

*L'ATA organizza*



*In collaborazione con*



COMUNE DI FRASCATI



*Con il patrocinio di*



# DIALOGHI COSMICI

Frascati (RM), Scuderie Aldobrandini  
marzo - aprile 2025

Paolo de Bernardis - Dipartimento di Fisica, Sapienza  
Dialogo 4 - 22/marzo/2025

**4) Le strutture cosmiche**

Photo: ©ESA and the Planck Collaboration



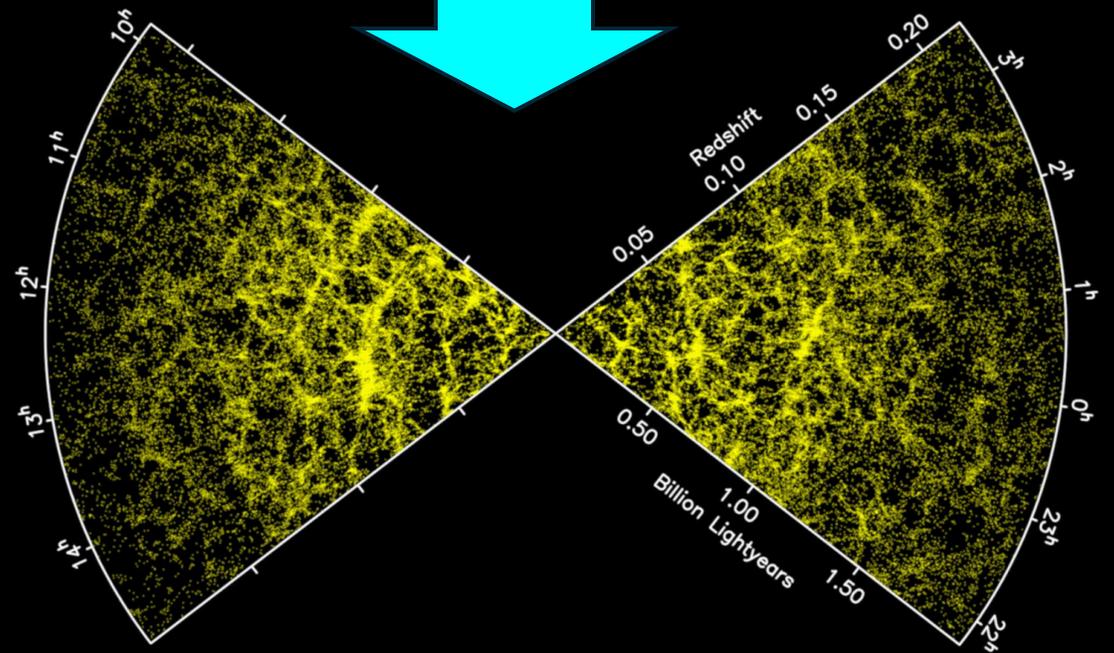
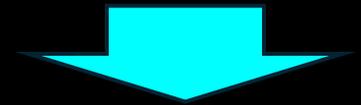
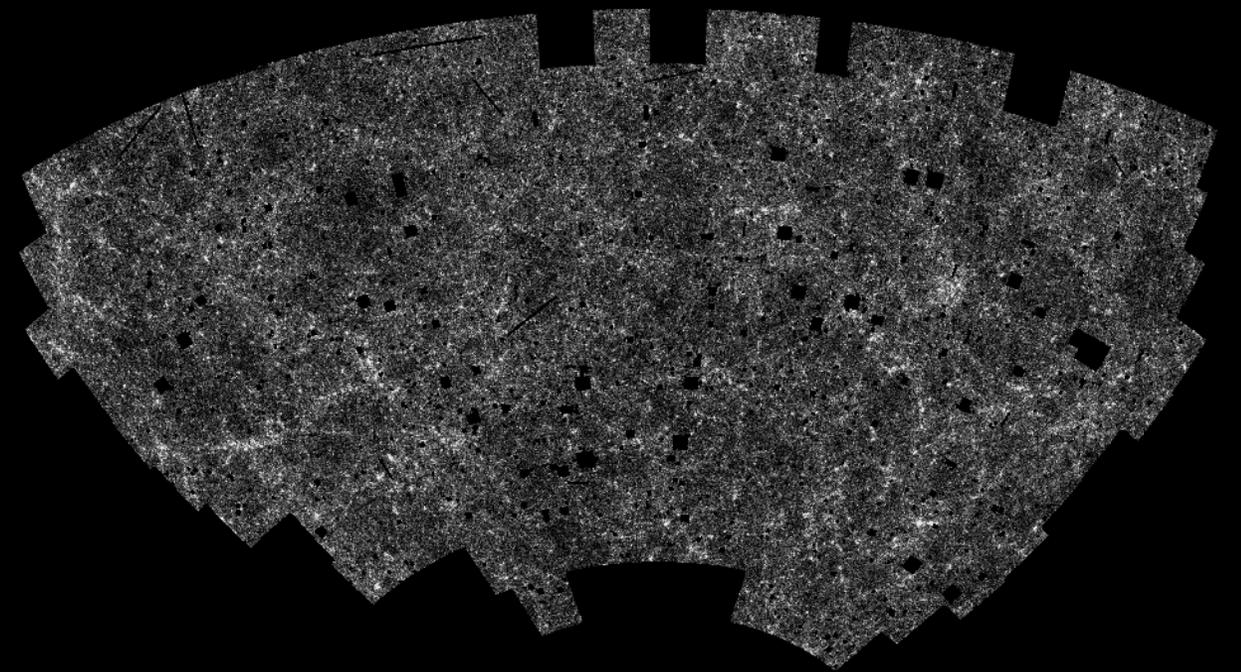
# Dialoghi cosmici – 4

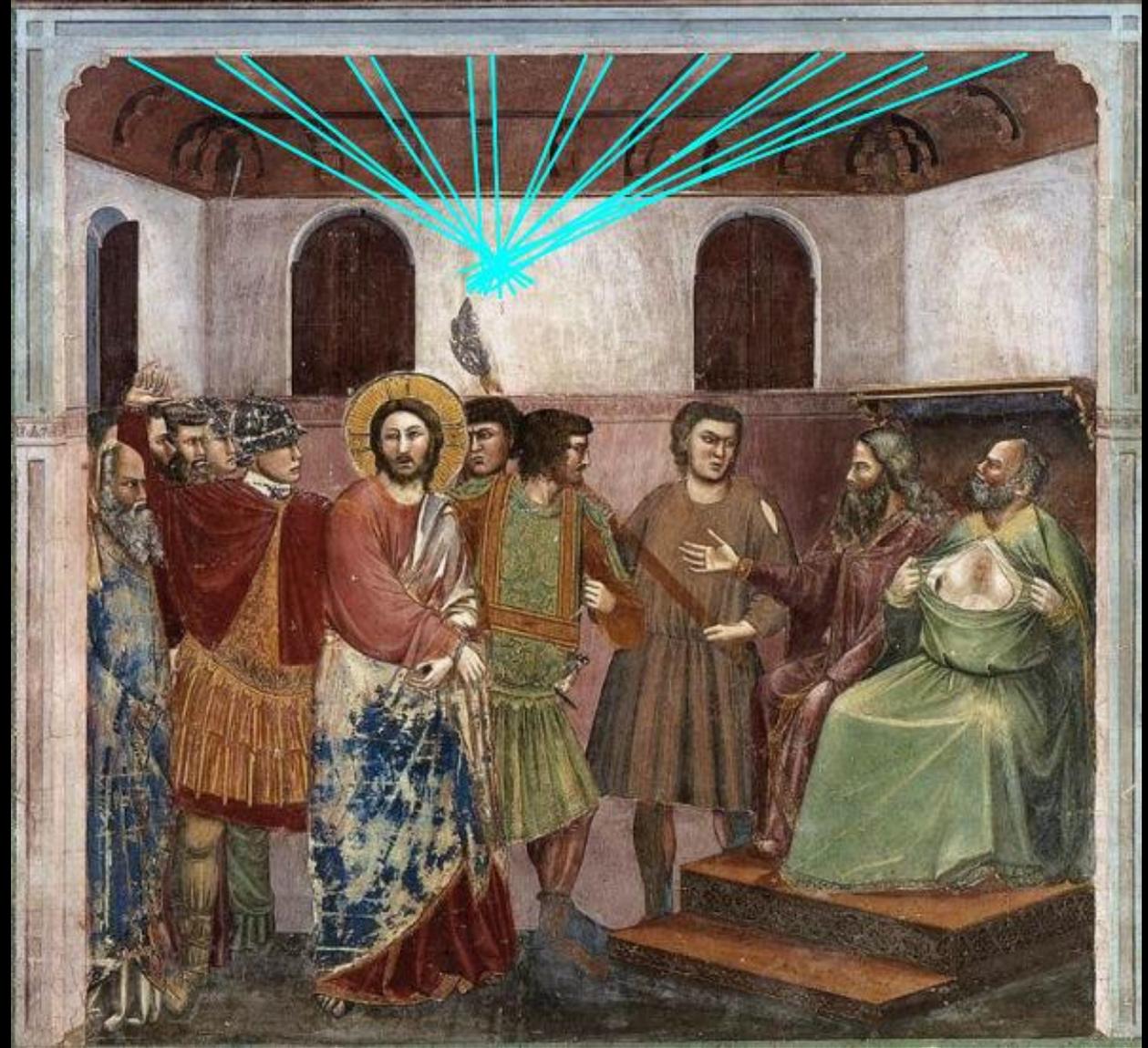
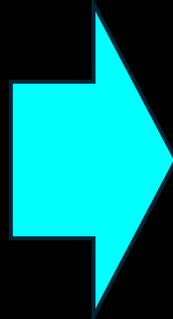
- L'universo odierno contiene una gerarchia di strutture (pianeti, stelle, galassie, ammassi di galassie, superammassi) separate da enormi spazi vuoti.
- L'universo primordiale invece era estremamente omogeneo, come testimoniato dalle mappe del fondo cosmico di microonde.
- Come si forma la gerarchia di strutture che vediamo oggi, a partire da un mezzo sostanzialmente identico dappertutto, all'inizio?
- Oggi cercheremo di rispondere a questa domanda.

1. *L'universo omogeneo e isotropo e la sua espansione*
2. *L'interpretazione fisica dell'espansione dell'Universo*
3. *La storia dell'universo*
4. *Le strutture cosmiche*
5. *Origine e struttura dell'universo*
6. *Evento finale: star party*

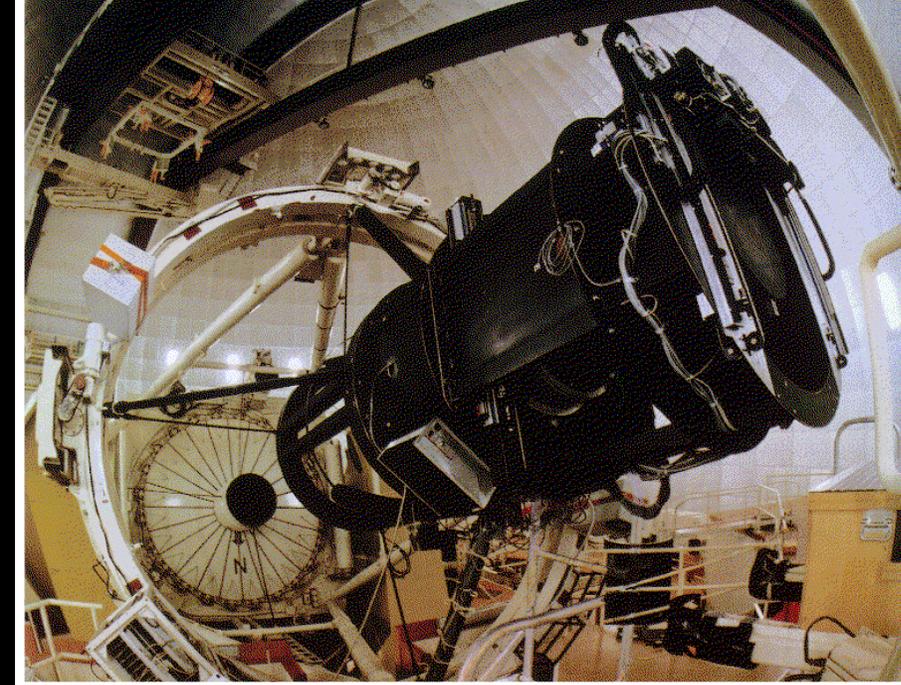
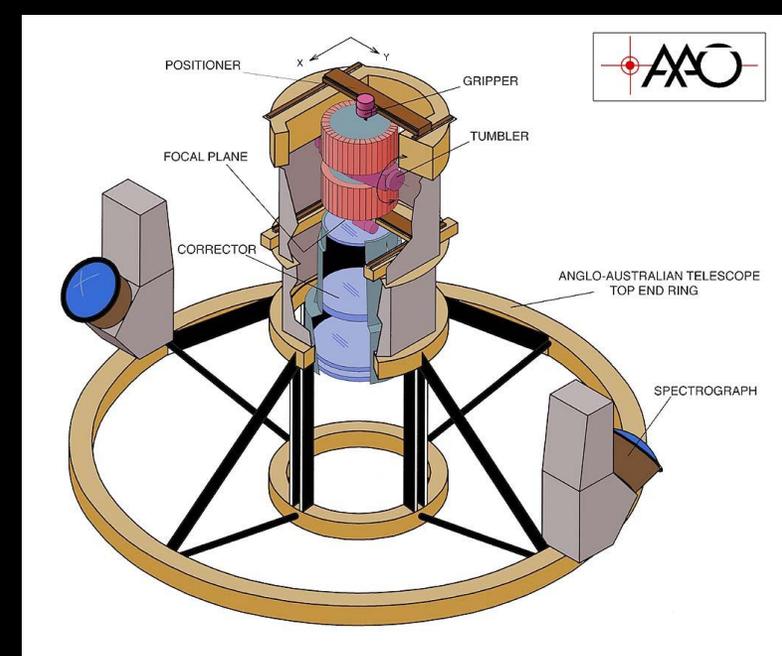
# Le strutture più grandi dell'universo

- Anni '50: conteggi e distribuzione bidimensionale delle galassie – indicazione di struttura a grande scala
- Anni '80: conteggi automatizzati (APM) di 1 M di galassie (2D)
- Anni '90-2000: redshift surveys
- Oggi: redshifts (e quindi posizioni in 3D) di milioni di galassie



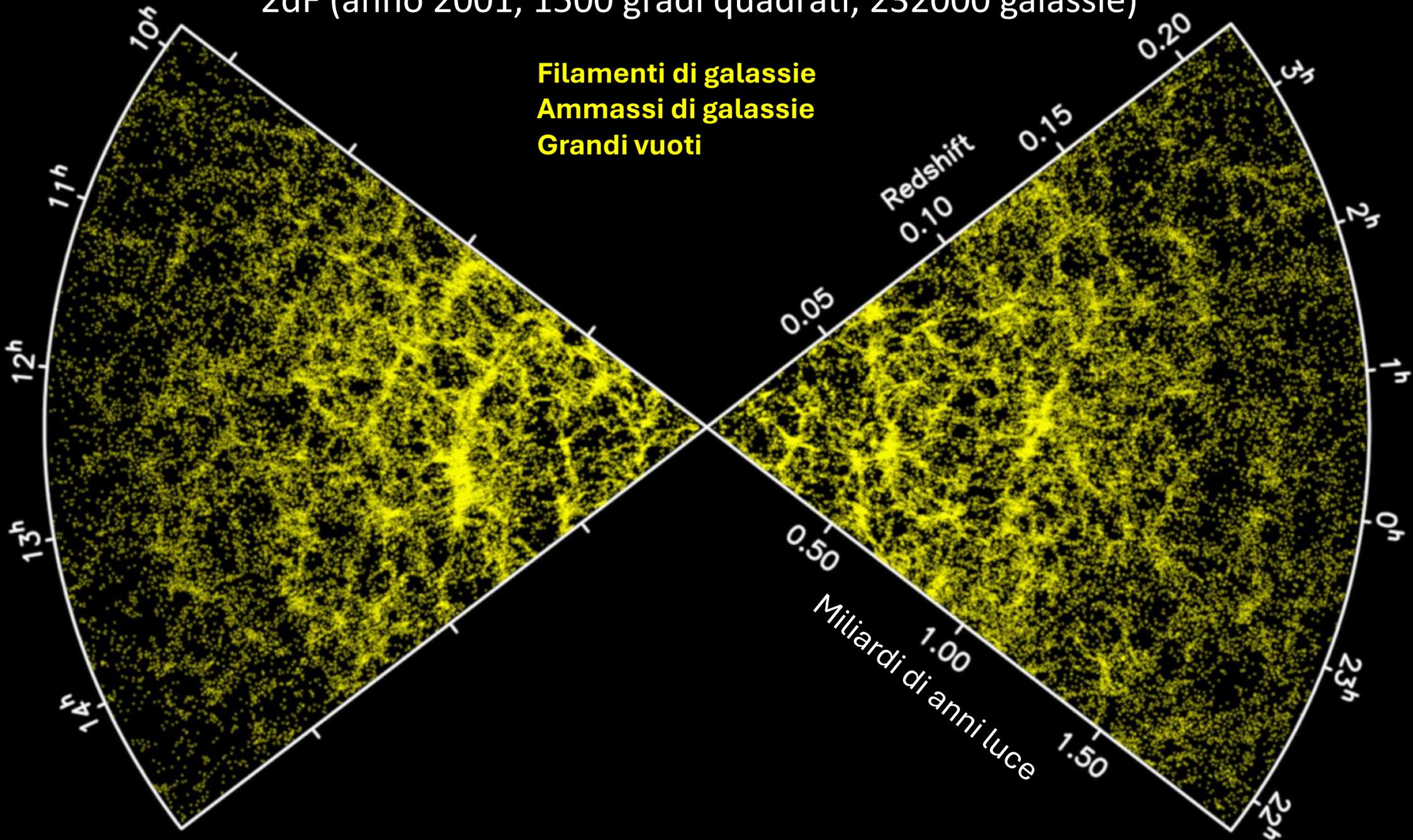


- Circa anno 2000:  
2dF facility
- uno spettrometro a fibre ottiche automatizzato  
montato all'anglo-australian telescope
- **Redshift surveys**



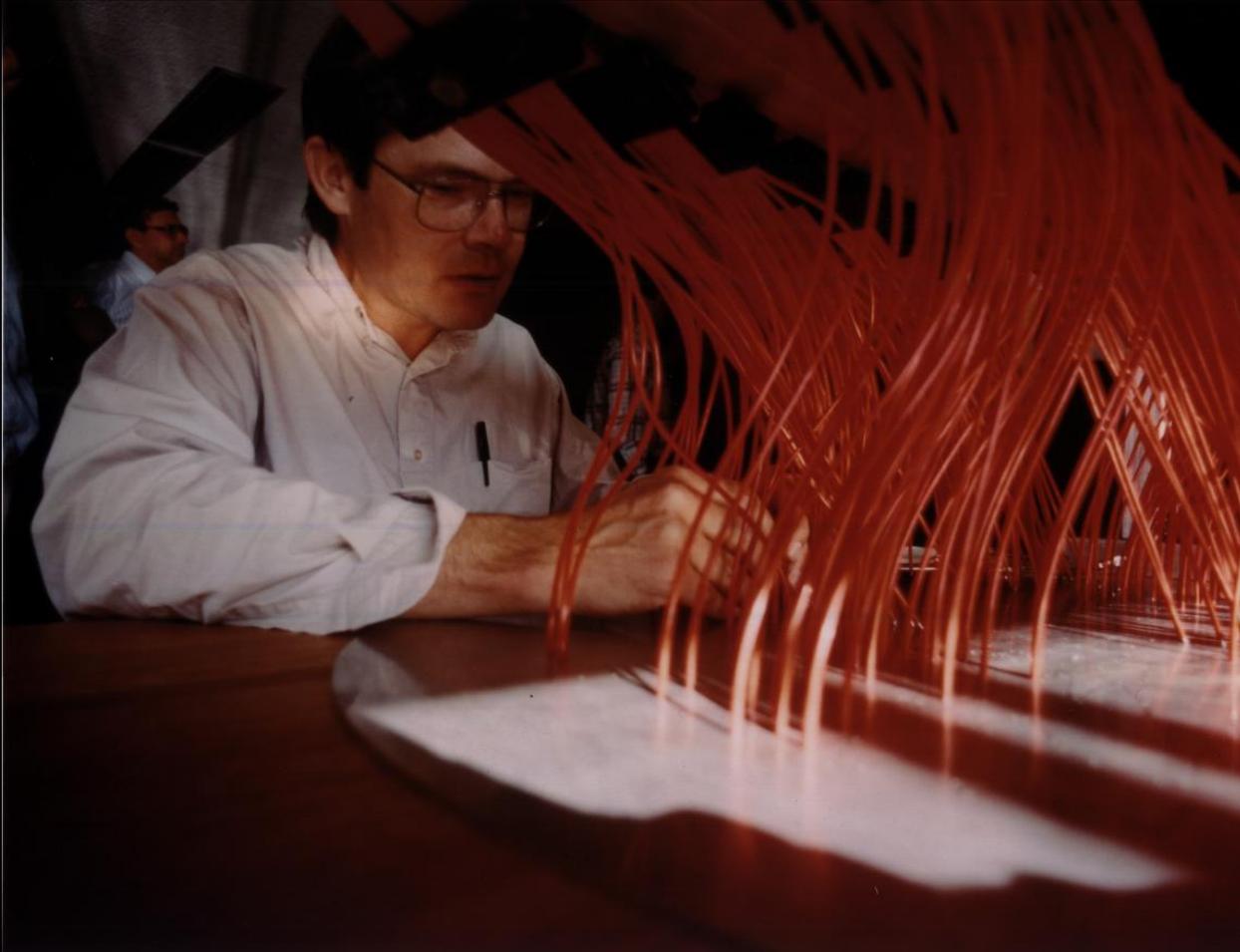
2dF (anno 2001, 1500 gradi quadrati, 232000 galassie)

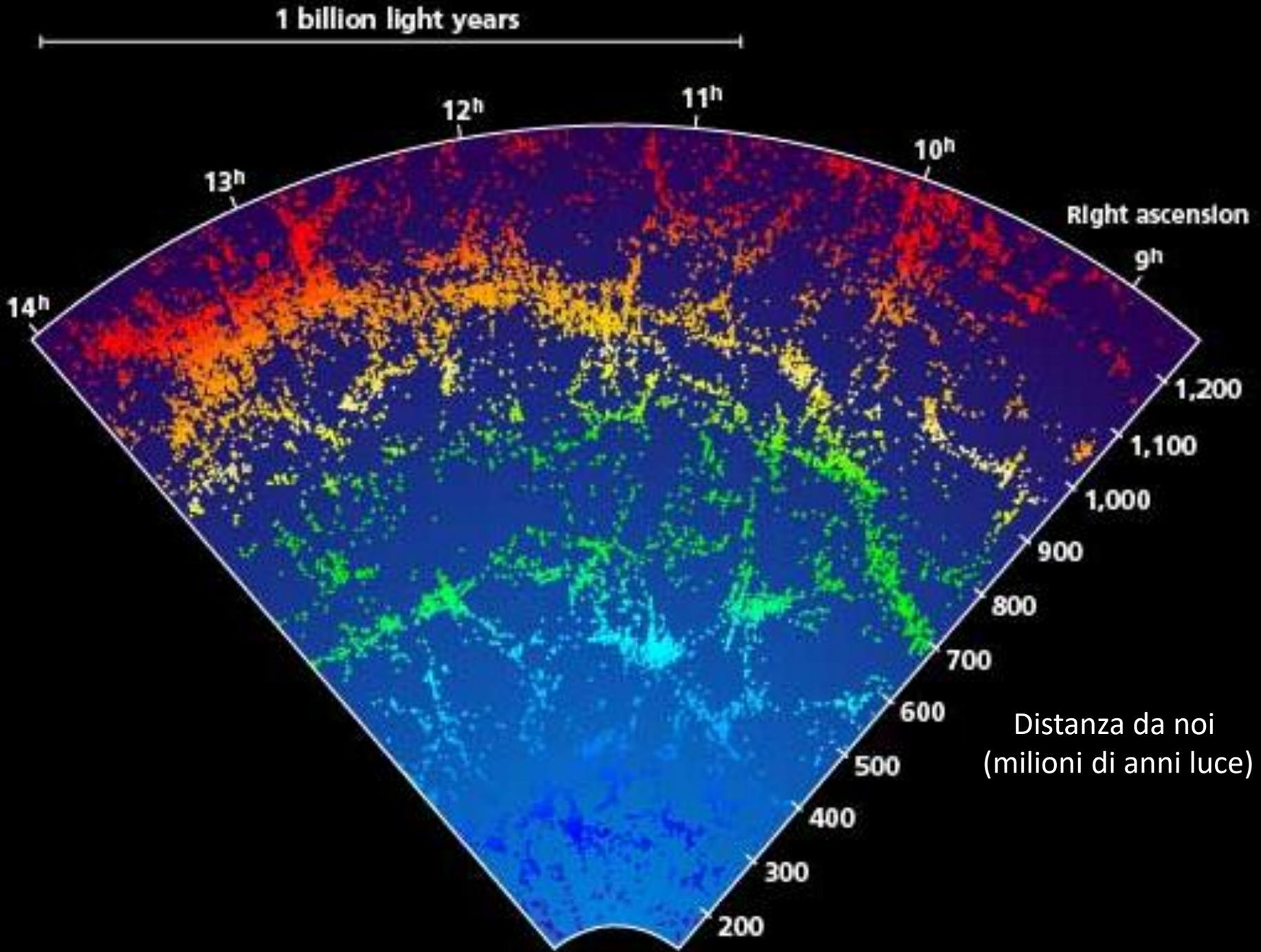
**Filamenti di galassie**  
**Ammassi di galassie**  
**Grandi vuoti**

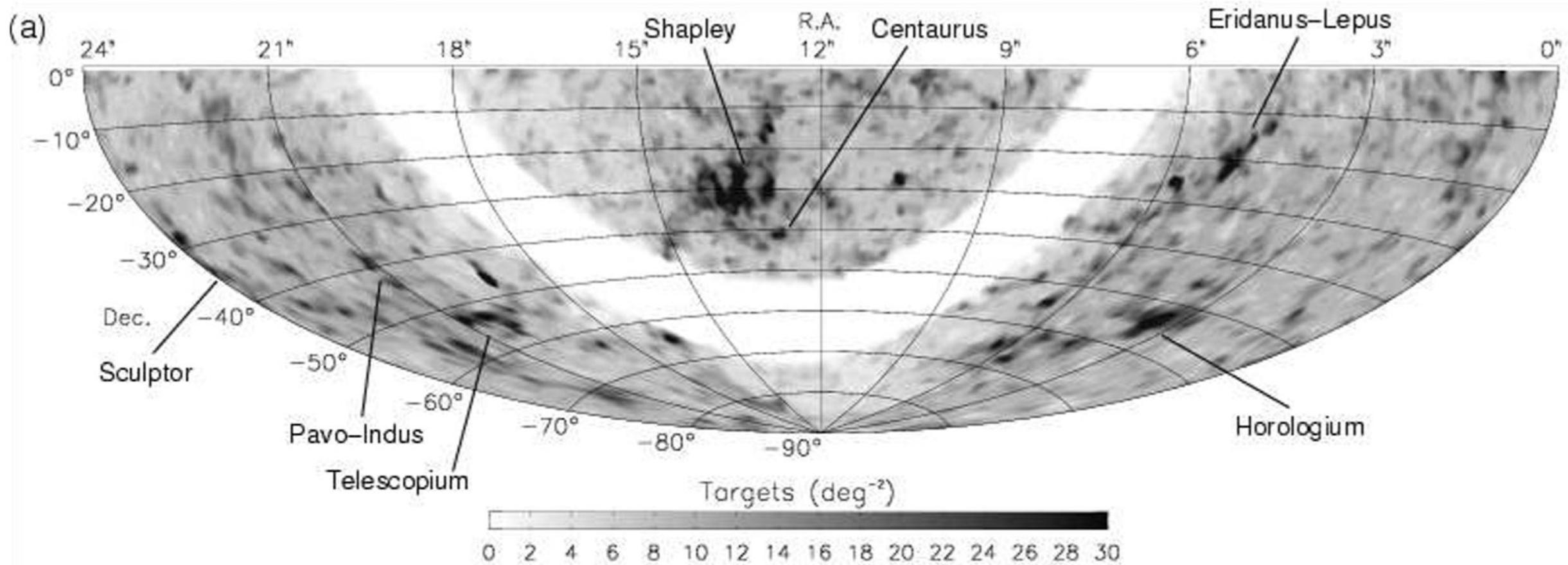




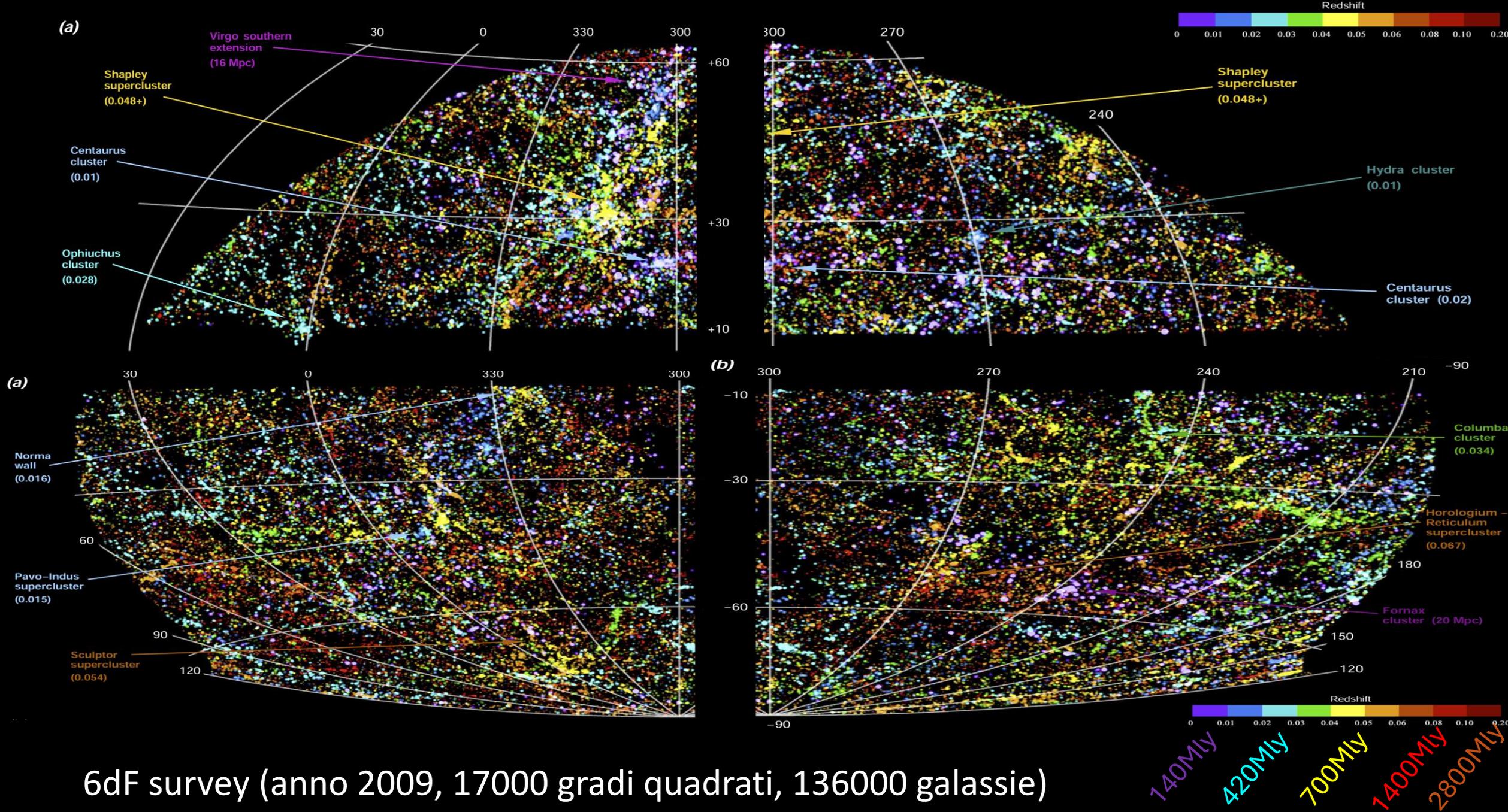
- Sloan Digital Sky Survey (2000-2008)
- Telescopio dedicato e spettrometro a fibre ottiche.
- Più di 1 milione di galassie !



