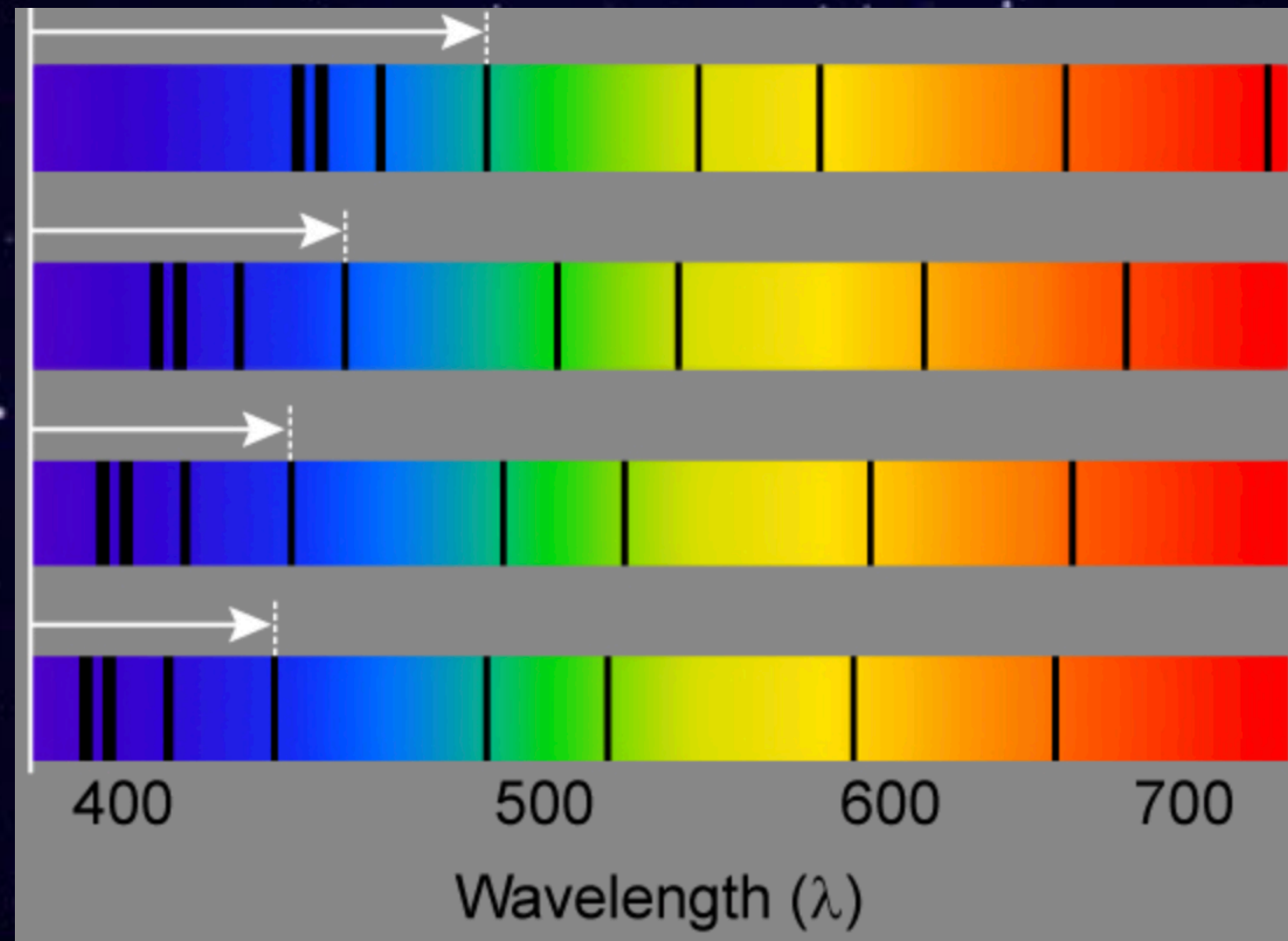
1. Slipher (1912) La luce proveniente dalle stelle lontane ci appare più 'rossa'

galassia lontana

galassia vicina

Stella

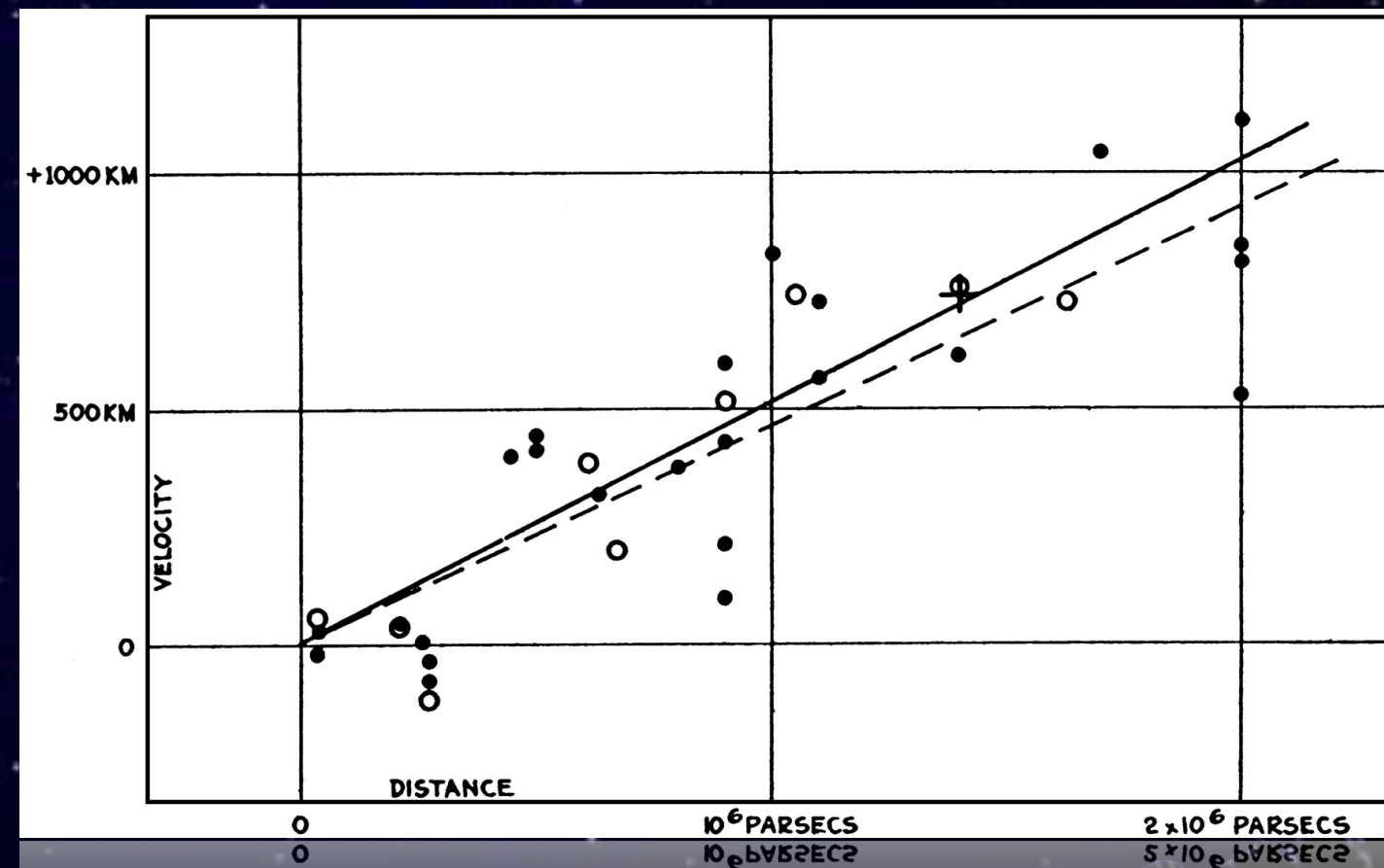
Laboratorio



⇒ Effetto Doppler: le stelle si allontanano da noi

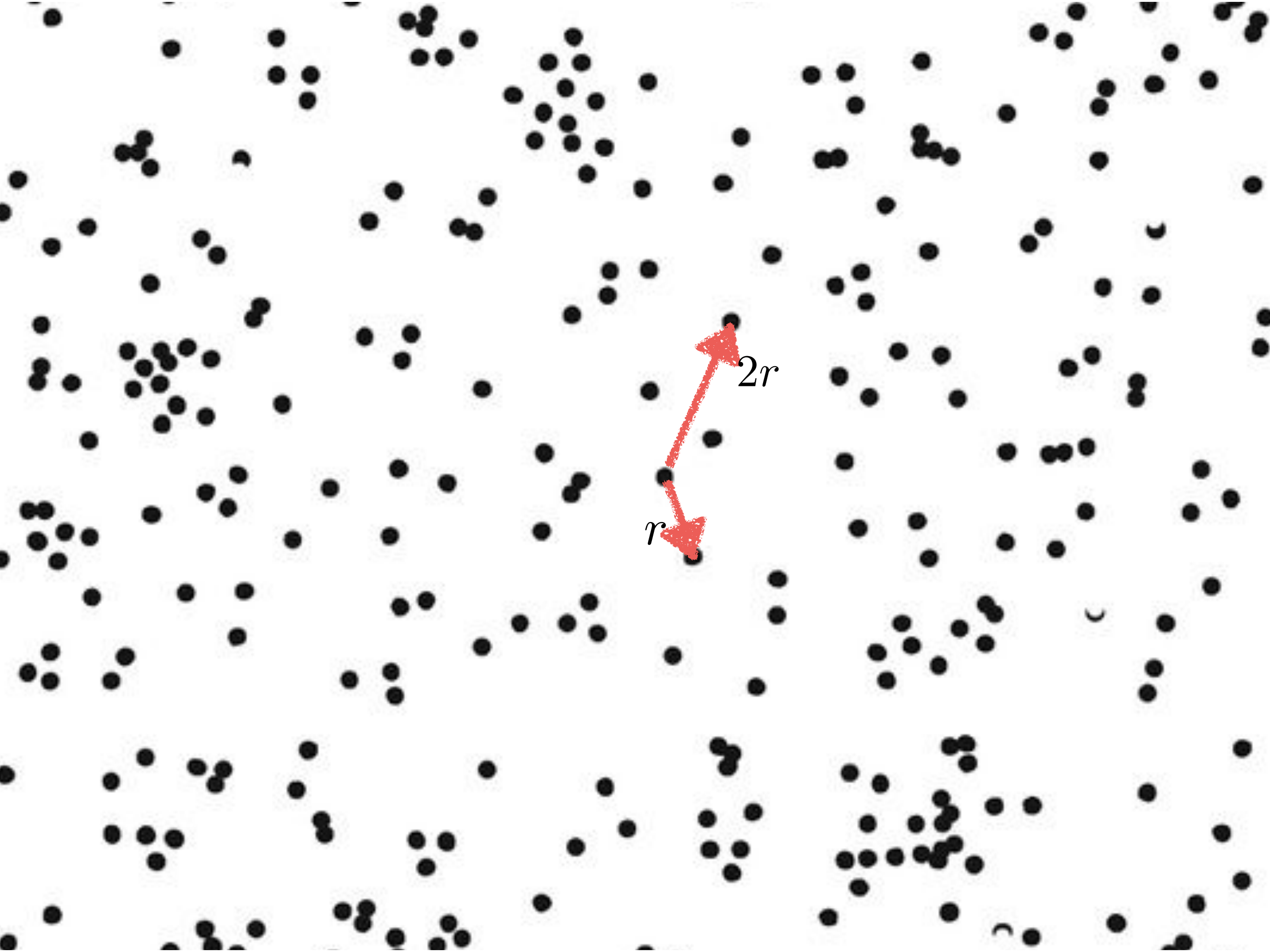
Due osservazioni:

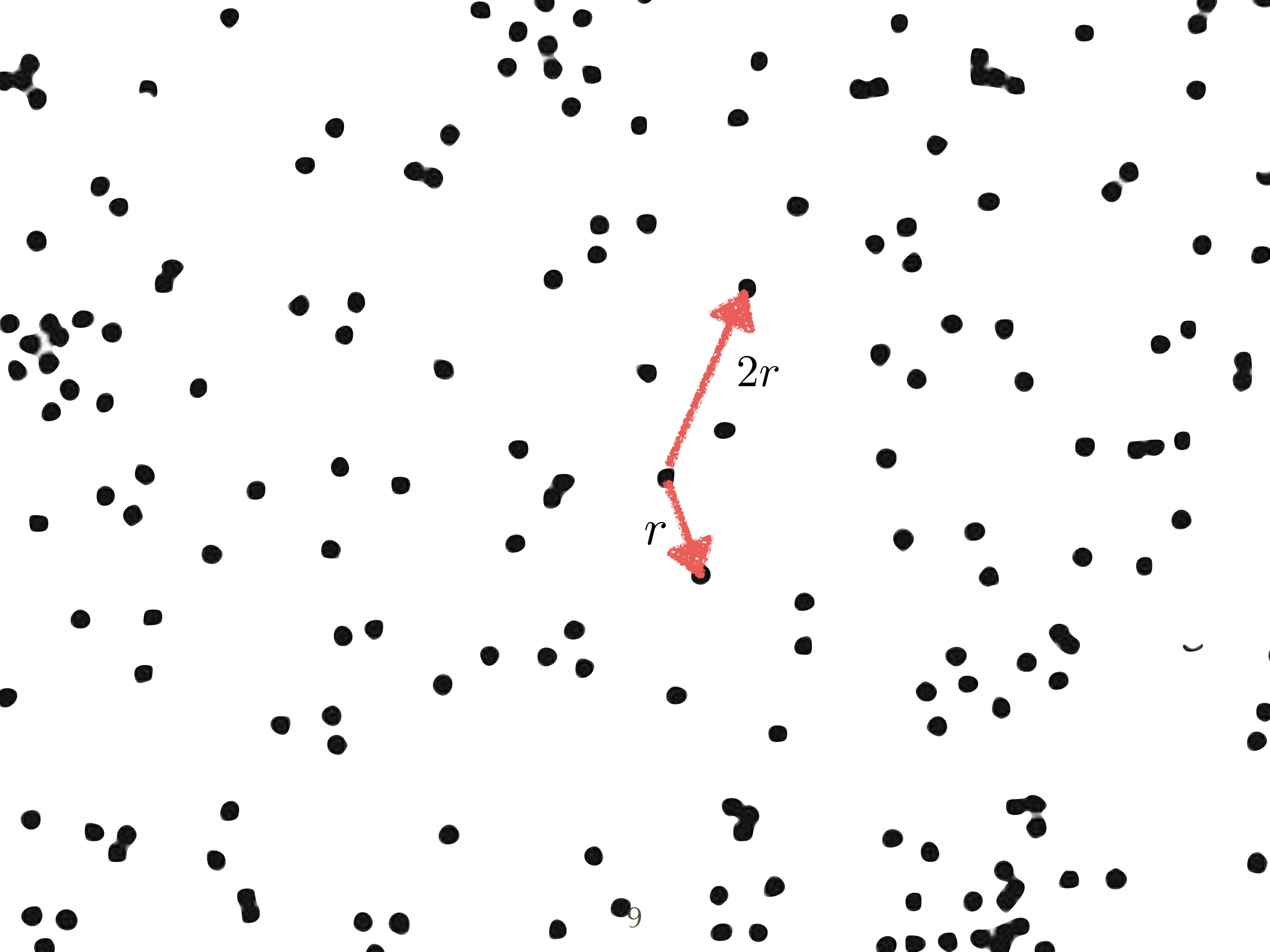
1. Slipher (1912) La luce proveniente dalle stelle lontane ci appare più 'rossa'
2. Hubble (1929) La velocità di recessione è proporzionale alla distanza

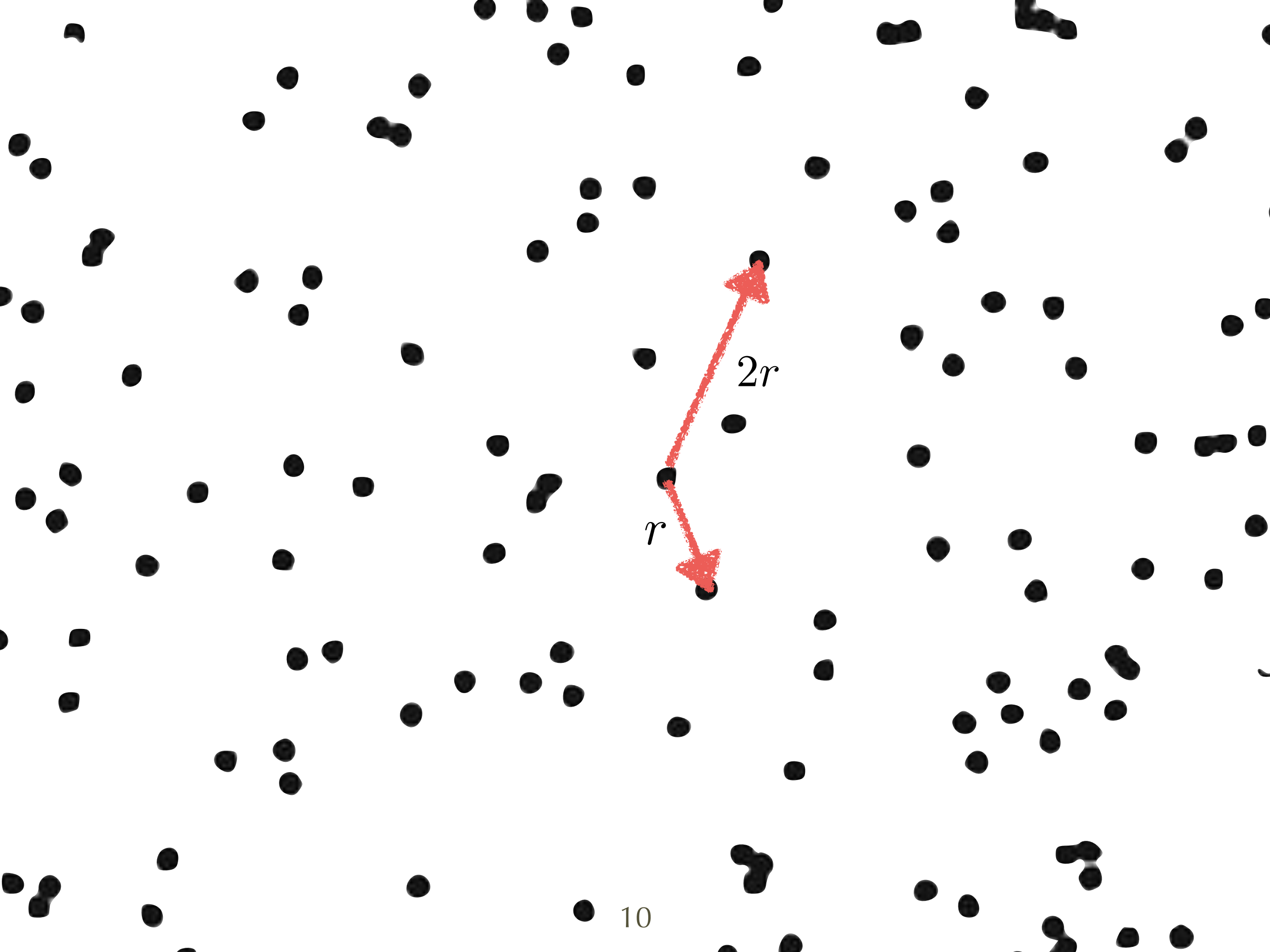


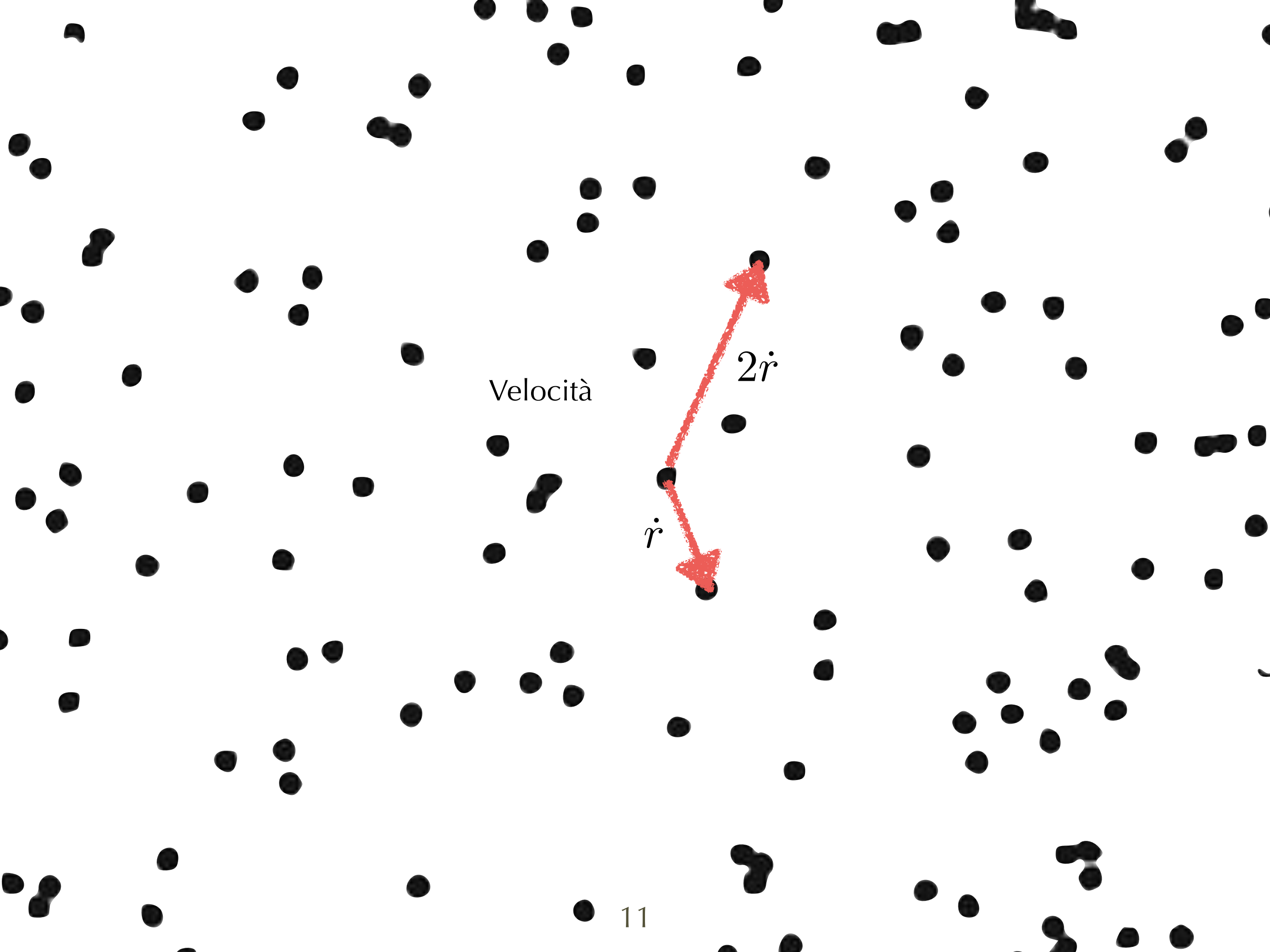
⇒ Effetto Doppler: le stelle si allontanano da noi