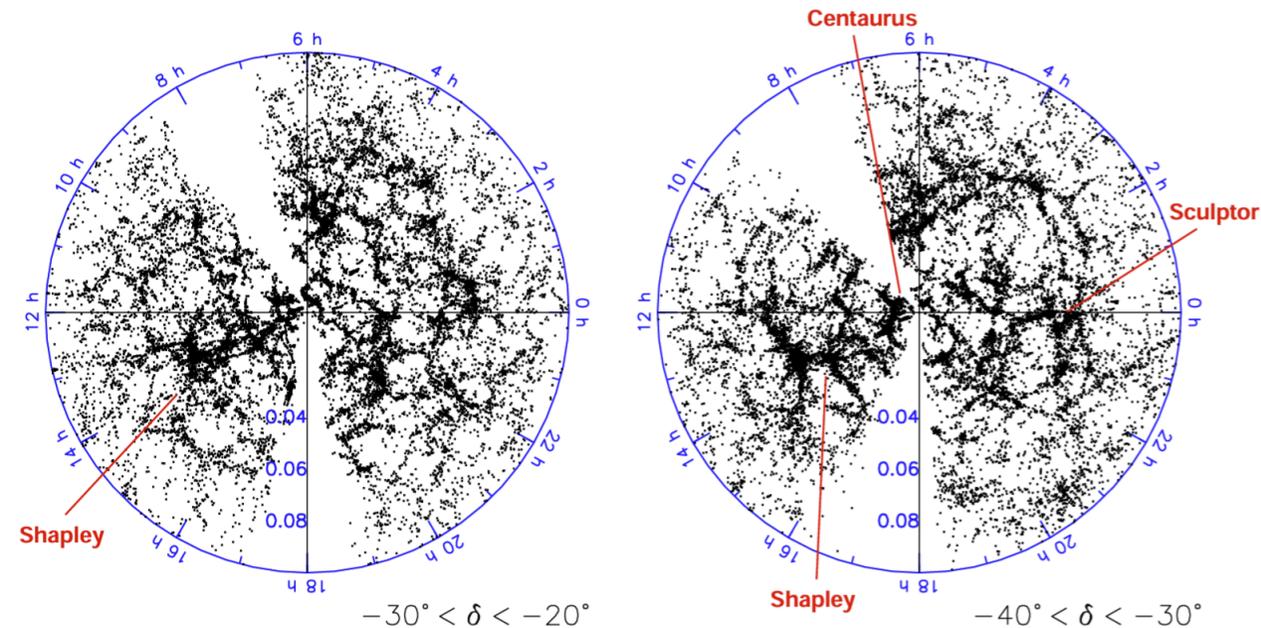
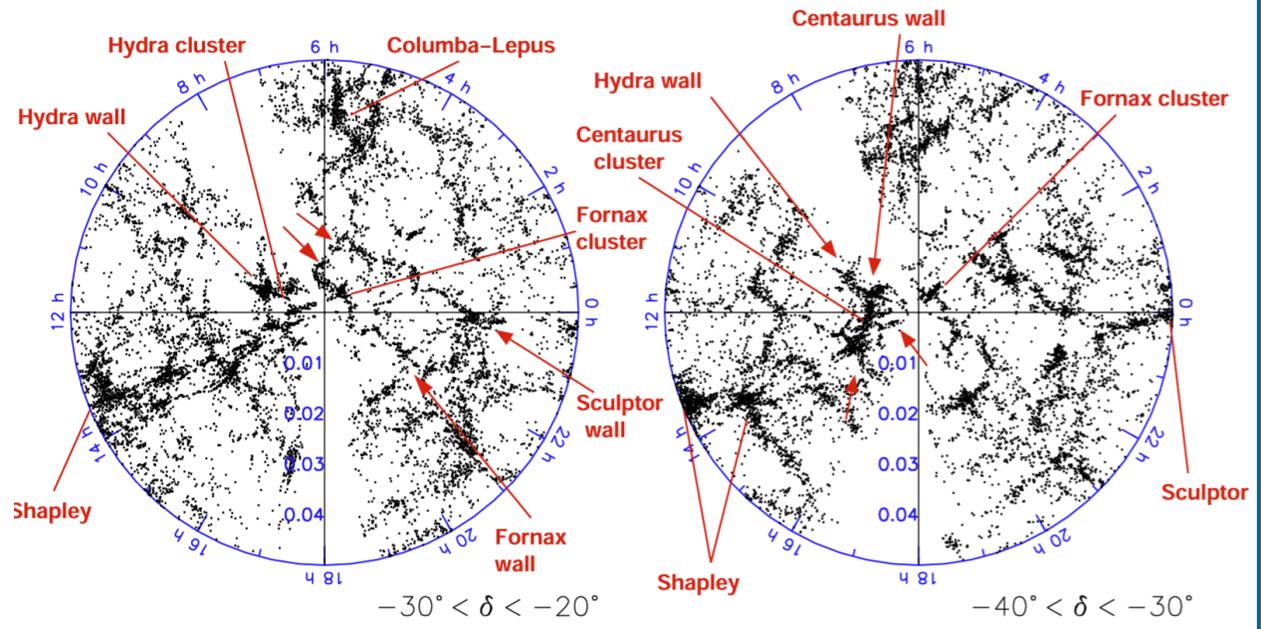
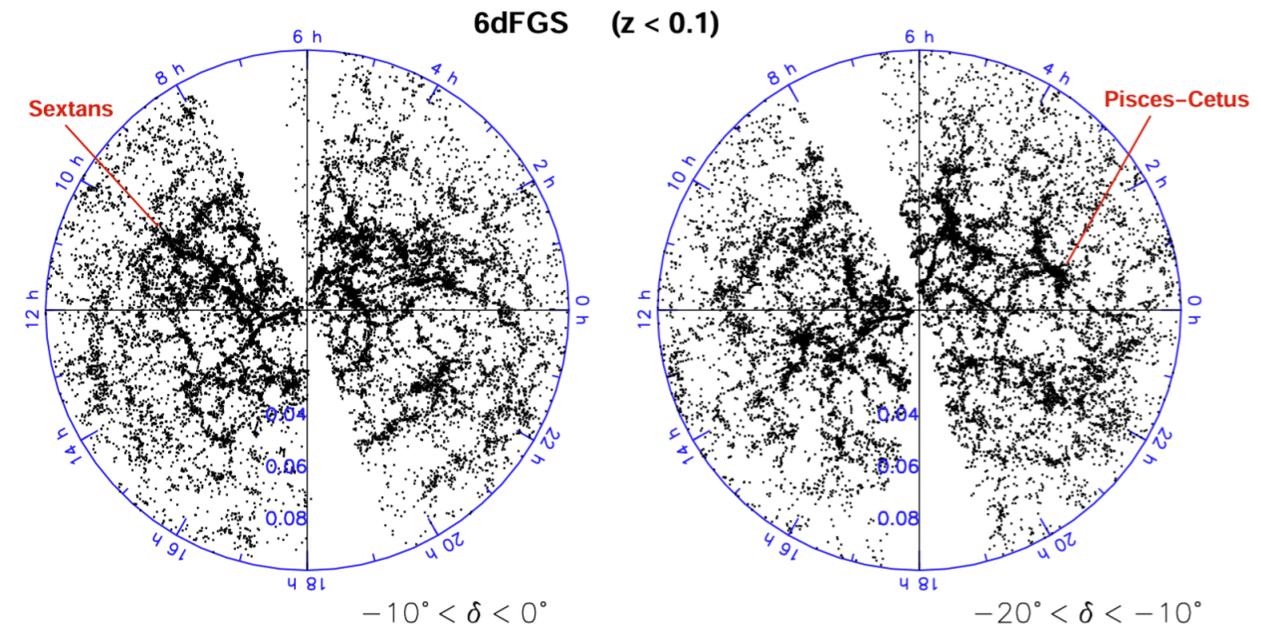
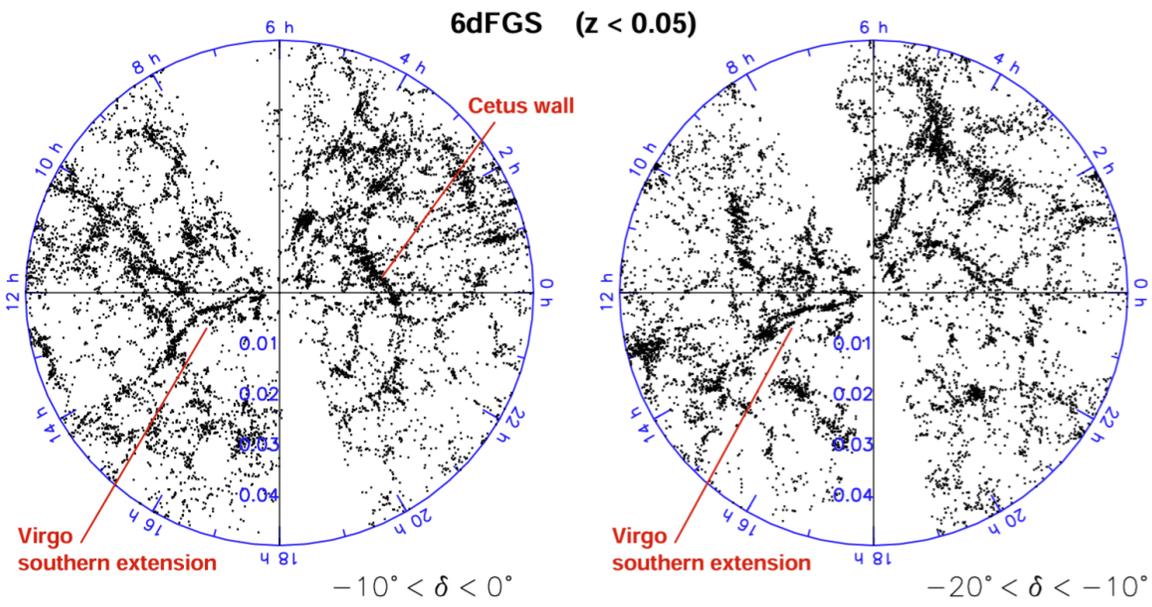




6dF (anno 2009, 17000 gradi quadrati, 136000 galassie)



6dF survey (anno 2009, 17000 gradi quadrati, 136000 galassie)

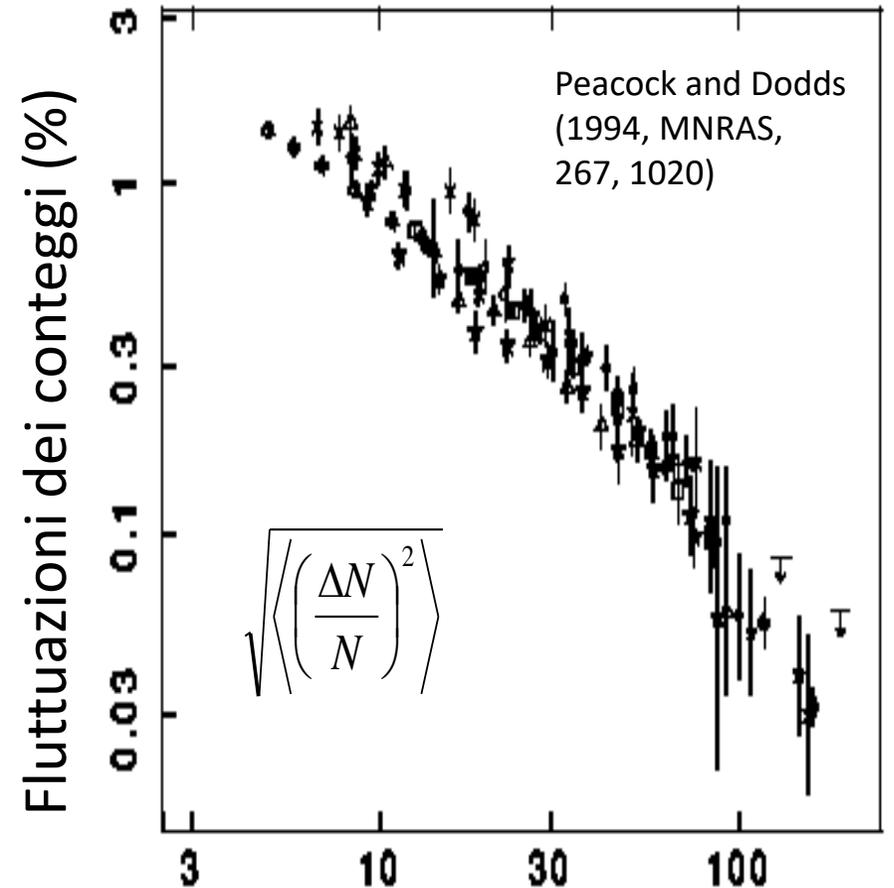


6dF (anno 2009, 17000 gradi quadrati, 136000 galassie)



# Struttura a grande scala dell'universo attuale

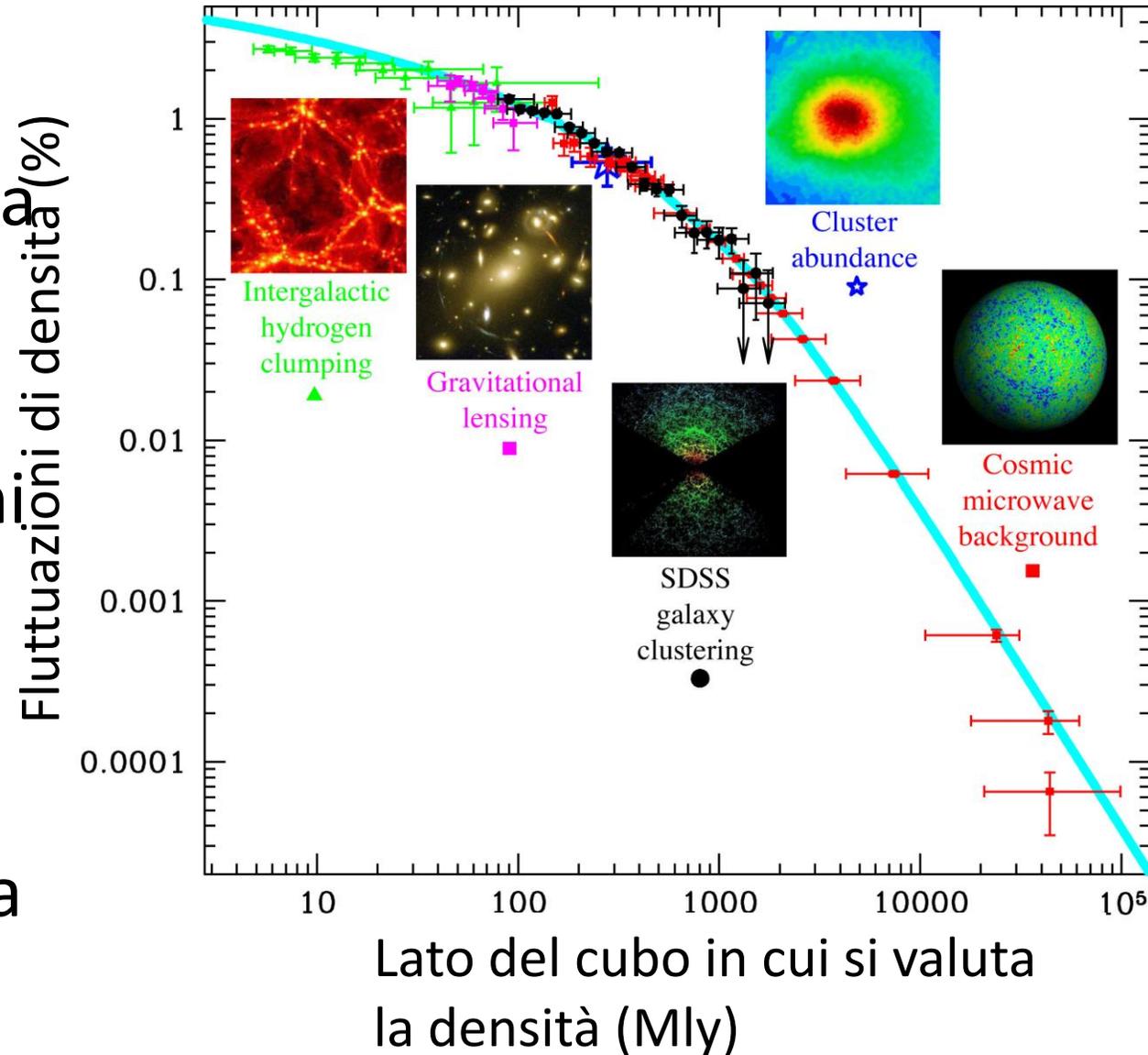
- L'universo attuale (relativamente vicino) ha una struttura a spugna con filemanti di galassie separati da grandi vuoti
- Le fluttuazioni di densità diminuiscono se mediate su volumi sempre maggiori (indicazione di *omogeneità* a grandi scale)



Lato del cubo in cui si contano  
le galassie (Mpc)

# Struttura a grande scala dell'universo attuale

- L'universo attuale (relativamente vicino) ha una struttura a spugna con filemanti di galassie separati da grandi vuoti
- Le fluttuazioni di densità diminuiscono se mediate su volumi sempre maggiori (indicazione di *omogeneità* a grandi scale)
- Le galassie sono le punte di una distribuzione di iceberg di materia oscura.



galassie

materia oscura

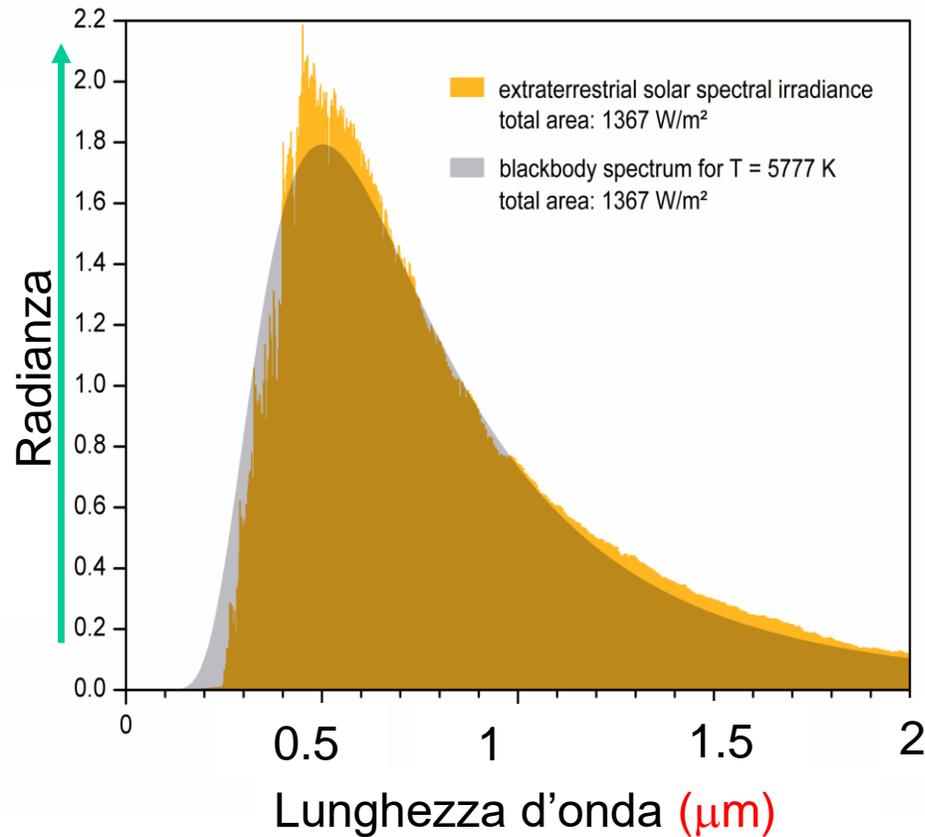


Simulazione consistente con dati SDSS (millennium simulation)

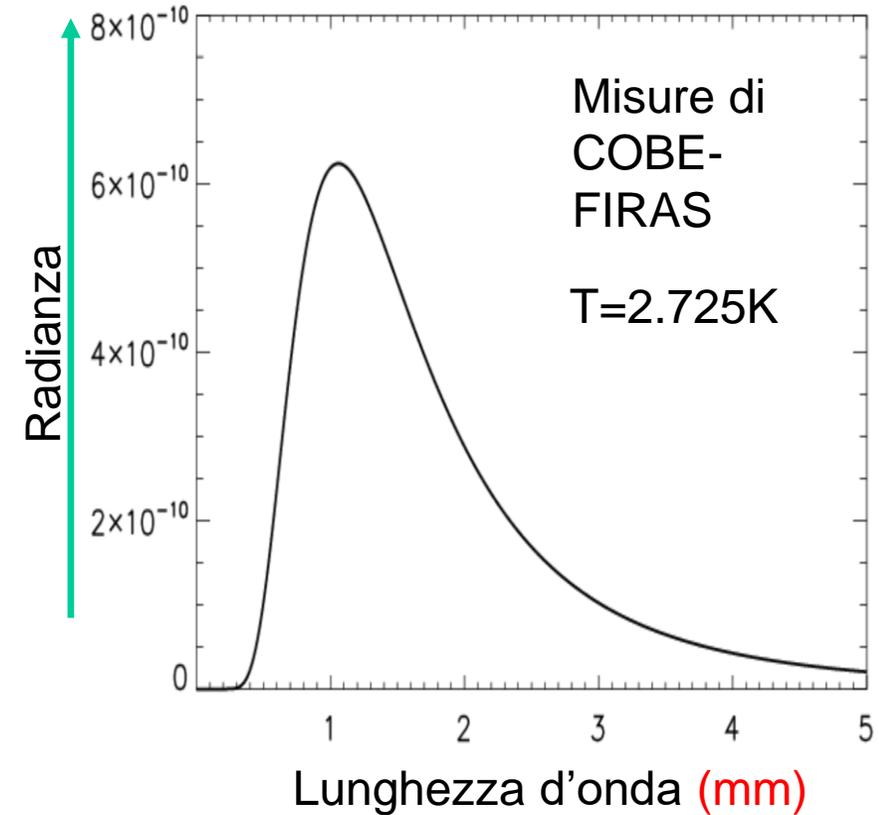
L'universo primordiale, era molto più omogeneo... ce lo dice il fondo cosmico di microonde  
Come siamo arrivati alla formazione di queste strutture ?

Come dalla superficie esterna di una stella proviene luce di origine termica, così proviene luce di origine termica dal gas incandescente dell'universo primordiale.

Emissione del Sole  
(e dell'universo primordiale)

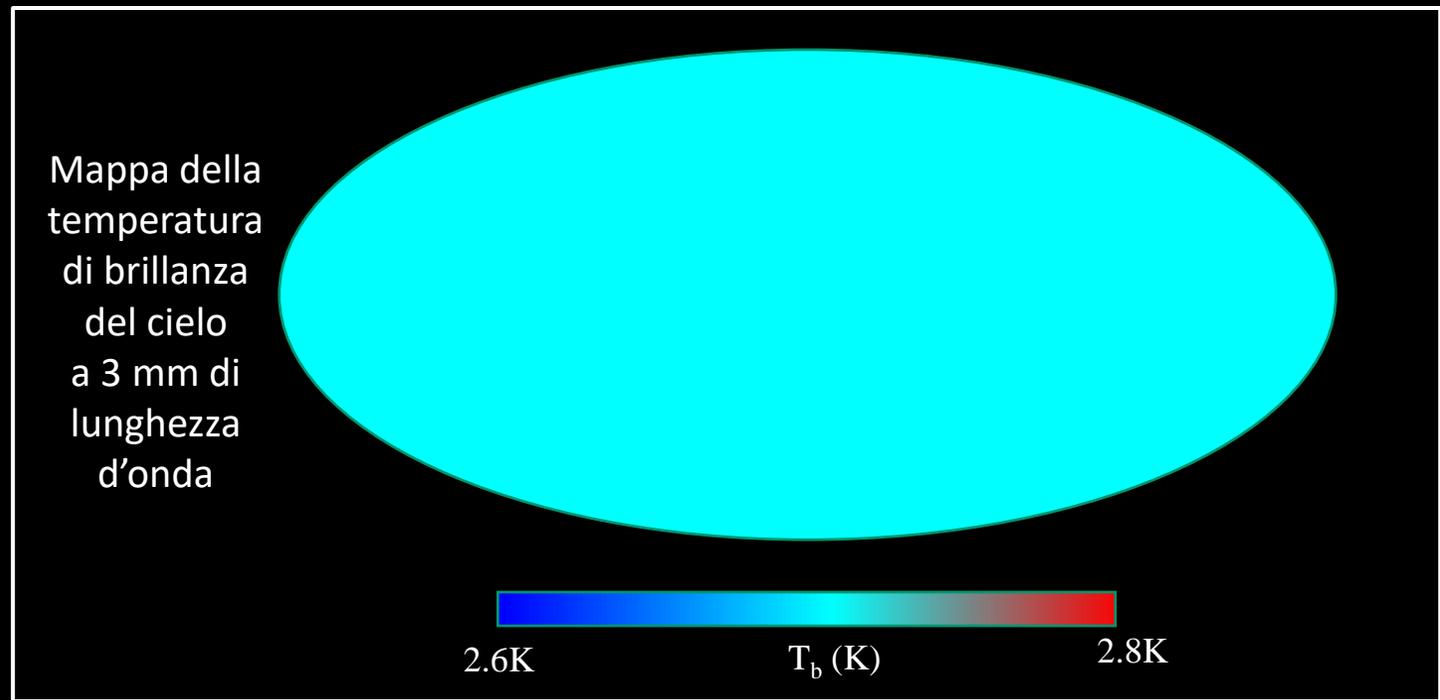
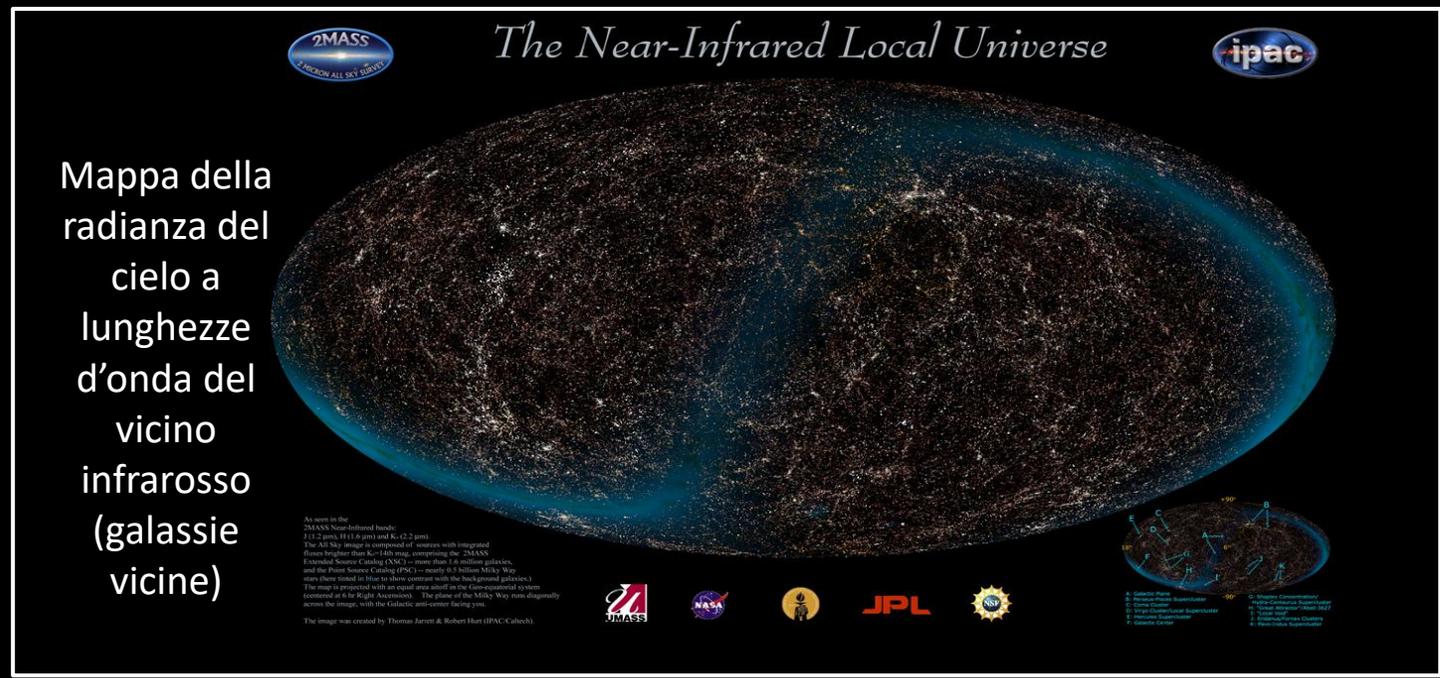


Emissione del fondo cosmico  
di microonde, scoperta nel 1965

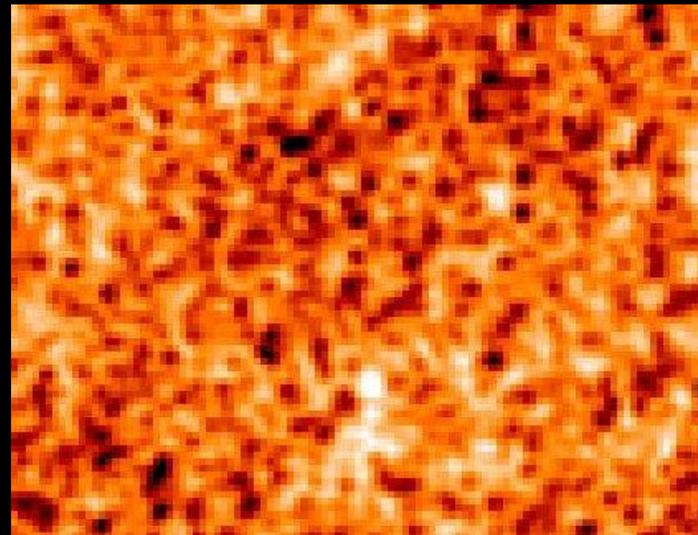


redshift

- A differenza di ciò che succede alle altre lunghezze d'onda, la mappa del cielo a 2 .. 3 mm di lunghezza d'onda è uniforme (*isotropa*):
- ovunque si osservi si riceve dal cielo la stessa brillantezza, entro l'1%.
- E' una prova della mancanza di strutture cosmiche nell'universo primordiale.
- Eppure il gas incandescente non poteva essere perfettamente uniforme !



Granulazione solare



Gas incandescente  
sulla superficie del  
Sole (5500 K)

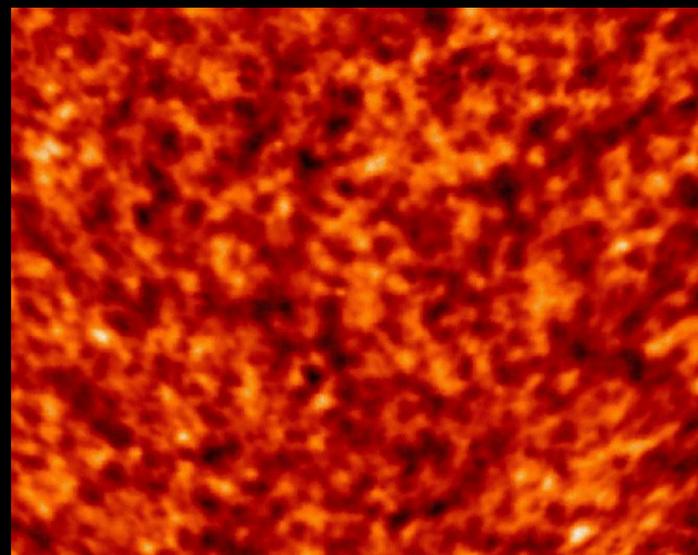
8 minuti

Qui, ora

Gas incandescente  
nell' universo  
primordiale  
(l' universo diventa  
trasparente a 3000 K)

14 miliardi di anni

Qui, ora



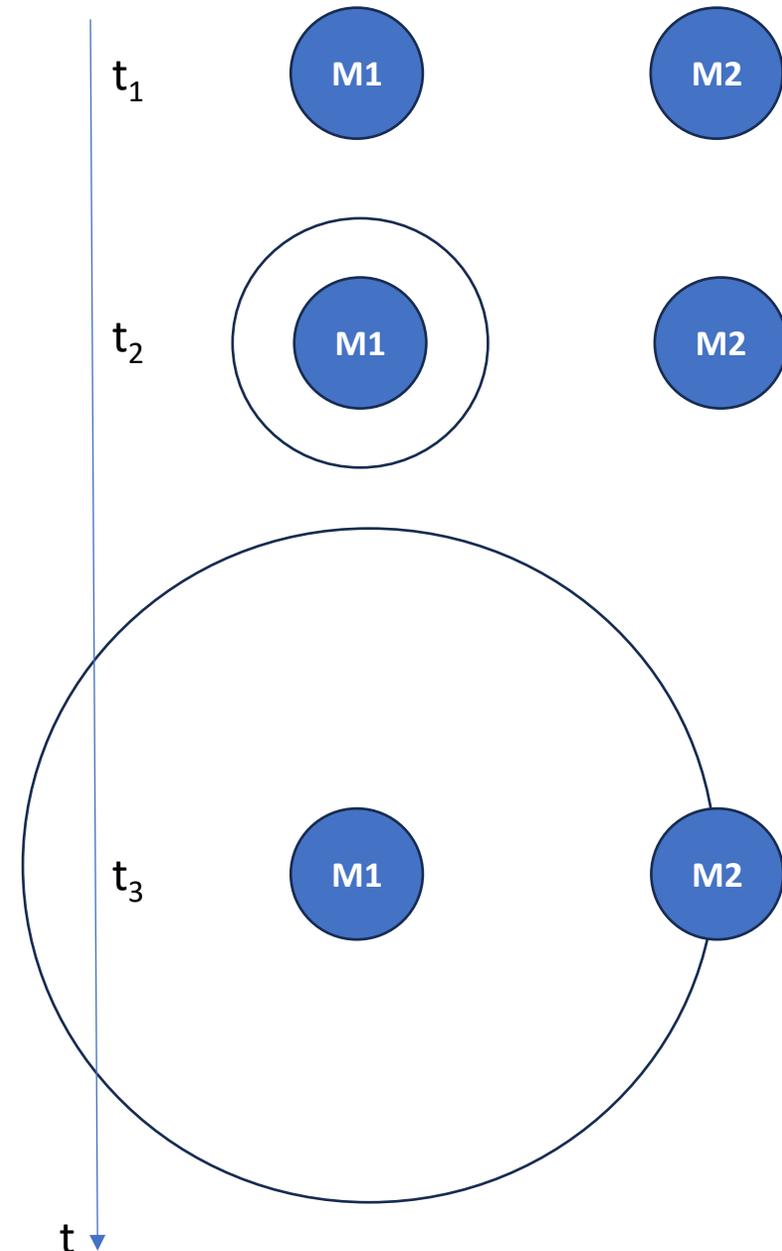
Mappa di BOOMERanG dell' Universo Primordiale

Ma quanto devono essere grandi le macchie nella mappa dell'universo primordiale ?

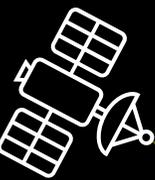
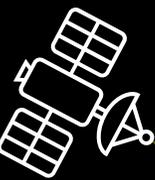
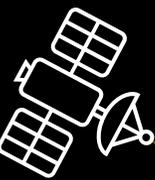
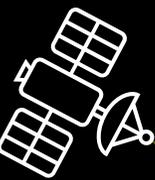
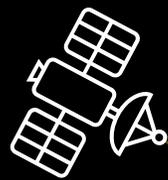


# Orizzonti causali

- Le forze, le azioni a distanza (forza elettromagnetica, forza gravitazionale, ...) agiscono *al massimo* alla velocità della luce.
- Se due oggetti si trovano a una certa distanza, il primo non può agire sul secondo tramite azioni a distanza prima del tempo che impiega la luce a viaggiare da lui al secondo.
- Quindi intorno ad ogni oggetto in un certo momento esiste una *sfera di azione* racchiusa da un orizzonte causale che comprende tutti gli oggetti su cui l'oggetto considerato ha potuto agire.
- Questa sfera ha un raggio, detto raggio dell'*orizzonte causale*, pari al tempo passato dal big-bang fino al momento considerato moltiplicato per la velocità della luce.
- L'orizzonte causale si allarga al passare del tempo.



# Orizzonti



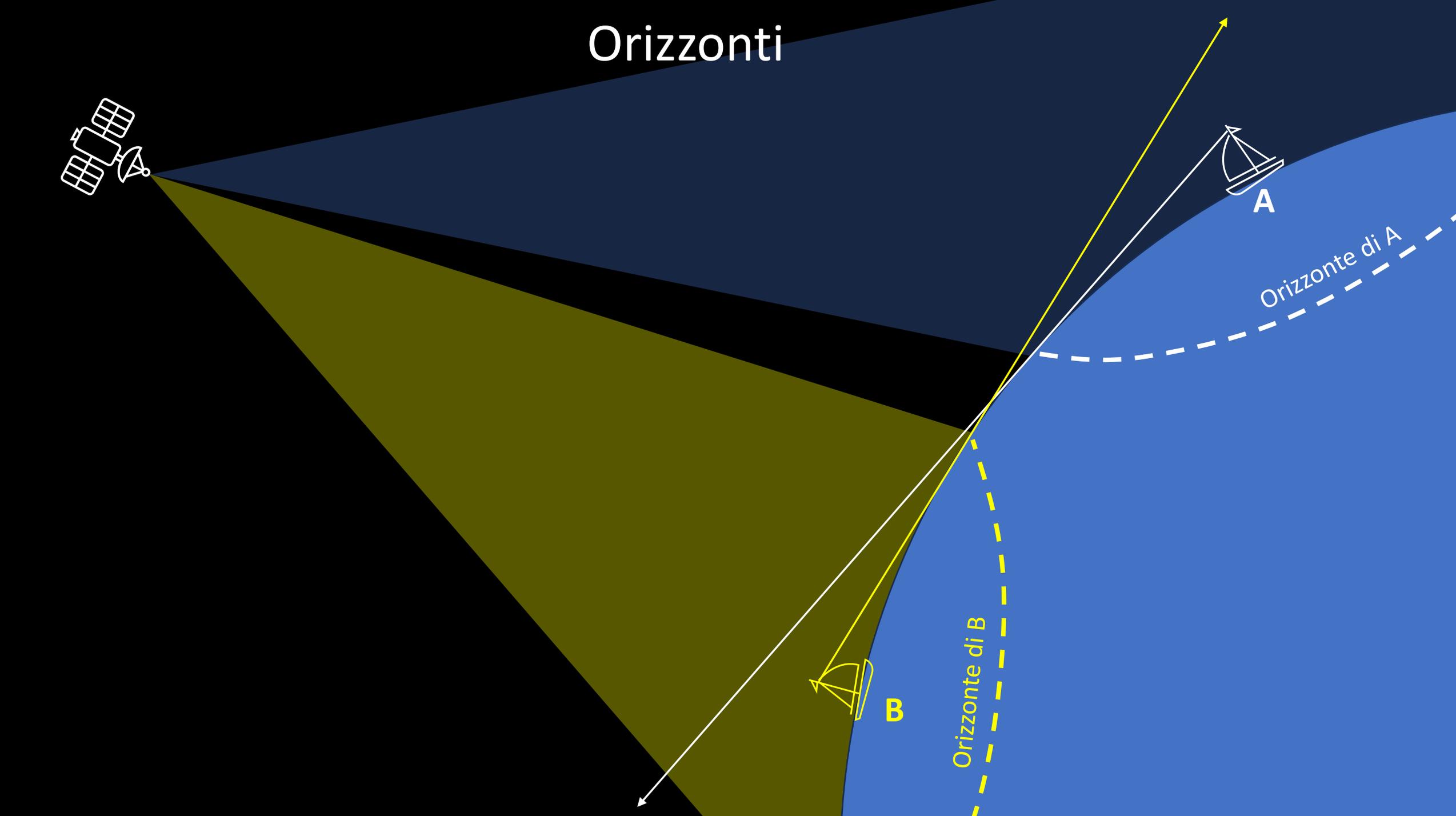
**B**

Orizzonte di B



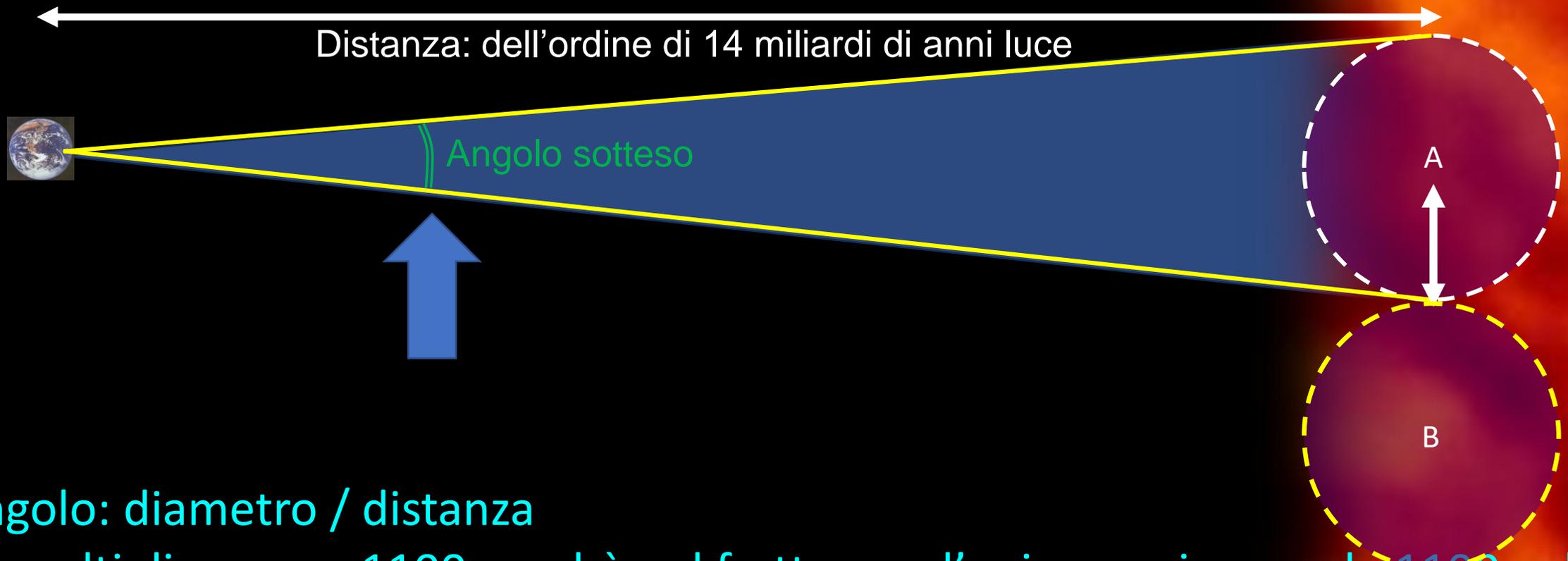
**A**

Orizzonte di A



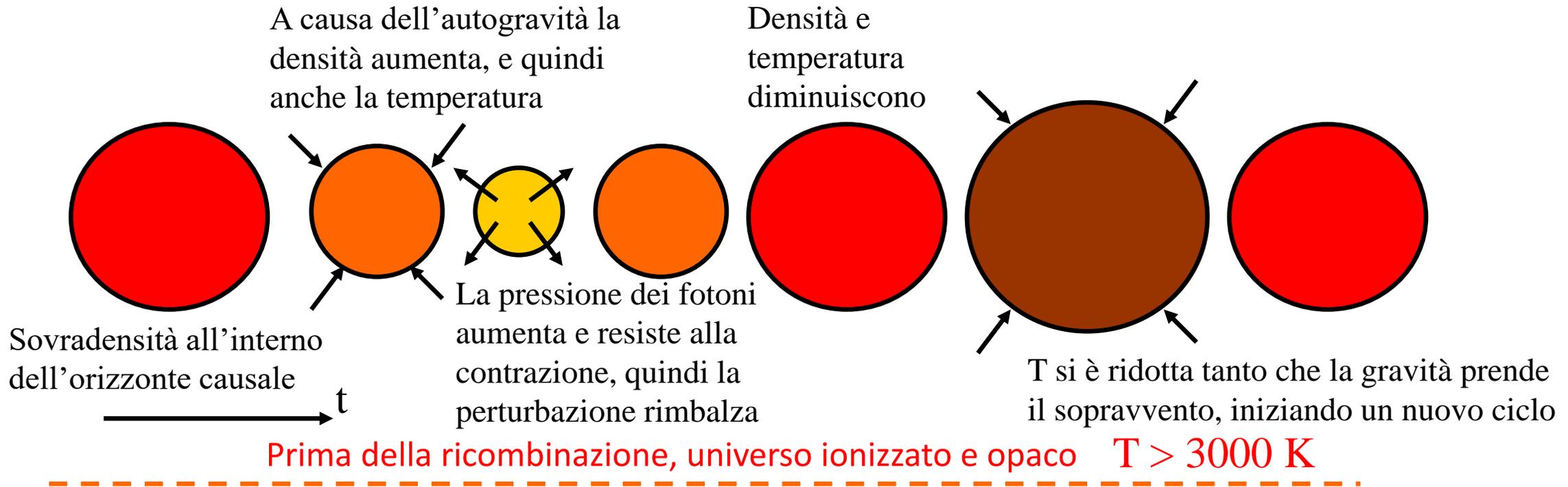
# Orizzonti causali

Orizzonte causale di A:  
alla ricombinazione: circa  
380000 anni luce



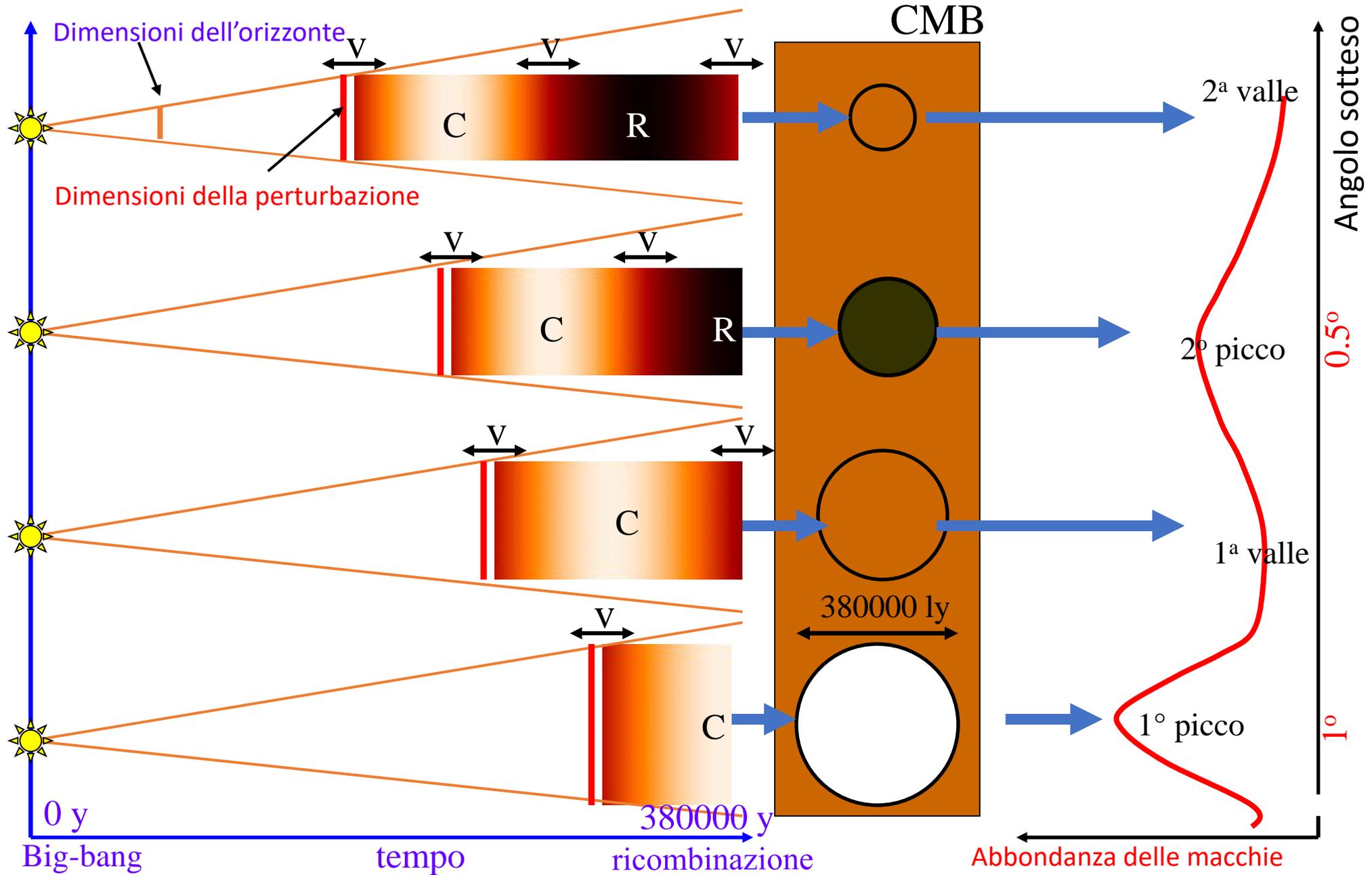
- Angolo:  $\text{diametro} / \text{distanza}$
- da moltiplicare per 1100 perchè nel frattempo l'universo si espande 1100 volte
- Il risultato è circa 1 grado, il doppio della luna piena.
- Nell'immagine del fondo cosmico di microonde ci aspettiamo macchie, dovute agli orizzonti causali, di circa 1 grado di raggio.

Le perturbazioni di densità **oscillavano** nel plasma primordiale, a causa degli effetti contrastanti di gravità e pressione dei fotoni



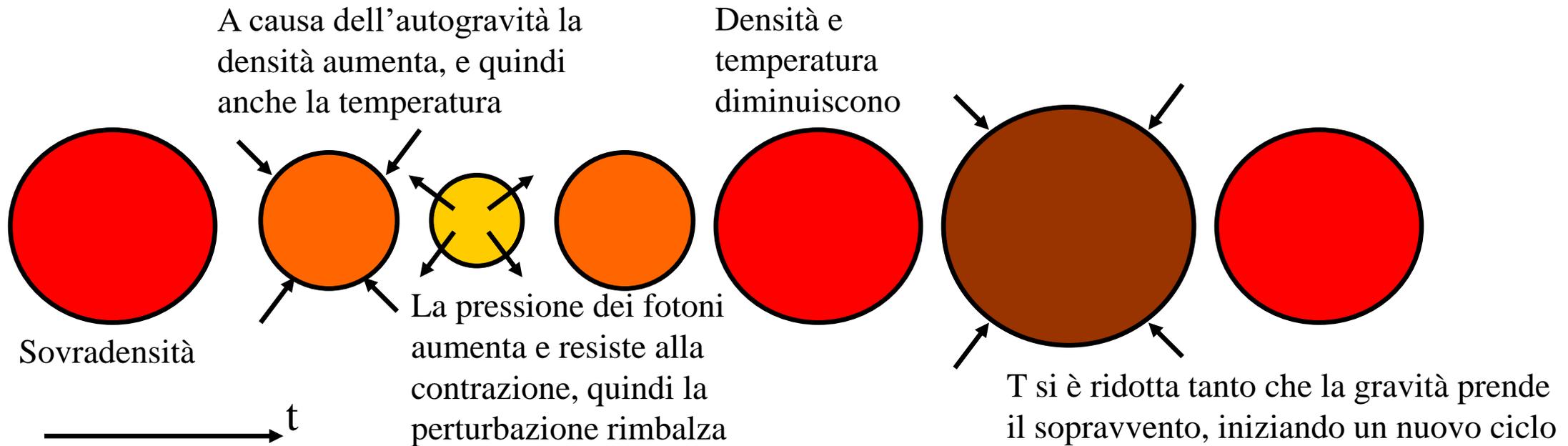
# Evoluzione delle piccole disomogeneità

Le sovradensità del fluido fotoni-materia iniziano ad oscillare solo quando l'orizzonte (acustico) diventa maggiore delle loro dimensioni. Quindi sovradensità di piccole dimensioni iniziano a oscillare prima di quelle di grandi dimensioni.



# Evoluzione delle piccole disomogeneità

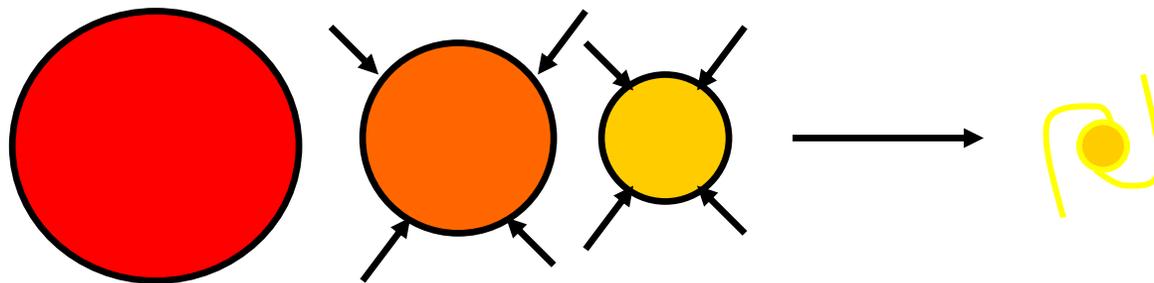
Le perturbazioni di densità **crescono**, dopo la ricombinazione, perchè non c'è più la pressione dei fotoni.