⇒ L'universo di sta espandendo





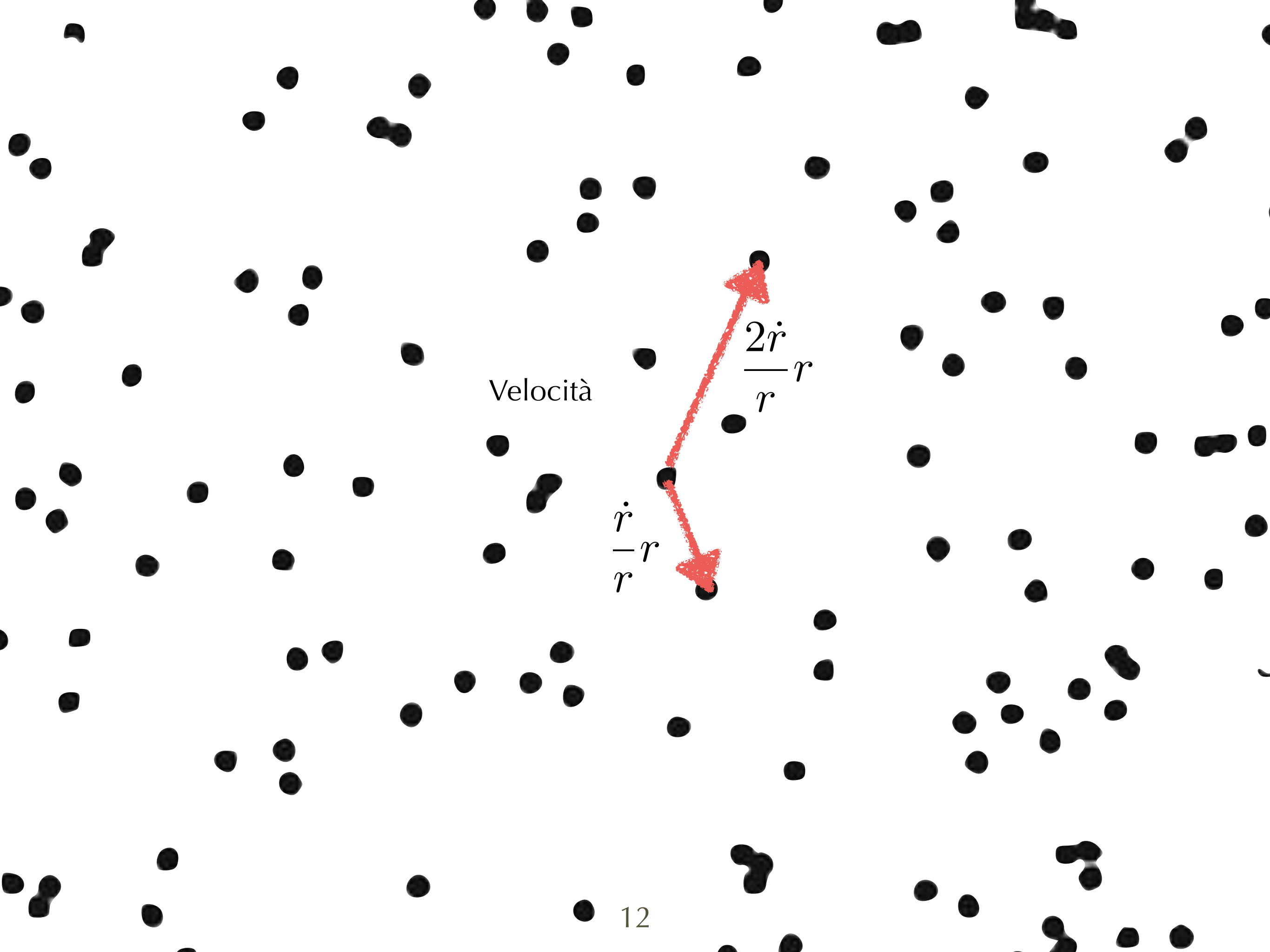




Velocità

$\dot{r}$

$2\dot{r}$



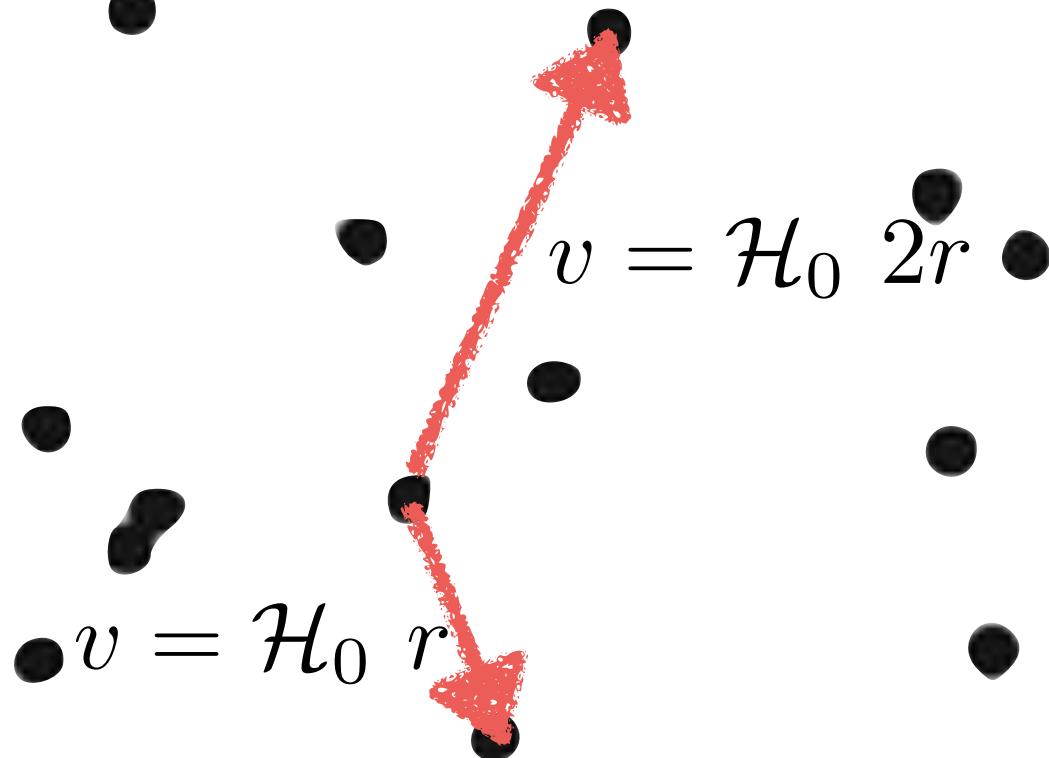
Velocità

$$\frac{2\dot{r}}{r}r$$

$$\frac{\dot{r}}{r}r$$

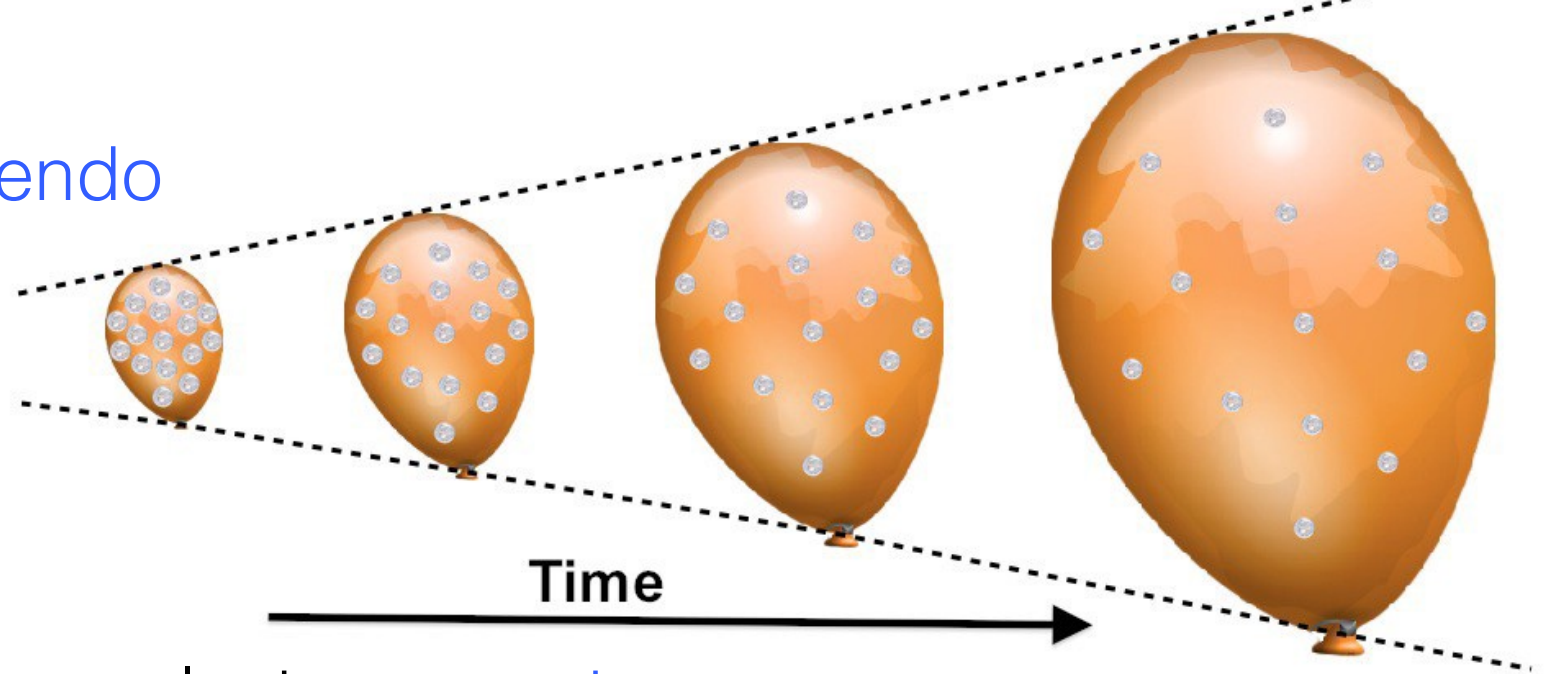
Velocità

$$\frac{2\dot{r}}{r}r$$
$$\frac{\dot{r}}{r}r$$



$$\mathcal{H}_0 = \frac{\dot{r}}{r} \approx 100 \text{ km/sec/MPC}$$

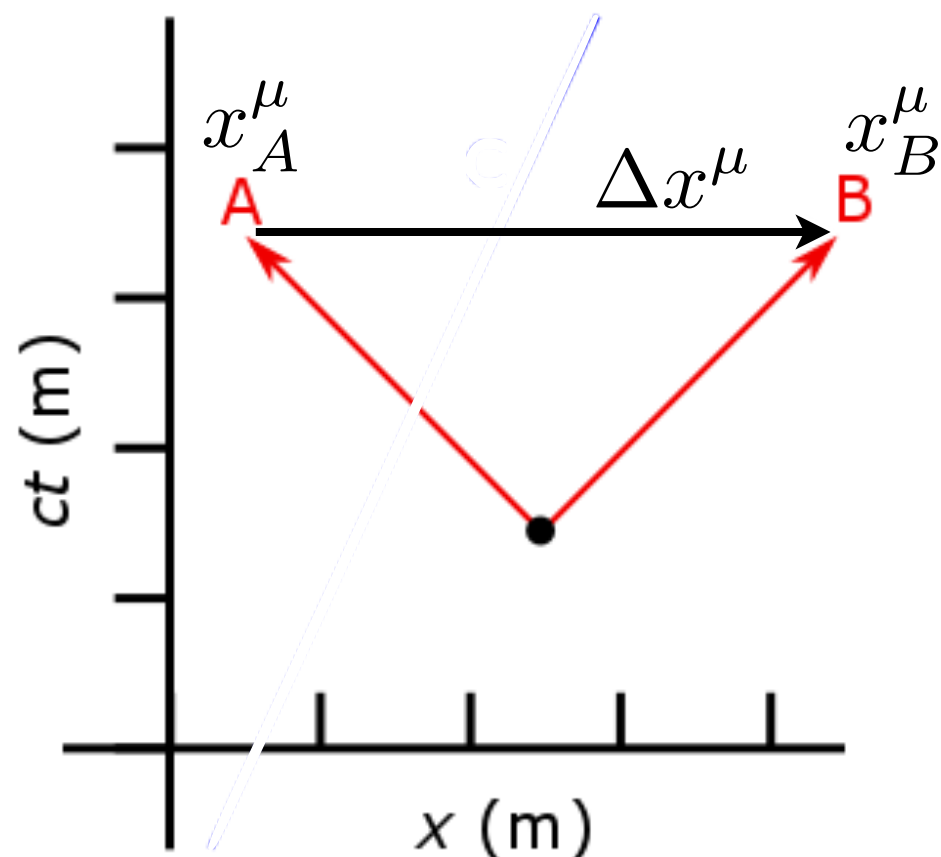
- Lo **spazio** si sta **espandendo**



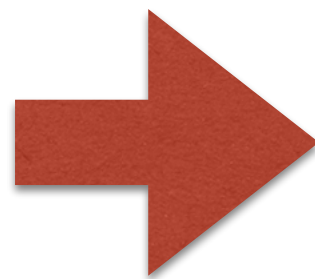
- La **distanza** fra ogni corpo celeste **aumenta**

$$s^2 = -c^2 \cancel{t^2} + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

$$s^2 = \eta_{\mu\nu} \Delta x^\mu \Delta x^\nu \Rightarrow g_{\mu\nu} \Delta x^\mu \Delta x^\nu$$



$$\eta_{\mu\nu} = \eta^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix}$$



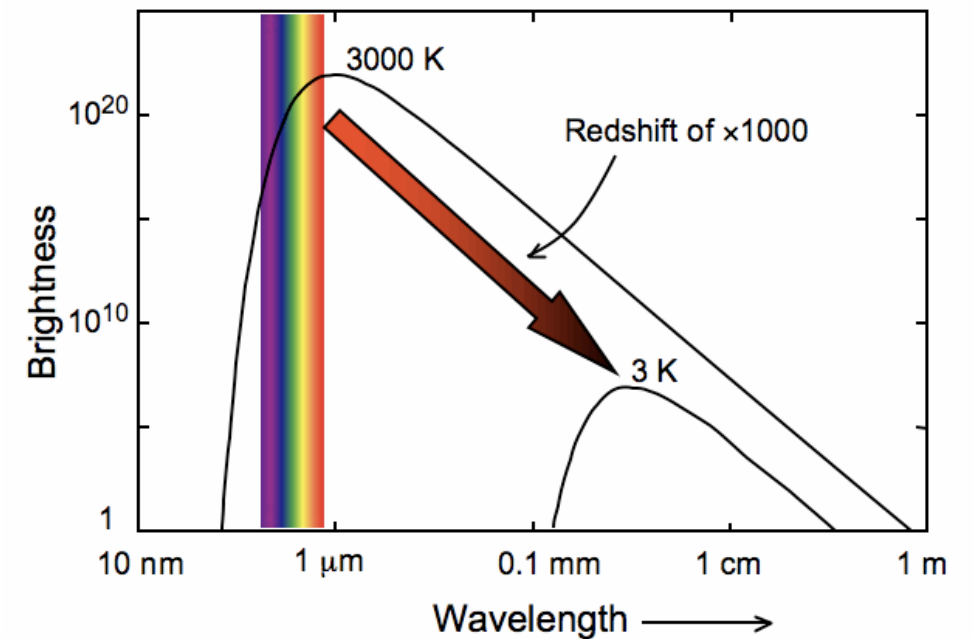
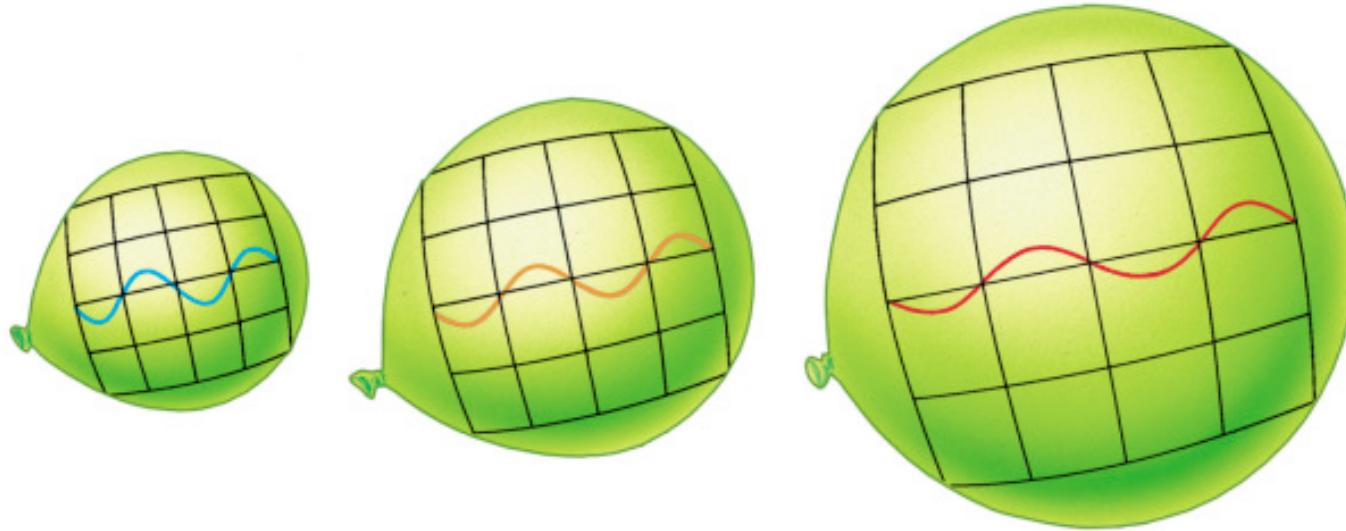
$$\eta_{\mu\nu}(t) = a(t) \times \eta_{\mu\nu}$$

$$g_{\mu\nu}(t) = a(t) \times g_{\mu\nu}$$

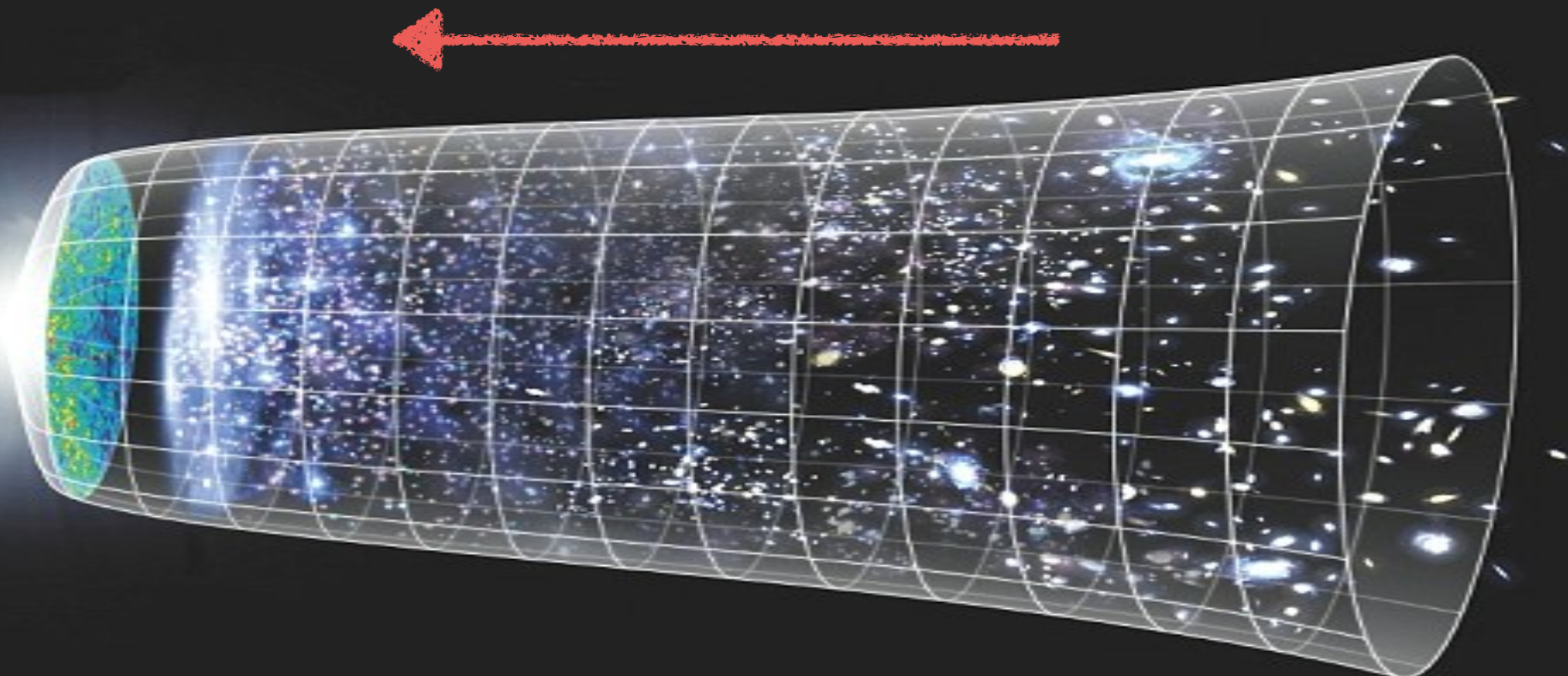
$a(t)$ è detto fattore di scala

Due conseguenze

- È possibile che la radiazione ci sia ma noi **non la vediamo**
 - **Lunghezza d'onda** sempre più piccola



- Possiamo **riavvolgere il tempo**
 - Singolarità: **Big Bang**



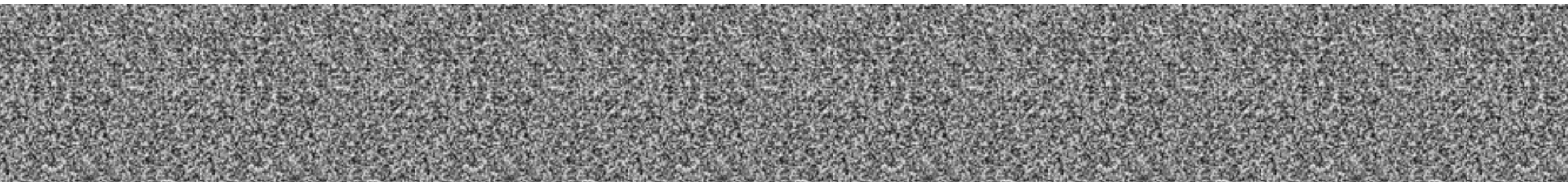




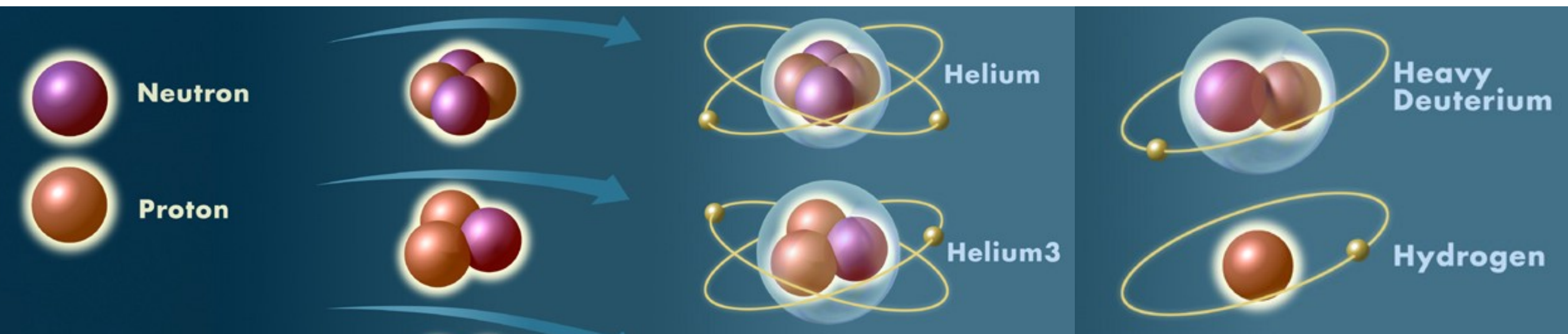


1. Puntando la parabola in qualsiasi direzione misuriamo un segnale

- Rumore bianco (2.73 K)
- Microonde
- Proviene da 13.5 Miliardi di anni fa



2. Il segnale che osserviamo è la CMB (cosmic microwave background) e la sua origine è il processo che ha portato alla formazione dei primi atomi dell'universo



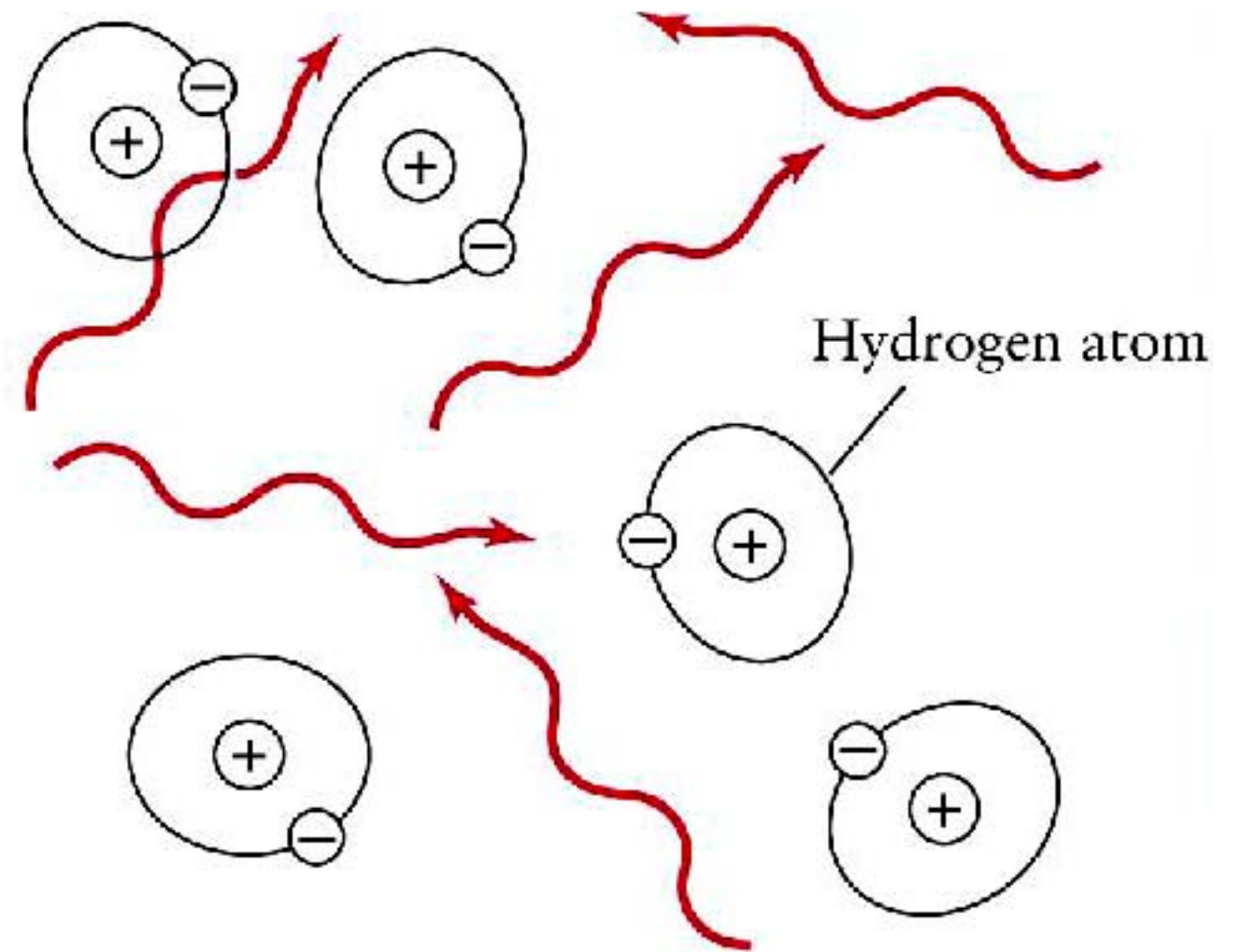
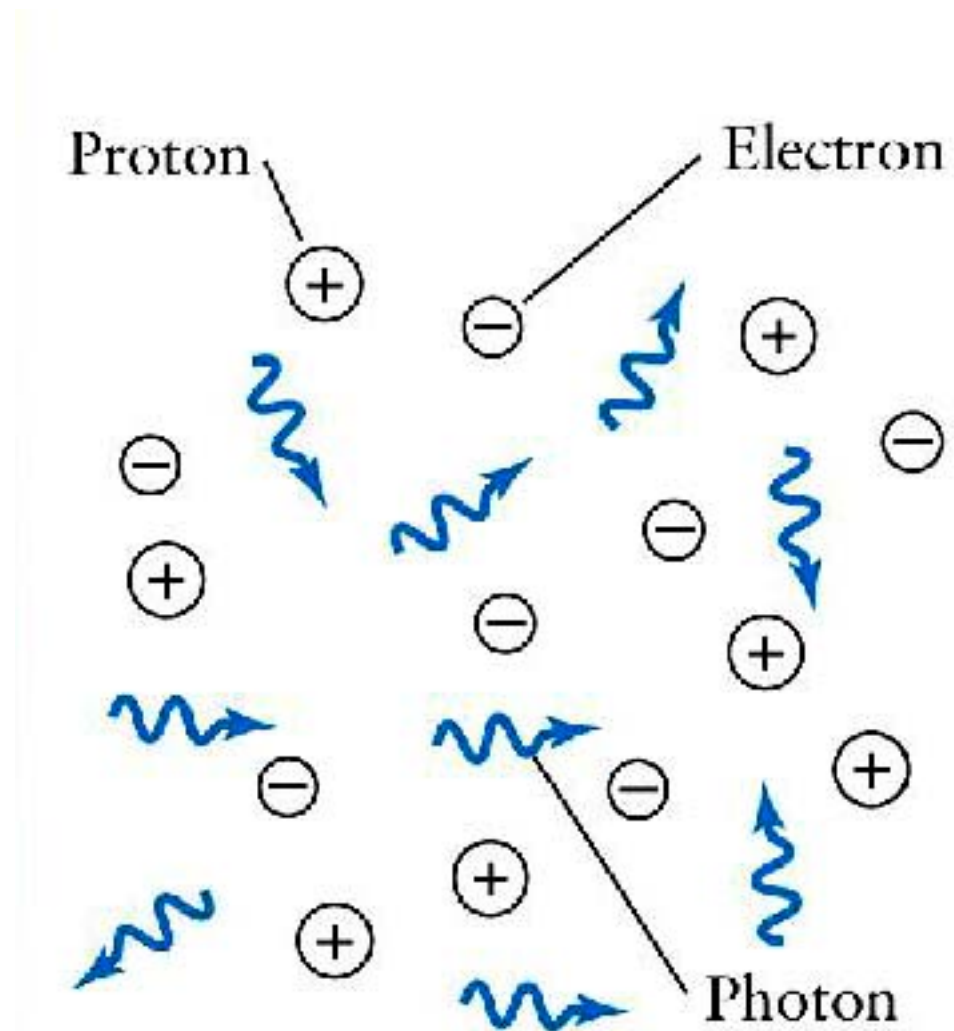
3. Ha reso l'universo arancione per milioni di anni

Torniamo indietro nel tempo

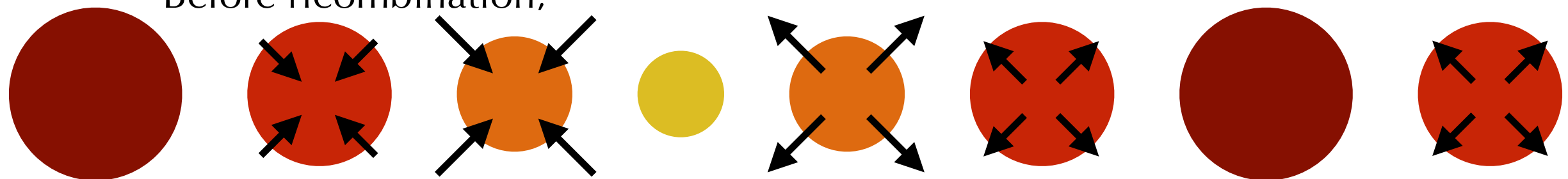


Plasma

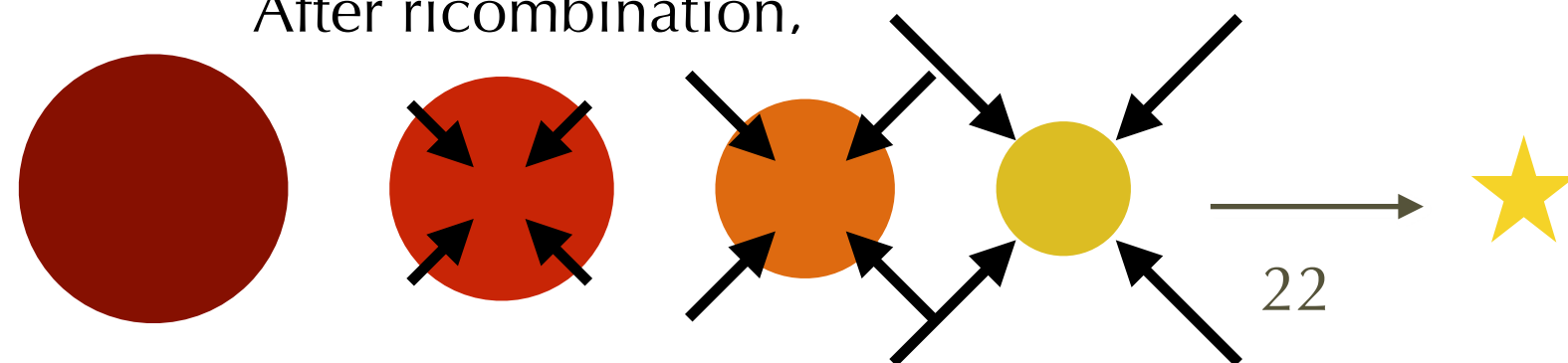
Ricombinazione



Before ricombination,

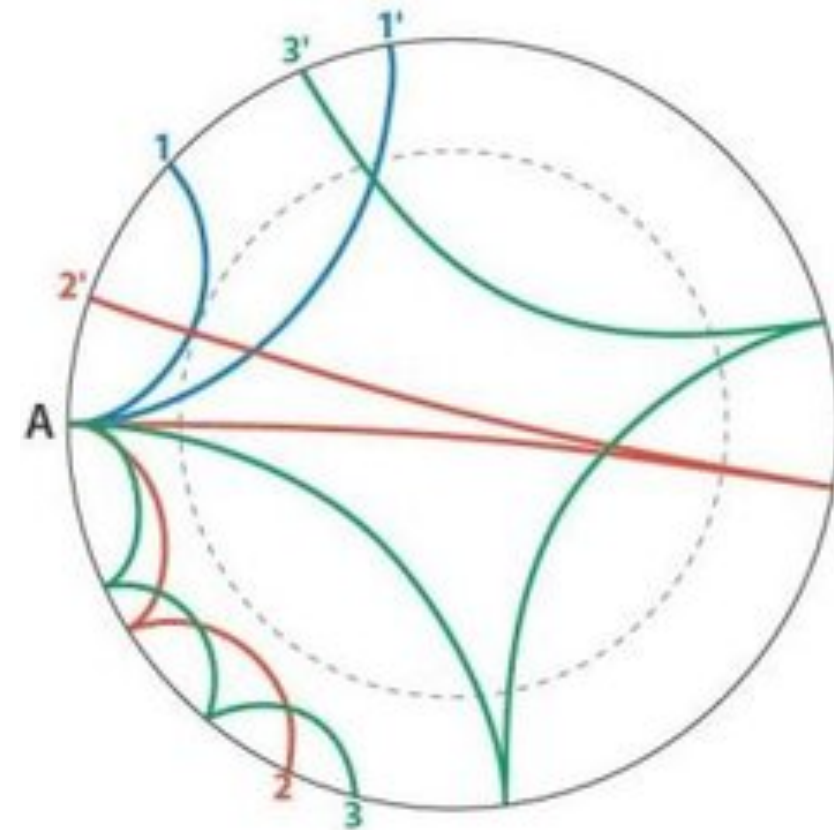
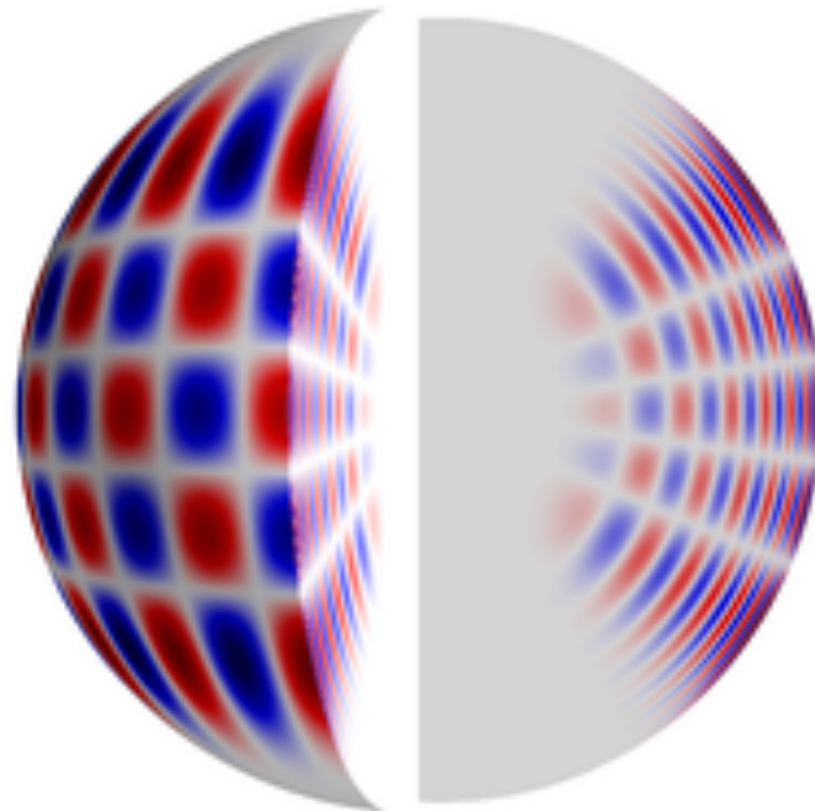
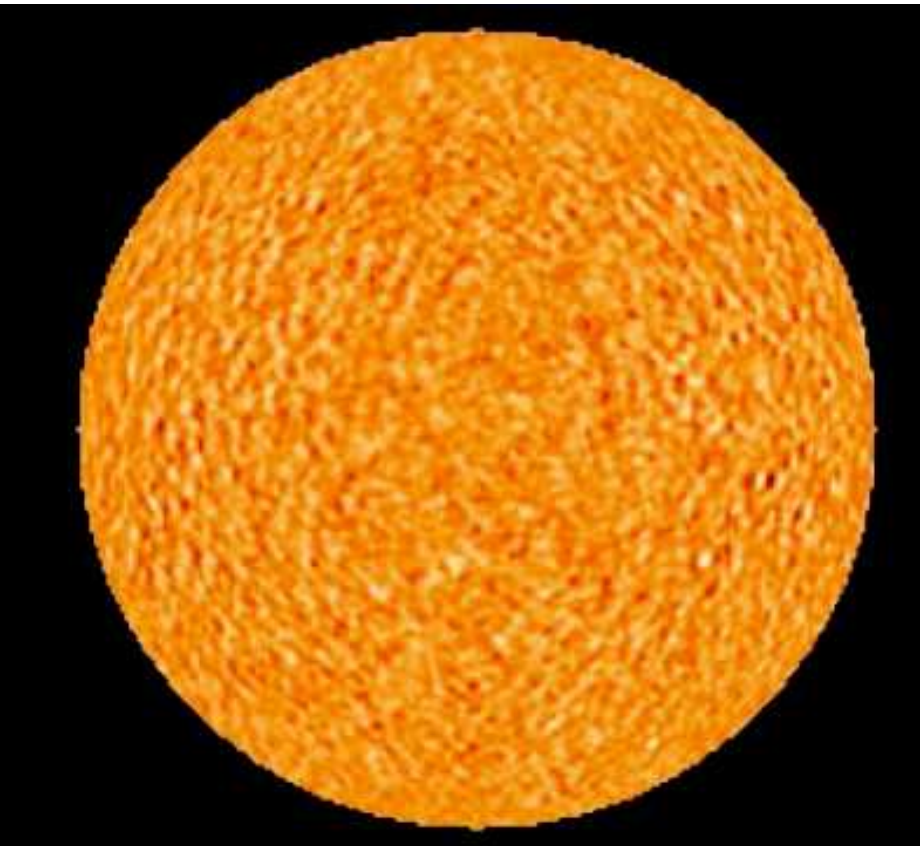


After ricombination,



Il Sole: esempio di plasma oscillante

- Oscillazioni nel plasma $\Rightarrow$ oscillazioni del sole $\Rightarrow$ Eliosismologia



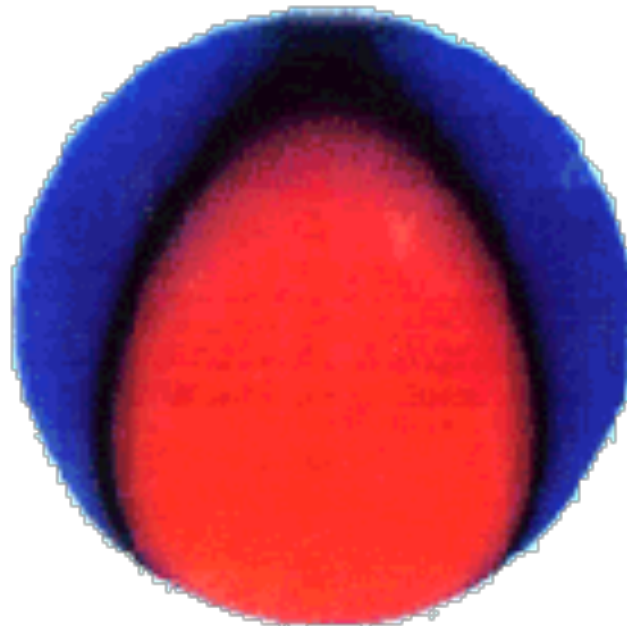
- Le oscillazioni permettono di studiare la struttura interna del sole
- Le fluttuazioni non si possono propagare in maniera arbitraria ma sono costrette dalla geometria ad assumere ben determinate proporzioni secondo quelli che sono i modi normali di oscillazione

Modi normali di oscillazione della sfera



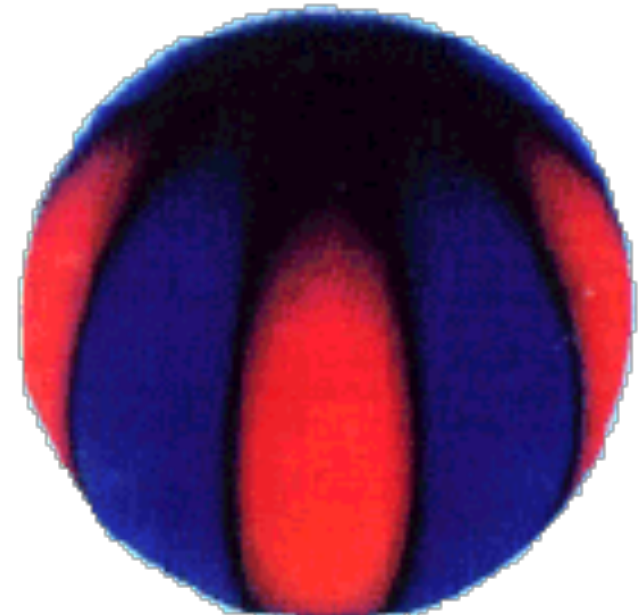
$$L = 2$$

$$M = 0$$



$$L = 2$$

$$M = 2$$



$$L = 5$$

$$M = 5$$



$$L = 20$$

$$M = 0$$



$$L = 20$$

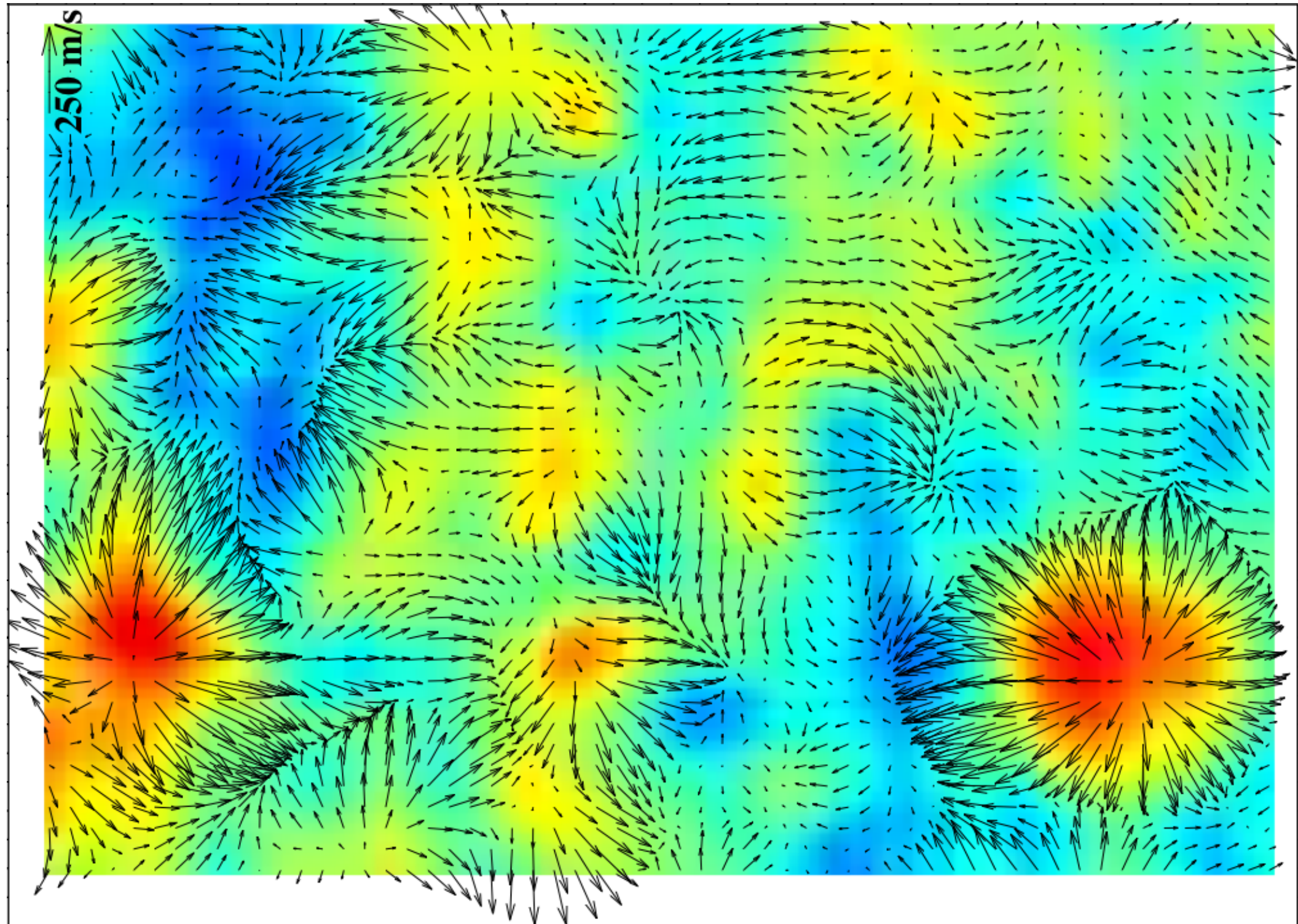
$$M = 17$$



$$L = 20$$

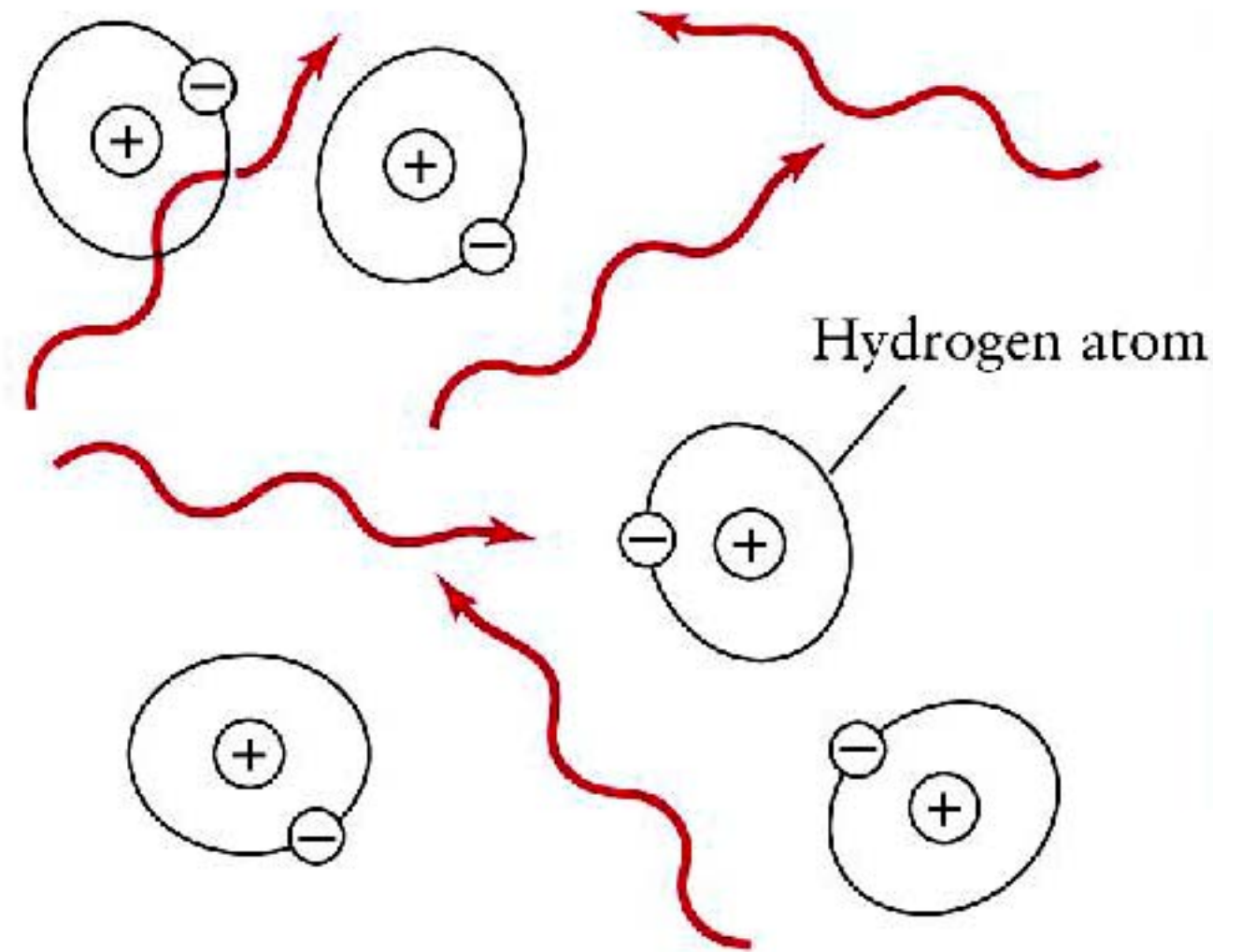
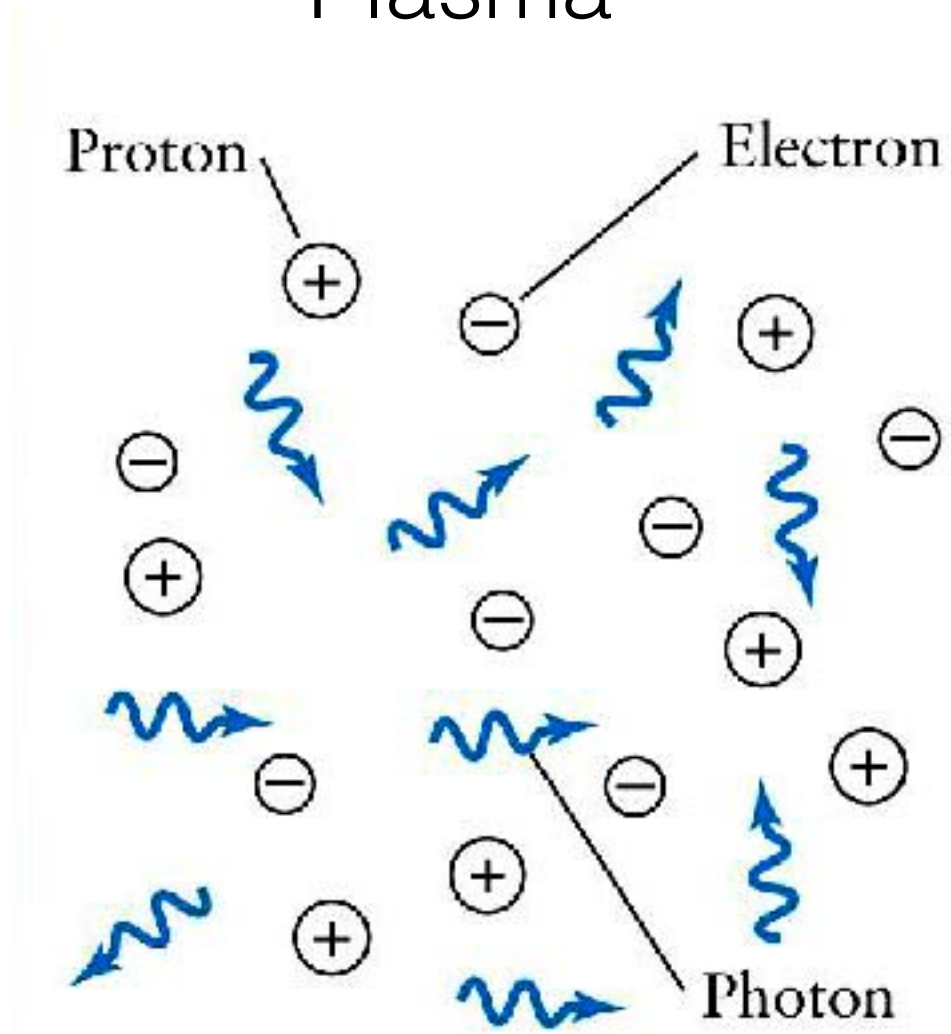
$$M = 20$$