Prima della ricombinazione, universo ionizzato e opaco  $T > 3000 \text{ K}$

t

Dopo la ricombinazione, universo neutro e trasparente  $T < 3000 \text{ K}$



Qui i fotoni non interagiscono più con la materia, e quindi la gravità dovuta principalmente alle strutture di materia oscura, può fare il suo lavoro, formando le strutture.

Quanto detto finora è quanto si sapeva già dai tempi di Penzias e Wilson, circa 60 anni fa.

- Come siamo riusciti ad ottenere mappe dettagliate dell'universo primordiale ?
- Che cosa ci dicono sul processo di formazione delle strutture cosmiche ?

# “Ricetta” per osservare l’*immagine* dell’ universo primordiale

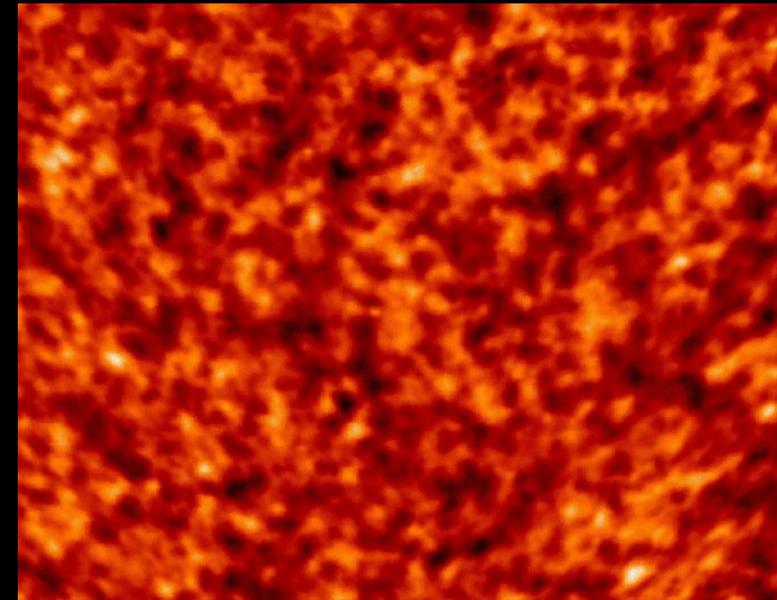
Puntare il telescopio dove nel visibile non si vede nulla (!)

Al posto dell’occhio, piazzare nel fuoco del telescopio un  *sensore* sensibile a lunghezze d’onda molto più lunghe (rivelatore di microonde)

Aumentare il più possibile la sensibilità del sensore, quindi *raffreddarlo* il più possibile

Evitare l’umidità atmosferica, portando telescopio e sensore in un sito osservativo *molto freddo e secco* (alta montagna, Antartide...) oppure nello spazio (palloni, satelliti)

Avere un telescopio di dimensioni sufficienti per vedere dettagli del Cielo nelle microonde più piccoli di un grado (circa 2x le dimensioni della luna piena), il che nelle microonde non è banale.



# Seguendo la “ricetta”:

- Al posto dell’occhio, piazzare nel fuoco del telescopio un sensore sensibile a lunghezze d’onda molto più lunghe
- **Rivelatore di microonde**, e telescopio per le microonde
- Aumentare il più possibile la sensibilità del sensore, quindi raffreddarlo il più possibile



**Bolometro per le microonde**

Langley (1900)

.....  
Mauskopf (1995)

# Seguendo la "ricetta":

- Al posto dell'occhio, piazzare nel fuoco del telescopio un sensore sensibile a lunghezze d'onda molto più lunghe
- Rivelatore di microonde, e **telescopio** per le microonde
- Aumentare il più possibile la sensibilità del sensore, quindi raffreddarlo il più possibile



**Telescopio per  
le microonde  
ARGO 1988**  
Alluminio  
Modulatore

# Seguendo la “ricetta”:

- Al posto dell’occhio, piazzare nel fuoco del telescopio un sensore sensibile a lunghezze d’onda molto più lunghe
- Rivelatore di microonde, e telescopio per le microonde
- Aumentare il più possibile la **sensibilità** del sensore, quindi **raffreddarlo** il più possibile



**Sistema criogenico:**  
 $T = 1/1000$   
della  $T$   
ambiente



# Seguendo la “ricetta”:

- Al posto dell’occhio, piazzare nel fuoco del telescopio un sensore sensibile a lunghezze d’onda molto più lunghe
- Rivelatore di microonde, e telescopio per le microonde
- Aumentare il più possibile la **sensibilità** del sensore, quindi **raffreddarlo** il più possibile



**Sistema  
criogenico:**  
 $T = 1/1000$   
della  $T$   
ambiente

# Seguendo la “ricetta”:

- Evitare l’umidità atmosferica
- Il nemico è il **vapor d’acqua**, che assorbe le deboli microonde provenienti dall’universo, quando passano attraverso la parte umida dell’atmosfera terrestre



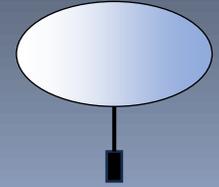
# Seguendo la “ricetta”:

- Per evitare l’umidità atmosferica si portano telescopio e sensore in un sito osservativo **molto freddo e secco** (alta montagna, Antartide...) **oppure nello spazio** (palloni, satelliti)

Satellite (spazio profondo)

Razzo sonda: 100 km:  
“limite” dell’atmosfera

40 km: Pallone stratosferico  
(spazio vicino)



20 km: aereo stratosferico

10 km: aereo di linea



5000m : “limite” del vapor d’acqua

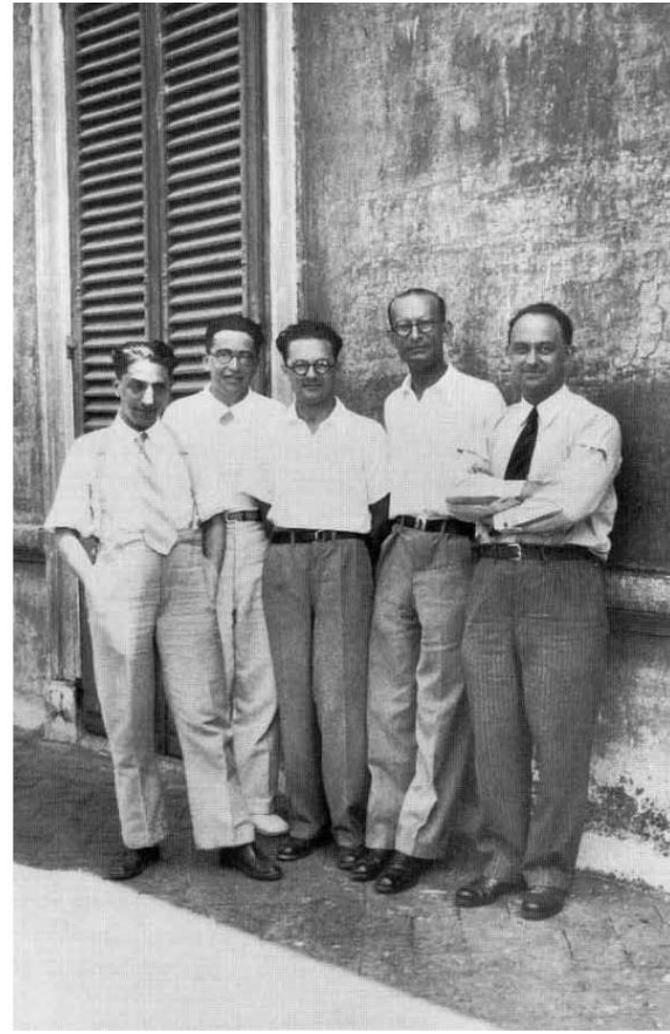




Pamir (1990): site testing at the Shorbulak telescope (4500 m quota)

Primi tentativi di utilizzo di rivelatori millimetrici in alta montagna per la misura di immagini dell'universo primordiale.





**Fig. 4.** Left: one of the first experiment carried out with stratospheric balloon in Italy is shown. The Balloon, with a volume of about 9,000 cubic meters, was launched from the Cagliari Elmas Airport (Sardinia, Italy). The experiment was designed and exploited under the lead of Prof. Edoardo Amaldi. Right: The group of the "Ragazzi di Via Panisperna": starting from the left: Oscar D'Agostino, Emilio Segre, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti ed Enrico Fermi. The scientific objective was to study the production of "starge" particles in the atmosphere, by means the use of emulsions. The flight was successfully exploited in 1953.



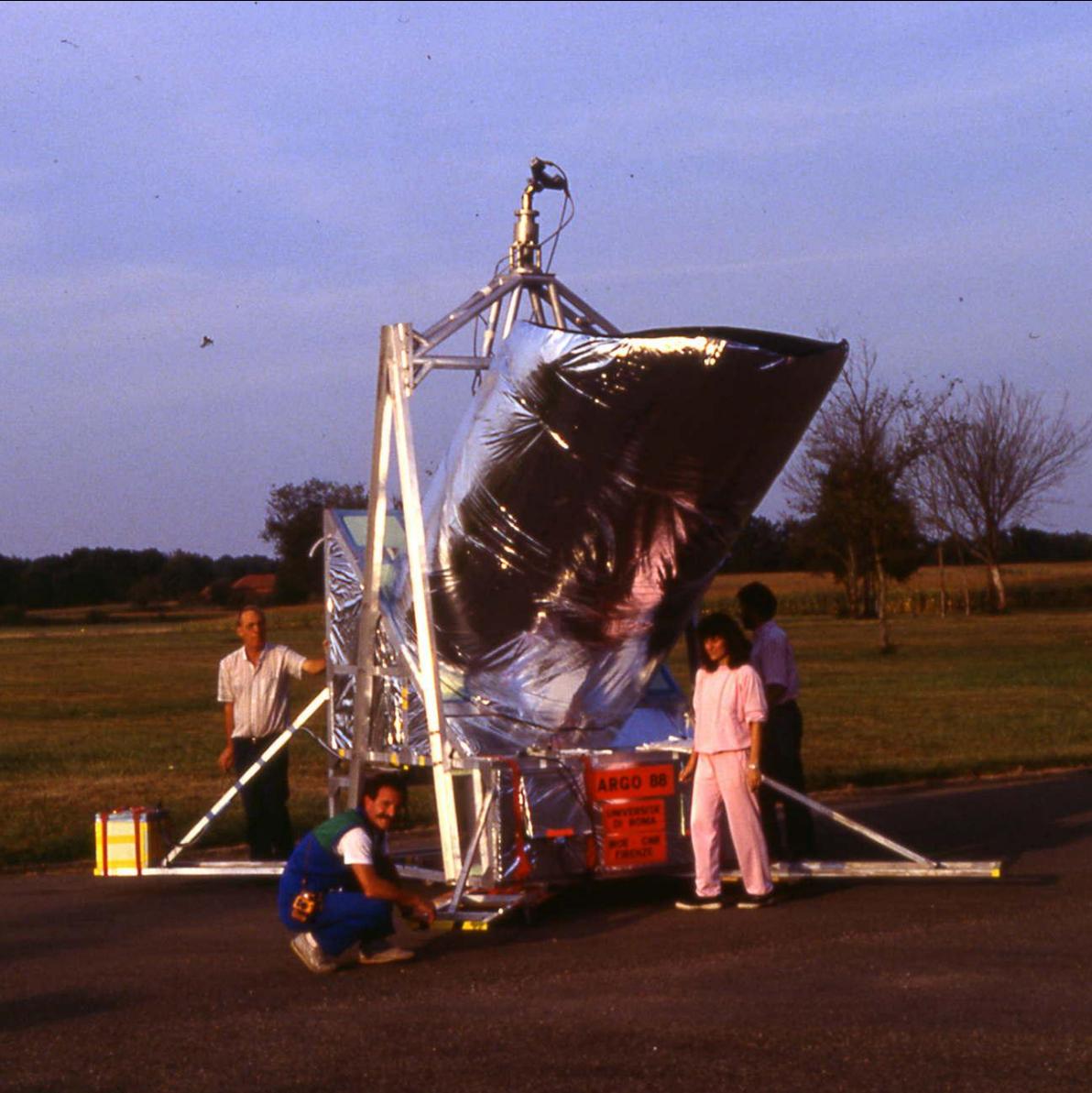
Trapani 1980  
ULISSE – lim.sup.



Trapani 1984



1988 Aire sur l' Adour  
(France) ARGO :

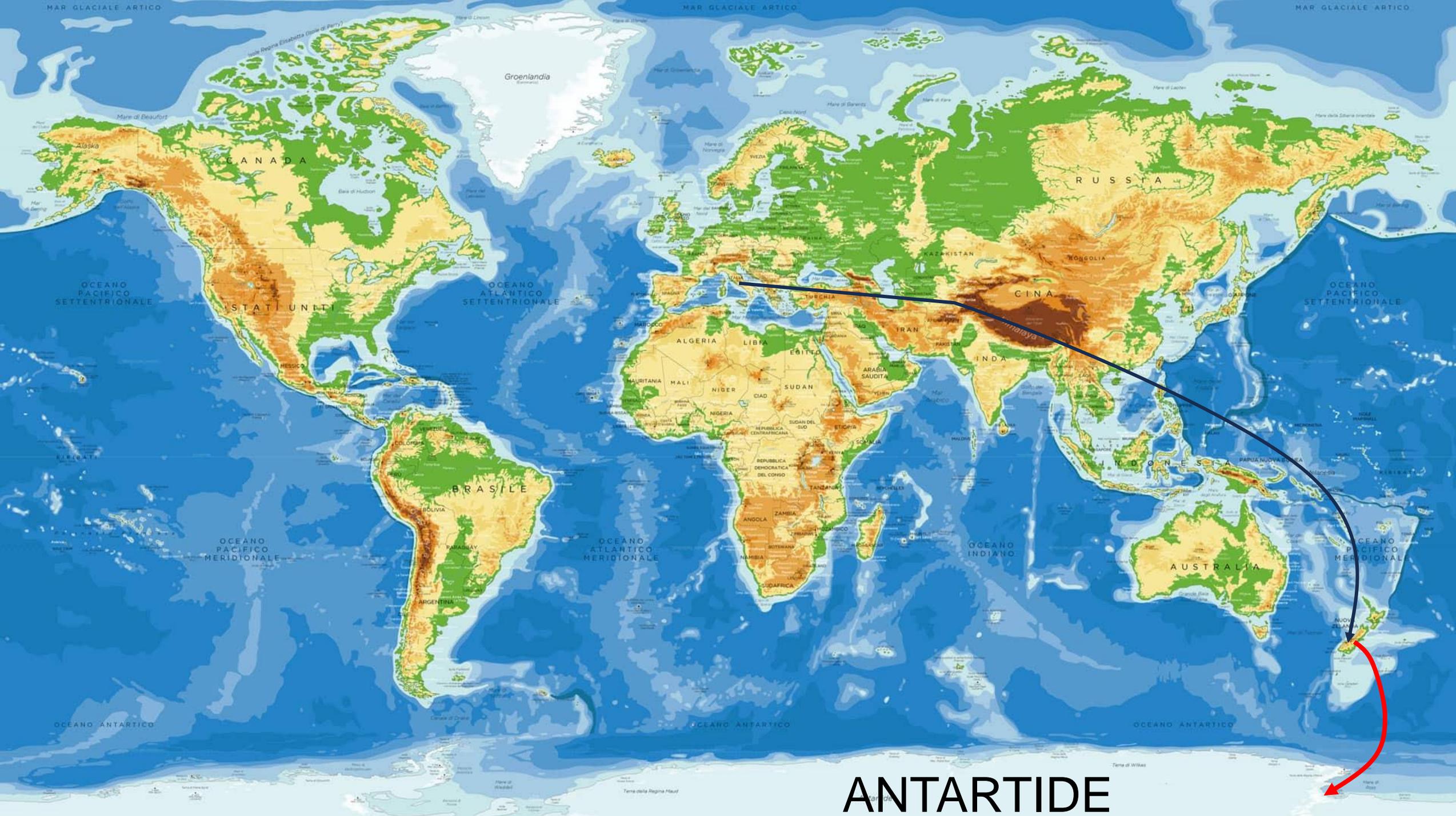


1992 Trapani

Left to right:

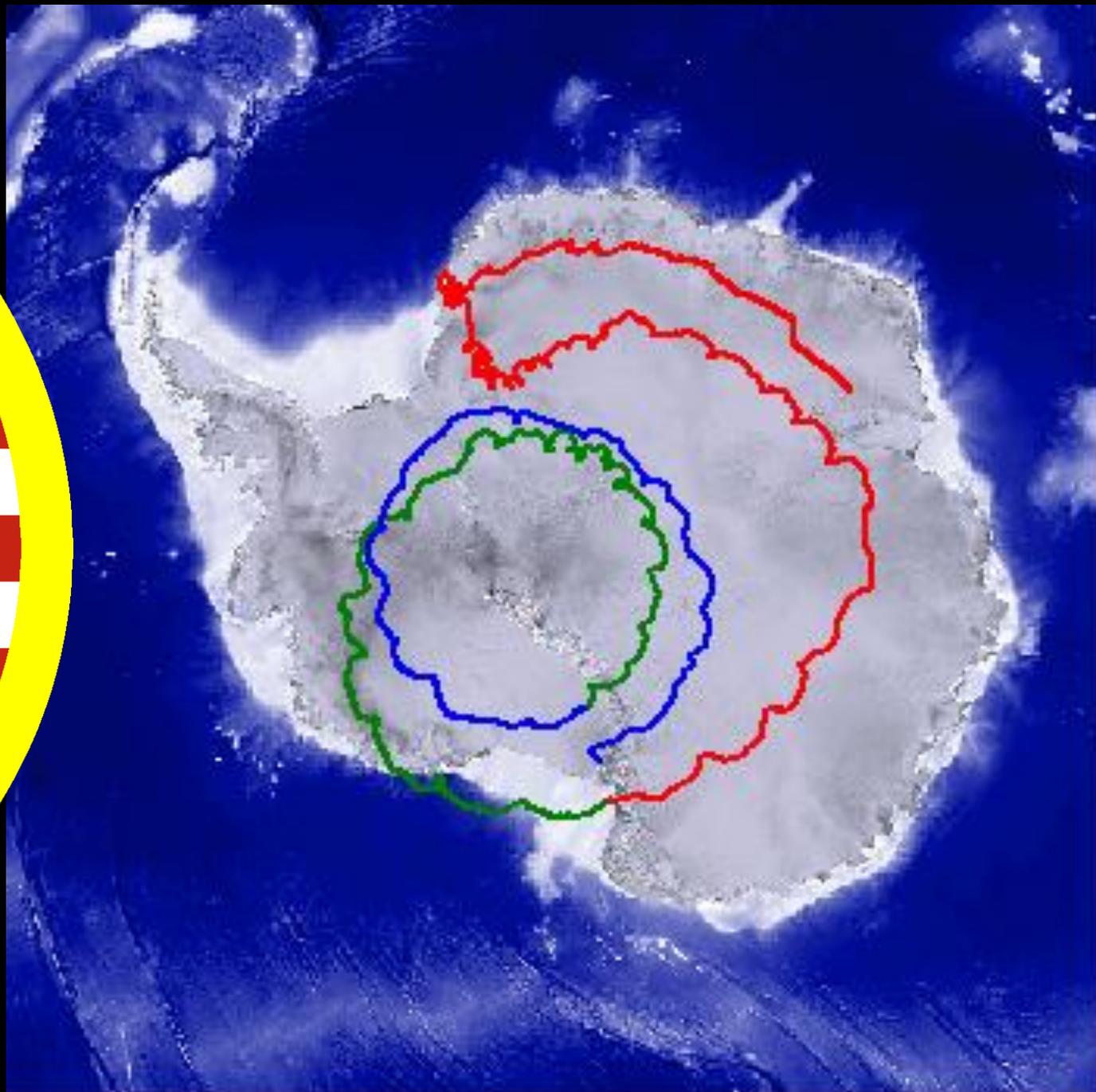
Silvia Masi, Antonella De Luca, Michele Epifani, Luca Amicone,  
Marco De Petris, Paolo de Bernardis, the 1.2m telescope

telescopio 1.2 m : misura di piccole fluttuazioni di  
intensità: un solo rivelatore, poche ore... → B98...

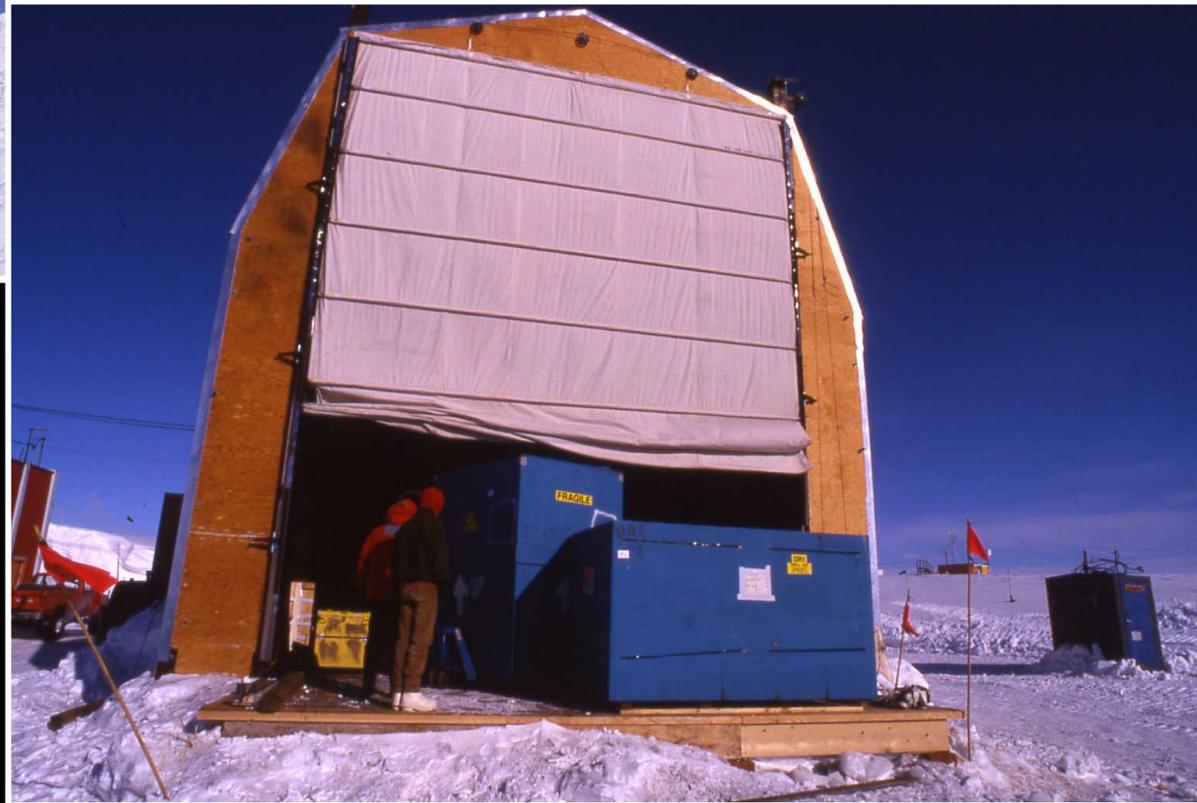


ANTARTIDE





# BOOMERanG : campagna di lancio a McMurdo (Antartide) 1998



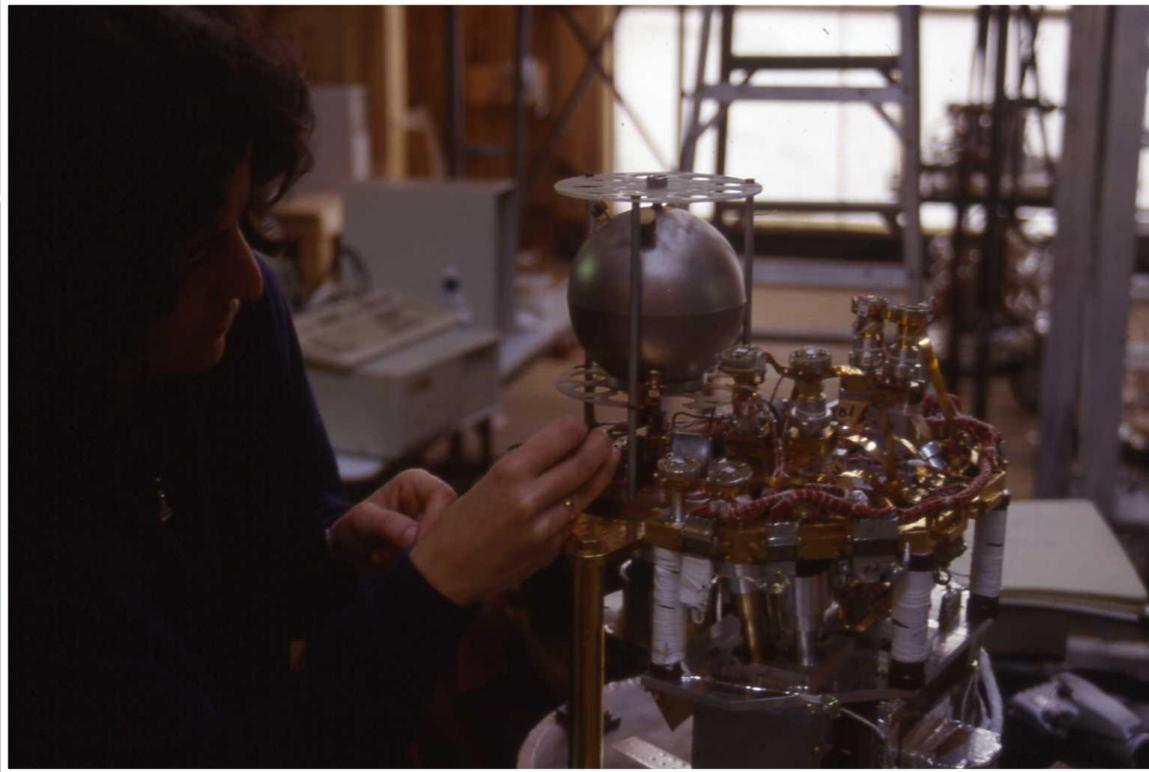
# BOOMERanG : campagna di lancio a McMurdo (Antartide) 1998



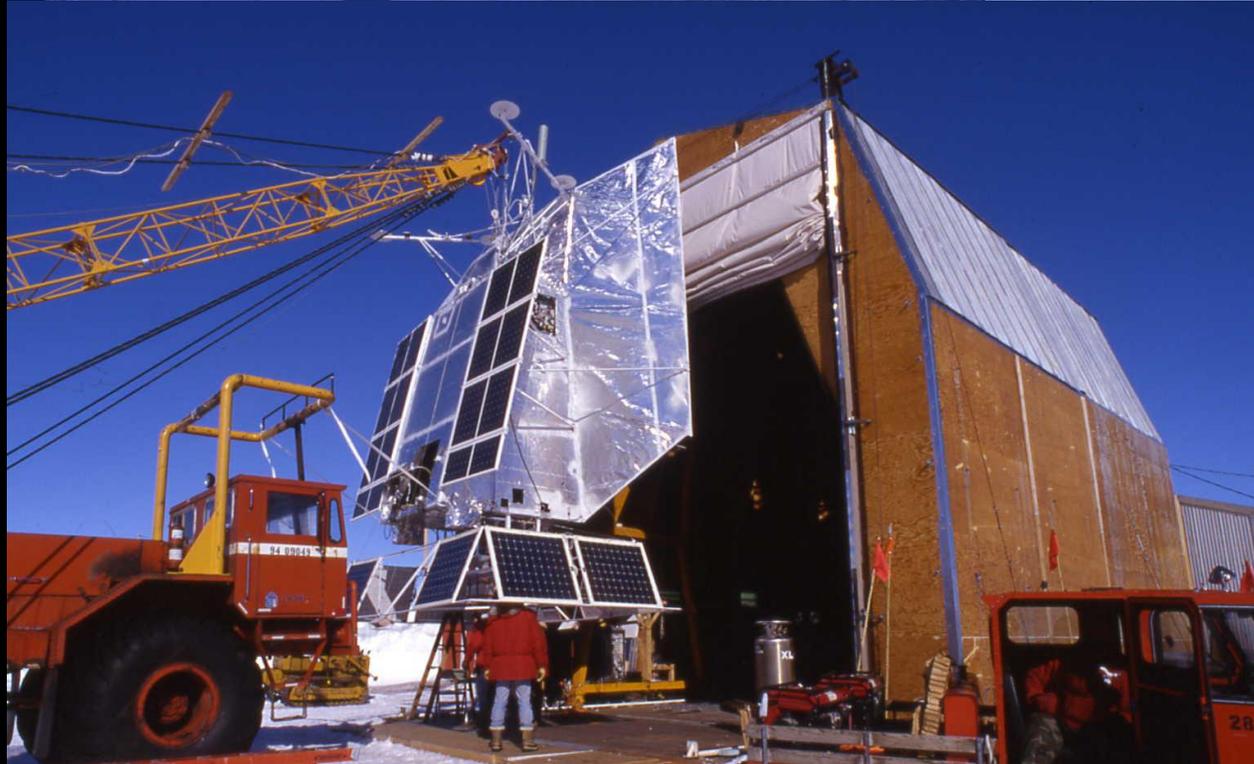
Lavoro di preparazione dello strumento (Nov. 1998)



# BOOMERanG : campagna di lancio a McMurdo (Antartide) 1998



# BOOMERanG : campagna di lancio a McMurdo (Antartide) 1998



Misure di calibrazione dello strumento (Dic. 1998)

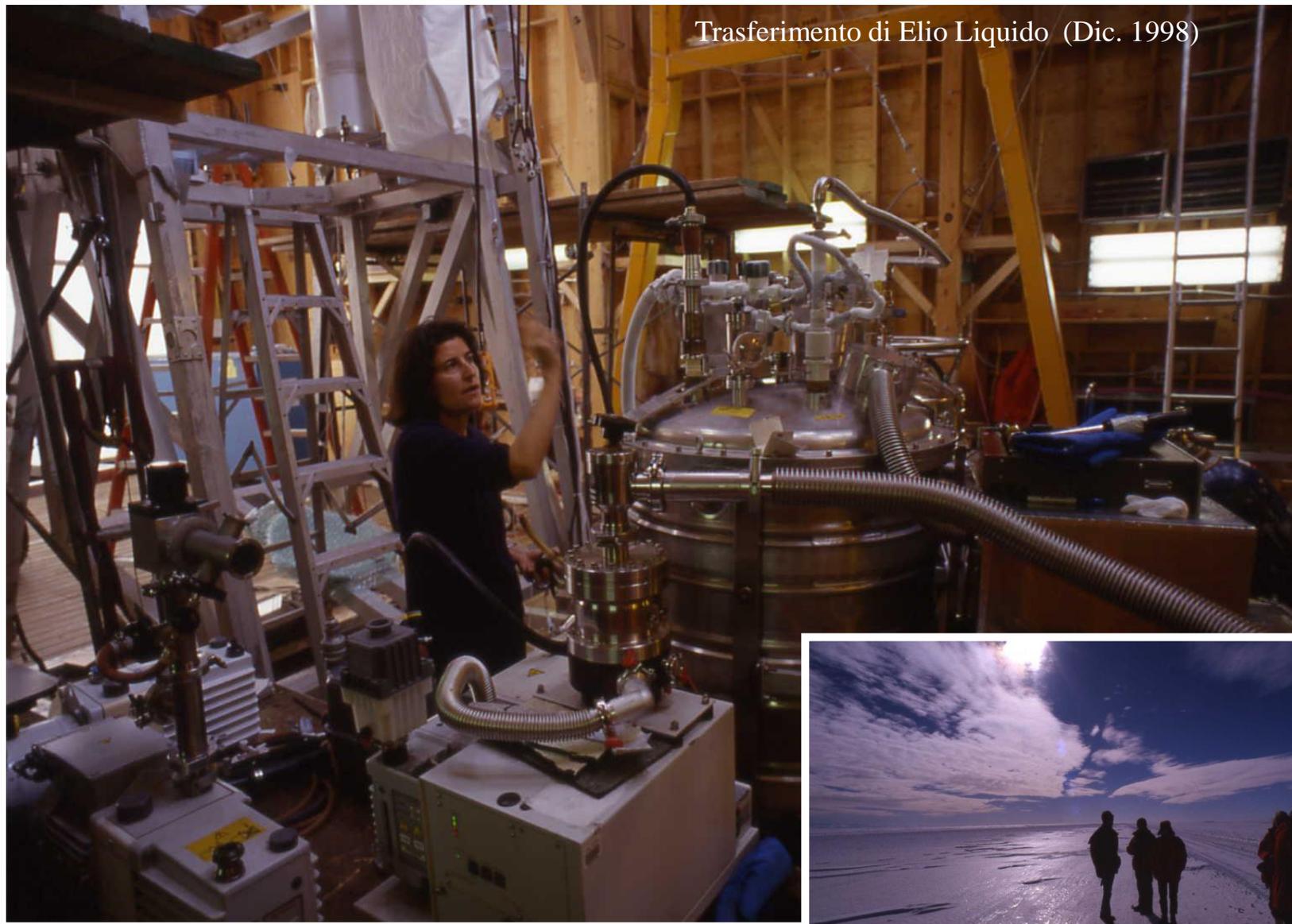


# BOOMERanG : campagna di lancio a McMurdo (Antartide) 1998

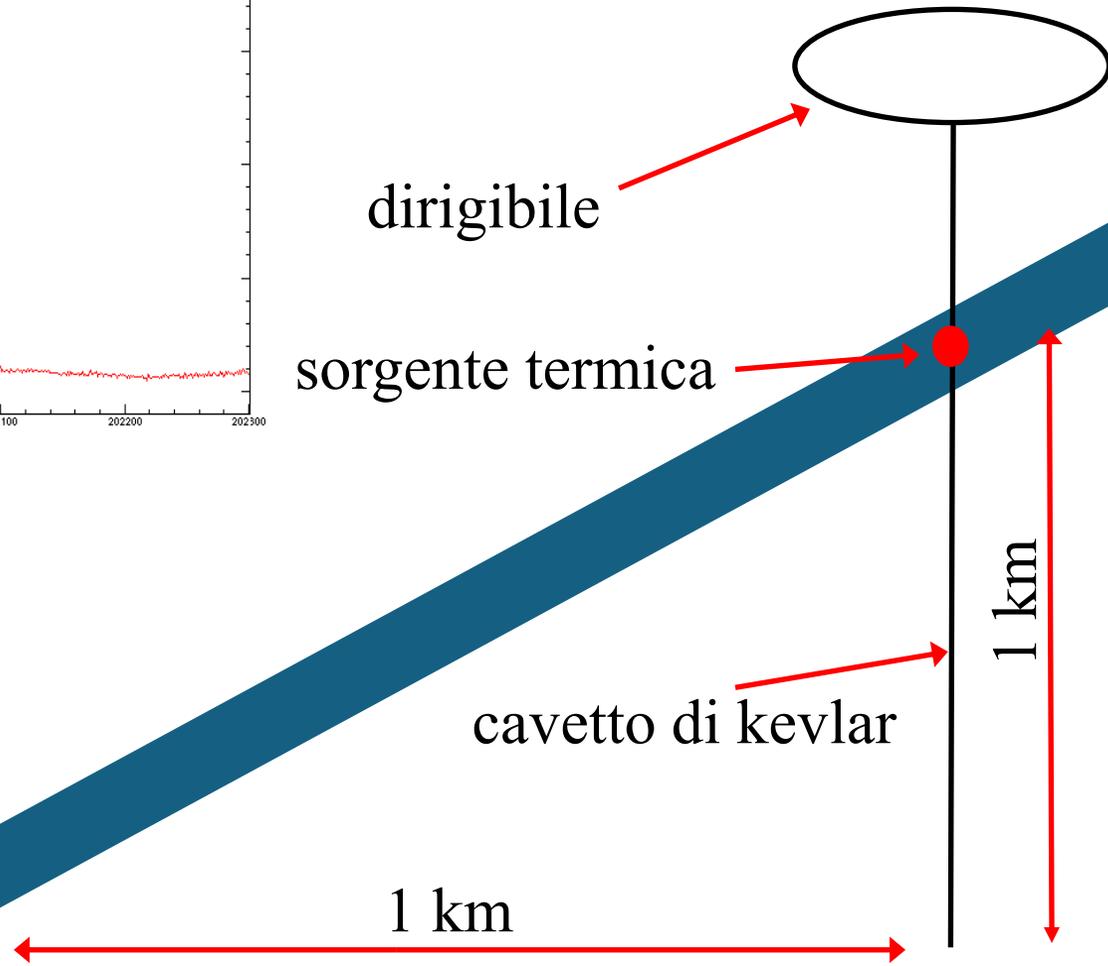
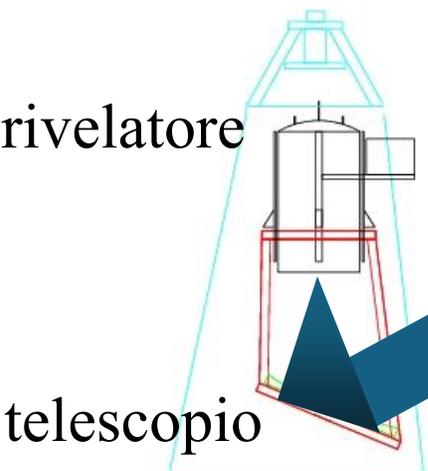
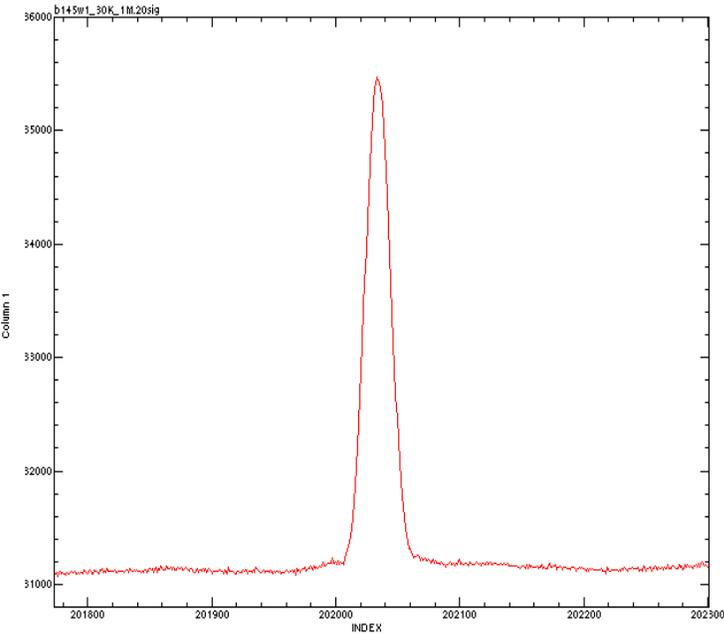


# BOOMERanG : campagna di lancio a McMurdo (Antartide) 1998

Trasferimento di Elio Liquido (Dic. 1998)



# Calibrazione con pianeta artificiale



# BOOMERanG : campagna di lancio a McMurdo (Antartide) 1998



Preparazione paracadute (Dic. 1998)



Test Ricezione dati  
(Dic. 1998)



# BOOMERanG : campagna di lancio a McMurdo (Antartide) 1998



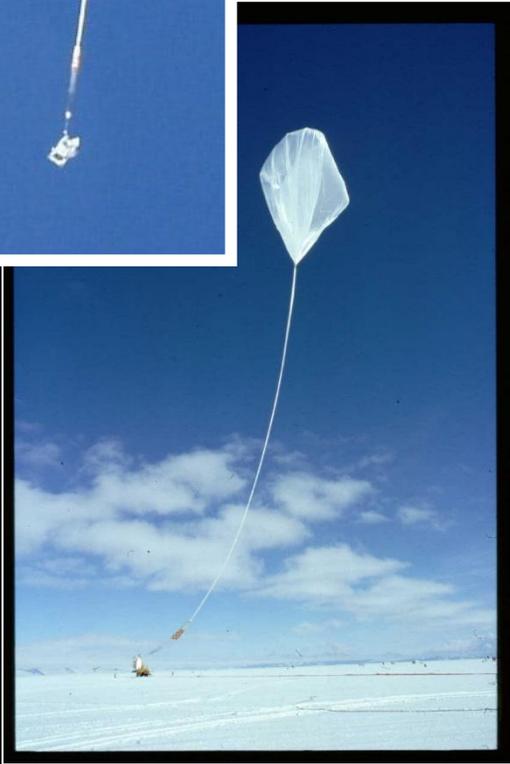
Lancio navicella (29 Dic. 1998)



# BOOMERanG : campagna di lancio a McMurdo (Antartide) 1998

Lancio navicella (29 Dic. 1998)

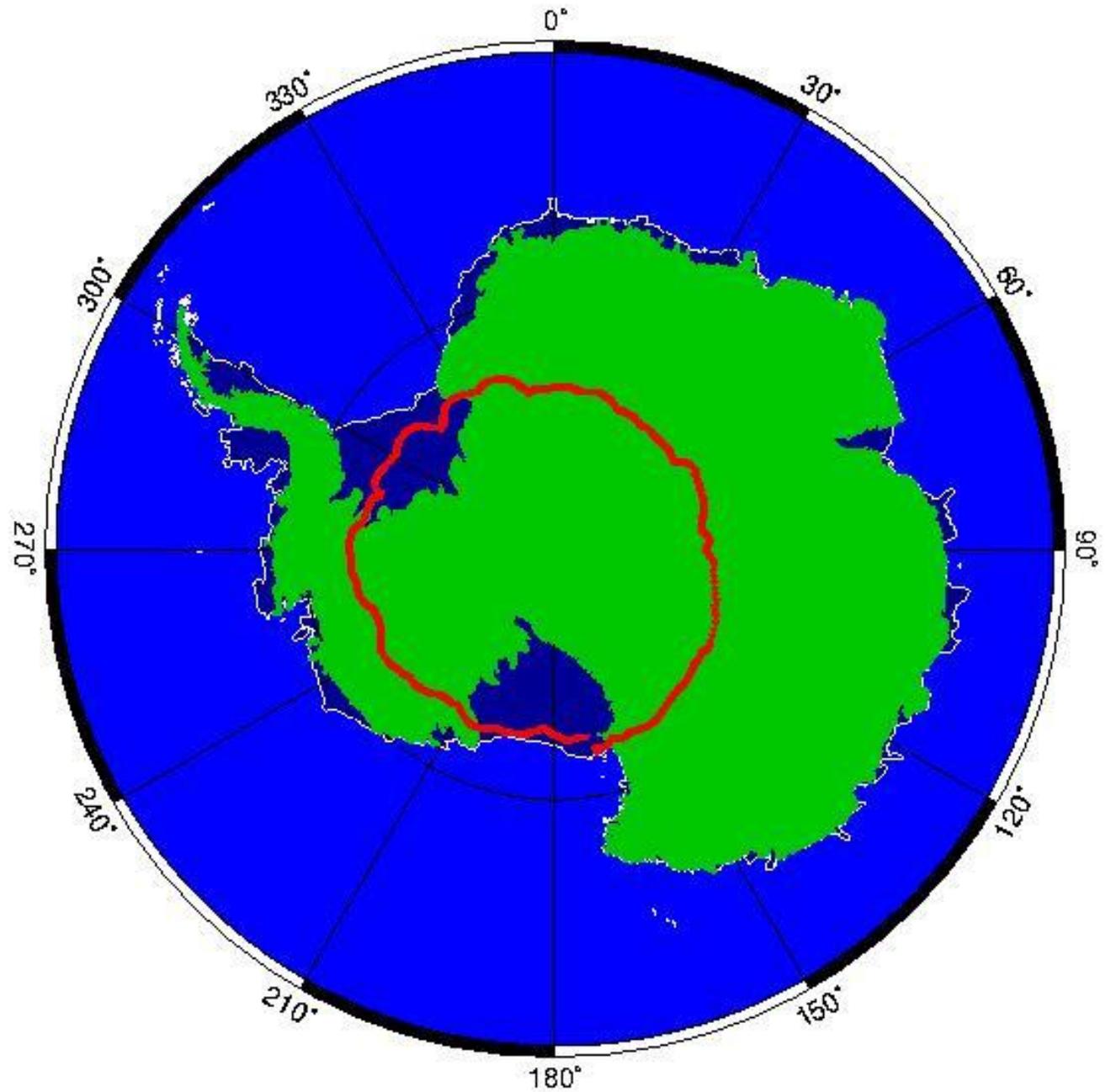




**Il viaggio fortunato della navicella: a 37 Km di quota, in balia delle correnti a getto, ha circumnavigato l'Antartide misurando continuamente, per tornare, dopo 8000 km di viaggio, vicino alla base di lancio.**

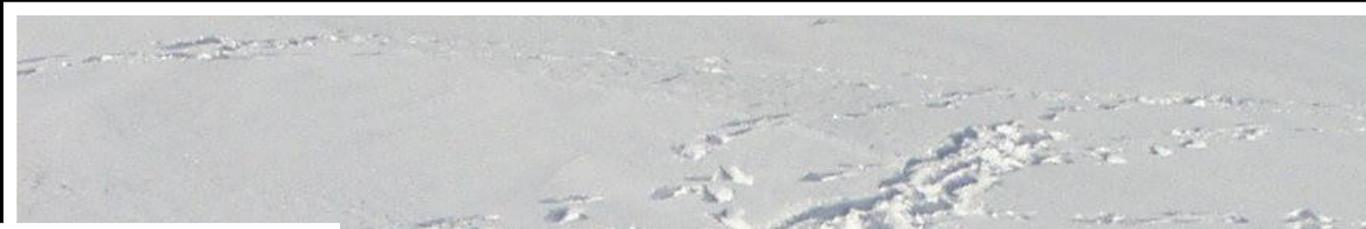
**L' 8/1/1999, mentre sorvolava il pack vicino alla base, abbiamo inviato il telecomando di separazione.**

**Il giorno successivo abbiamo potuto recuperare la navicella e i dati registrati a bordo.**



# Recupero – 9/1/99





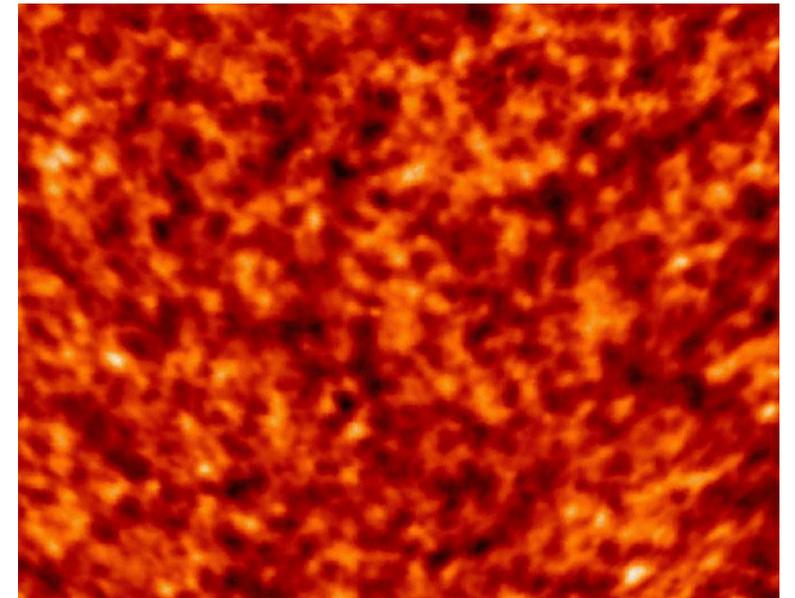
# Lunga attività di analisi dei dati raccolti

- Nonostante la bassissima temperatura, il rumore su ognuno dei 50 milioni di campionamenti dei rivelatori è maggiore dei segnali da misurare
- Ogni pixel del cielo è stato osservato molte volte.
- Si può allora applicare un processo di media, con algoritmi ottimali, che riduce il rumore e mantiene il segnale.
- Soluzione di un sistema con **100000 incognite e 50 milioni di equazioni** stocastiche ...
- Sviluppo di algoritmi ottimali di filtraggio dei dati, e uso del più grande supercomputer disponibile all'epoca (1999) per alcuni mesi
- Alla fine.. le mappe

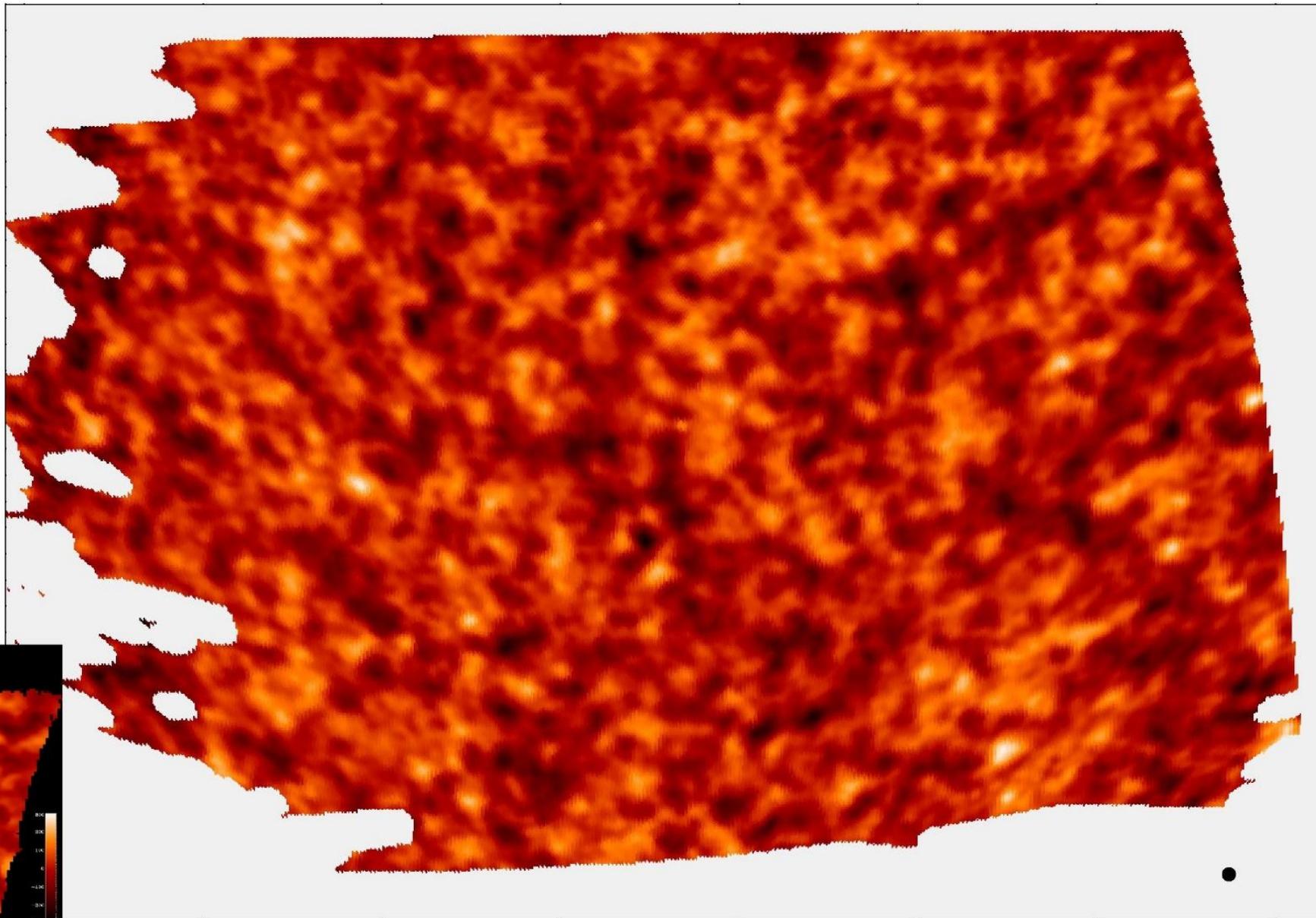
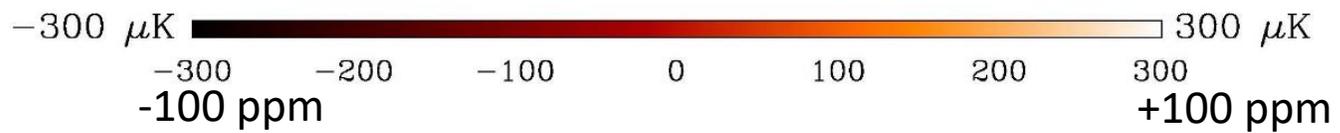
$$\vec{d} = \overleftrightarrow{A}\vec{m} + \vec{n}$$

$$\vec{\tilde{m}} = (\overleftrightarrow{A}^T \overleftrightarrow{A})^{-1} \overleftrightarrow{A}^T \vec{d}$$

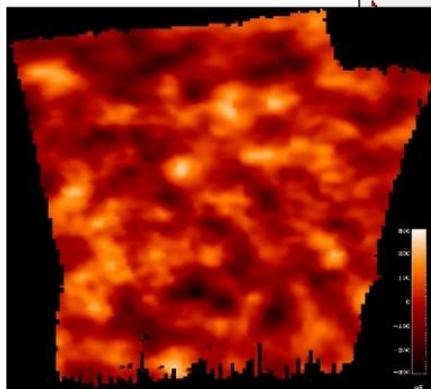
$$\vec{\tilde{m}} =$$



BOOMERanG:  
mappa dell'  
1% del cielo  
a  $\lambda$  2 mm

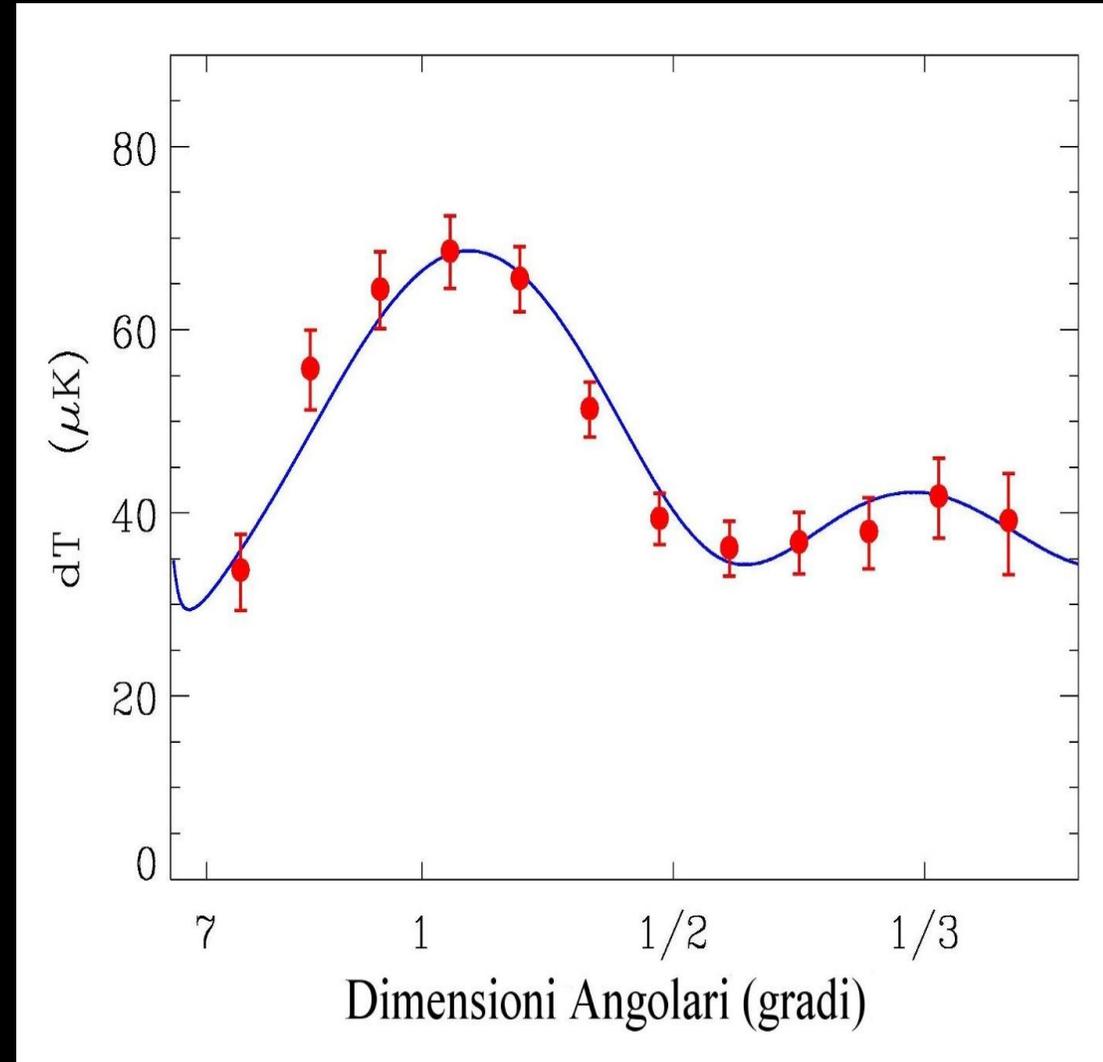


MAXIMA-1



# Di che dimensioni sono le macchie osservate ?

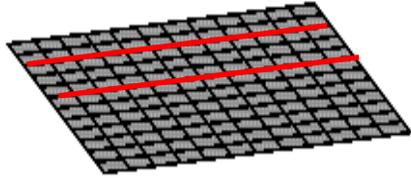
- Esiste una procedura matematica, chiamata **spettro di potenza**, che permette di rispondere alla domanda, calcolando qual'è l' **abbondanza delle macchie di diverse dimensioni**.
- Questa può essere confrontata con la teoria
- La maggior parte delle macchie ha davvero dimensioni intorno ad **1 grado**,
- come previsto dal semplice ragionamento di prima.
- Ma quel ragionamento era basato sulla geometria euclidea, invece l'universo **potrebbe** avere una geometria curva !