Fluttuazioni di temperatura e velocità

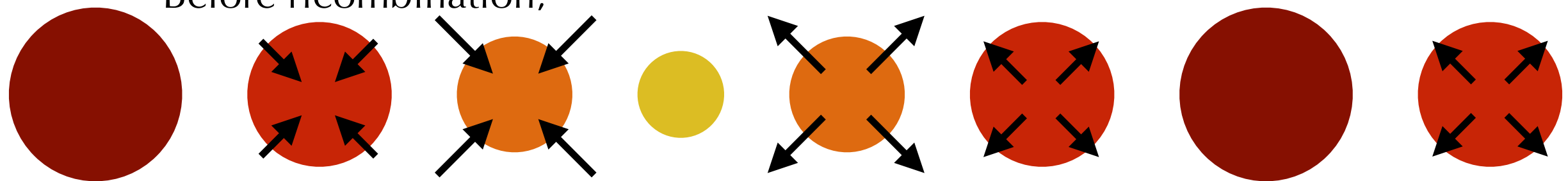


Plasma

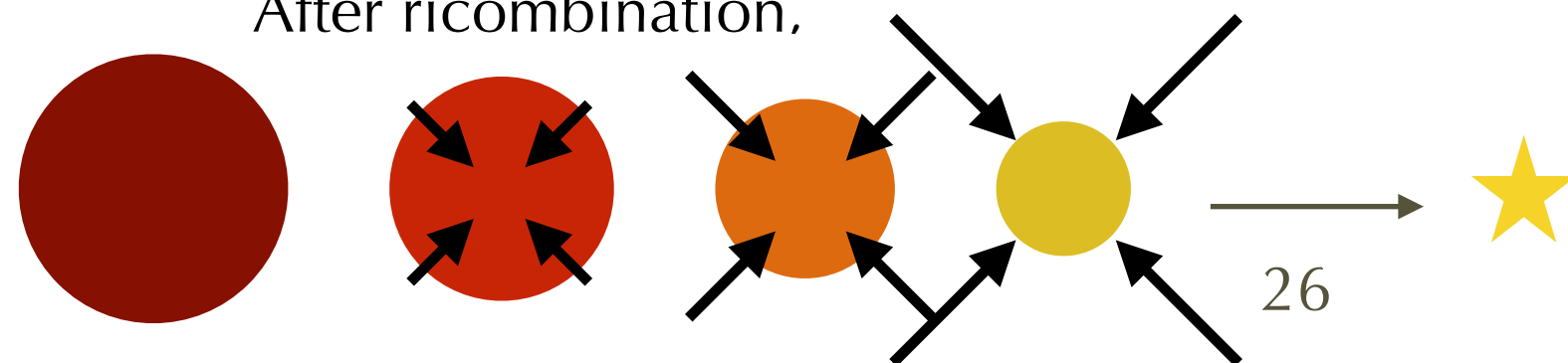
Ricombinazione



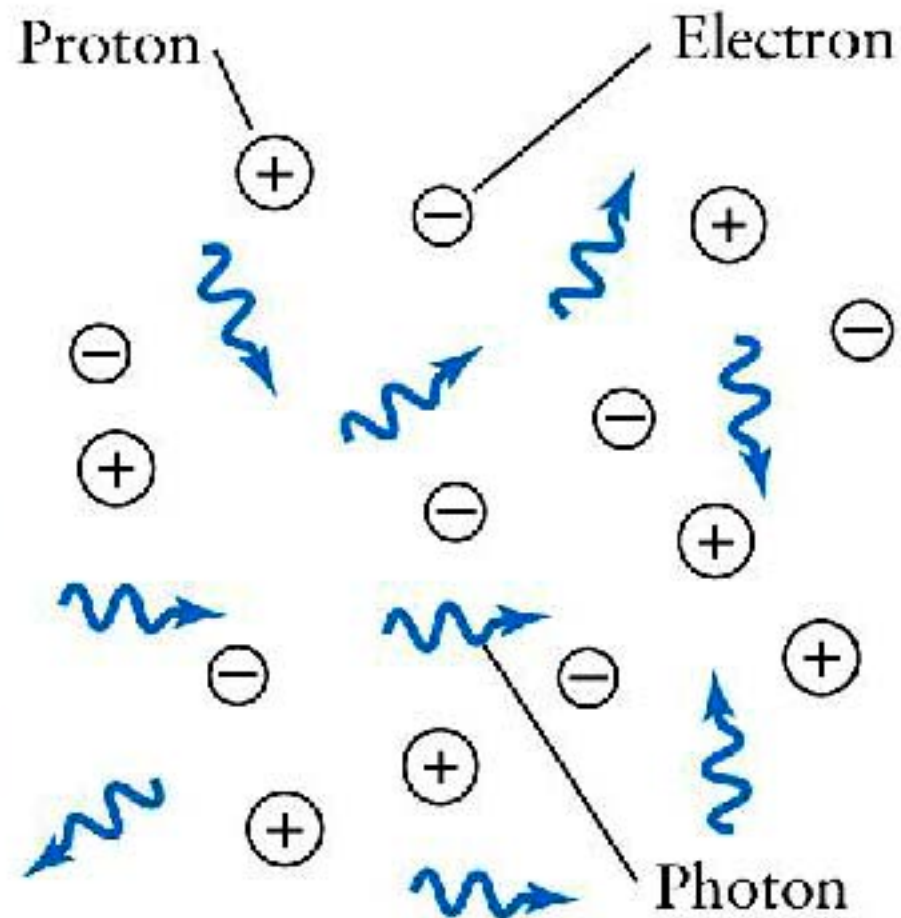
Before ricombination,



After ricombination,

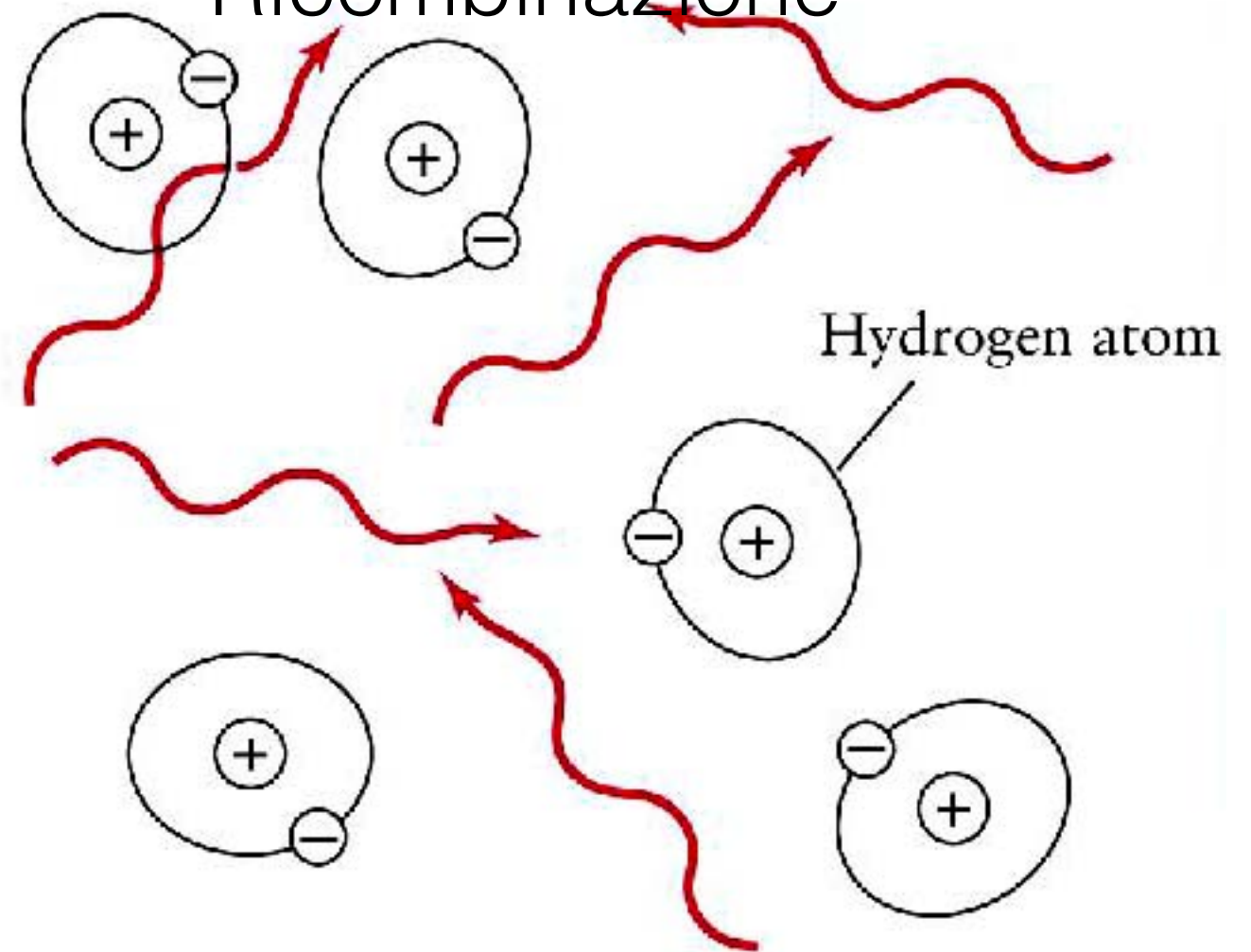


Plasma



Universo Opaco

Ricombinazione



Universo trasparente

$t = 0$ —————→ $t \approx 380\,000$ anni —————→ ora

$$n_{\gamma} \approx 10^{10} n_b$$

$$13.6 \text{ eV} \rightarrow 1/4 \text{ eV} \approx 3000 \text{ K}$$



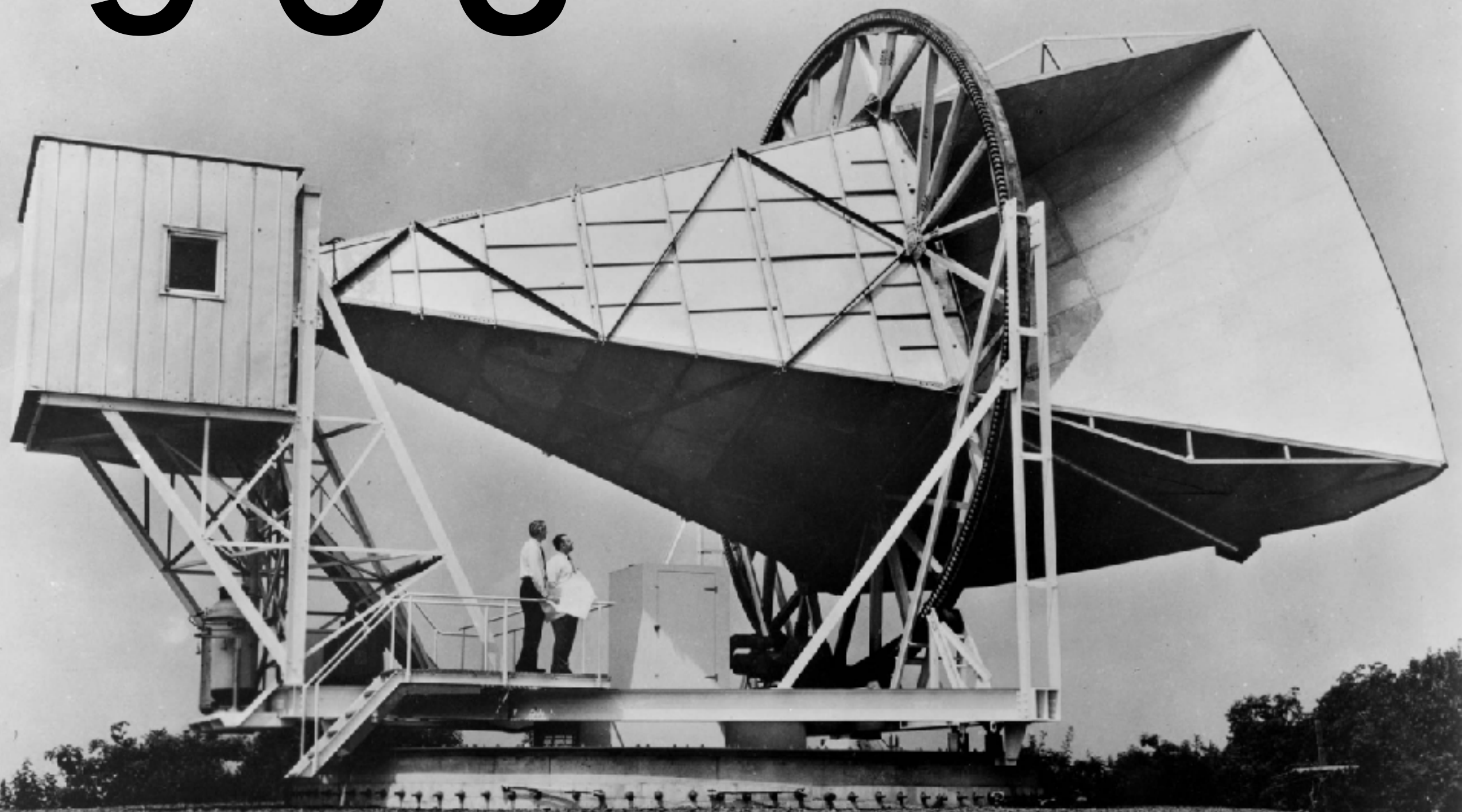


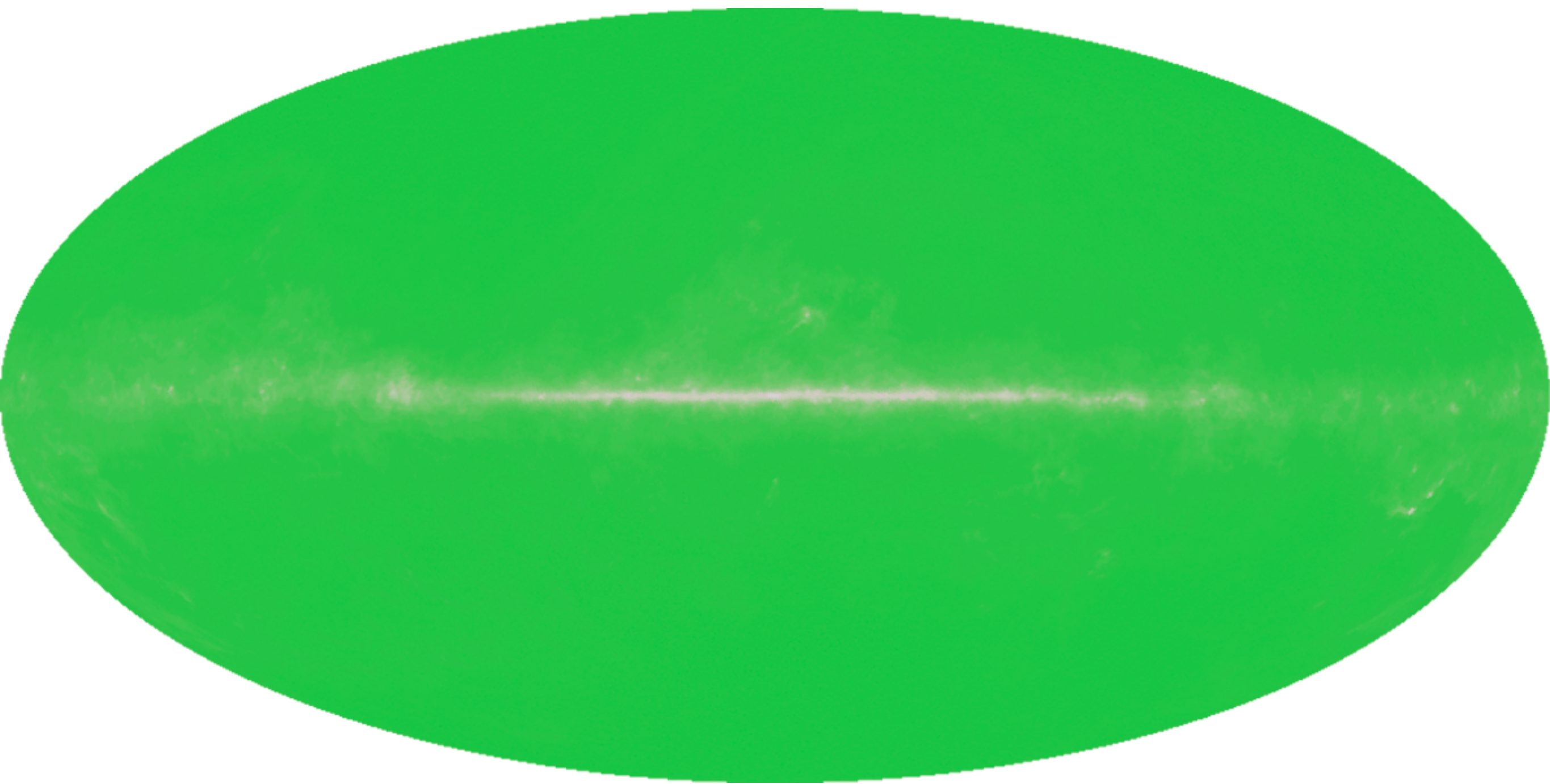


Le strutture che vediamo ora derivano dalle fluttuazioni iniziali

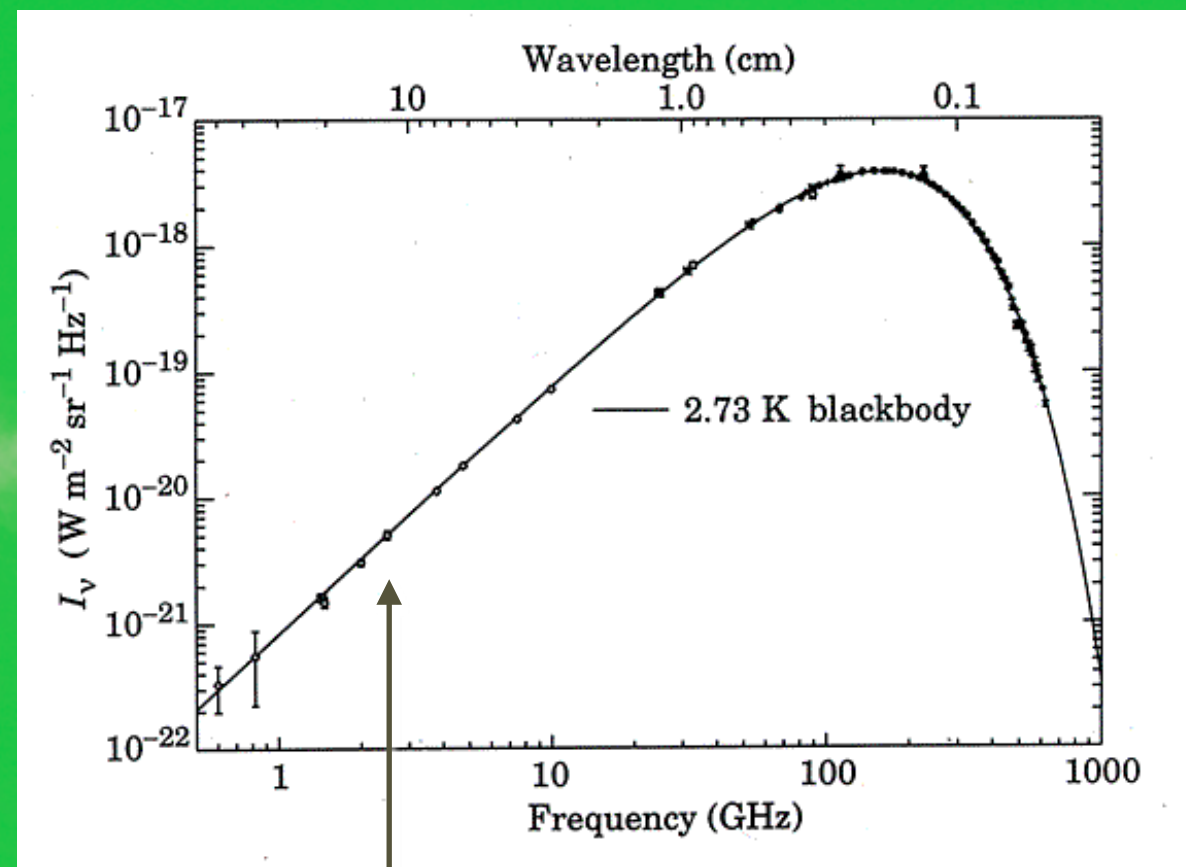
1965

Penzias & Wilson





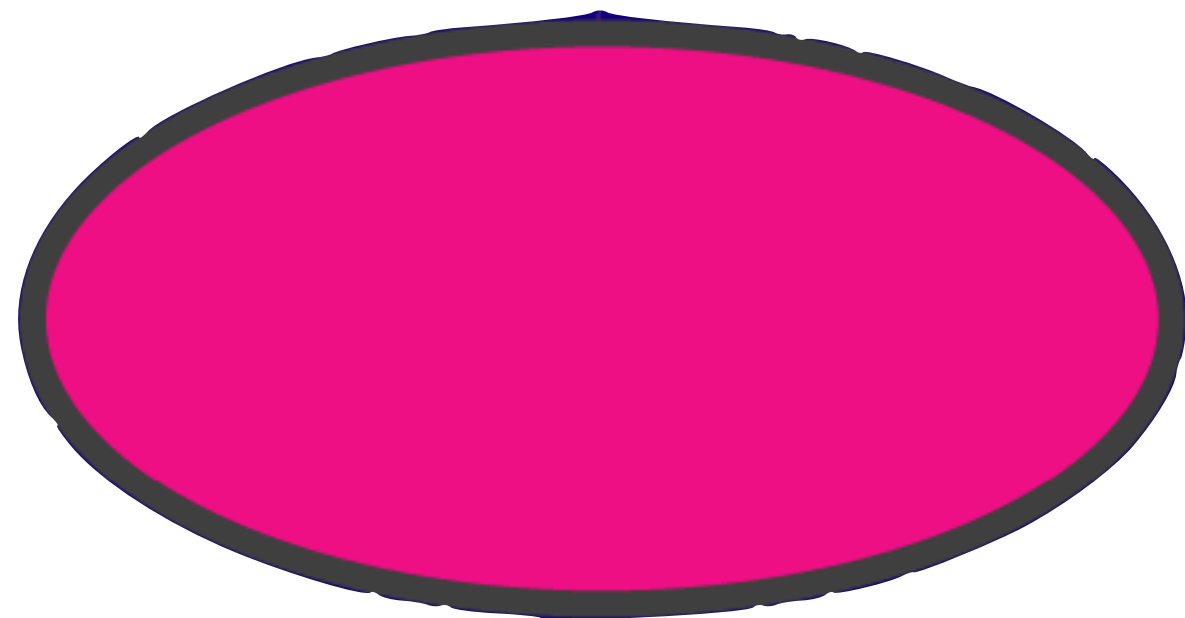
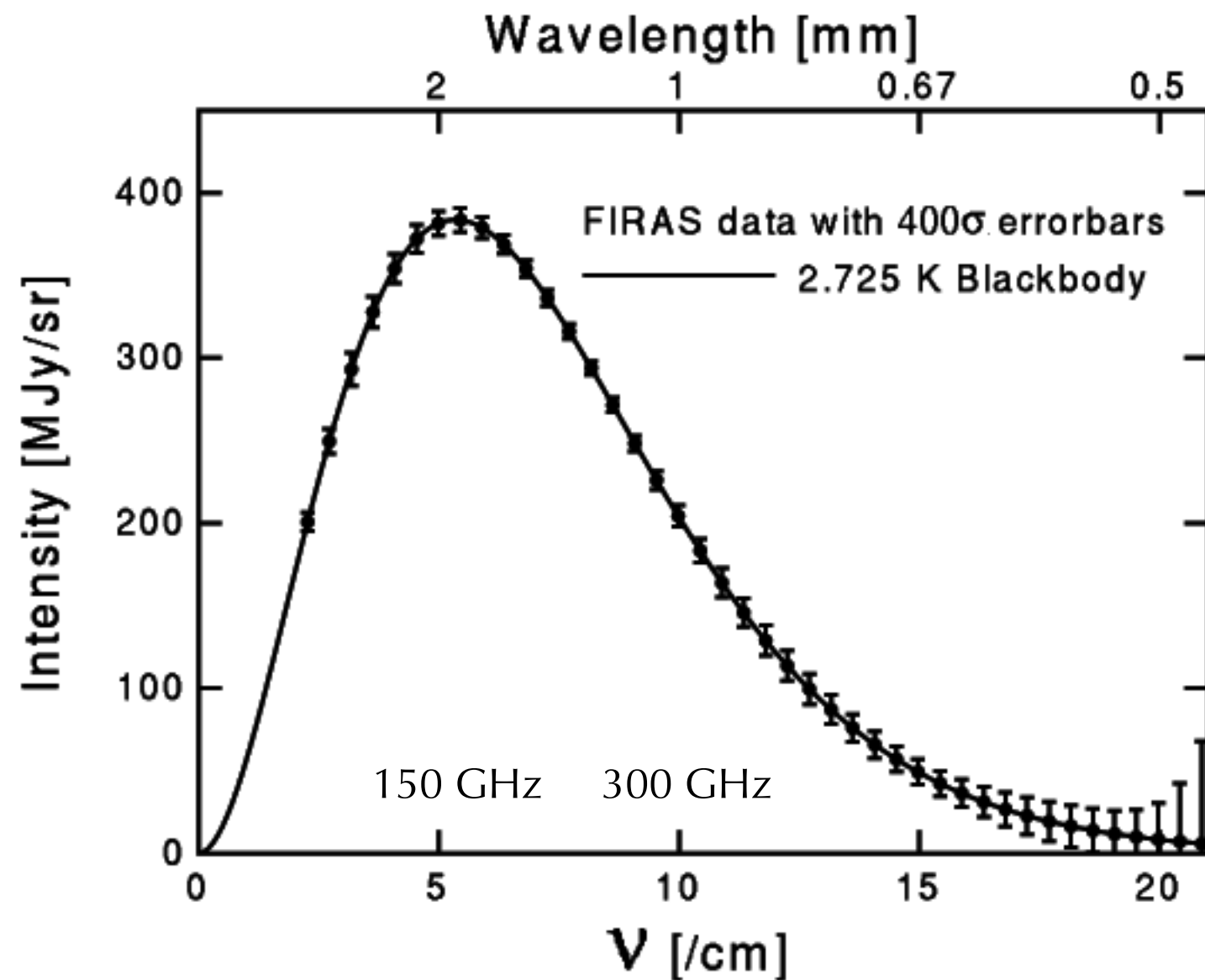
Spettro (di corpo nero) isotropo a 2.73 K



Multipoli

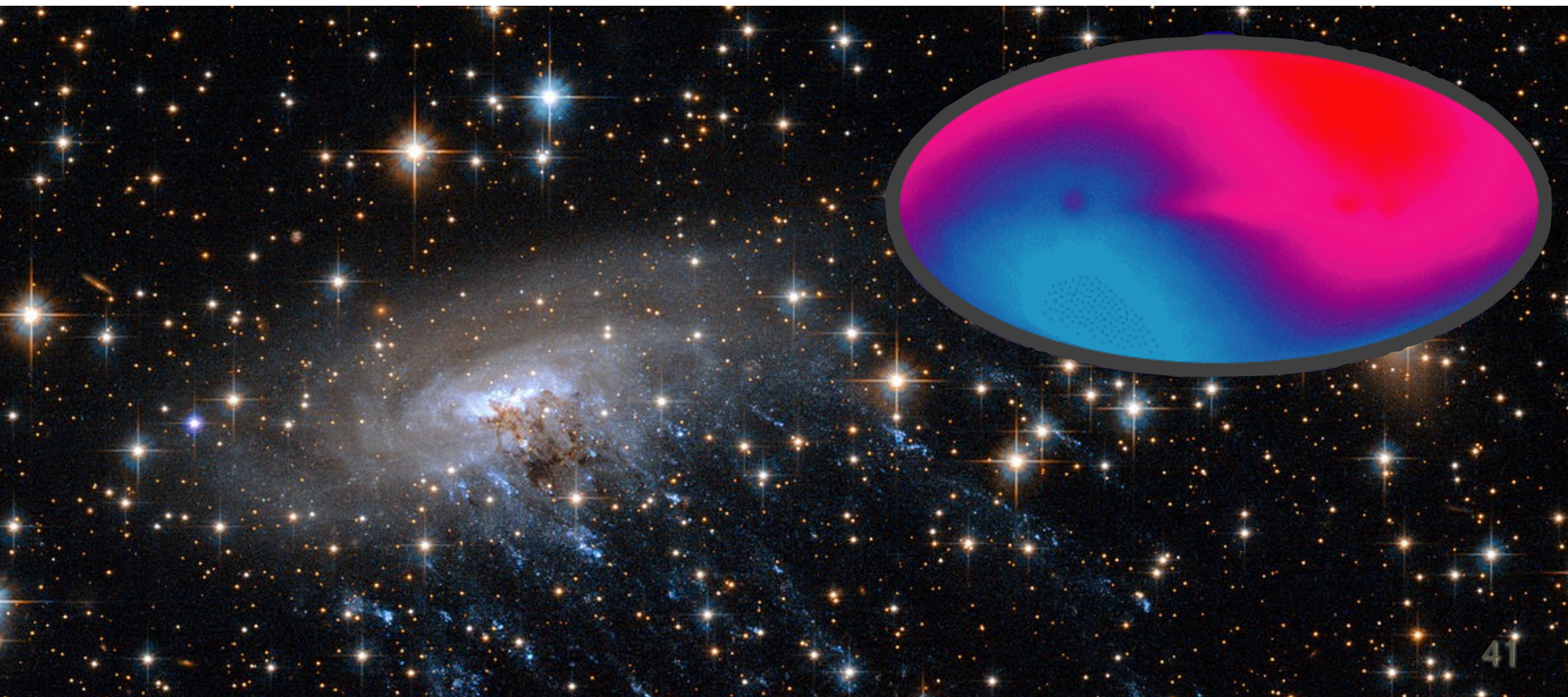
- **Monopole** term: 2.725 K blackbody
 - Arno Penzias and Robert W. Wilson 1965
 - best measurement done by **FIRAS** instrument on COBE satellite (absolute temperature instrument)

$O(1)$



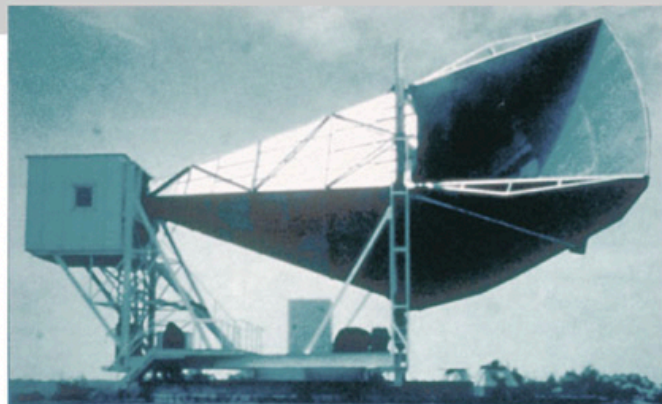
Multipoli

- **Monopole** term: 2.725 K blackbody $O(1)$
- **Dipole** term: 3.355 mK $O(10^{-3})$
 - **Doppler shift** caused by the Solar system motion relative to the nearly isotropic blackbody field
 - $V_{\text{solar system}} = (369.0 \pm 0.9) \text{ km/s}$
 - determine the “**absolute rest frame**” of the Universe

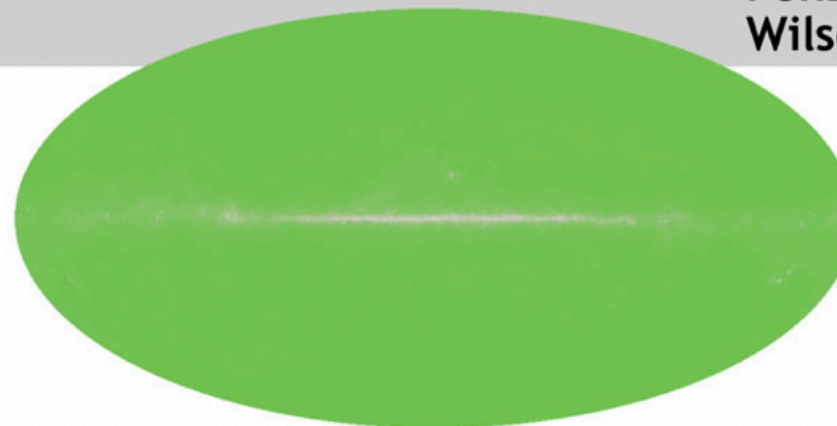


Risoluzione spaziale

1965



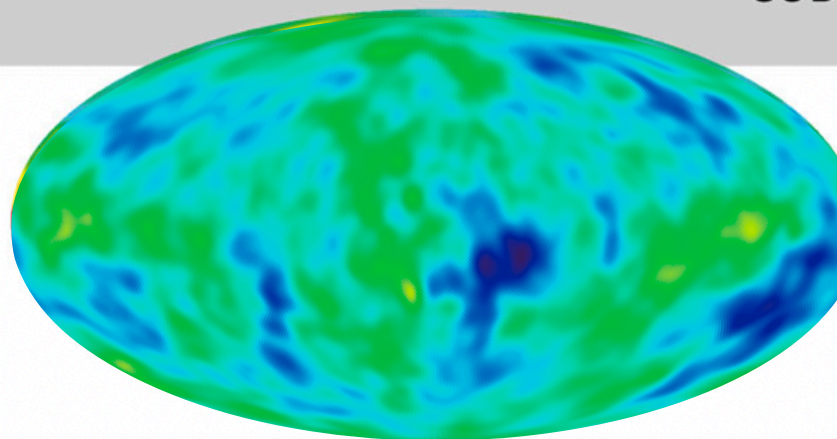
Penzias and
Wilson



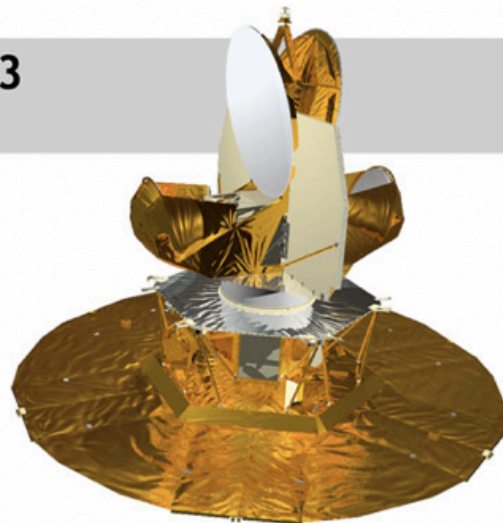
1992



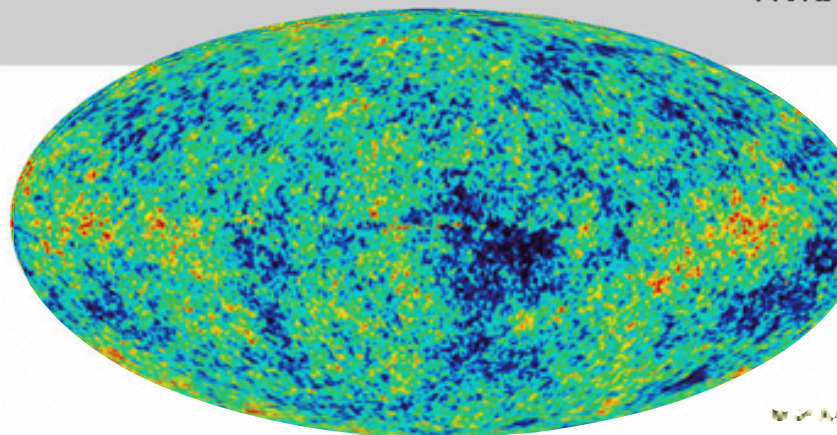
COBE



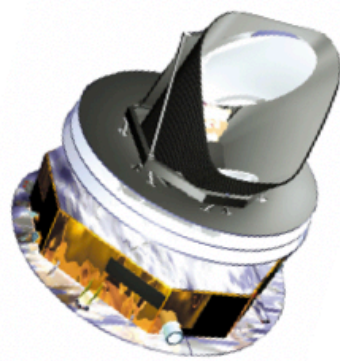
2003



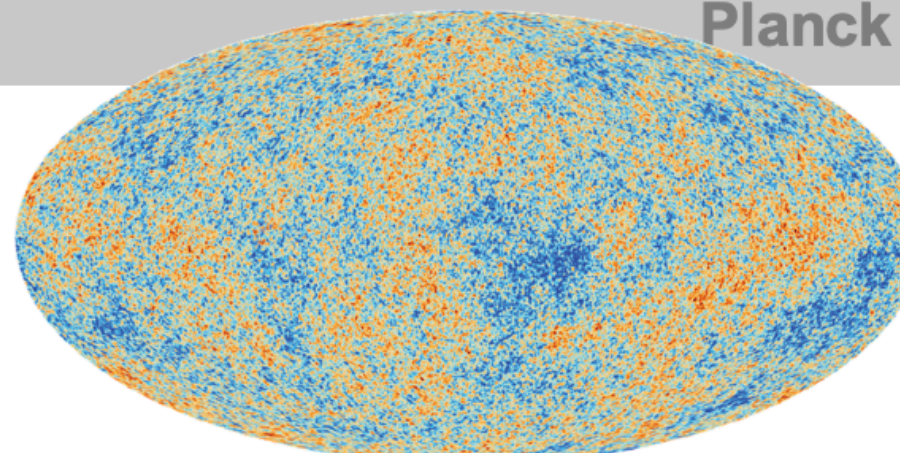
WMAP



2009 2018



Planck

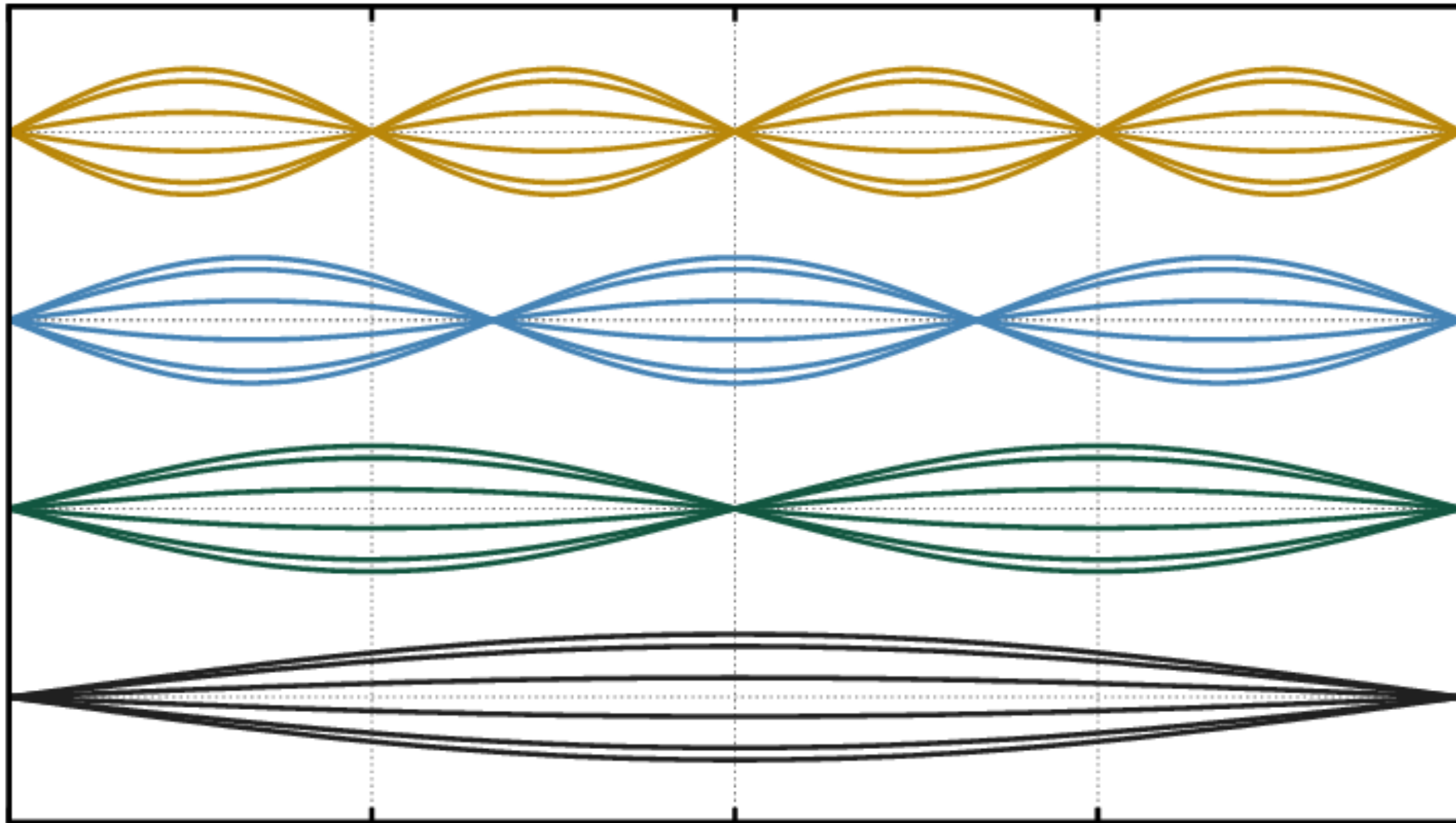


- Che informazioni ricaviamo dai **multipoli più alti** (oscillazioni)?



- chiunque di voi abbia studiato le **serie di Fourier** capisce che se riuscissi a misurare le ampiezze relative dei **modi di vibrazione** potrei ricostruire lo **stato iniziale** (come era stata pizzicata la corda)

- Che informazioni ricaviamo dai **multipoli più alti** (oscillazioni)?



- Distinguere la **geometria** (frequenze proprie) dalle **condizioni iniziali** (ampiezze dei modi di oscillazione)



Le frequenze sono determinate dalla geometria

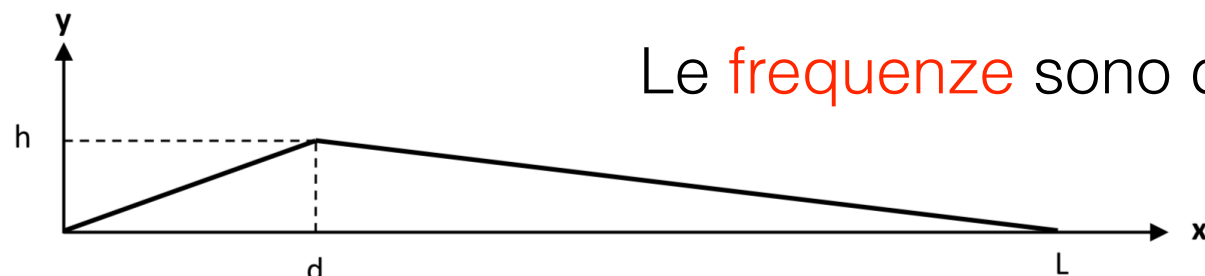
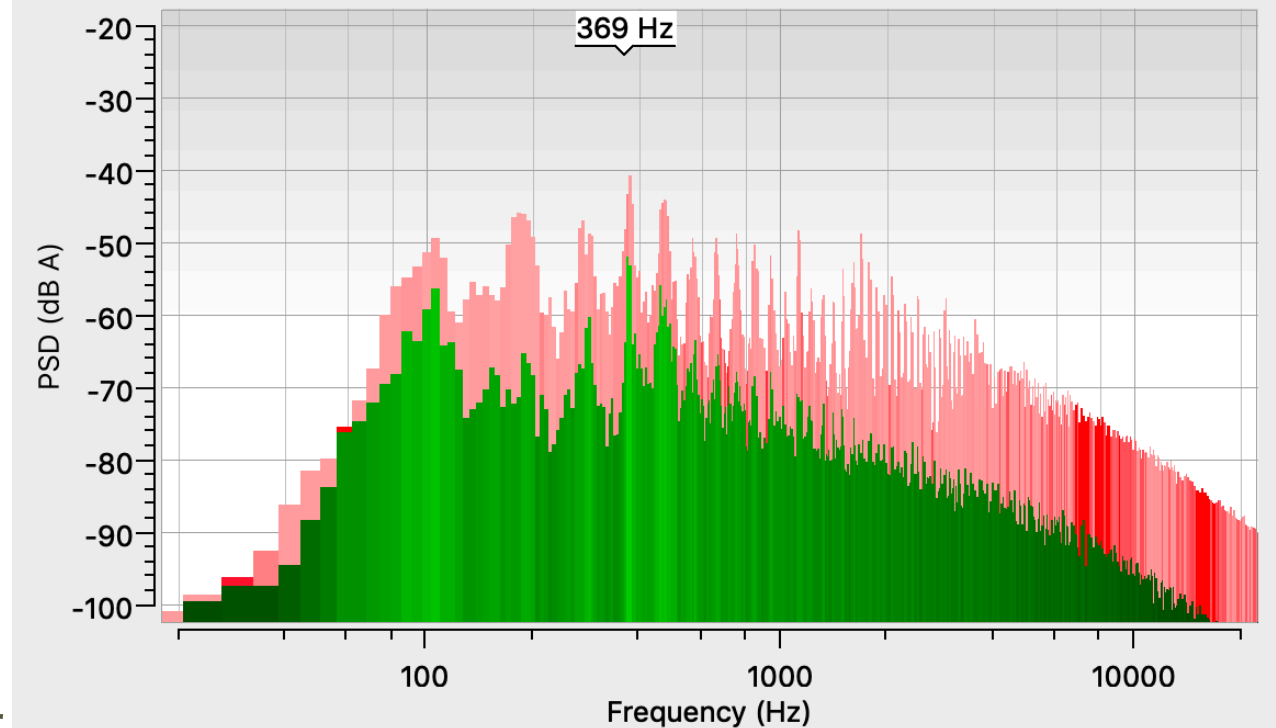
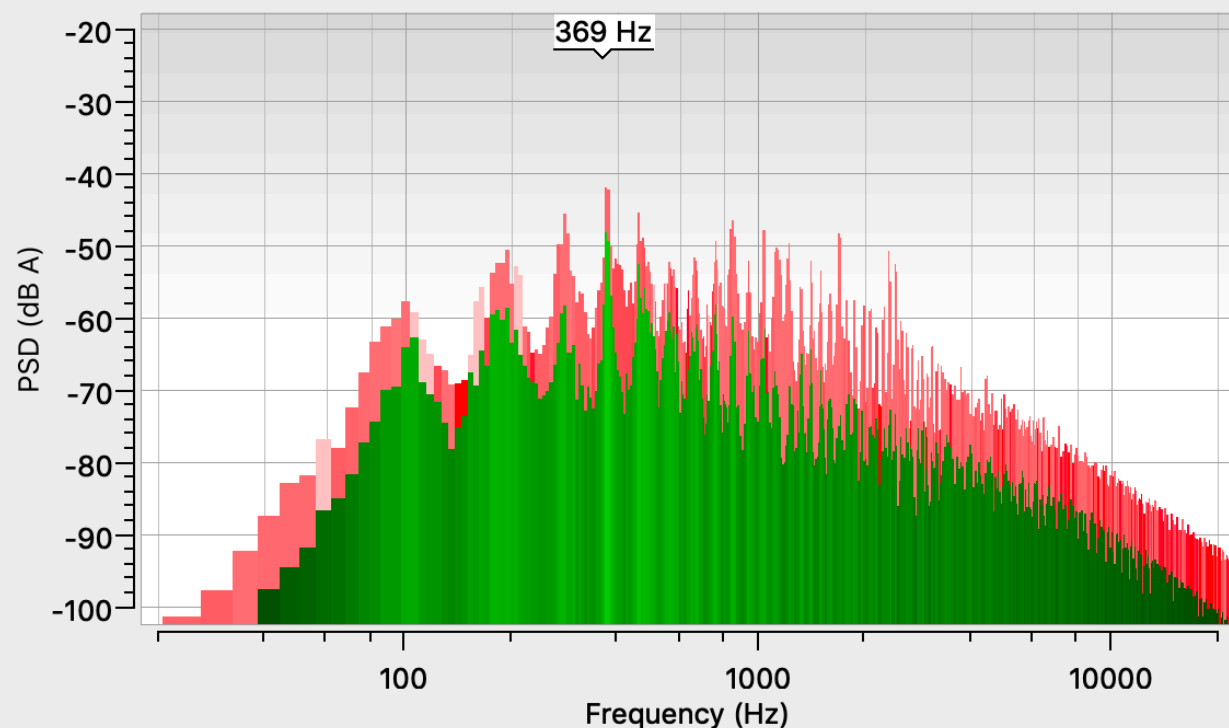


Figure 7: Initial conditions of the plucked string.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{hx}{d}, & 0 \leq x \leq d \\ \frac{h(L-x)}{L-d}, & d < x \leq L \end{cases}$$

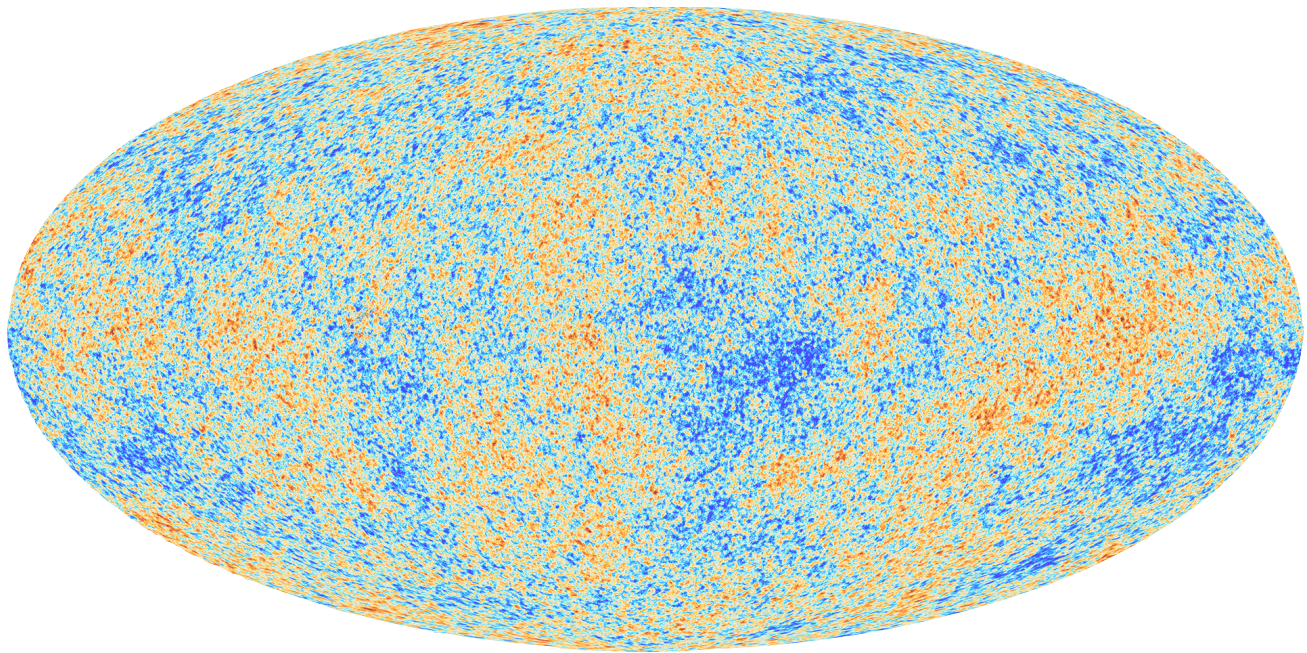
$$A_k = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) dx = \frac{2hL^2}{\pi^2 k^2 d(L-d)} \sin\left(\frac{k\pi d}{L}\right)$$

Le ampiezze delle singole frequenze danno informazioni su come è stata pizzicata la corda

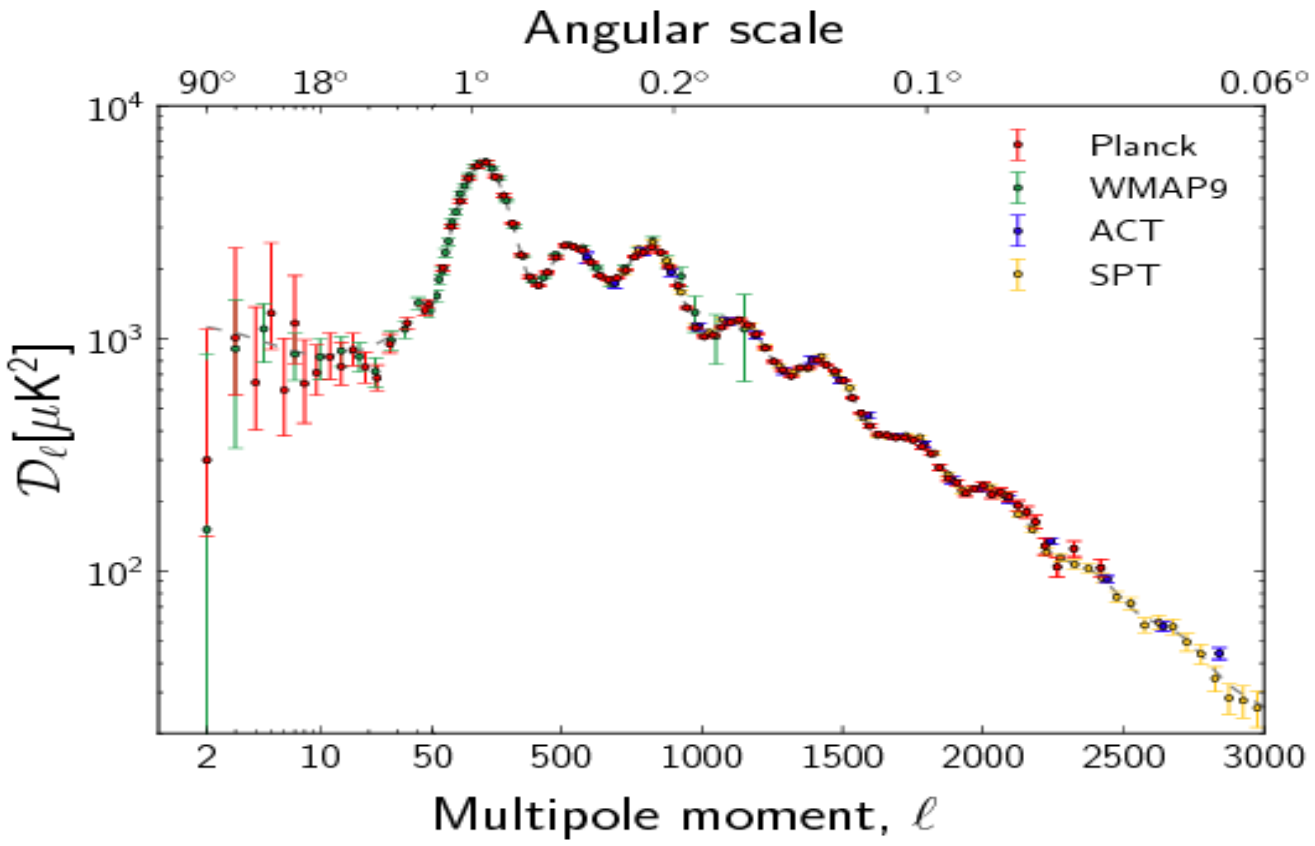
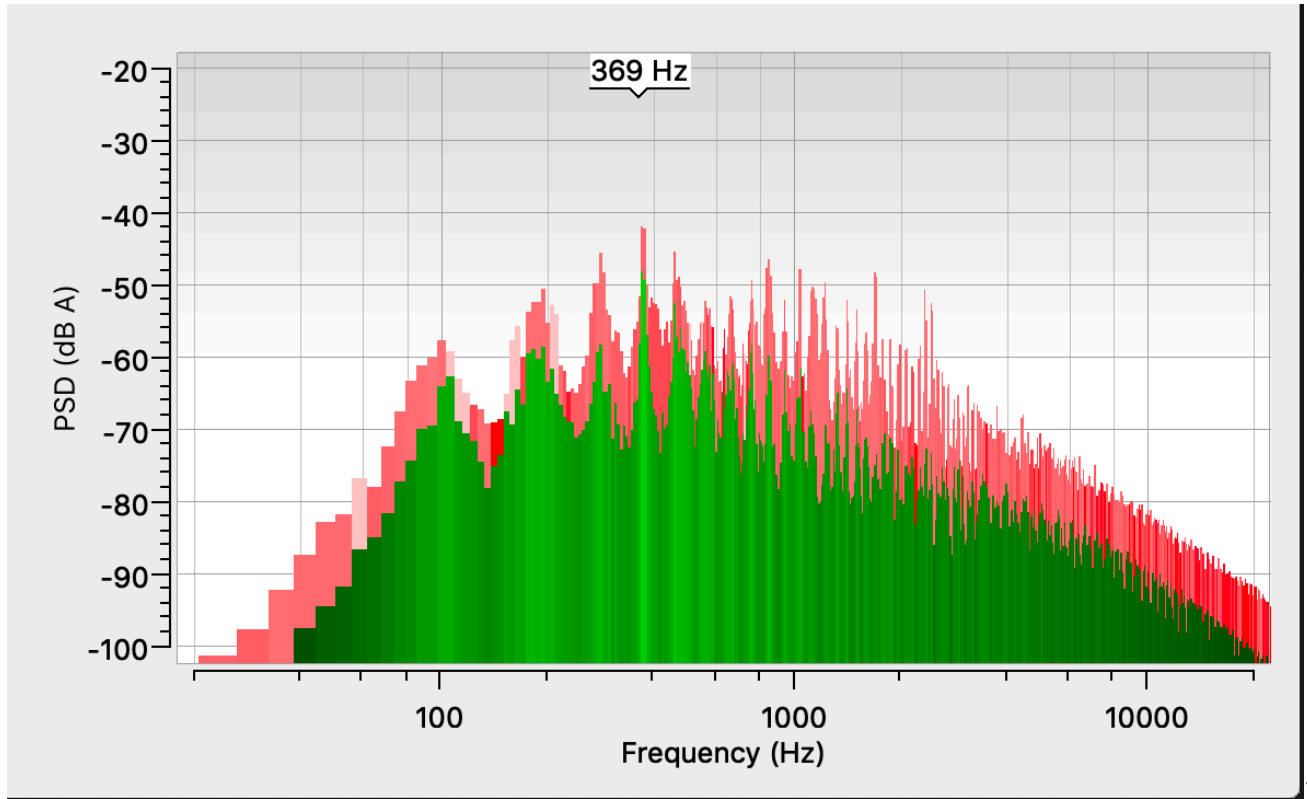
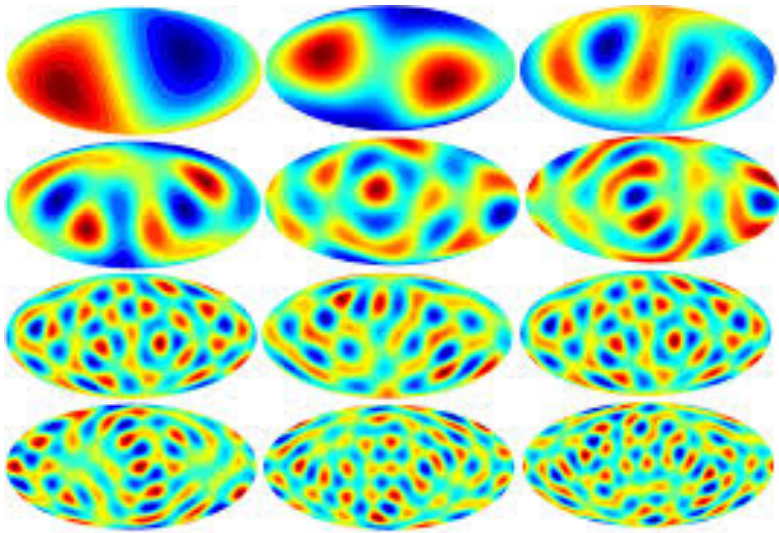


Nel caso della scomposizione angolare la cosa è un po' più complessa ma il risultato è simile

Mappa CMB del satellite Planck

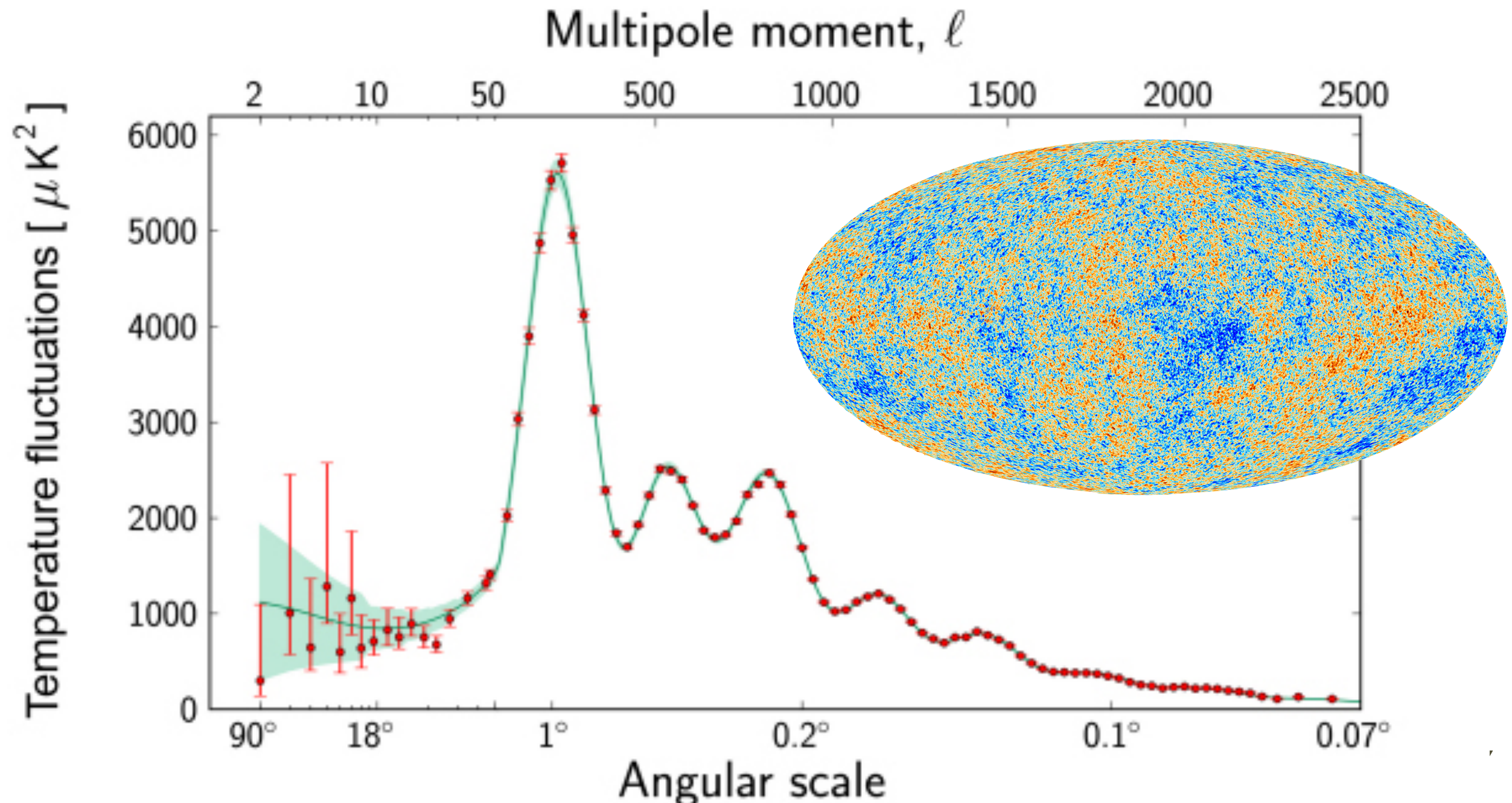


$$= \sum_{\ell}$$



Planck fit a 6 parametri

- **dimensione dell'universo** connesso all'istante del **decoupling** nella scala attuale ($\rightarrow$ universo è piatto)
- quantità di **materia** (barioni/radiazione) al momento del decoupling
- parti dell'universo **correlate** su scale maggiori di quelle causali (ct0)



Abbiamo scoperto tutto?