# Geometria dell' universo ? Dipende da quanta massa-energia c'è

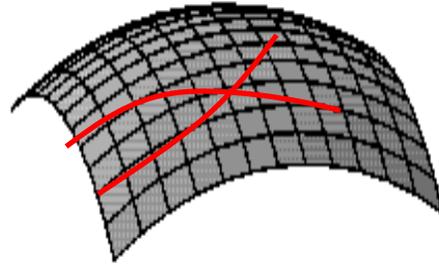
Densità  
Critica

Spazio Euclideo in 2-D



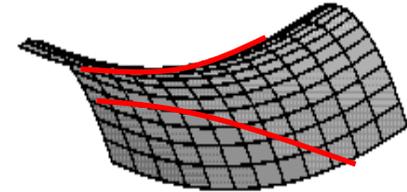
Densità  
più alta

Spazio curvo in 2-D  
(curvatura positiva)

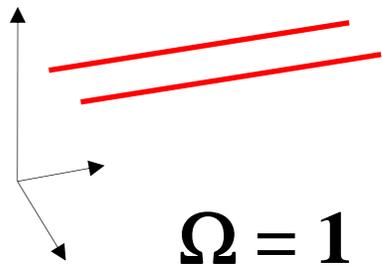


Densità  
più bassa

Spazio curvo in 2-D  
(curvatura negativa)

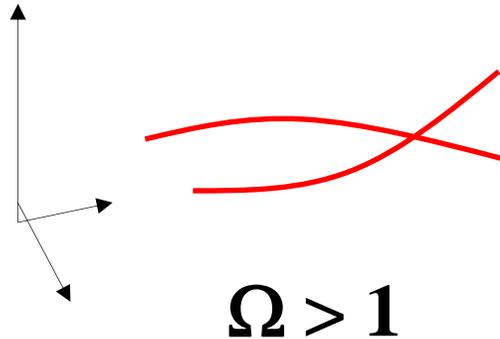


Spazio Euclideo in 3-D



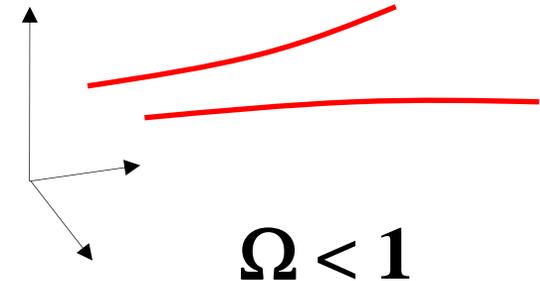
$$\Omega = 1$$

Spazio curvo in 3-D  
(curvatura positiva)

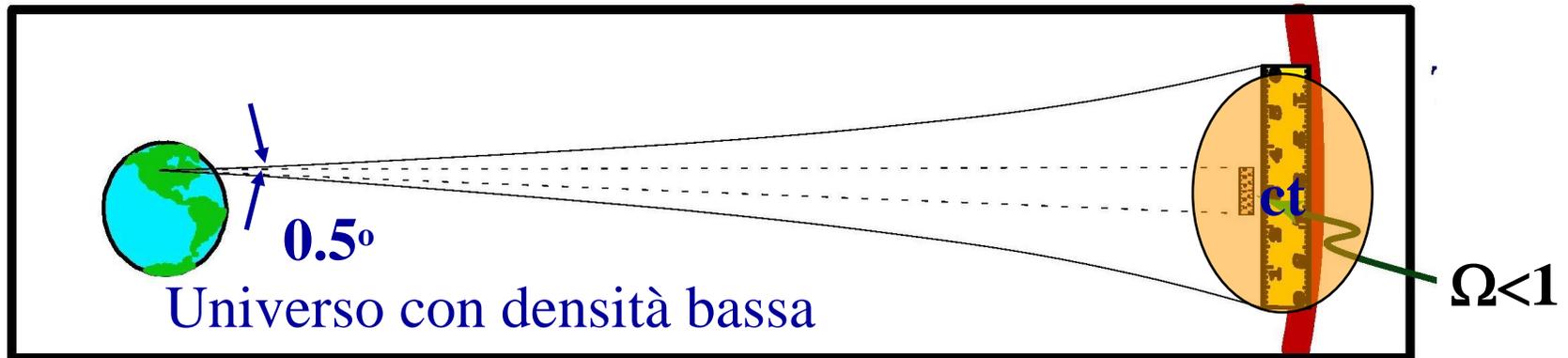
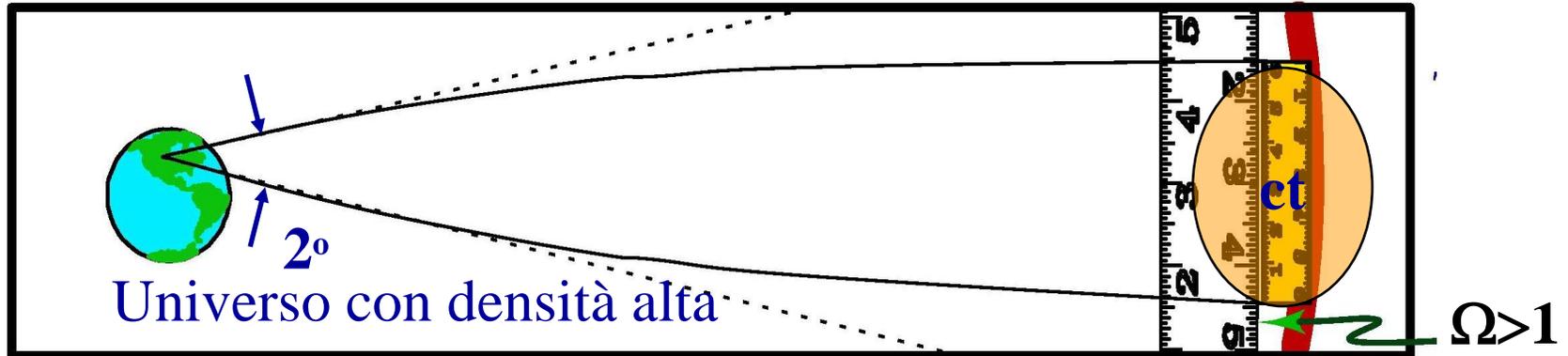


$$\Omega > 1$$

Spazio curvo in 3-D  
(curvatura negativa)

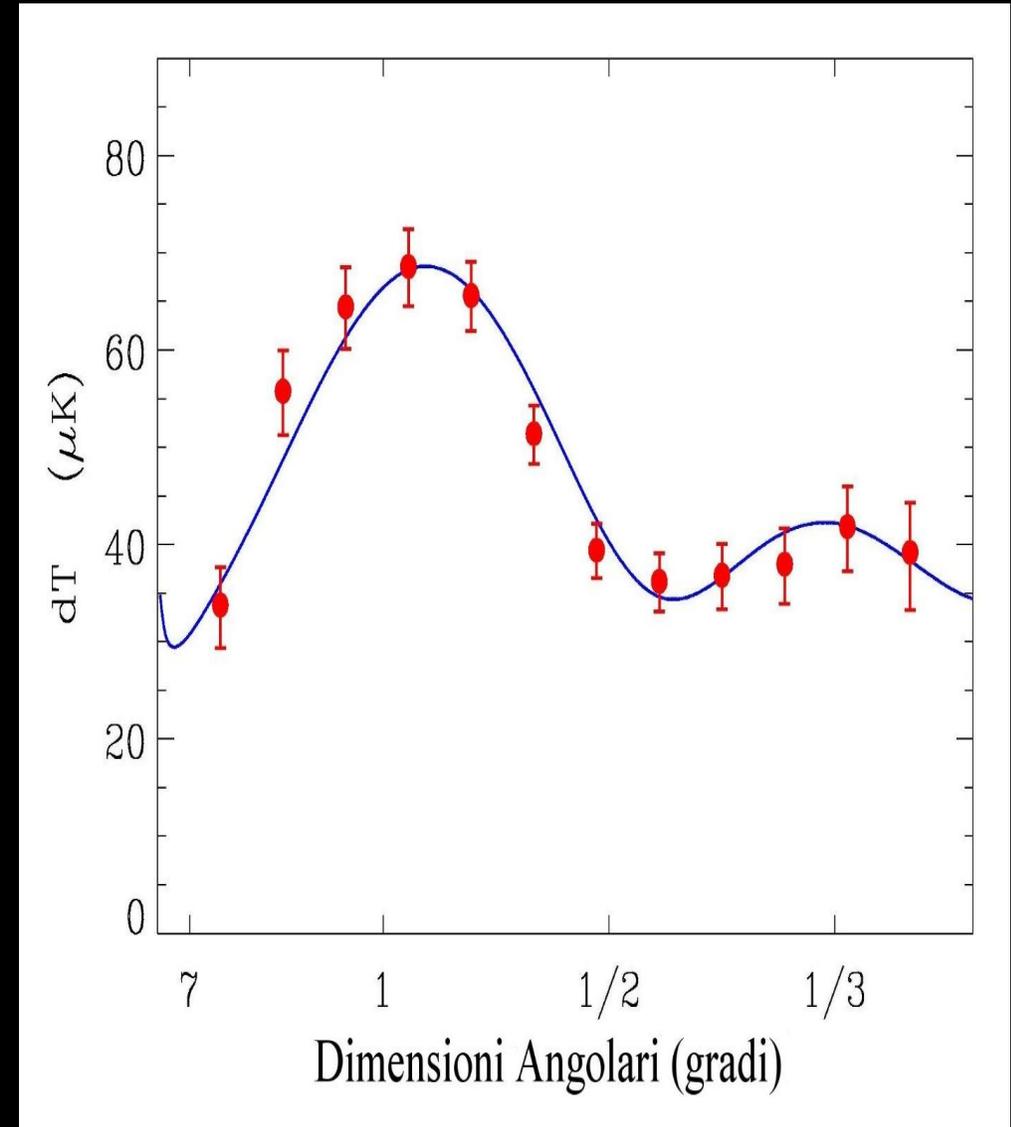


$$\Omega < 1$$



## Conseguenze ?

- La maggior parte delle macchie hanno dimensioni intorno ad 1 grado, come previsto per una *geometria Euclidea, o piatta*, dell' Universo.
- Quindi la densità totale di massa-energia dell' universo è pari alla densità critica  $\rho_c = 10^{-29} \text{ g/cm}^3$ .
- **Abbiamo «pesato» l'universo.**
- In realtà possiamo fare di più, perché a seconda della densità e tipo di massa-energia l'evoluzione dell'universo è diversa.



# Studiare ancora più in dettaglio la luce più antica

- La radiazione cosmica di fondo, proveniendo da così lontano e con una origine così remota nel tempo, è un mezzo straordinario di indagine, sia della cosmologia che della fisica fondamentale, in molti altri modi.
- Sono state ottenute *immagini dettagliate del CMB e quindi dell' universo primordiale*.
- Vedere come era fatto ci permette di capire molte cose su
  - Curvatura dell'universo e densità di massa-energia (esperimento BOOMERanG, 2000)
  - Composizione dell'universo (barioni, materia oscura, energia oscura) e formazione delle strutture: esperimenti WMAP, Planck ...)
  - Struttura degli ammassi di galassie, osservati in controluce contro lo sfondo brillante del fondo di microonde (SPT, OLIMPO, 2018)
  - L'origine delle prime strutture, l'ipotetico processo di inflazione cosmica (esperimenti di polarizzazione, QUBIC, SO, S4, LiteBIRD ... 2032 ?)

14 Maggio 2009

## Planck: erede *anche* di BOOMERanG

- Stessa strategia di osservazione / scansione
- Stessa strategia multifrequenza
- Stessi rivelatori spider-web per HFI
- Stessi rivelatori PSB per HFI
- Stessi metodi di analisi dei dati

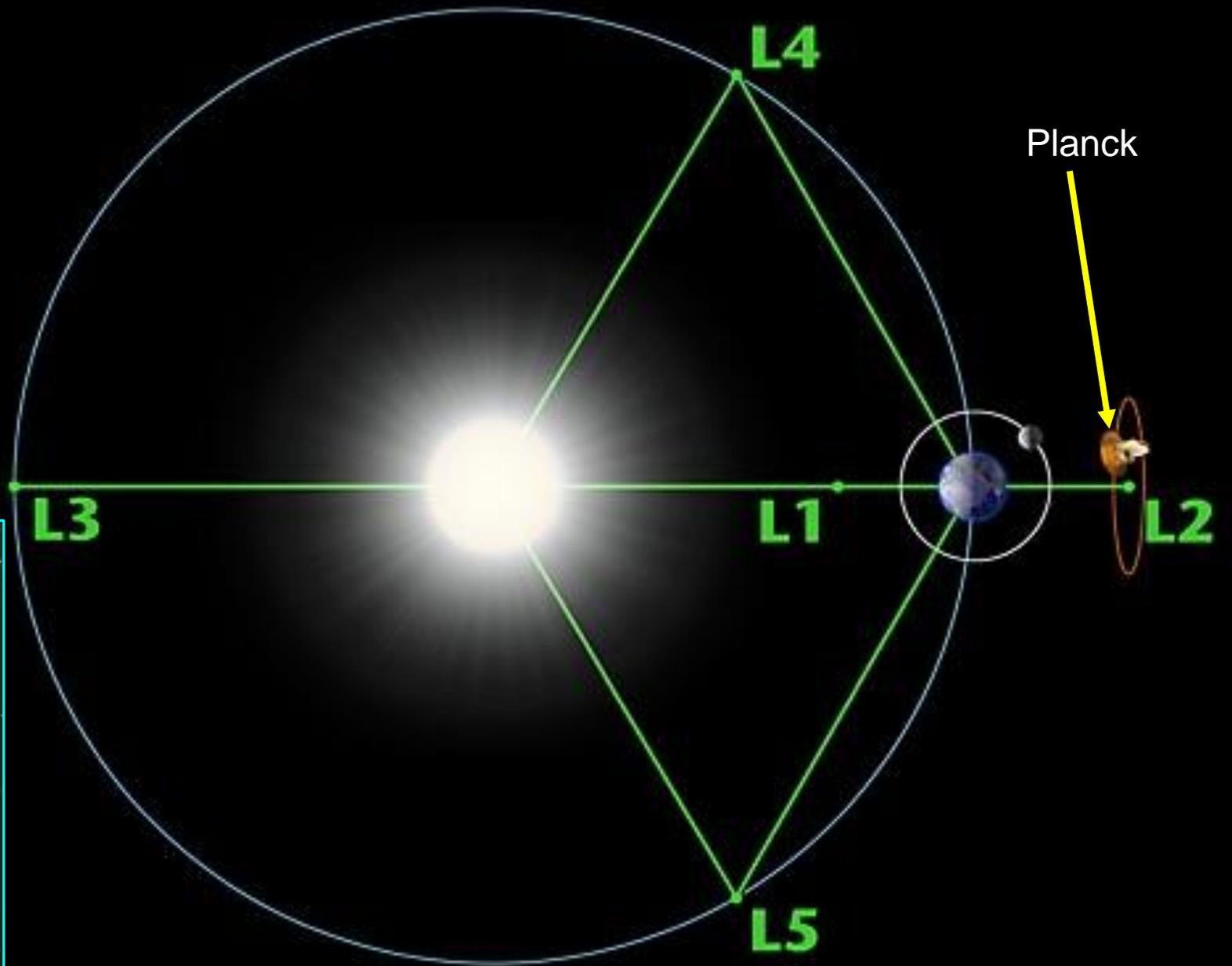


# PLANCK

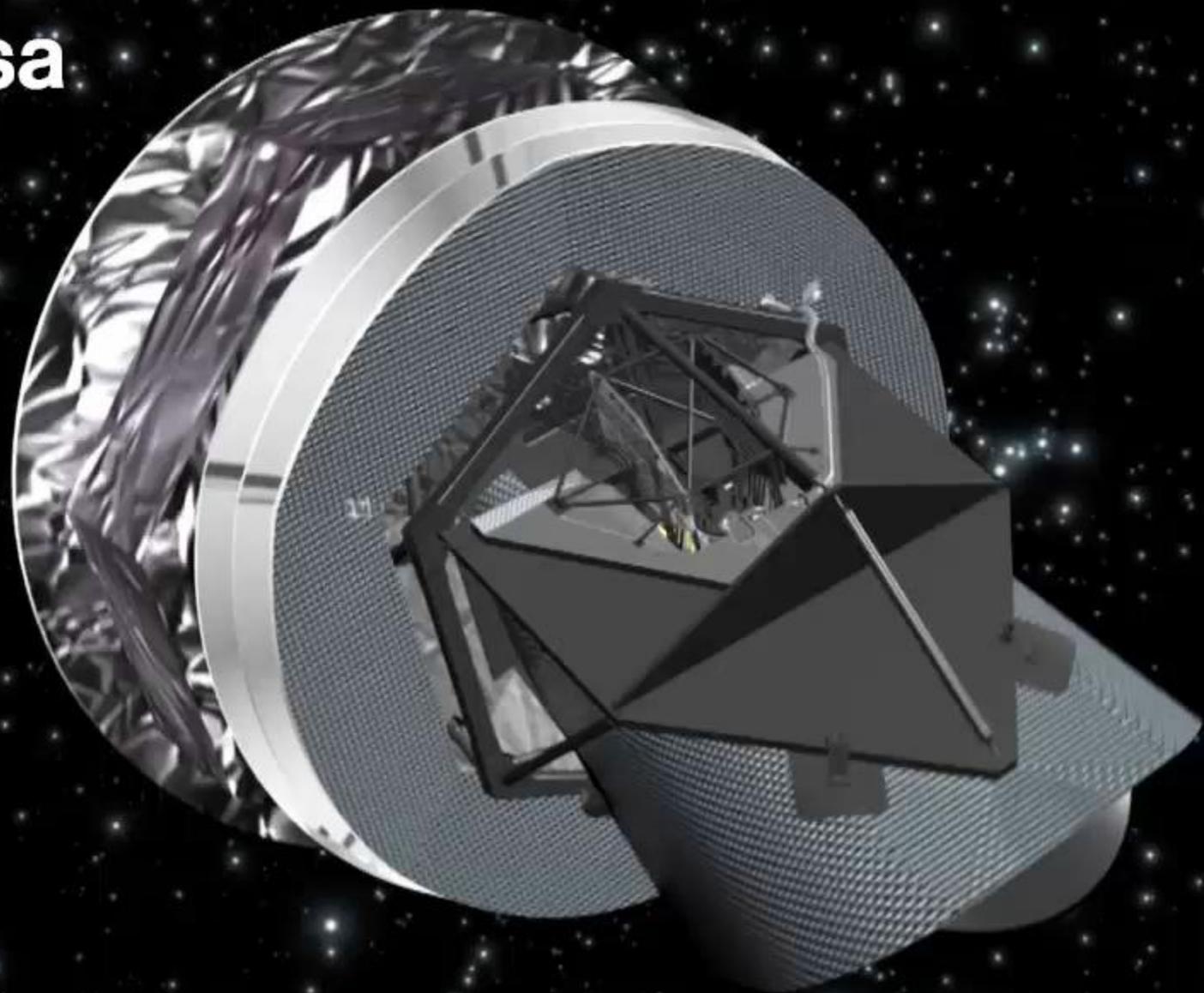
Looking back to the dawn of time  
Un regard vers l'aube du temps



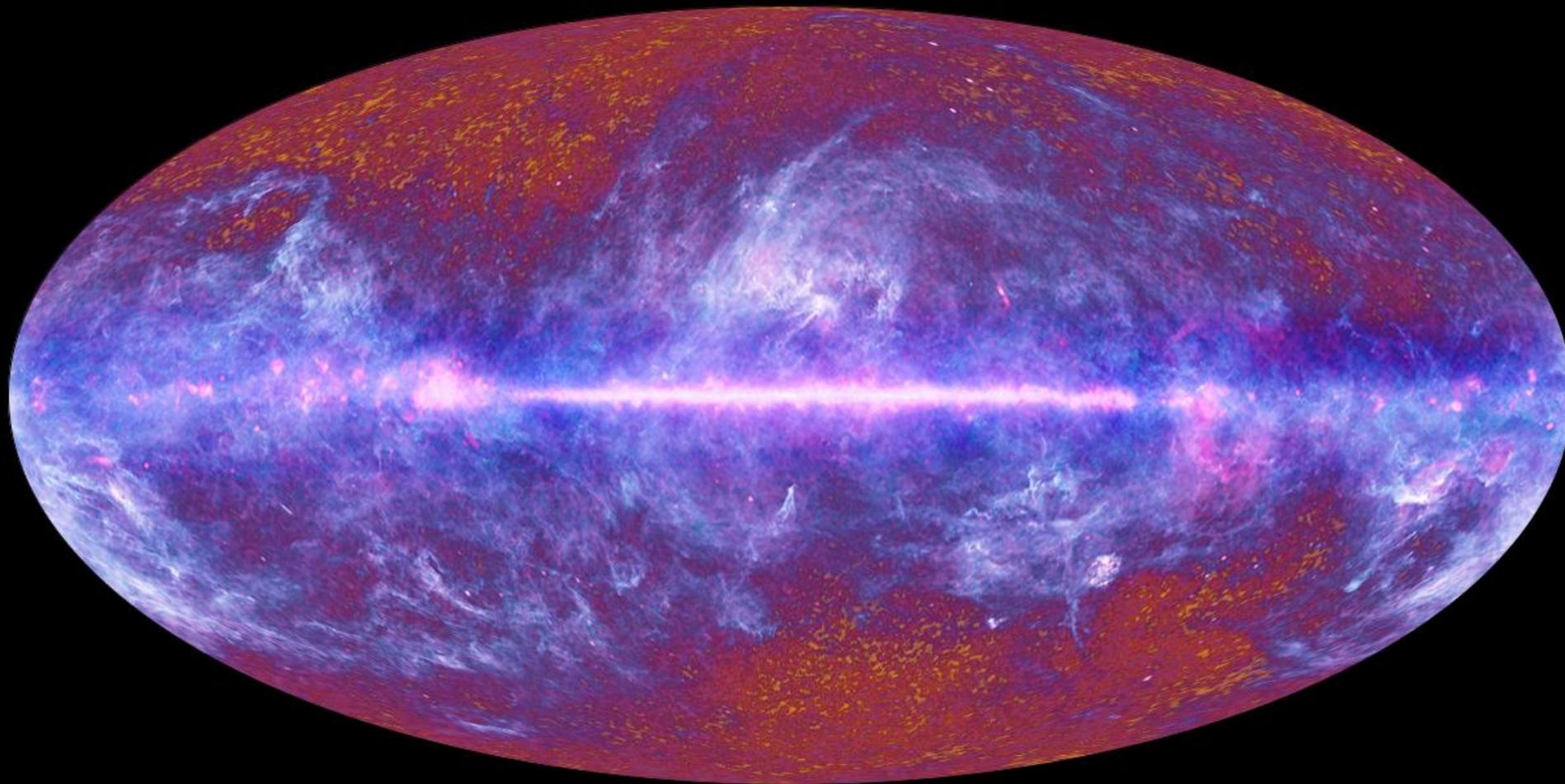
Punto  
Lagrangiano  
L2



• esa



2011 data release



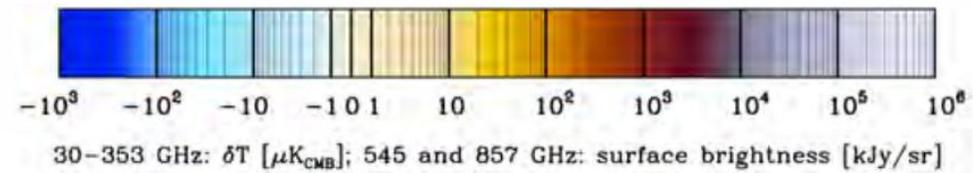
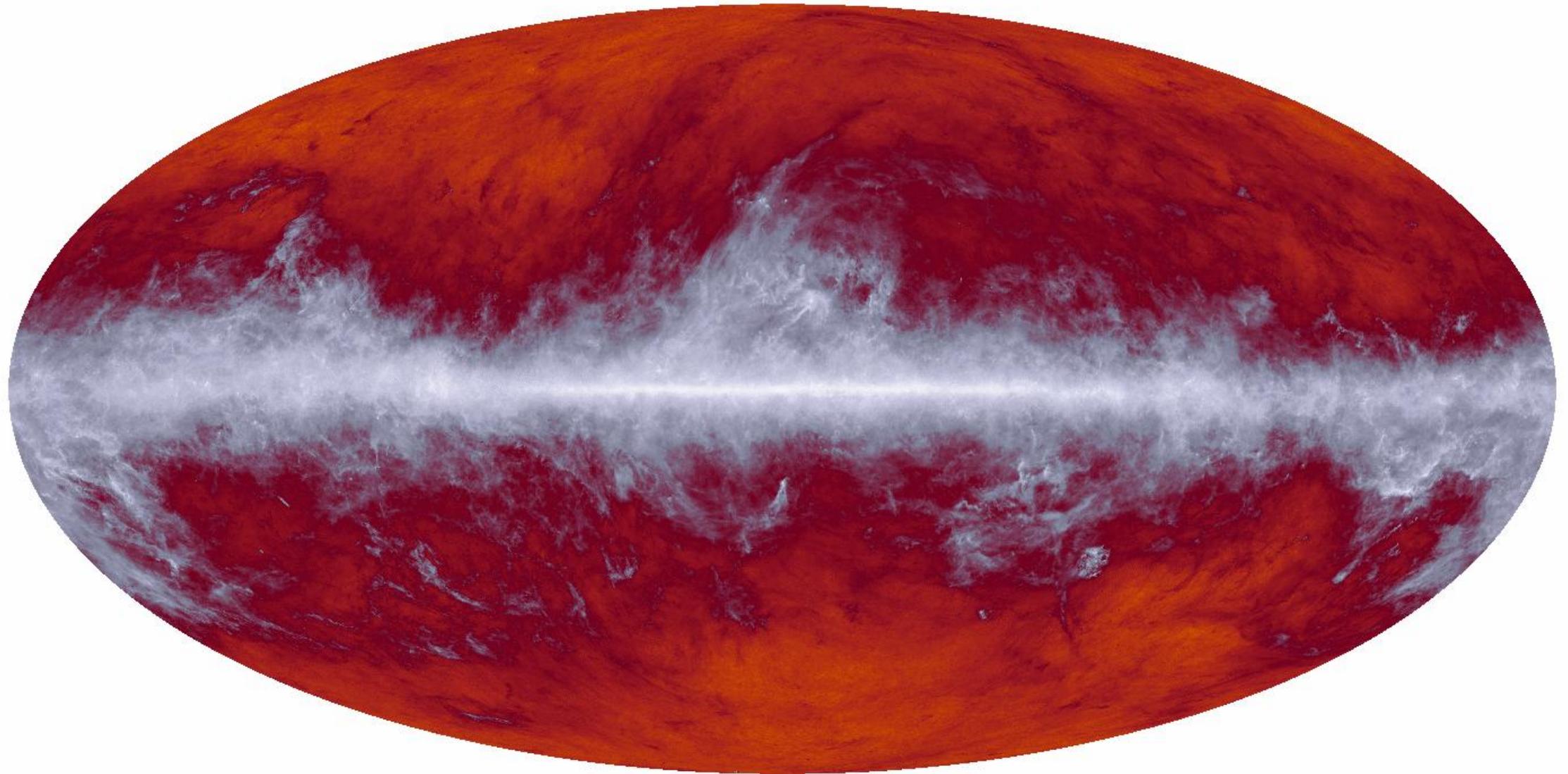
The Planck one-year all-sky survey



(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

6x10<sup>6</sup> pixels (5')

857 GHz

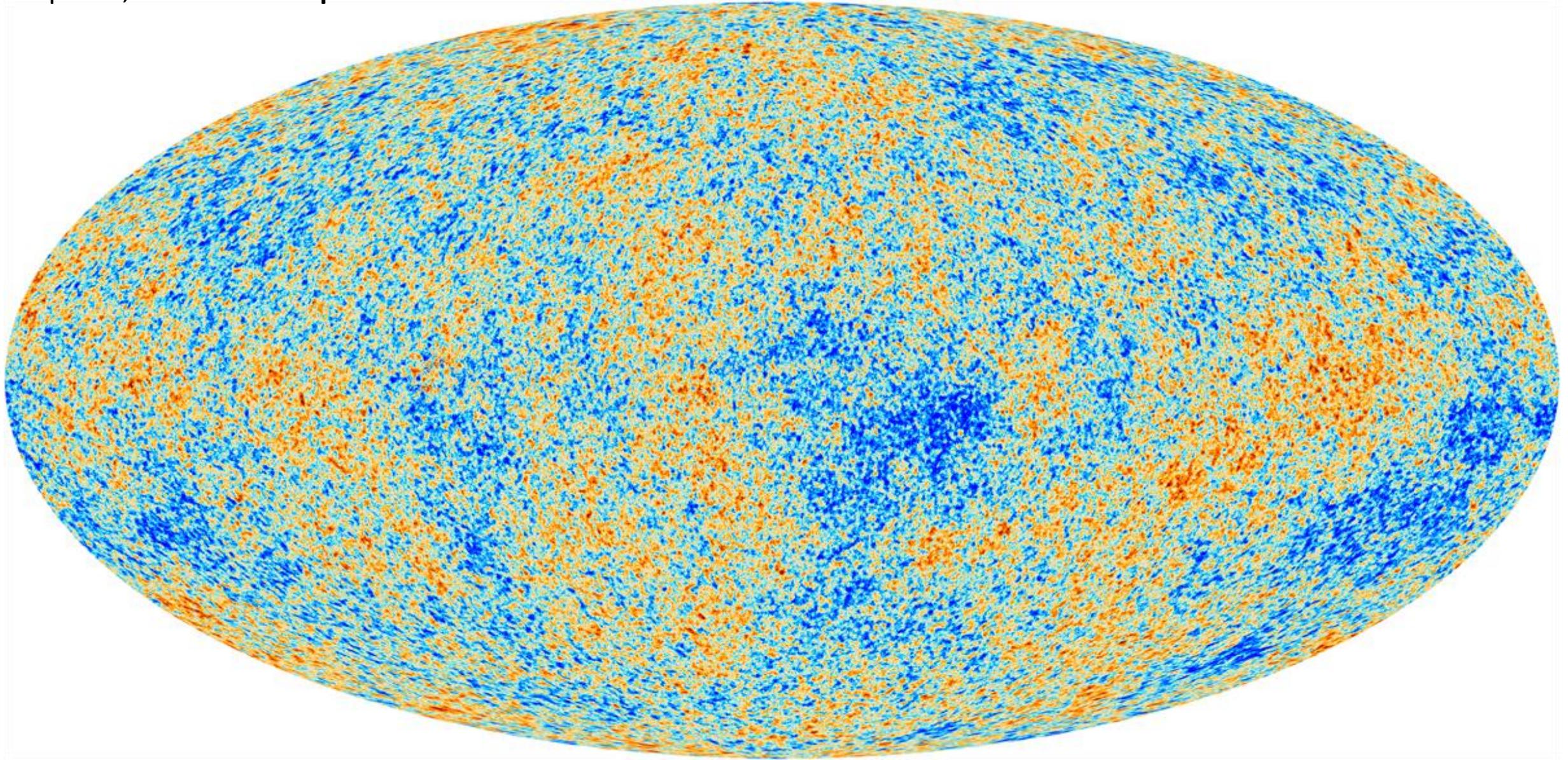


Estraendo solo il fondo cosmico:

le macchie che avevamo trovato con BOOMERang sul 4% del cielo ci sono dappertutto.

Si può misurare con maggiore precisione l'abbondanza delle macchie di diverse dimensioni.

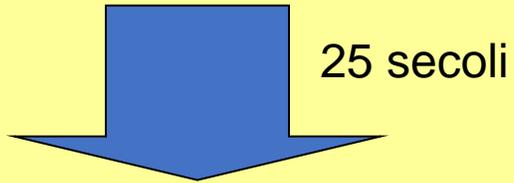
Da questa, si stima la **composizione dell'universo**.



# Composizione: Di che cosa è fatto l' Universo ?

- Per i PreSocratici:

- terra,
- acqua,
- aria,
- fuoco



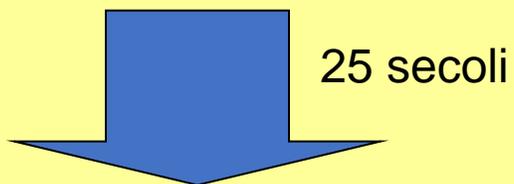
- Oggi, per lo scienziato medio:

- radiazione (luce),
- materia ordinaria,
- **materia oscura,**
- **energia oscura.**

# Composizione: Di che cosa è fatto l' Universo ?

- Per i PreSocratici:

- terra,
- acqua,
- aria,
- fuoco



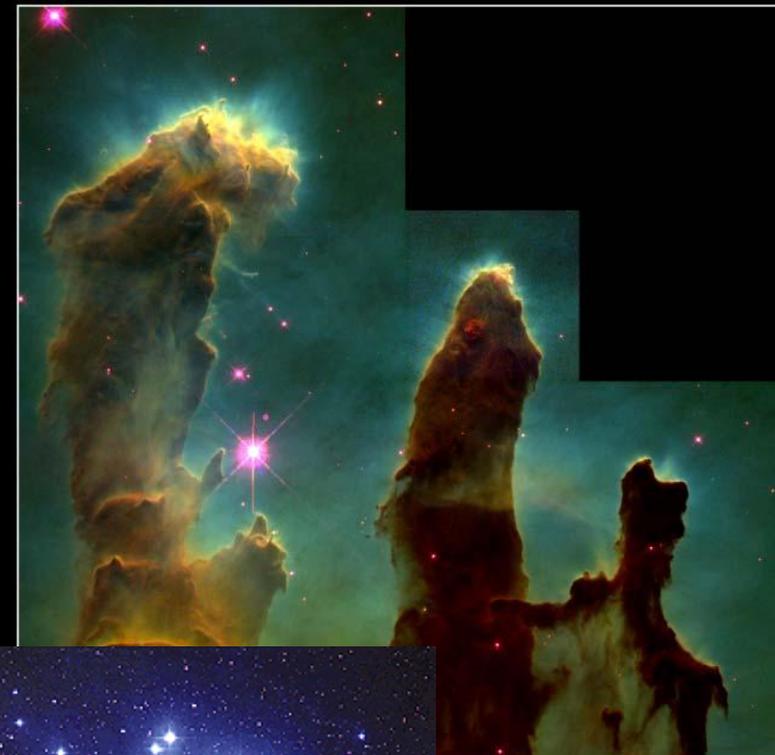
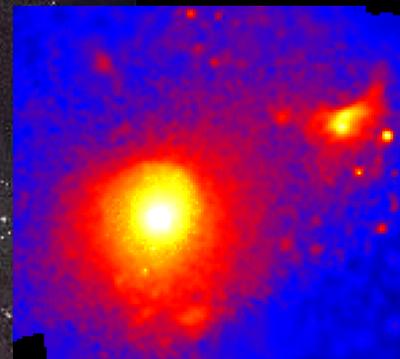
- Oggi, per lo scienziato medio:

- radiazione (luce),
- materia ordinaria,
- **materia oscura,**
- **energia oscura.**

- **Radiazione:** il fondo cosmico di microonde, soprattutto (la luce delle stelle è molto meno onnipresente).
- **Materia ordinaria:** atomi, molecole etc. Interagiscono con la luce, possiamo farne un censimento. 2% di  $\rho_c$



M33 © IAC/RGO/Malin  
Photo from Isaac Newton Telescope Plates  
by David Malin



HST · WFPC2

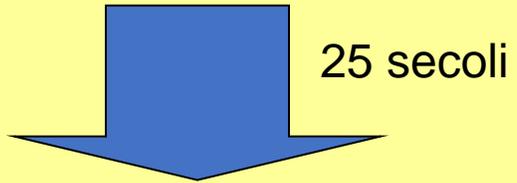


UKS 18

# Composizione: Di che cosa è fatto l' Universo ?

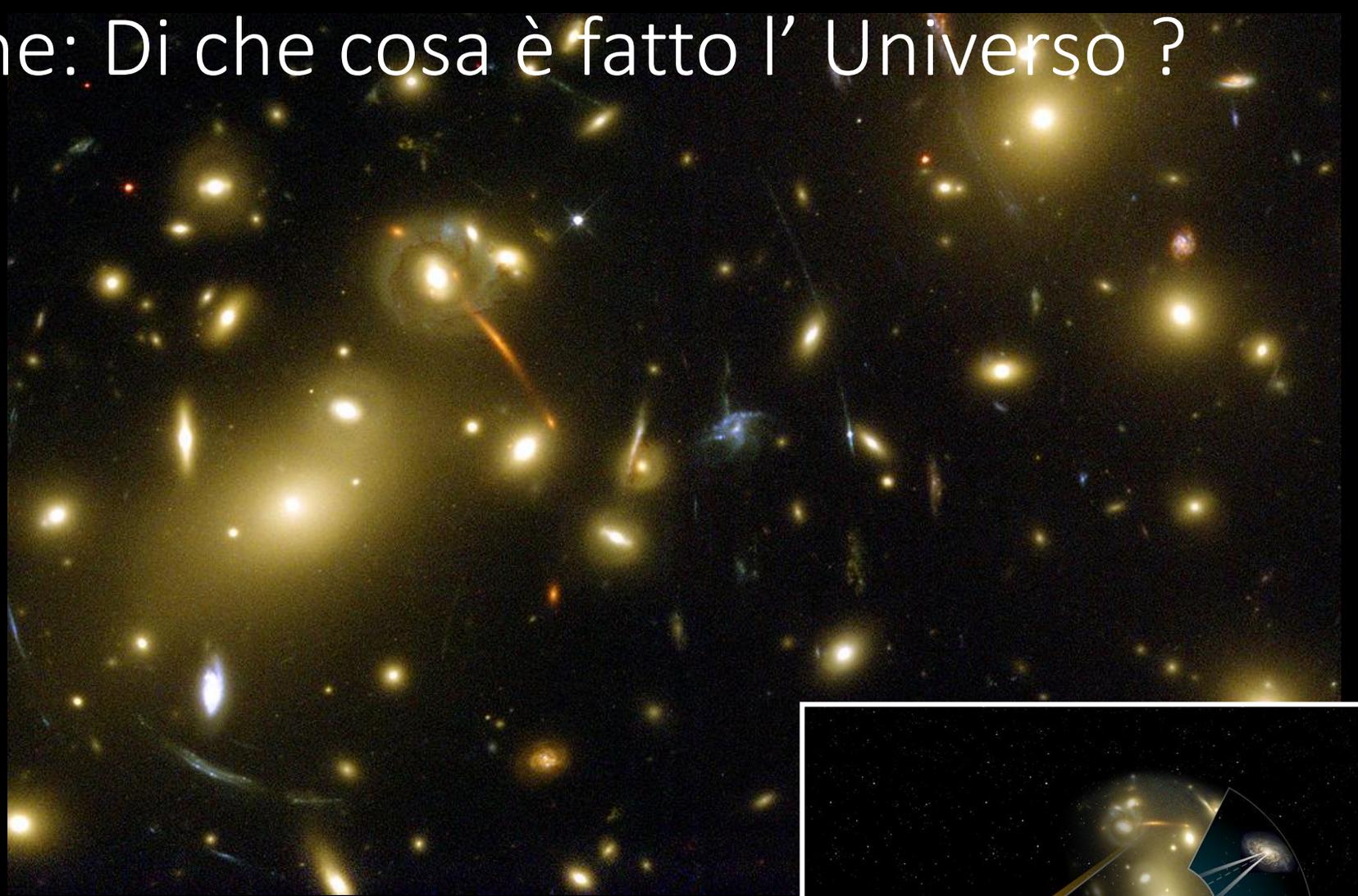
- Per i PreSocratici:

- terra,
- acqua,
- aria,
- fuoco

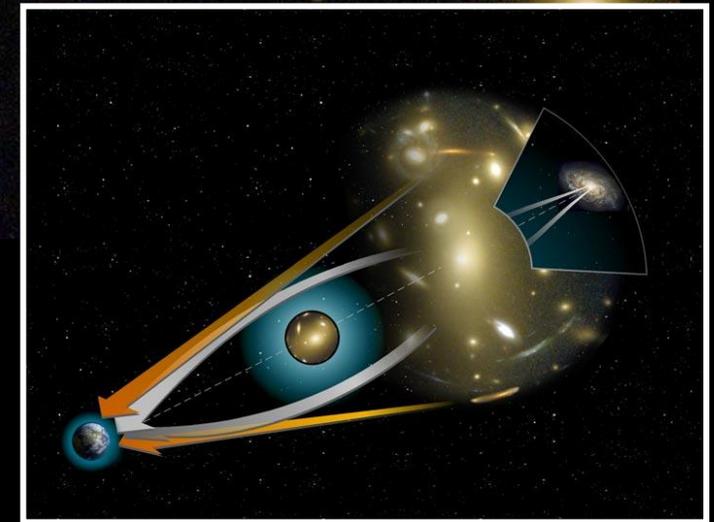


- Oggi, per lo scienziato medio:

- radiazione (luce),
- materia ordinaria,
- **materia oscura,**
- **energia oscura.**



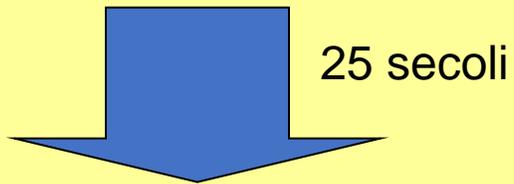
- Lenti gravitazionali e dinamica della rotazione delle galassie =>
- **Materia oscura !**
- Ma quanta è ? Più di quella ordinaria !



# Composizione: Di che cosa è fatto l' Universo ?

- Per i PreSocratici:

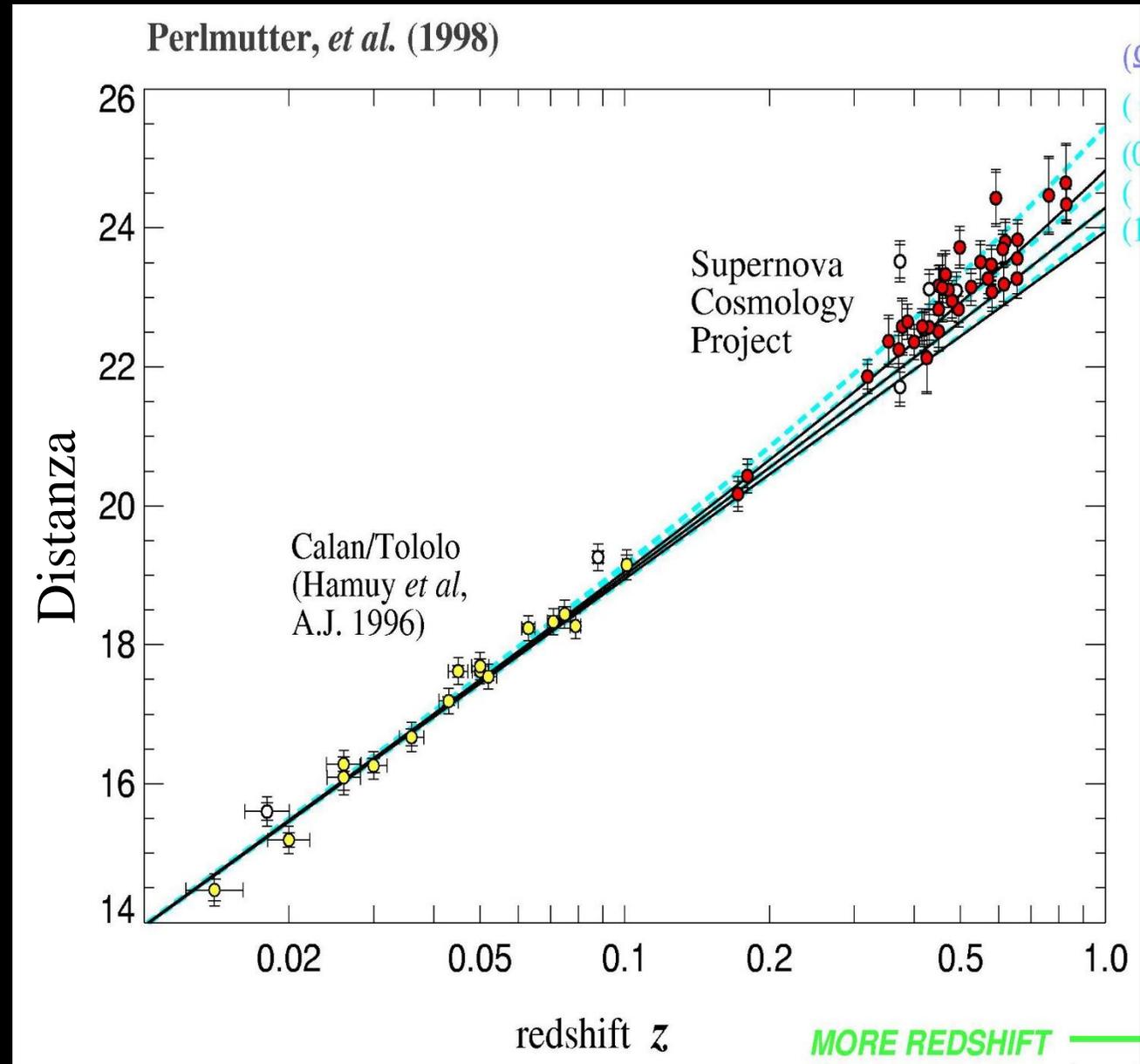
- terra,
- acqua,
- aria,
- fuoco



- Oggi, per lo scienziato medio:

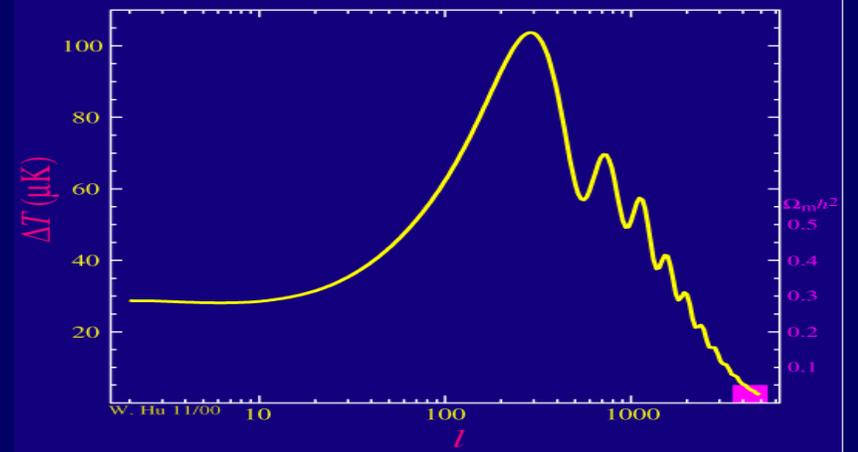
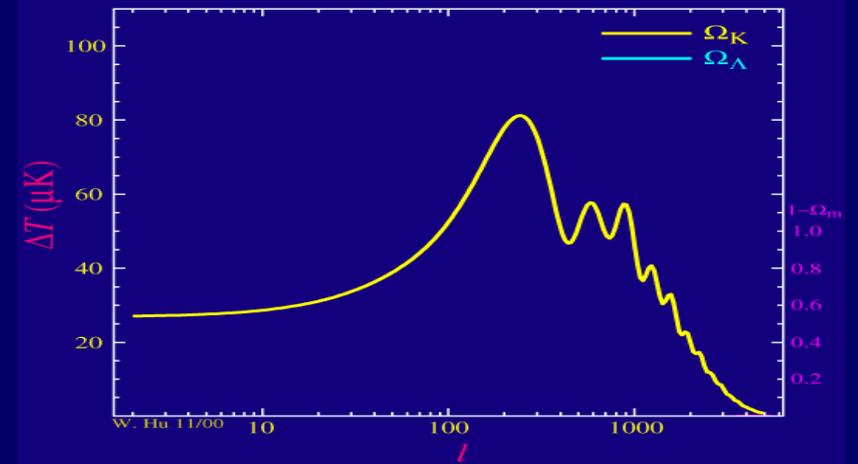
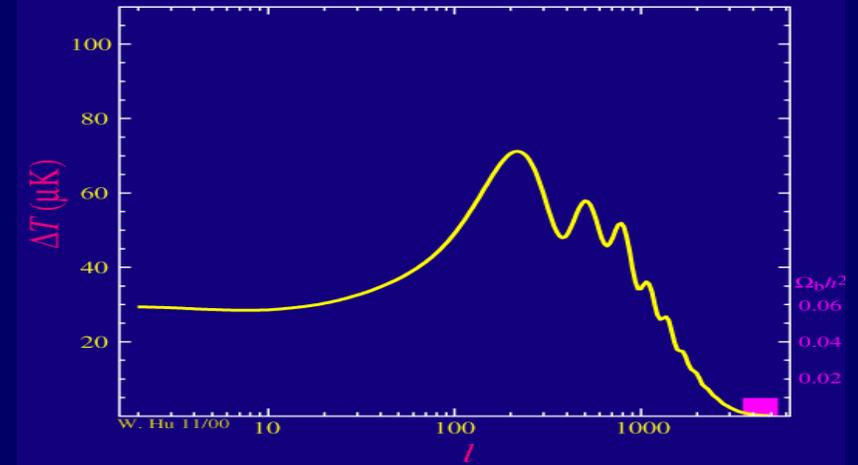
- radiazione (luce),
- materia ordinaria,
- **materia oscura,**
- **energia oscura.**

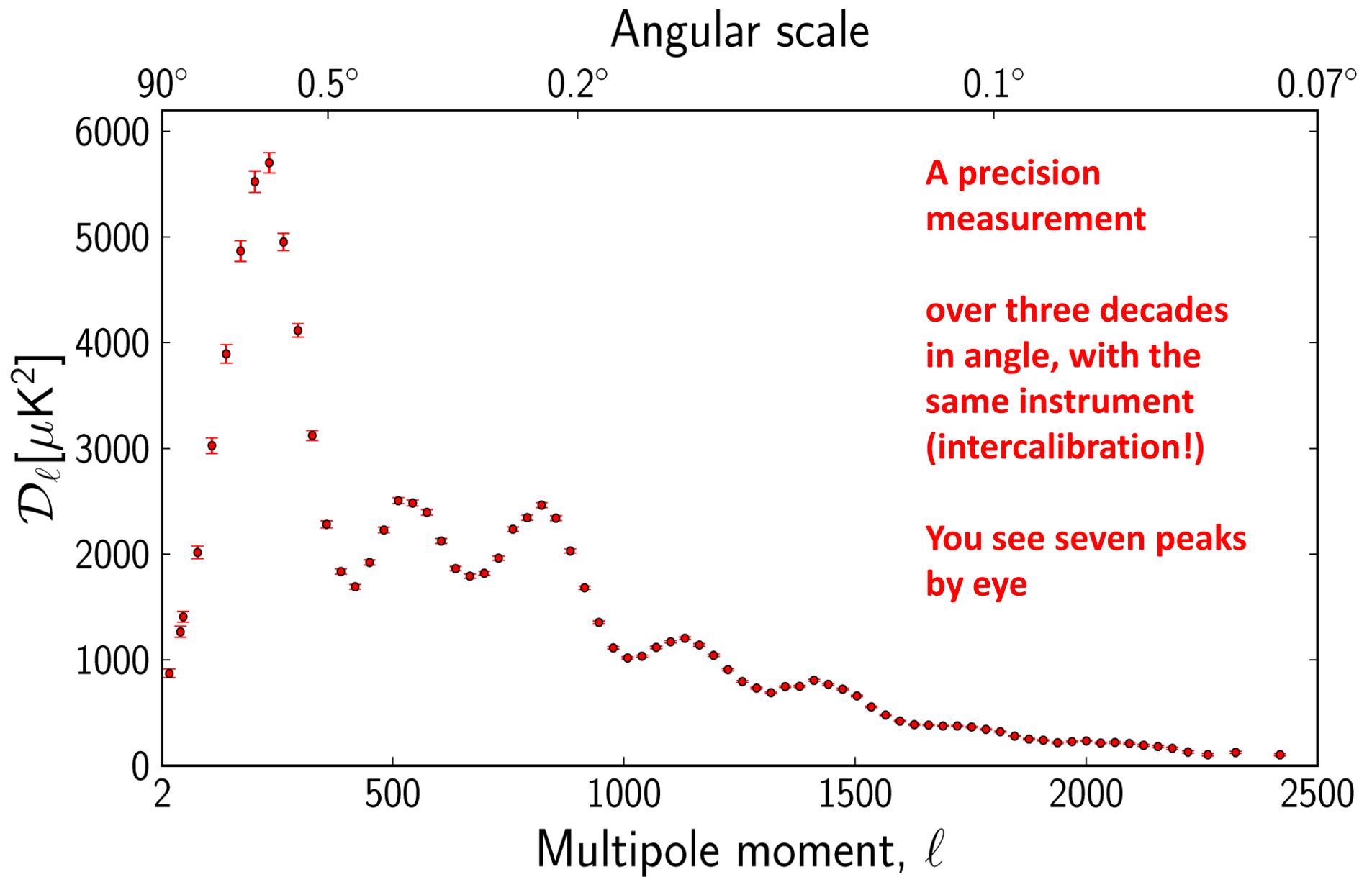
- C'è anche **energia oscura**
- Una strana forma di massa energia che ha fatto **accelerare** l'espansione dell'universo, tanto che le galassie più lontane appaiono sistematicamente e troppo deboli.
- Per spiegare questo fenomeno, deve essere la forma di massa-energia più abbondante oggi.