- Non rimane più niente da fare?



- Non possiamo andare più indietro di 380 000 anni?
- ...affatto! Dobbiamo solo trovare l'indizio giusto



cosmic horizon - the big bang

cosmic background radiation

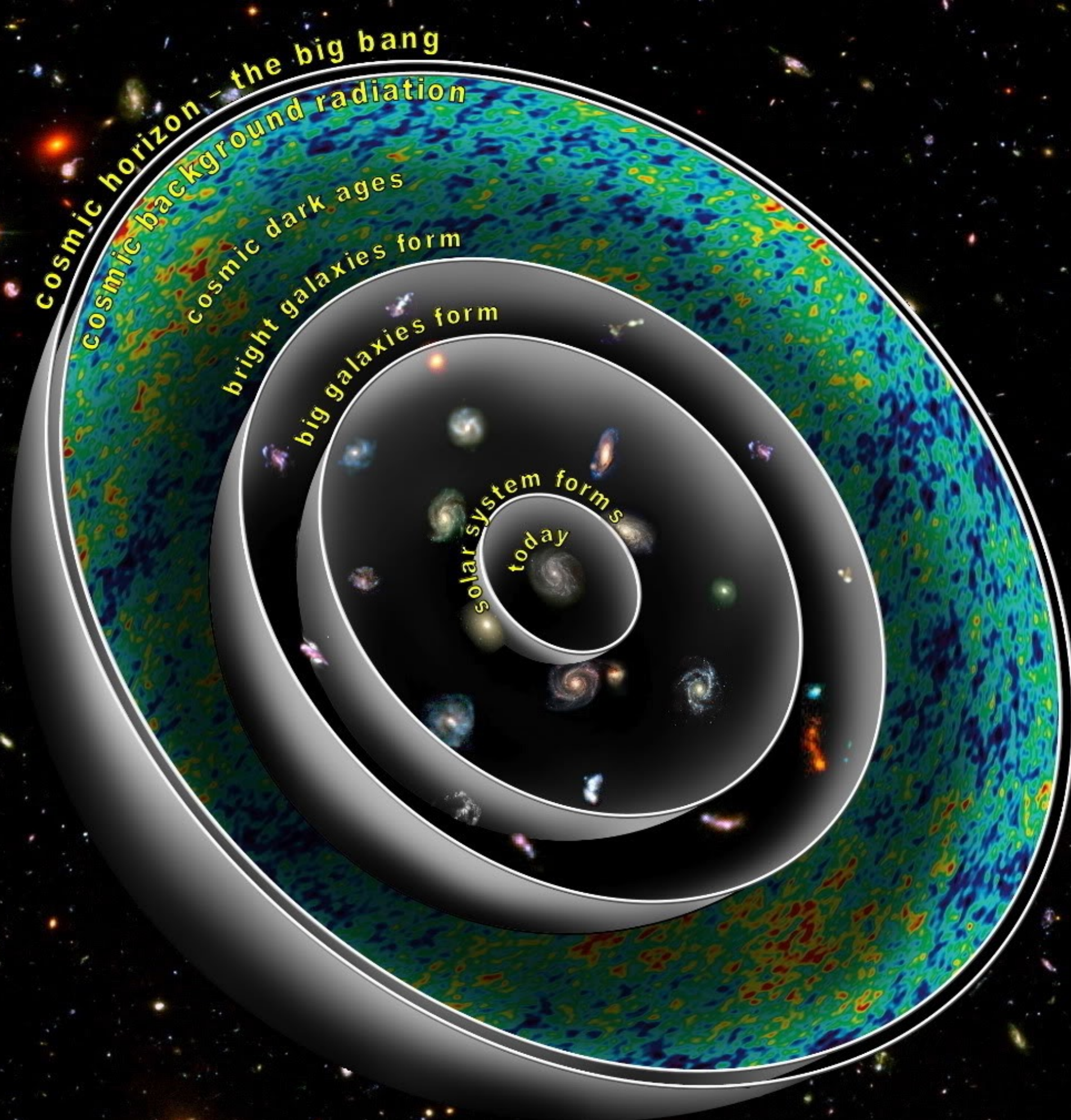
cosmic dark ages

bright galaxies form

big galaxies form

solar system forms

today



Affermazioni

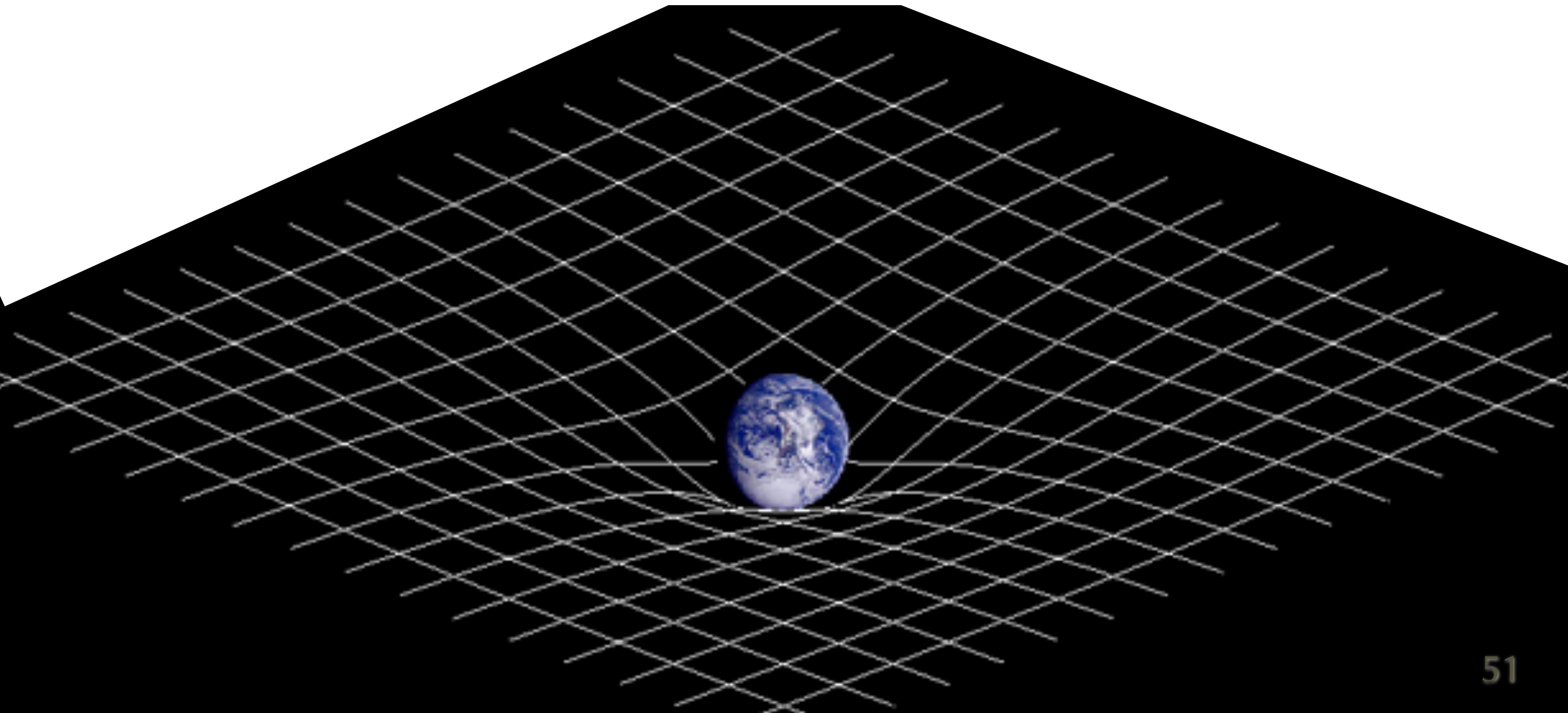
Studiando la polarizzazione della CMB
possiamo risalire ai primi istanti
di vita dell'universo

Possiamo risalire alla scala di energia
dell'inflazione che è correlata alla scala di energia
di Grande Unificazione

Cos'è l'inflazione

- **Espansione esponenziale** dell'universo avvenuta tra 10^{-36} e 10^{-33} secondi dopo il Big Bang
- Il modo in cui l'universo si espande è dettato dalle equazioni della **relatività generale** di Einstein

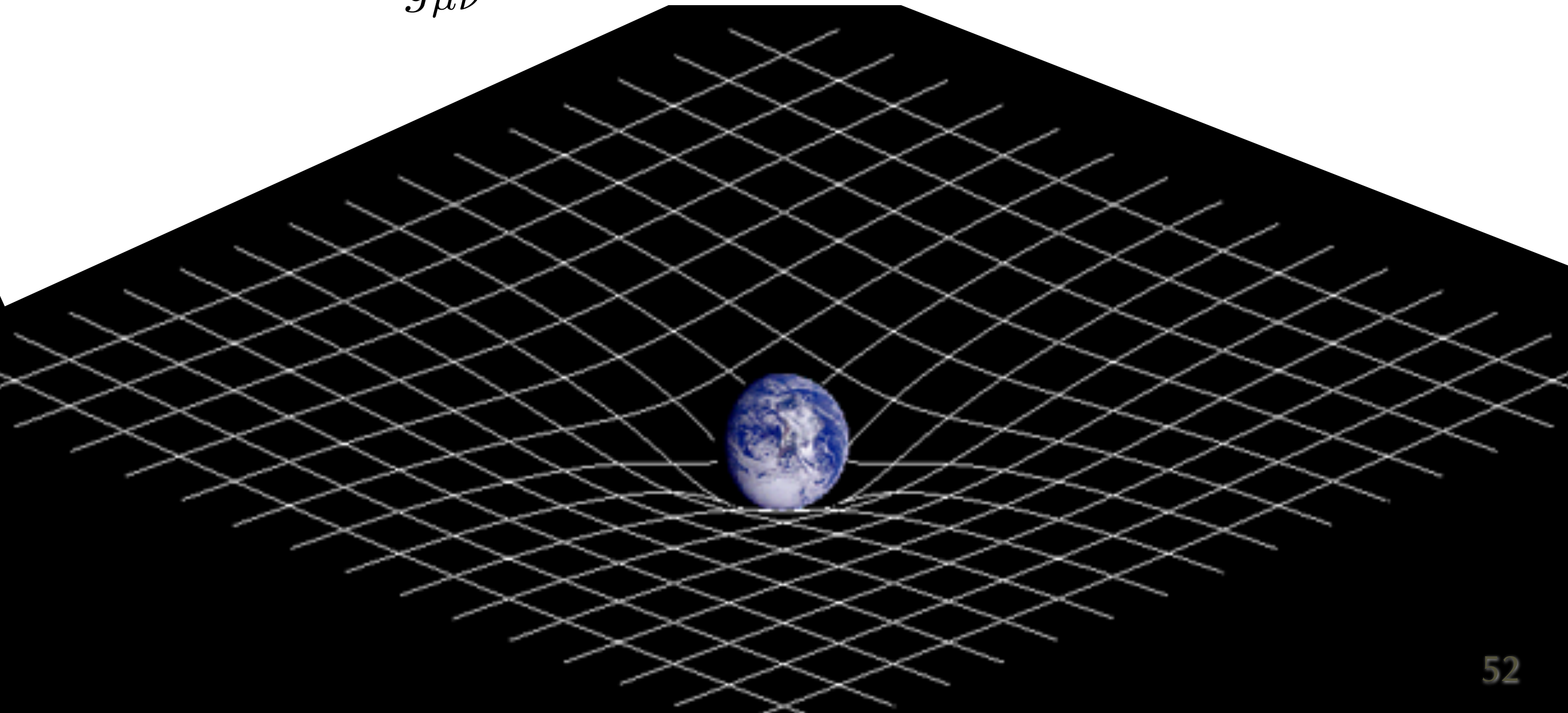
$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$



Cos'è l'inflazione

- **Espansione esponenziale** dell'universo avvenuta tra 10^{-36} e 10^{-33} secondi dopo il Big Bang
- Il modo in cui l'universo si espande è dettato dalle equazioni della **relatività generale** di Einstein

$$g_{\mu\nu} \in G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

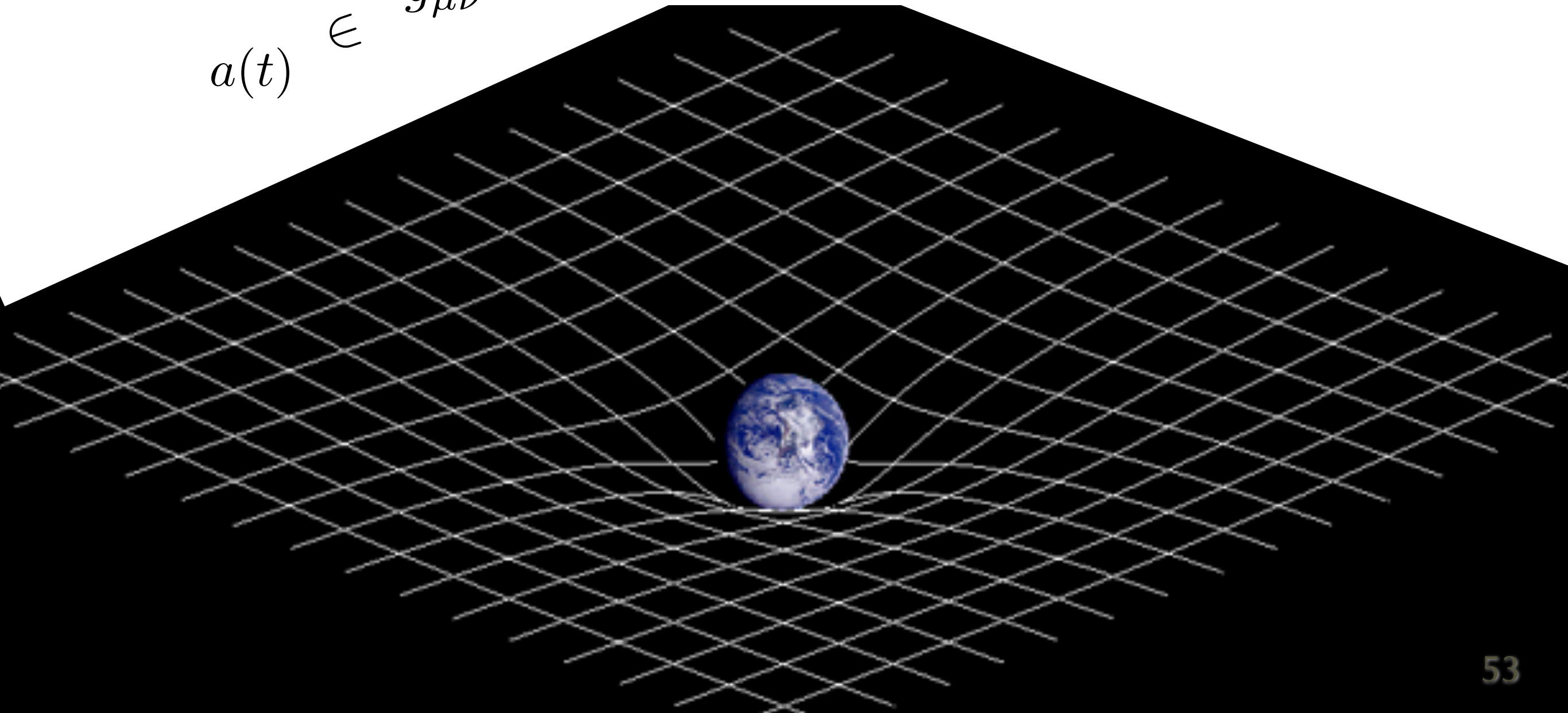


Cos'è l'inflazione

- **Espansione esponenziale** dell'universo avvenuta tra 10^{-36} e 10^{-33} secondi dopo il Big Bang
- Il modo in cui l'universo si espande è dettato dalle equazioni della **relatività generale** di Einstein

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

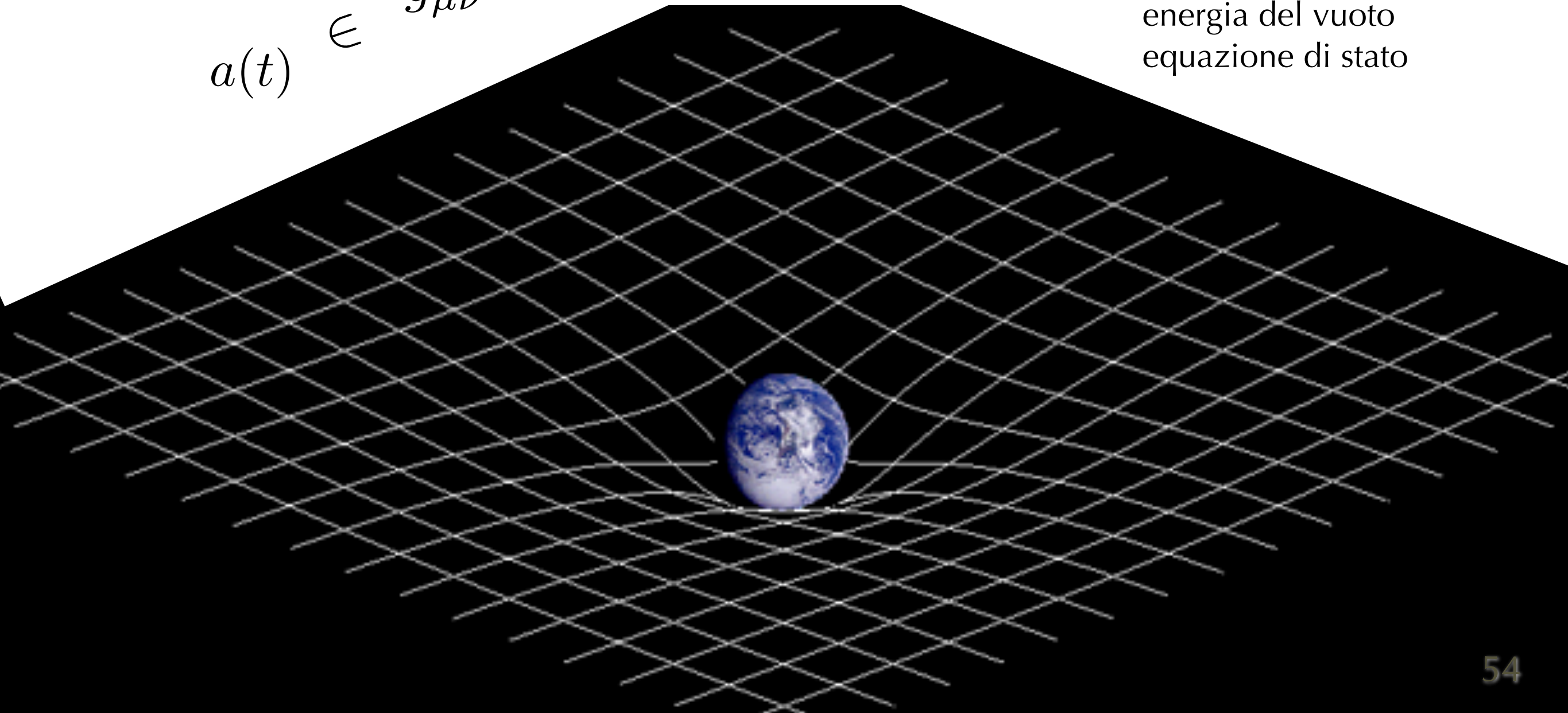
$$a(t) \in g_{\mu\nu} \in$$



Cos'è l'inflazione

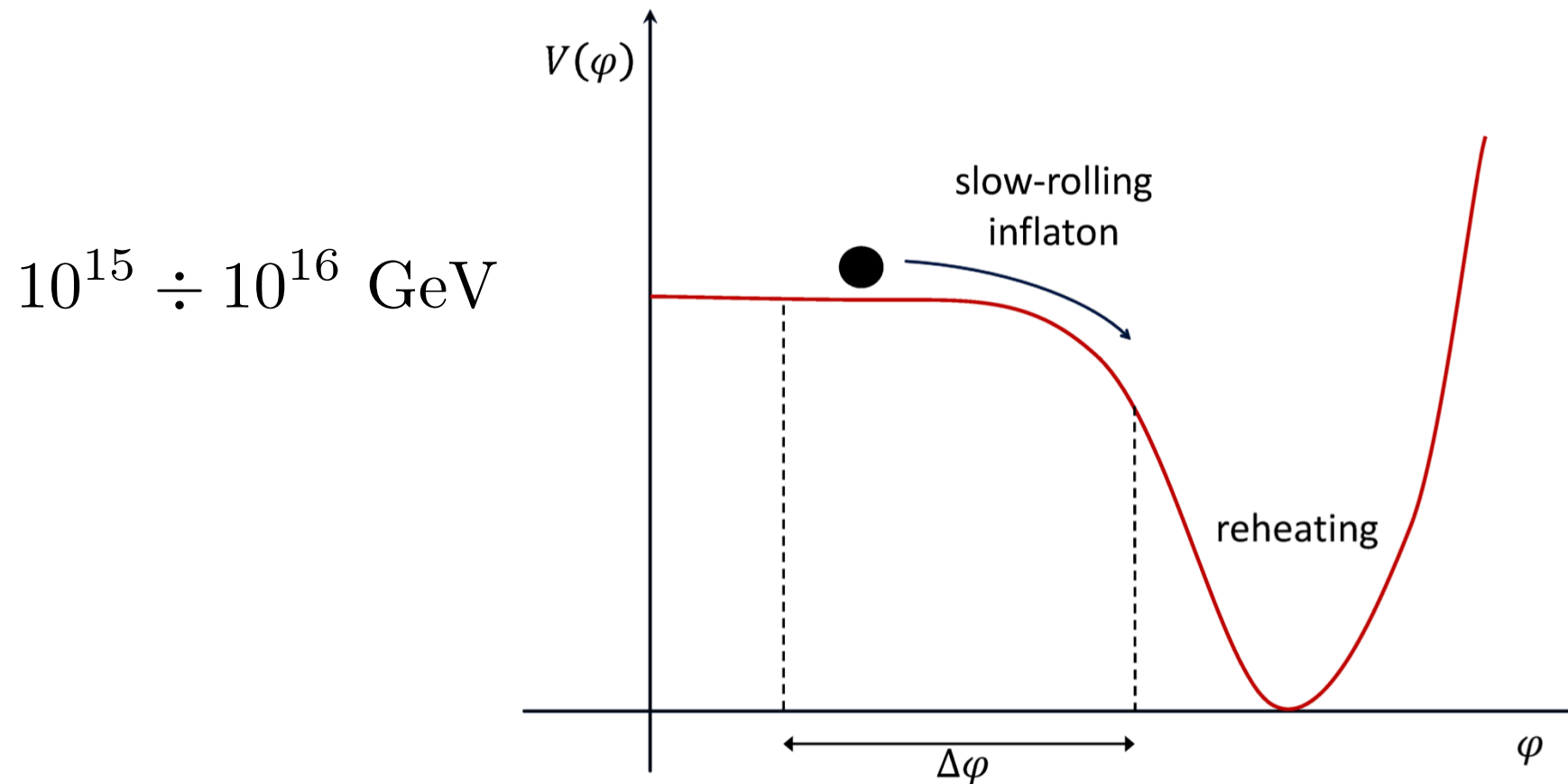
- **Espansione esponenziale** dell'universo avvenuta tra 10^{-36} e 10^{-33} secondi dopo il Big Bang
- Il modo in cui l'universo si espande è dettato dalle equazioni della **relatività generale** di Einstein

$$a(t) \in g_{\mu\nu} \in G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu} \ni \begin{array}{l} \text{radiazione} \\ \text{materia} \\ \text{energia del vuoto} \\ \text{equazione di stato} \end{array}$$



Cos'è l'inflazione

- L'energia dell'universo primordiale è dominata dal potenziale dell'inflatone
- L'inflatone, originariamente in un minimo locale del potenziale, rotola lentamente verso il vero minimo



$$\mathcal{H} = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right) = \text{cost}$$

$$a(t) = a_e e^{\mathcal{H}(t-t_e)}$$

fattore 2^{60}

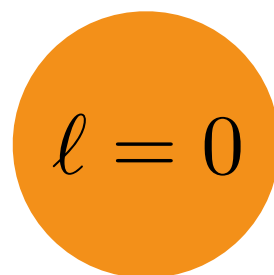
- “inventata” per risolvere alcuni paradossi tra cui l'isotropia della CMB
- Dilatazione dello spazio, in particolare della metrica

- La **metrica** viene “**dilatata**”
- Le **fluttuazioni della metrica** vengono espanse di un **fattore** $2^{60} \sim 10^{18}$

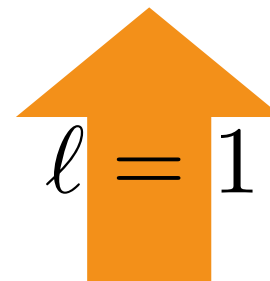
$$g_{\mu\nu} = \left(4 \times 4 \right) \rightarrow 3 \times 3$$

$$M_{ij} = \begin{pmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & x & y \\ -x & 0 & z \\ -y & -z & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a & b & c \\ b & d & e \\ c & e & -a-d \end{pmatrix}$$

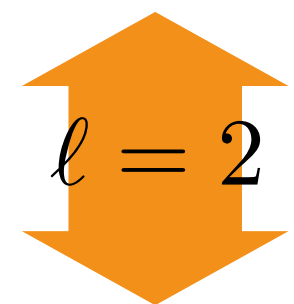
9
=
1
+
3
+
5



scalari



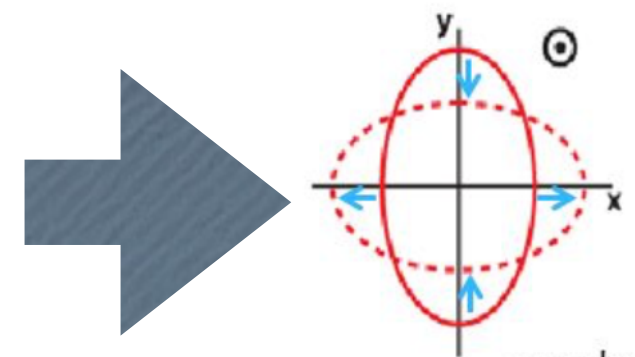
vettoriali



tensoriali

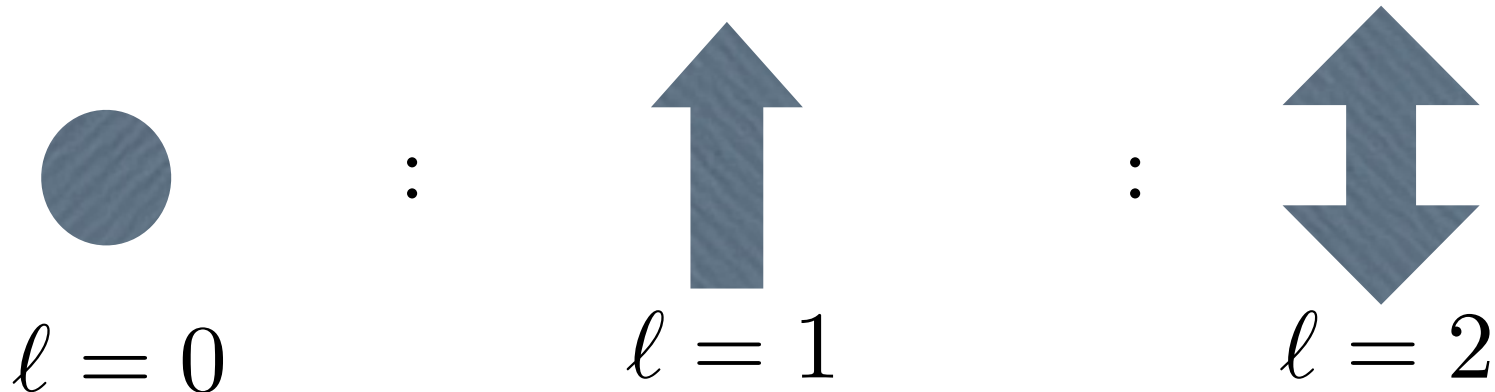
- Fluttuazioni

- **Onde Gravitazionali Primordiali!**



Boom!

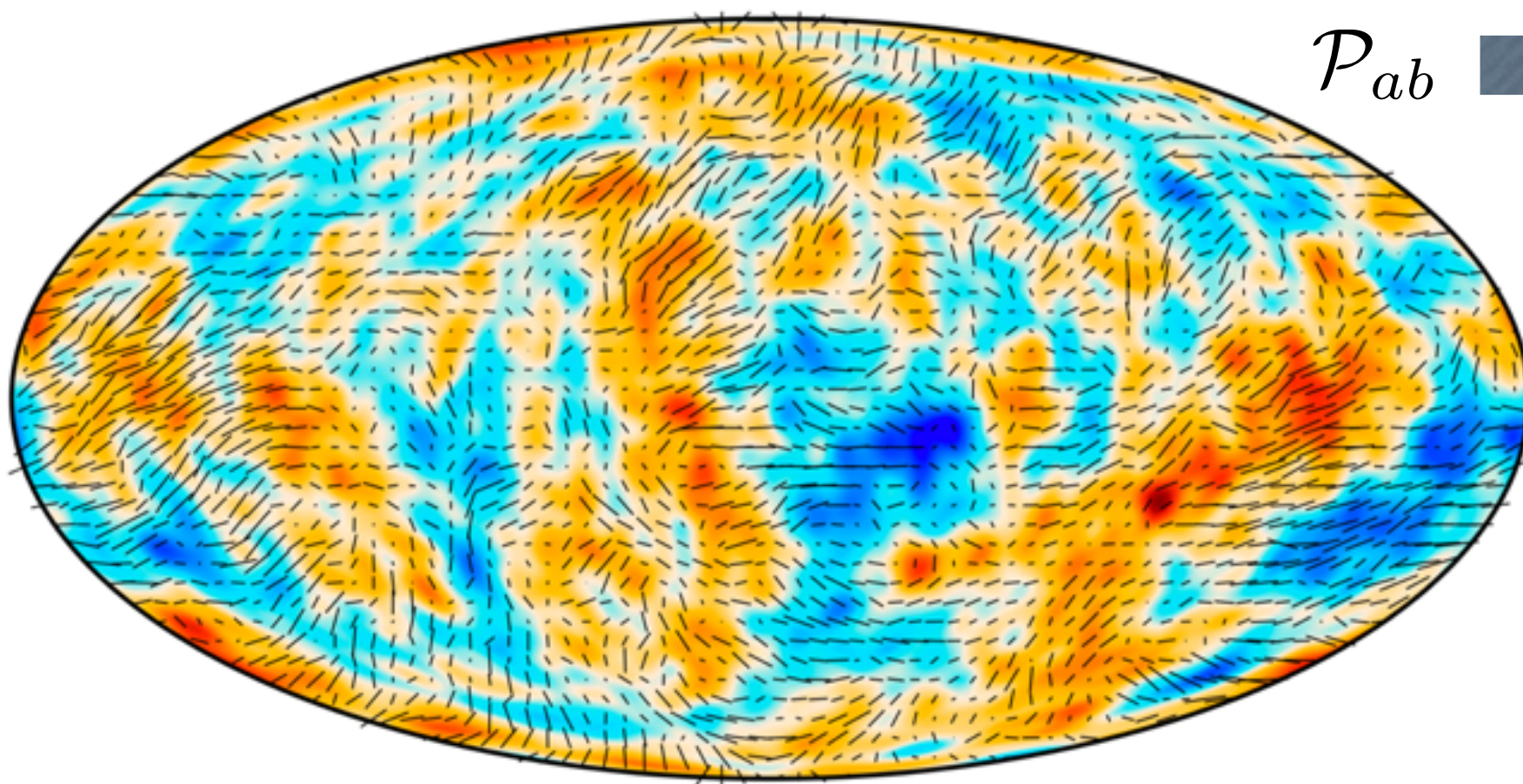
- Abbiamo trovato il modo di **passare** al di là dello **schermo**
- Ci passiamo con le **onde gravitazionali primordiali**
 - la cui ampiezza è fissata da $V(\phi)$ scala di energia dell'inflazione
- **Come** le osserviamo?
 - Dobbiamo trovare un **osservabile che ha spin=2**
 - **Polarizzazione!**



- **Polarizzazione** della CMB $\Rightarrow$ spettro di **GW primordiali** $\Rightarrow$ Potenziale **inflazione**

Come la misuro?

- **Monopole** term: 2.725 K blackbody O(1)
- **Dipole** term: 3.355 mK O(10⁻³)
- **Anisotropy**: 100 μ K rms O(10⁻⁴)
- **Tensor perturbations** produce a background of **primordial gravitational waves**
 - **E-mode polarization**: 3 μ K rms O(10^{-6÷7})
 - **B-mode polarization**: <500 nK rms



1 0.41 μ K

-160

160 μ K

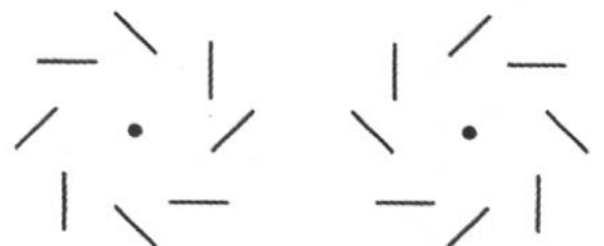
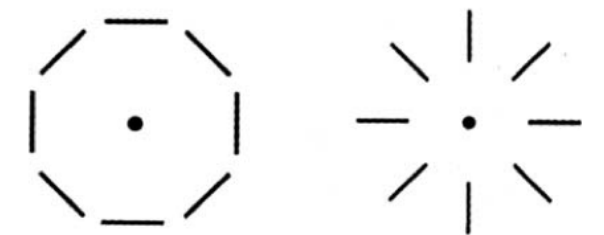
$\mathcal{P}_{ab}$



$$E \sim \partial_a \partial_b \mathcal{P}_{ab}$$

$$B \sim \epsilon_{ac} \partial_b \partial_c \mathcal{P}_{bc}$$

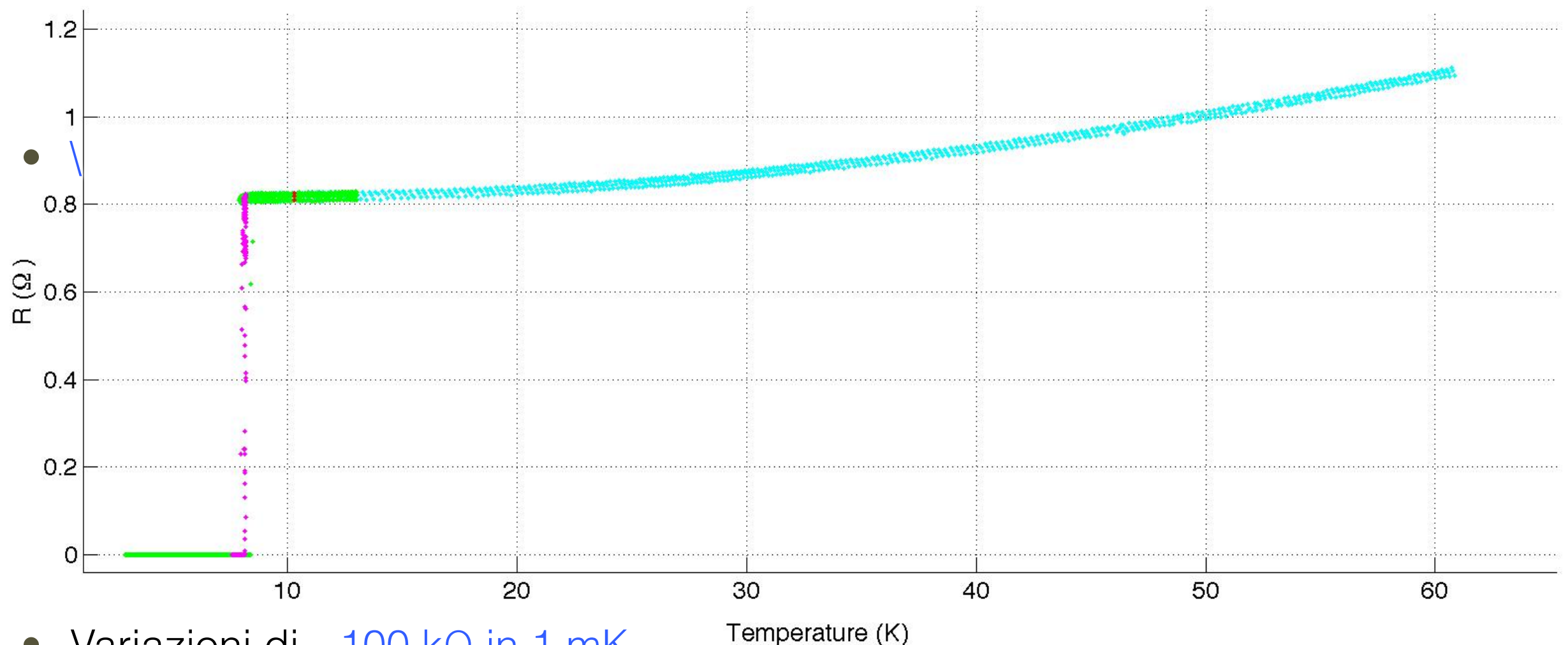
E-modes



B-modes

Enter Superconductivity

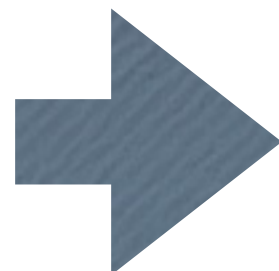
- Misurare le fluttuazioni di temperatura con risoluzione del nK
- Alcuni materiali a temperature sufficientemente basse presentano resistenza nulla alla corrente continua



- Variazioni di $\sim 100 \text{ k}\Omega$ in 1 mK

$$\Delta\Omega = 100 \text{ k}\Omega$$

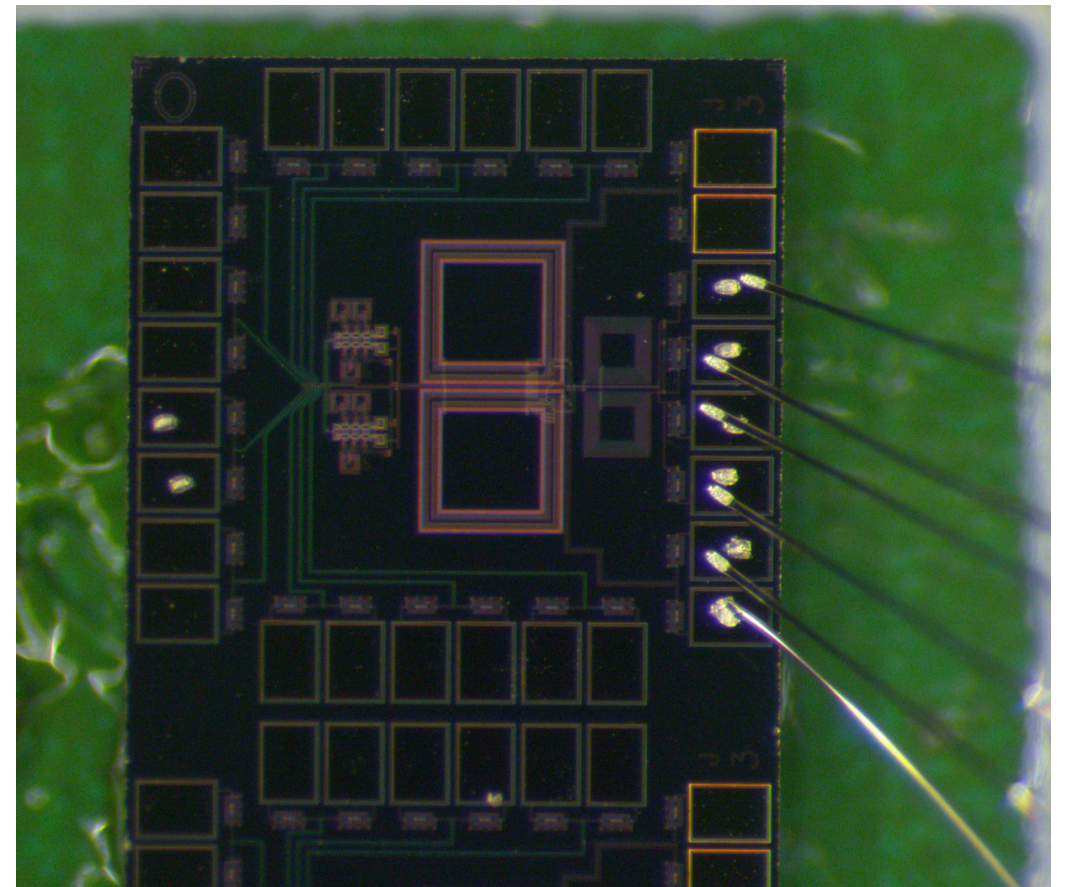
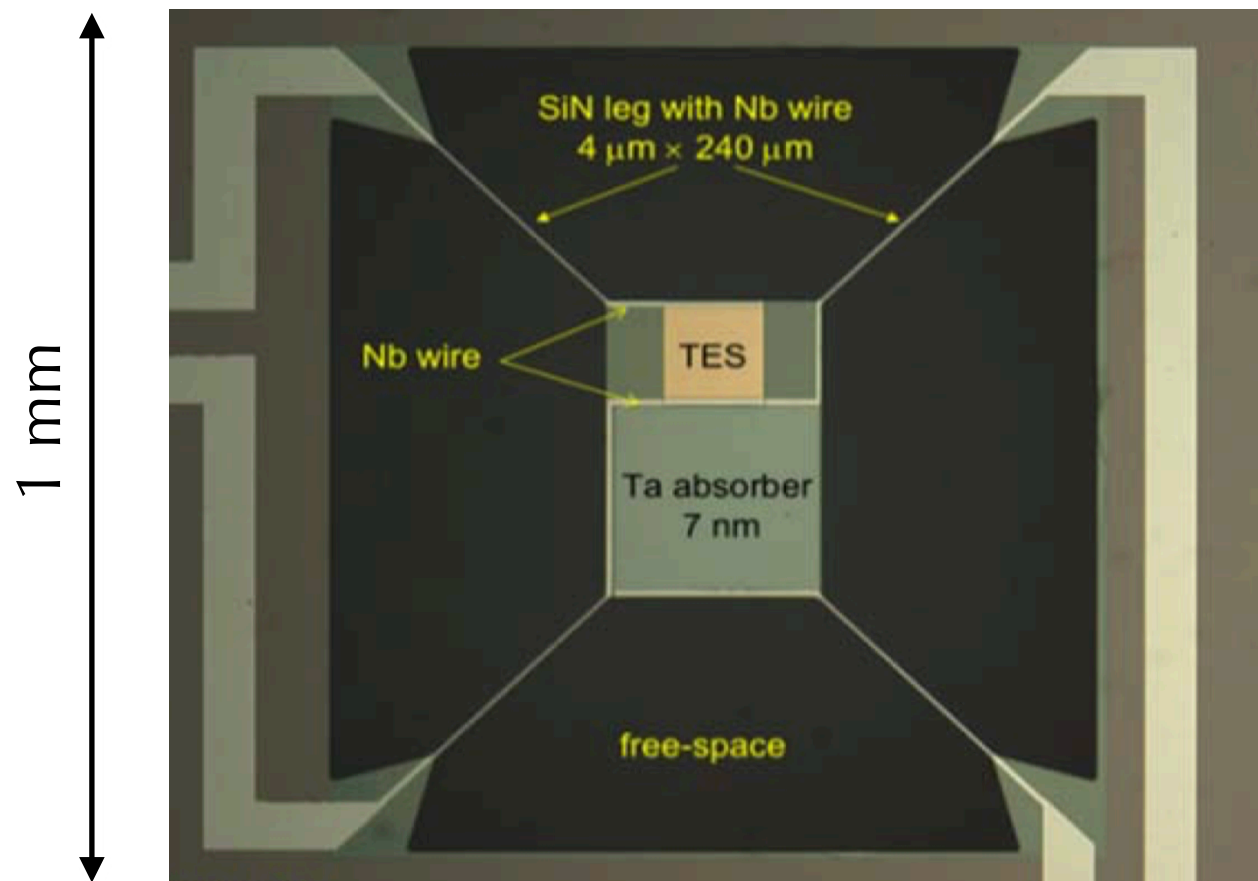
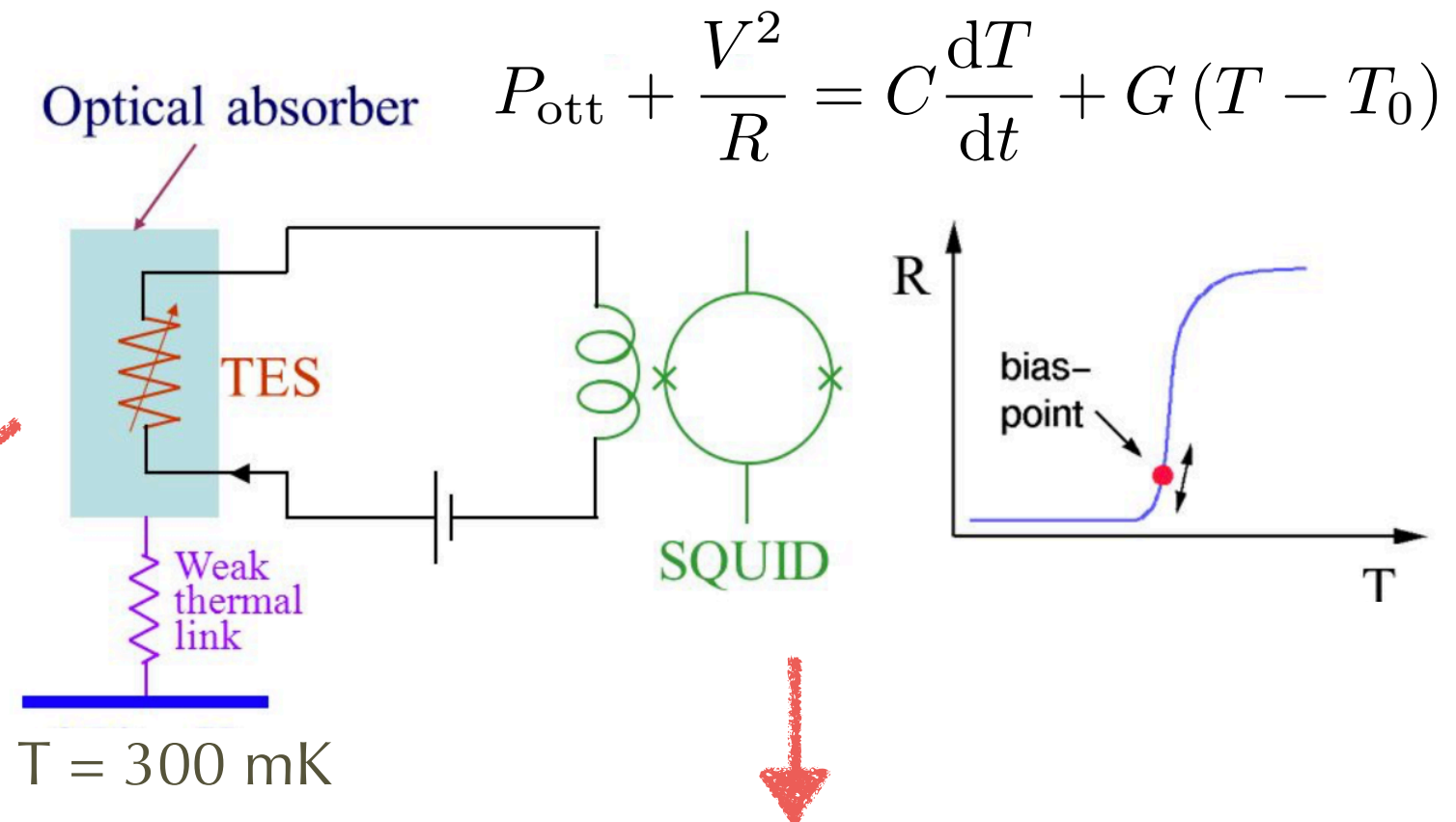
$$\Delta T = 1 \text{ mK}$$



$$10^{-8} \text{ K}/\Omega$$

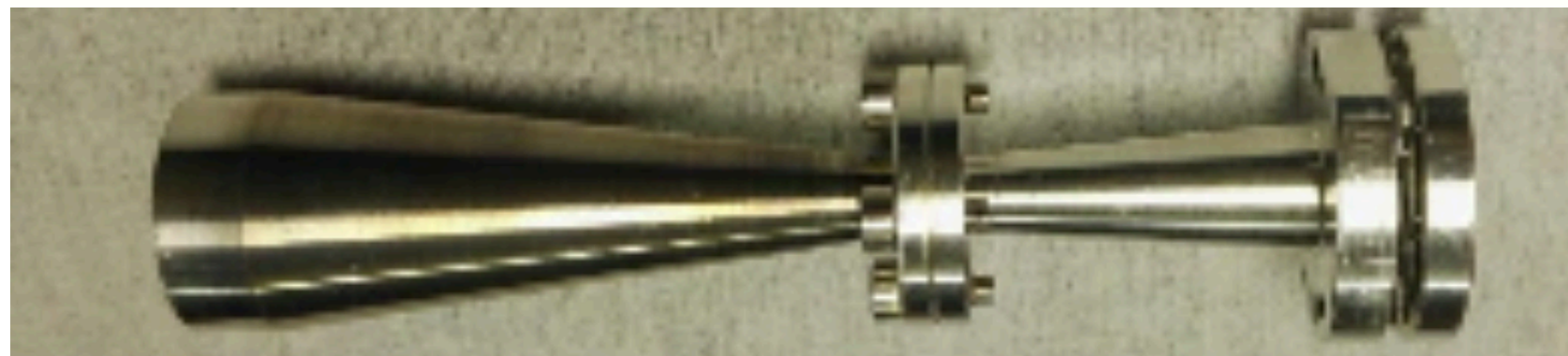
Il “vero” sensore

- **Resistenza variabile** inserita in un **circuito**
- **Tensione** di alimentazione
- **Corrente** letta da uno SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)



Assorbire le microonde

- Lunghezza d'onda $\lambda \sim 2\div 3$ mm
- “Horn” (guida d'onda più **cavità risonante**)

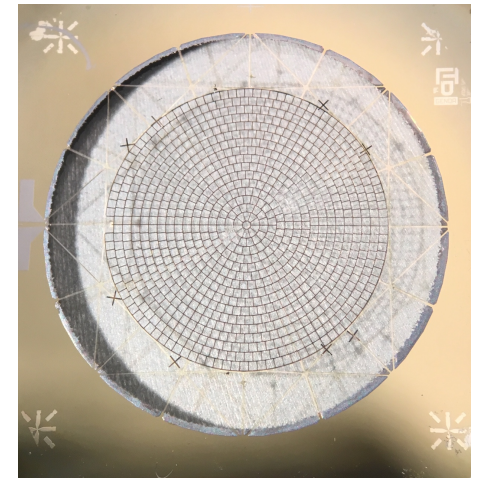


Horn antenna

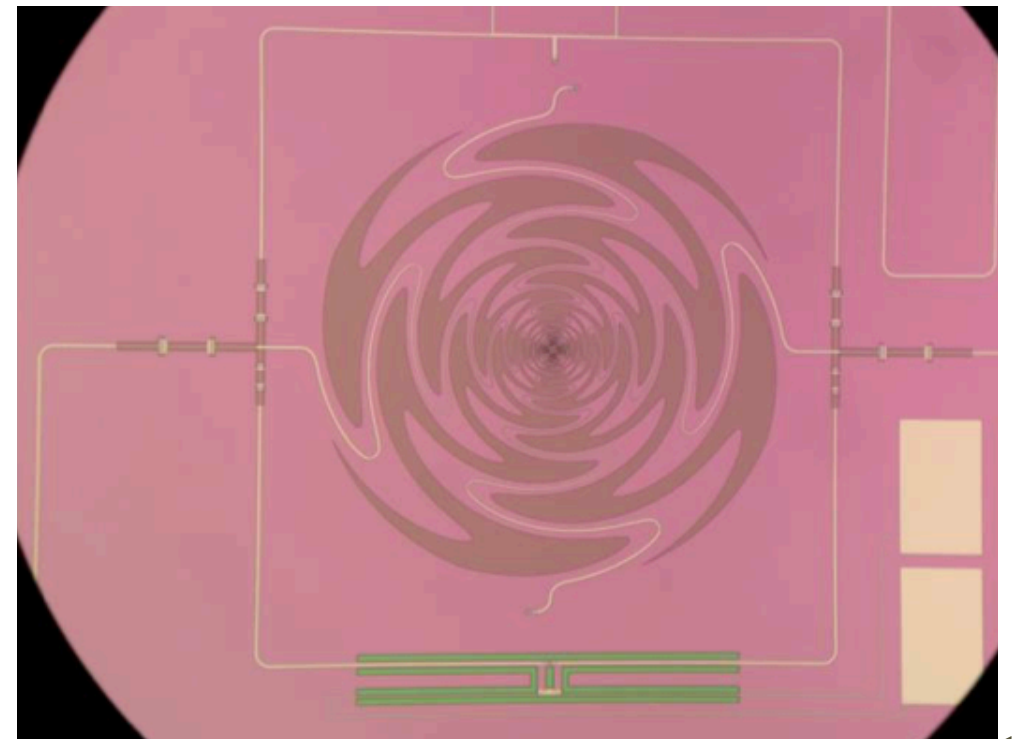
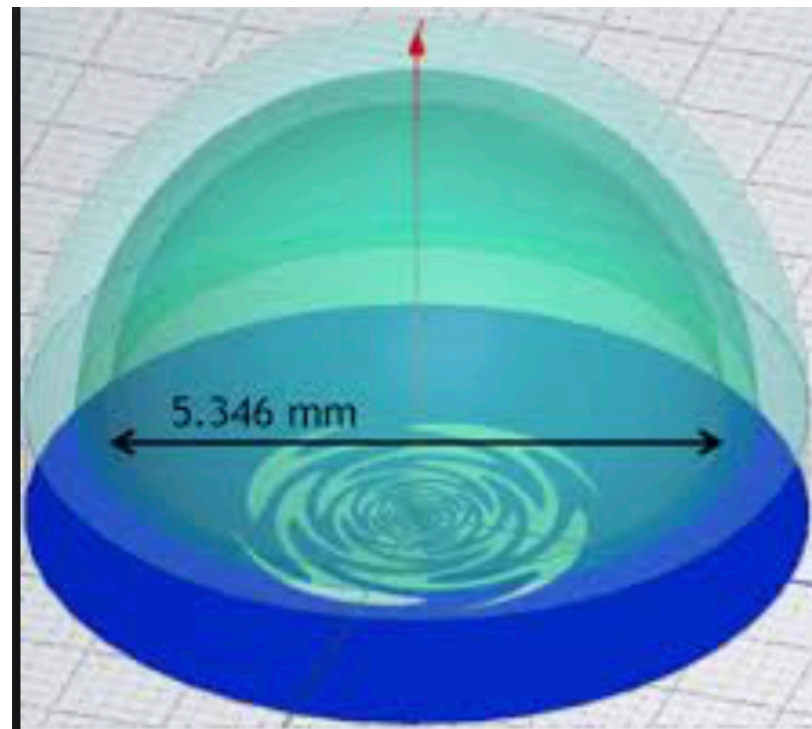
Antenna-detector
transition

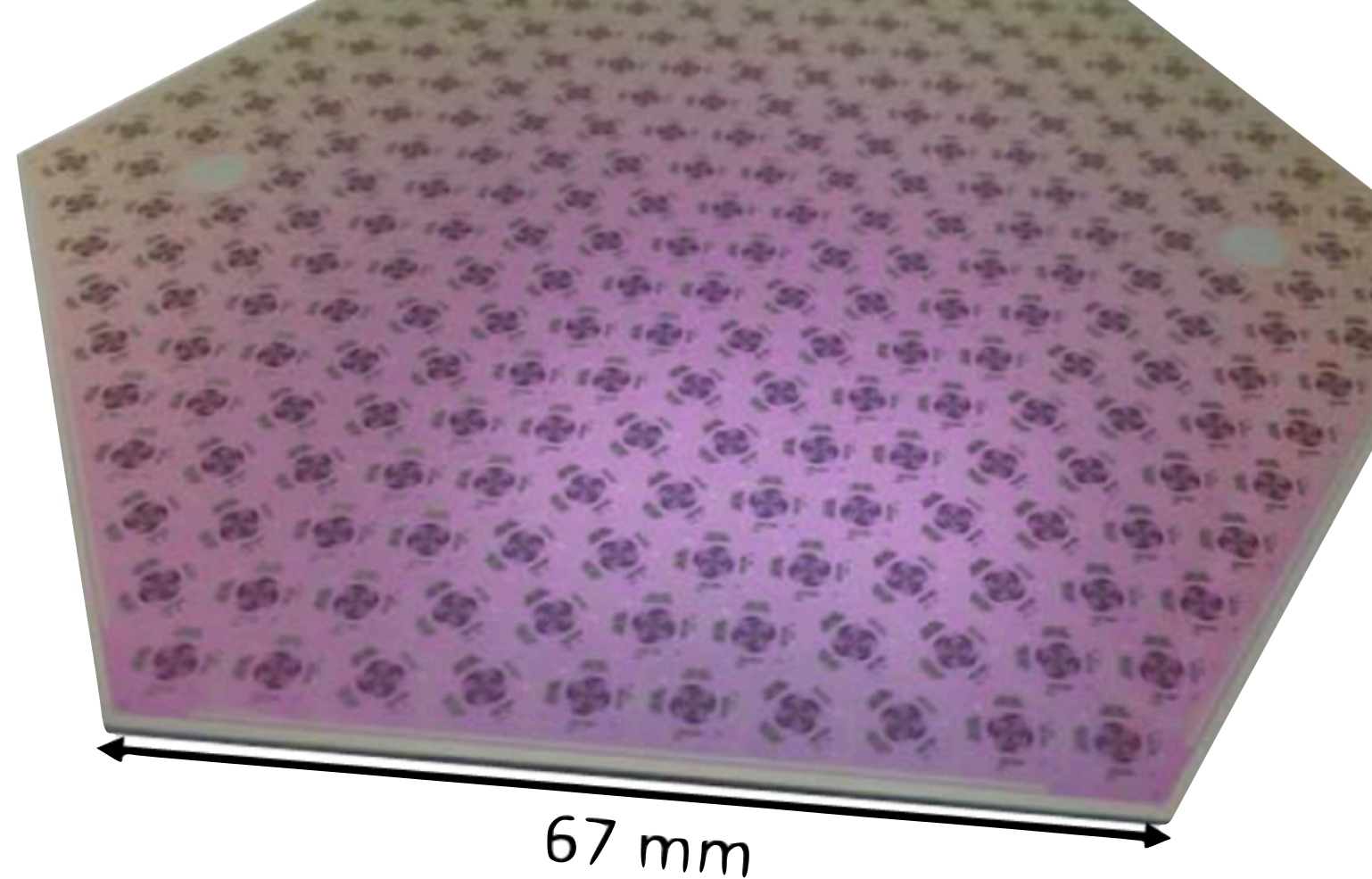
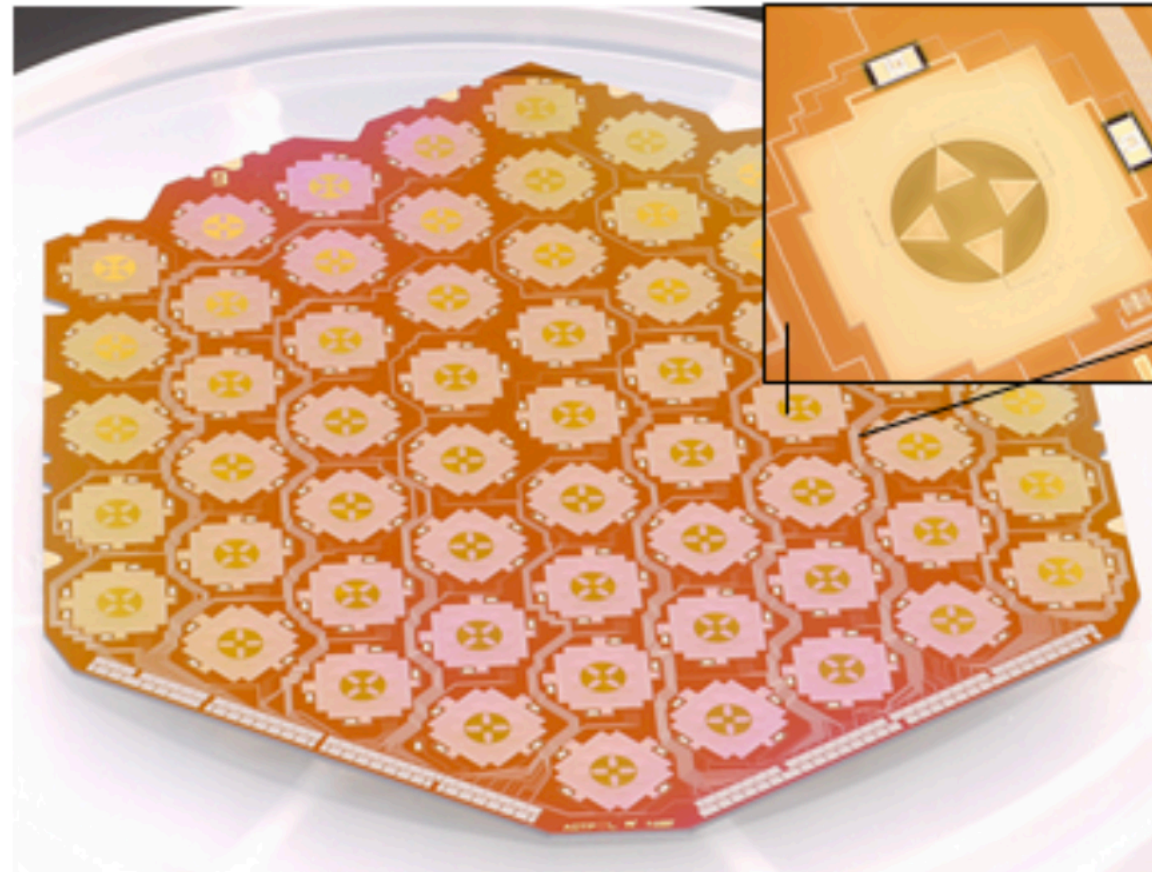
Bolometer
absorber

Backshort

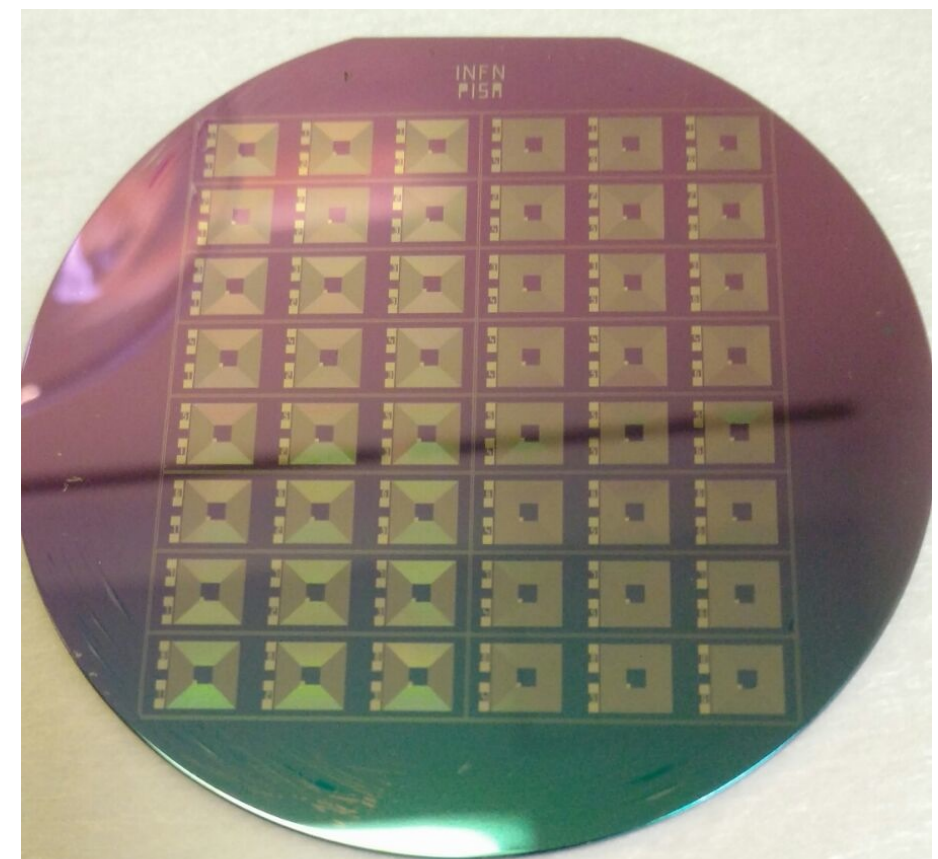
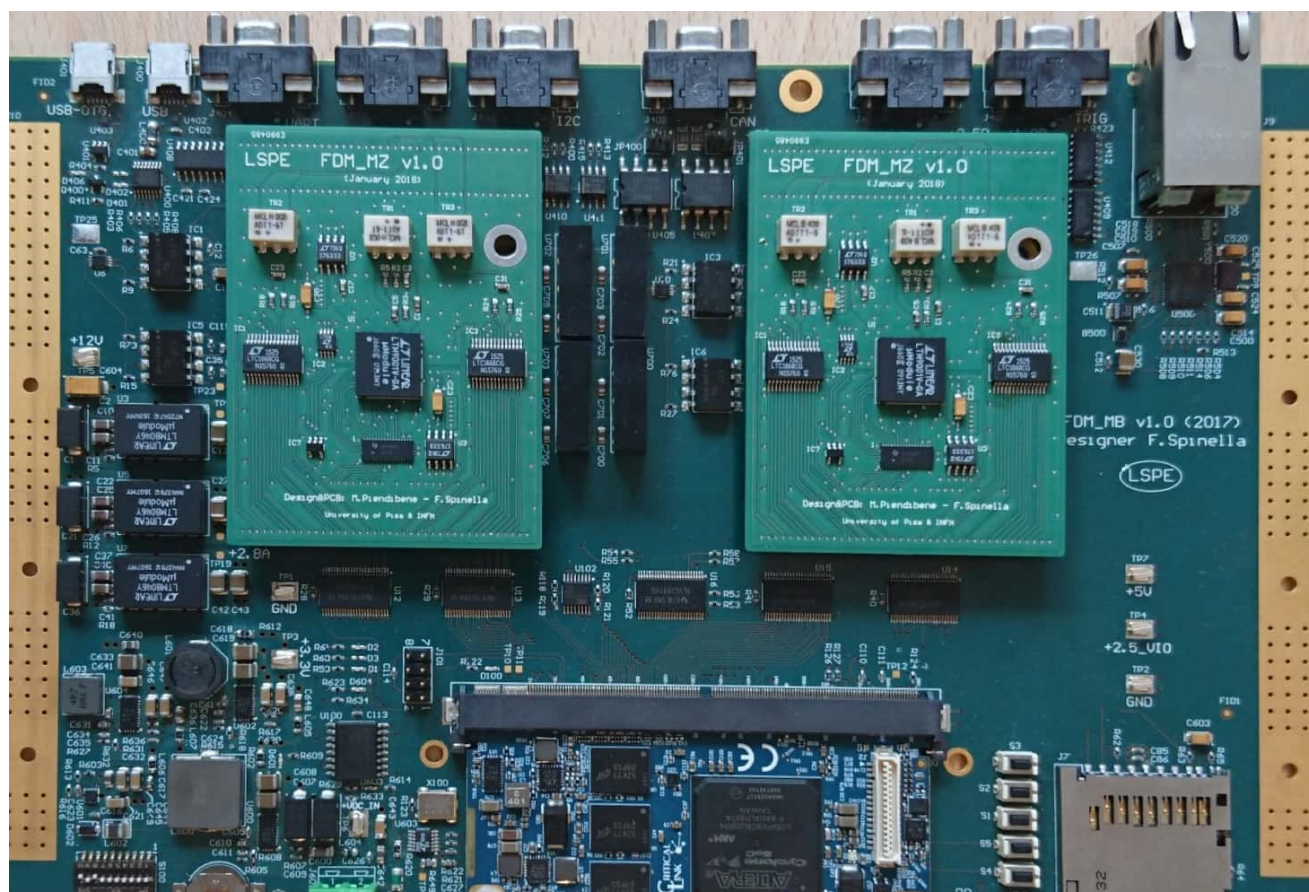


- Lente + **antenna** “disegnata” (litografata)

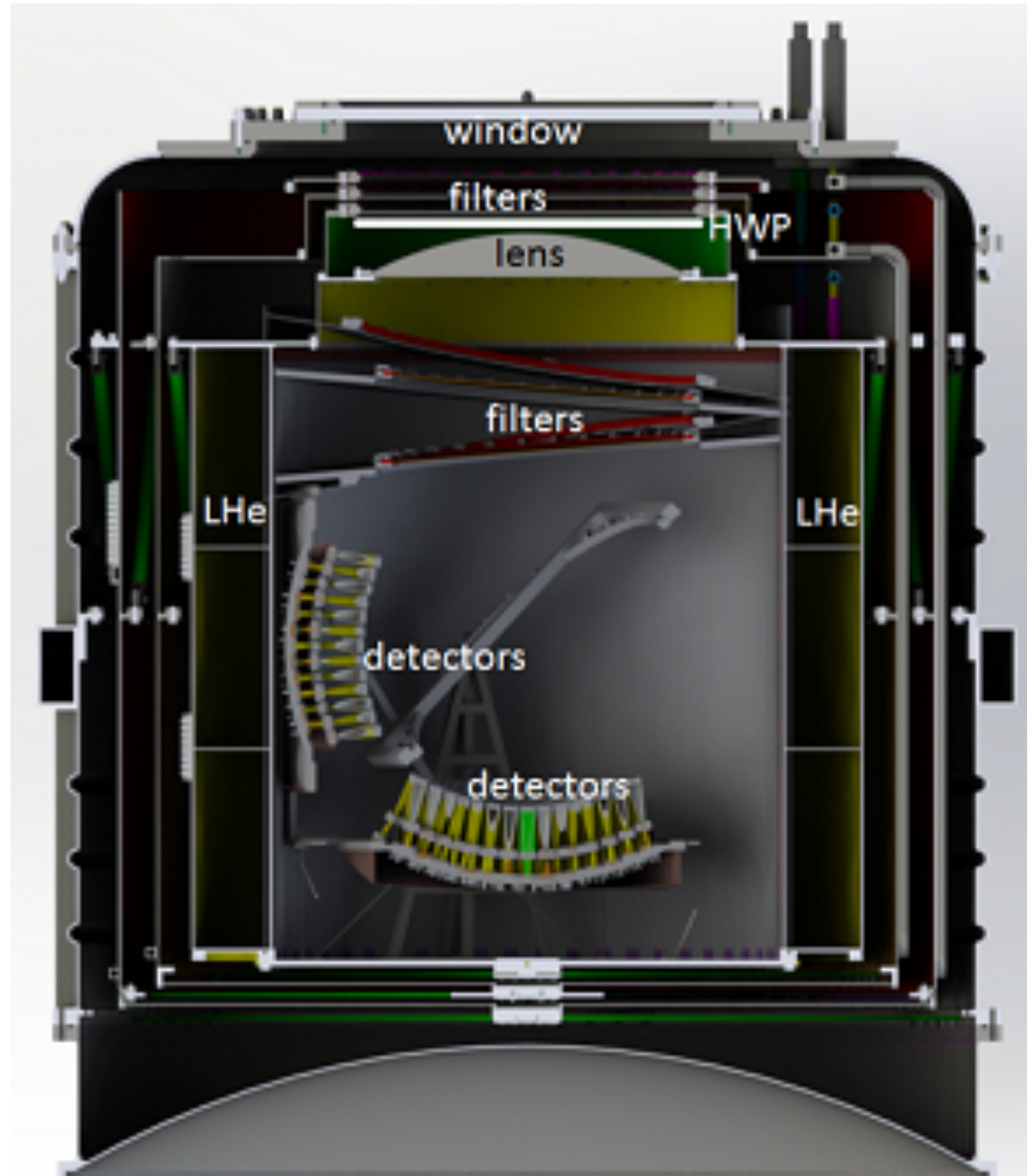
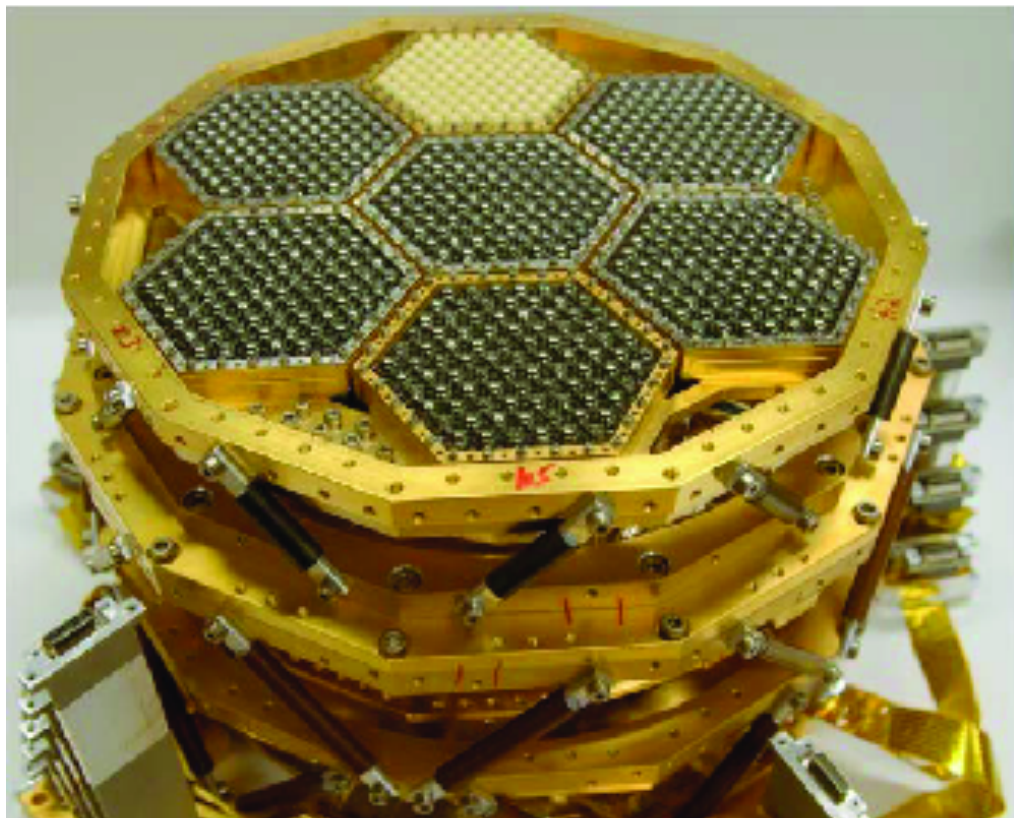
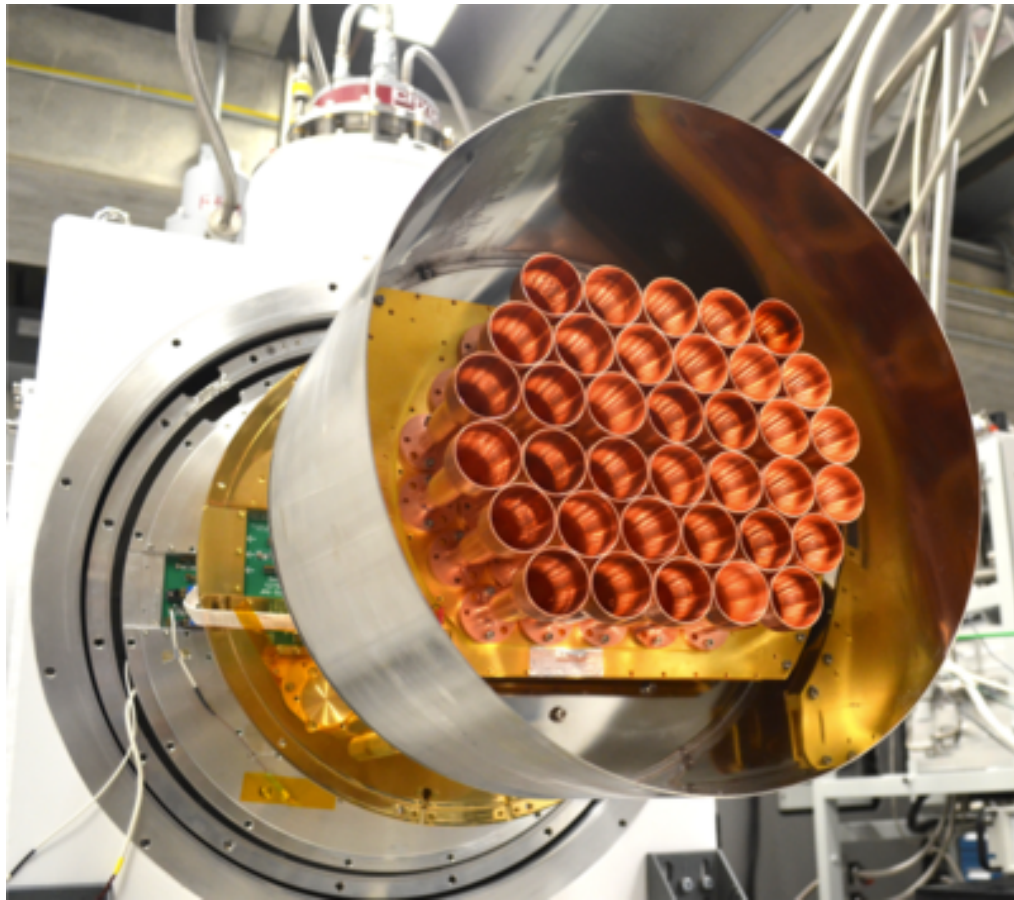




Array di centinaia o migliaia di detectors letti da un'elettronica “che non esiste”



Strumenti



Siti di misura

Terra



Pallone



Spazio



← Semplicità

Costo →

Tempi-scala →

Sensibilità →

Siti di misura

Terra



2020

Pallone



2020

LSPE/Swipe



Spazio



2028

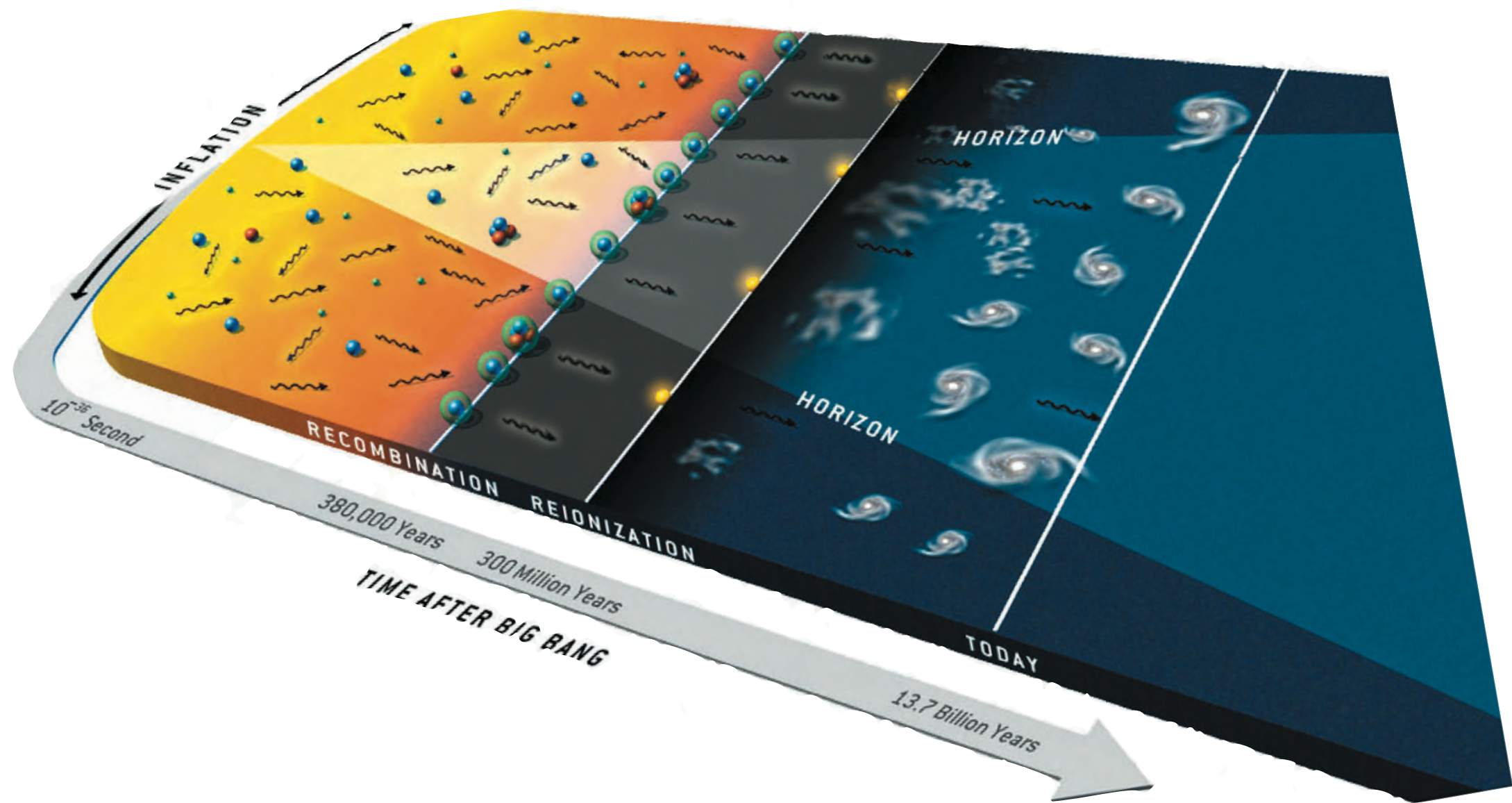
LiteBIRD



- Misura della mappa di polarizzazione nel futuro prossimo

Conclusione

- La **CMB** fornisce informazioni sui **primi istanti di vita dell'universo**
- La **prossima sfida** è la misura precisa della sua **polarizzazione**
 - **tecnologia** all'avanguardia
- Possibilità di misurare l'esistenza dei modi-B di **polarizzazione della CMB**
 - Prima misura degli **aspetti quantistici** della **gravità**
 - Avremo per la prima volta un **hint sperimentale** dell'"**unificazione**" della **gravità** con le altre **forze fondamentali**





GRAZIE

$$D_l = l(l+1)C_l/2\pi$$

CMB angular power spectra