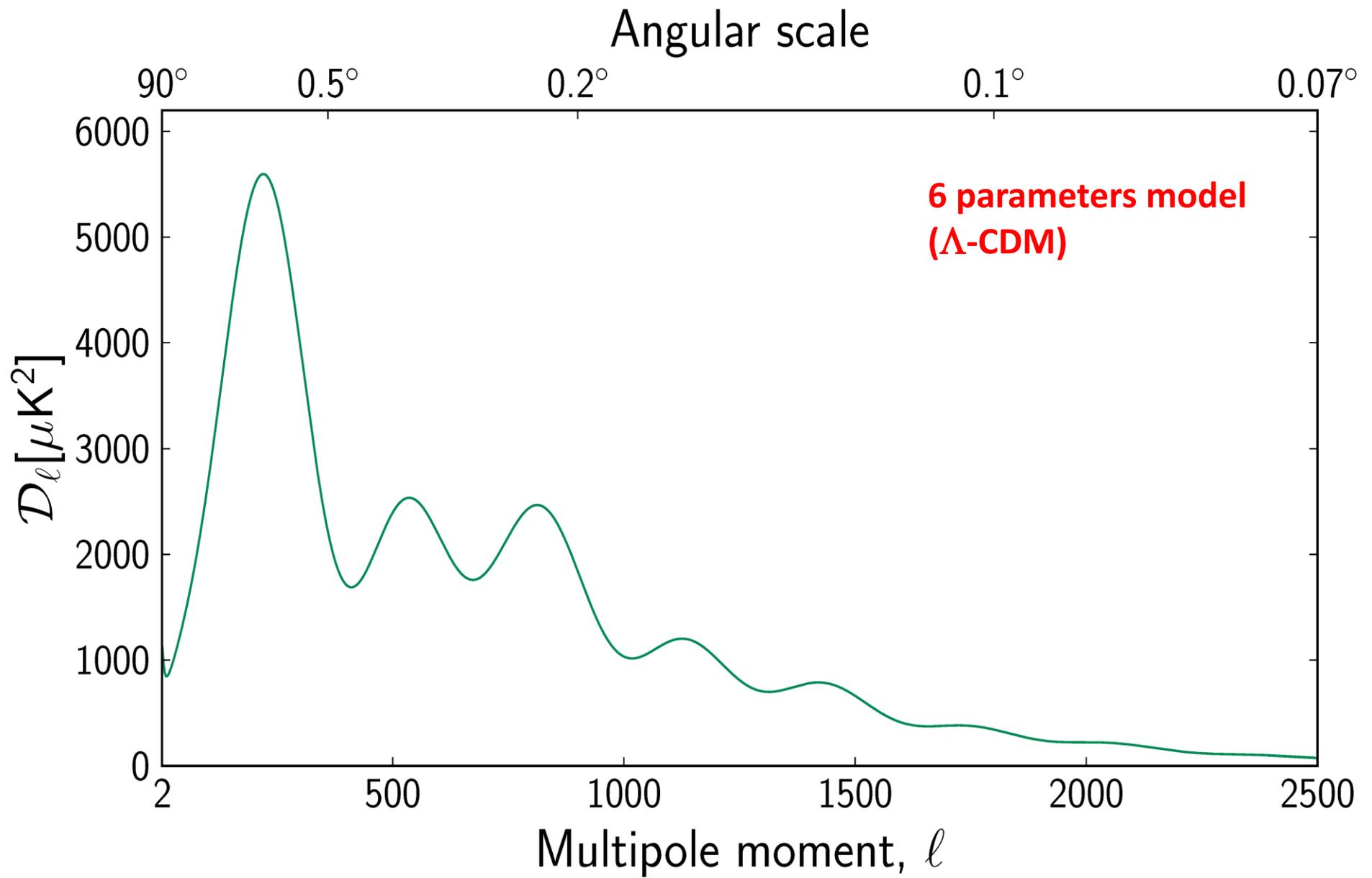


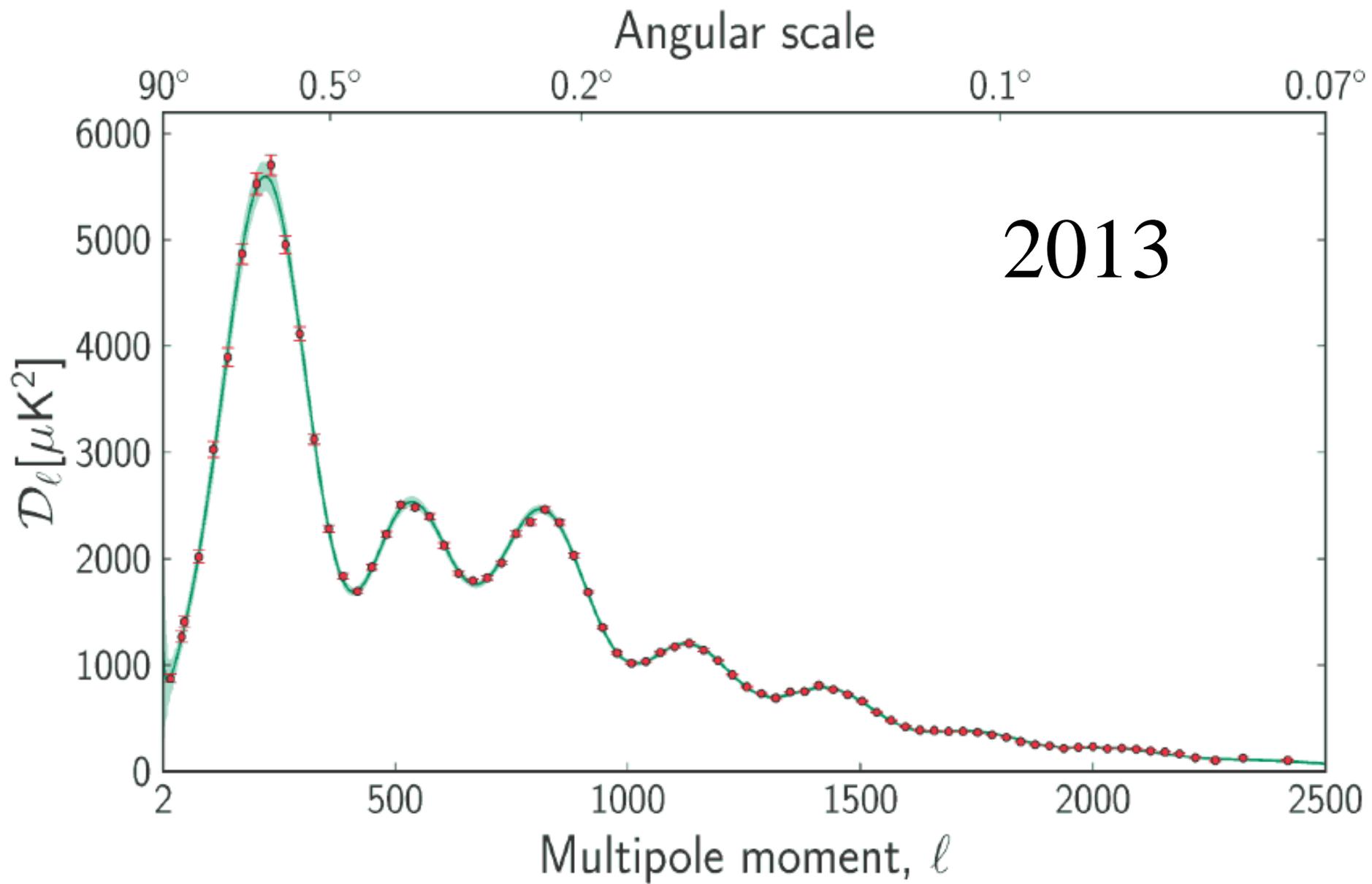
# Composizione dell'universo e CMB

- L'abbondanza delle macchie nell'immagine del fondo cosmico di microonde (spettro di potenza) dipende dalla composizione dell'universo, cioè dalle percentuali delle possibili forme di massa-energia presenti nell'universo.
- I cosmologi teorici hanno visto con grande dettaglio come composizioni diverse provocano evoluzioni diverse dell'universo, e quindi abbondanze delle macchie nel CMB diverse.
- Planck ha fatto una misura precisissima, quindi possiamo ricavare la composizione dell'universo.





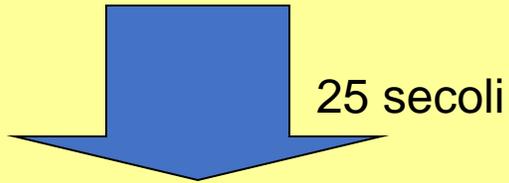




# Di che cosa è fatto l' Universo ?

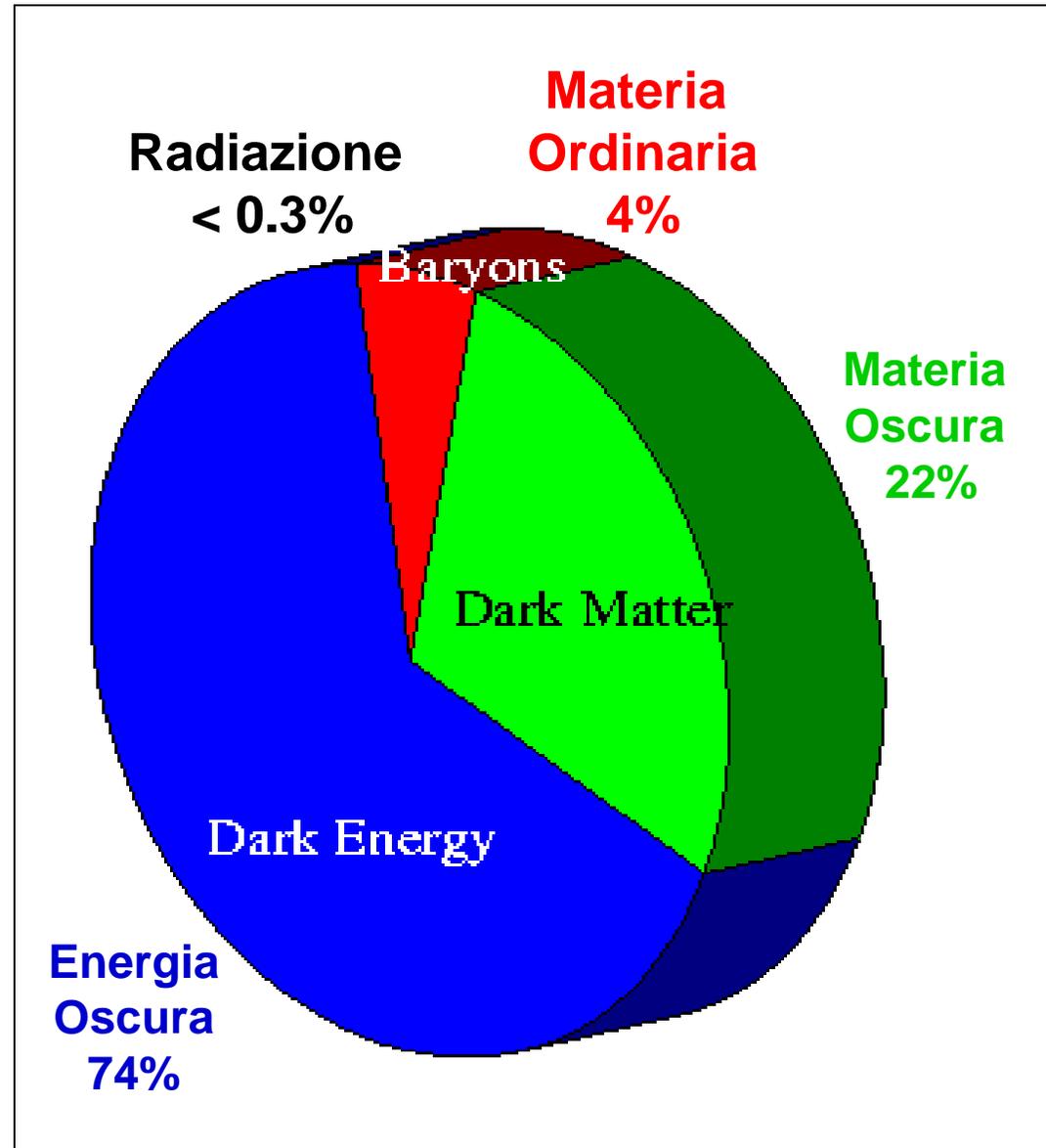
- Per i PreSocratici:

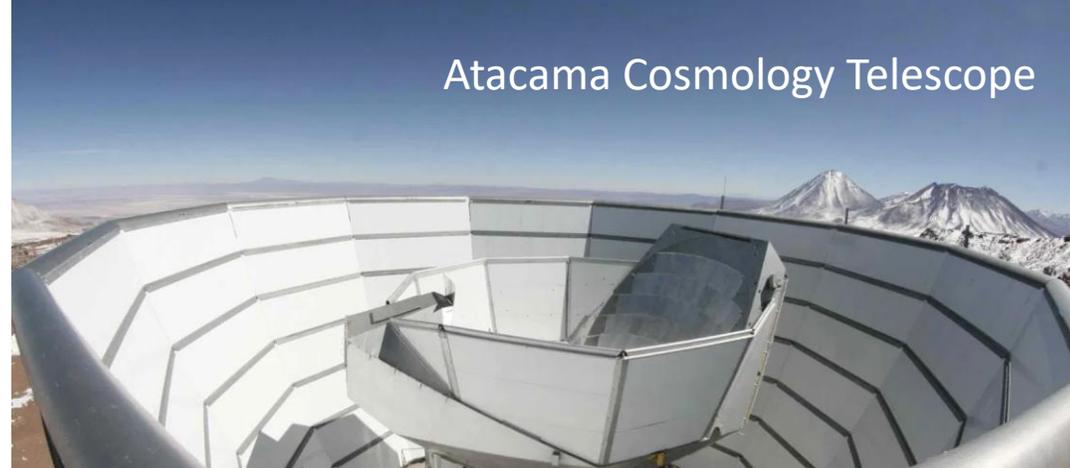
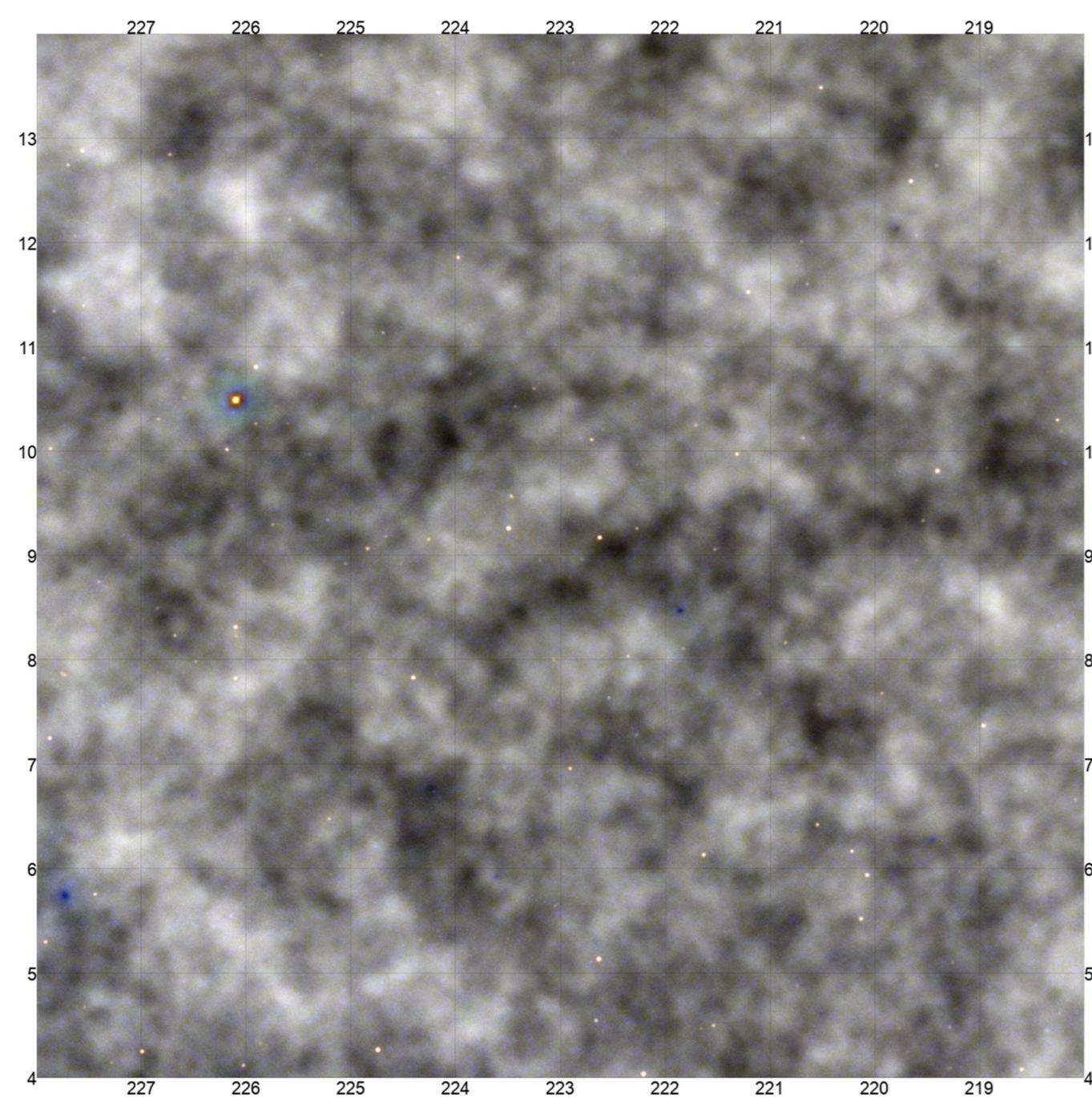
- terra,
- acqua,
- aria,
- fuoco



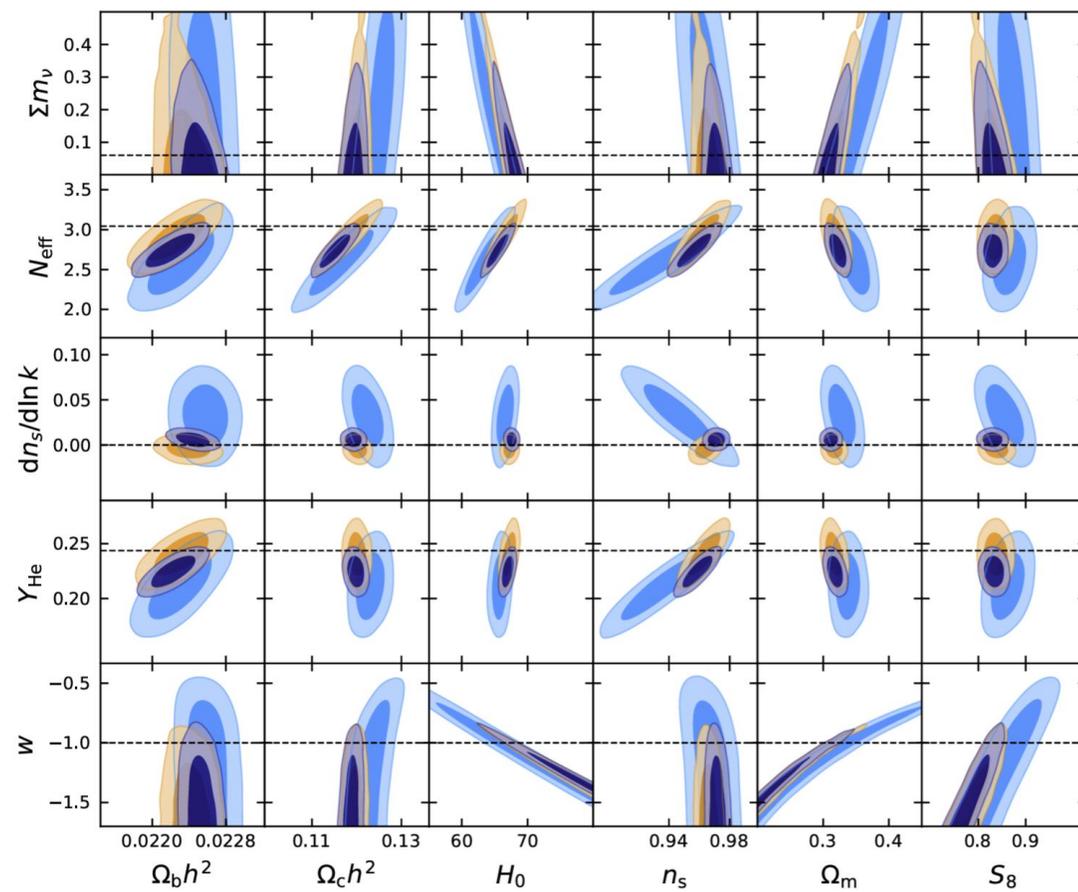
- Oggi, per lo scienziato medio:

- radiazione (luce),
- materia ordinaria,
- **materia oscura,**
- **energia oscura.**





ACT Planck P-ACT



Universo  
Primordiale

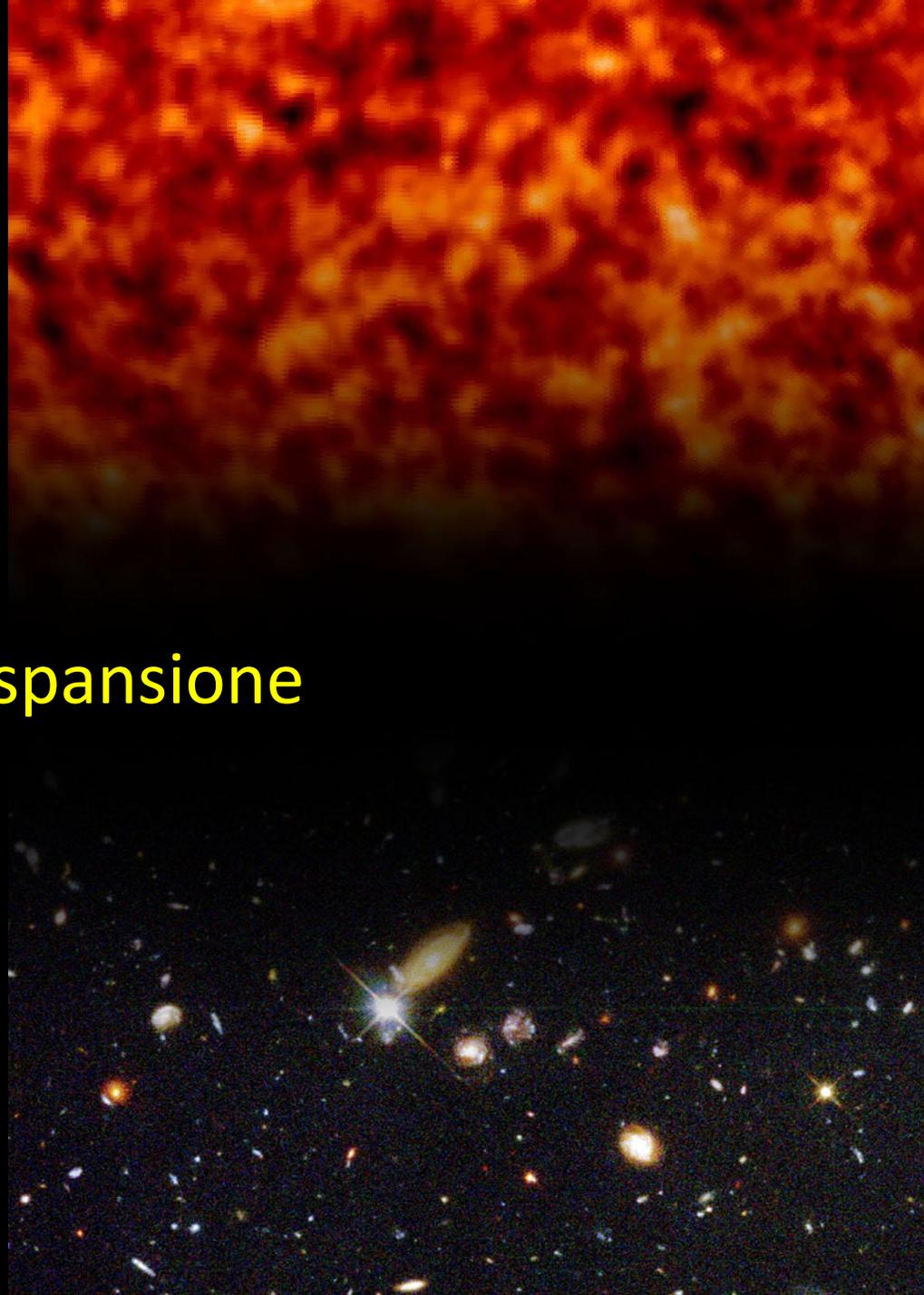
$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx 10^{-5}$$

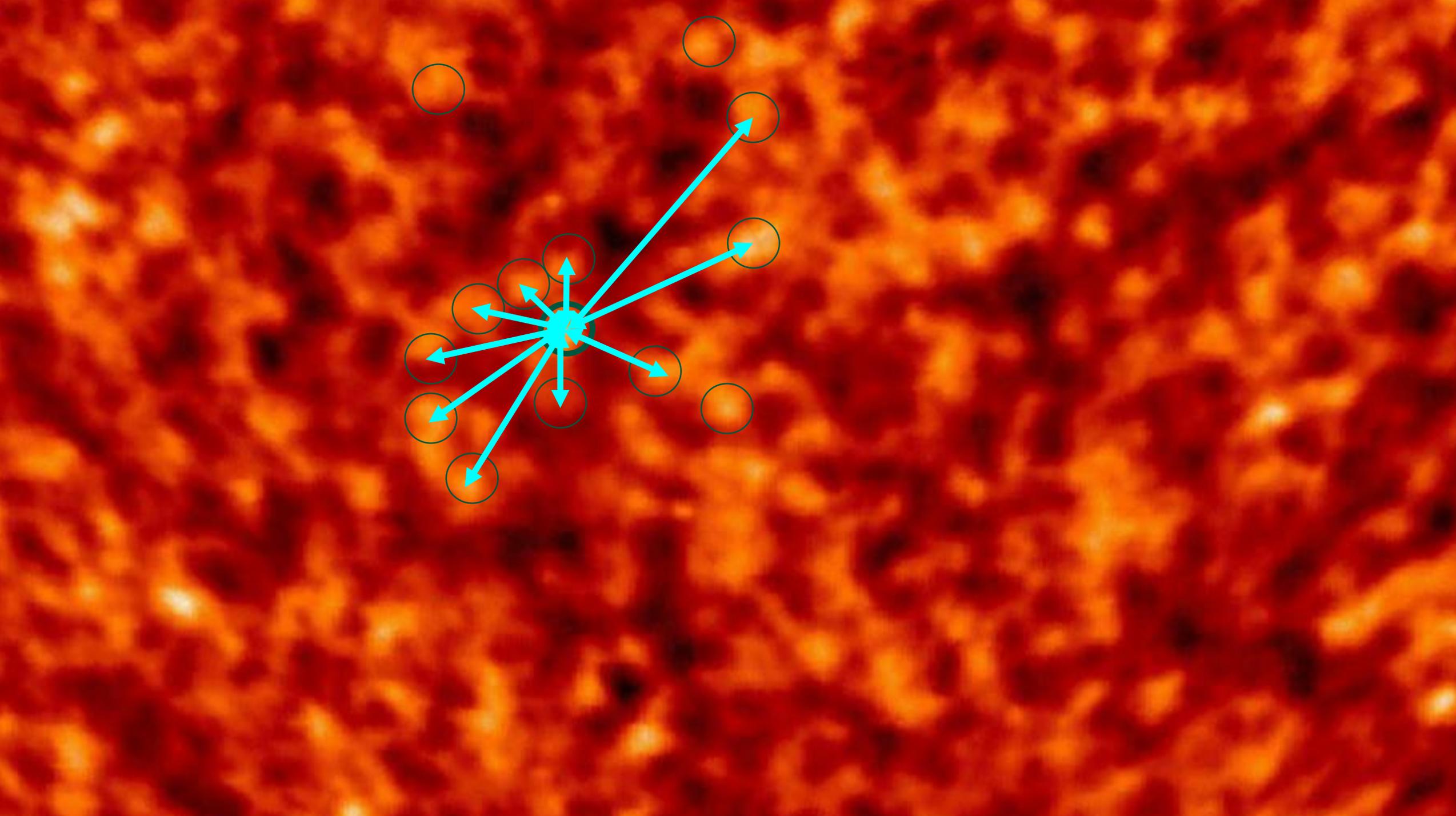
Gravità vs. Espansione

Universo  
Strutturato

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx 10^5$$

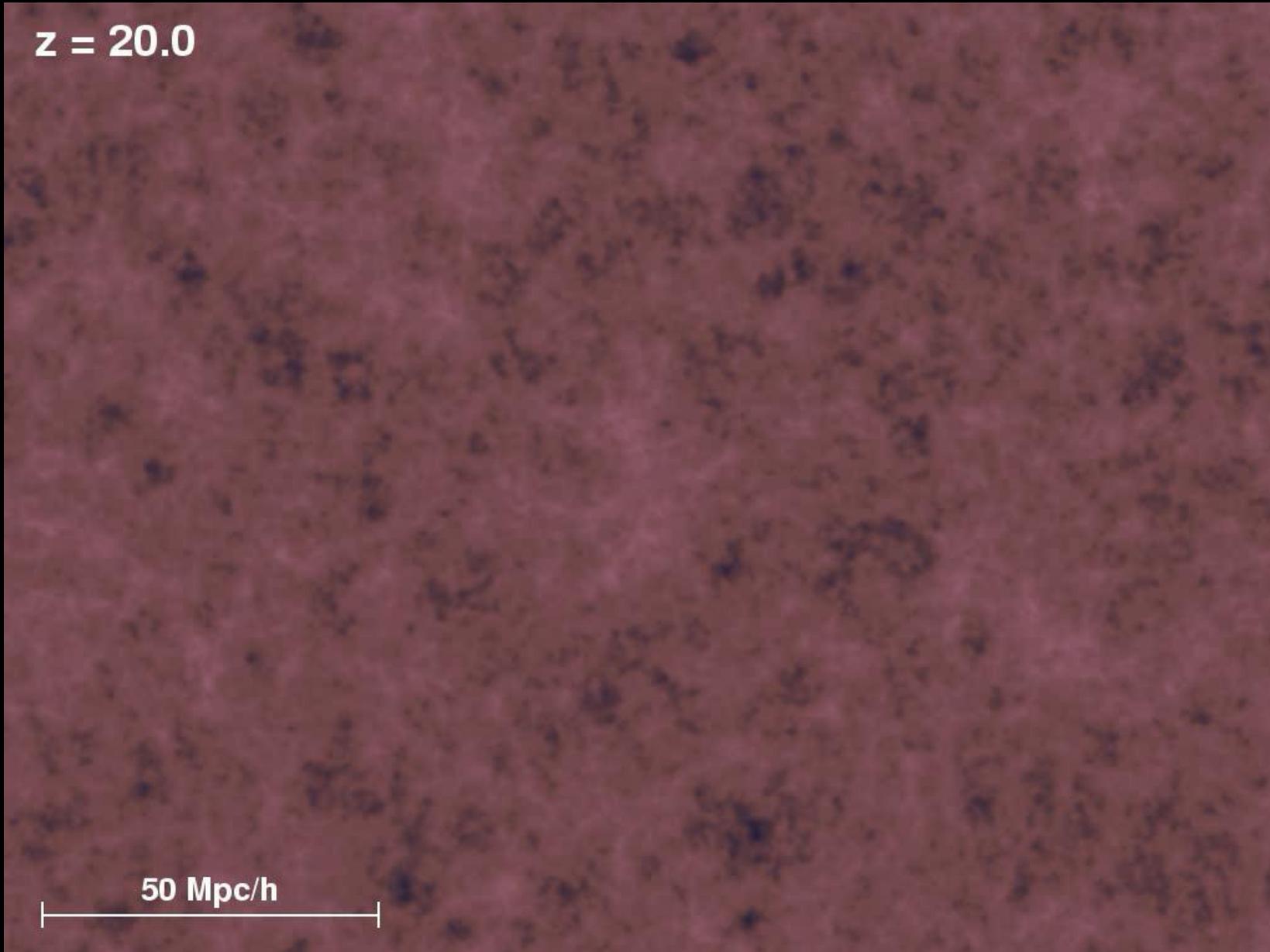
t



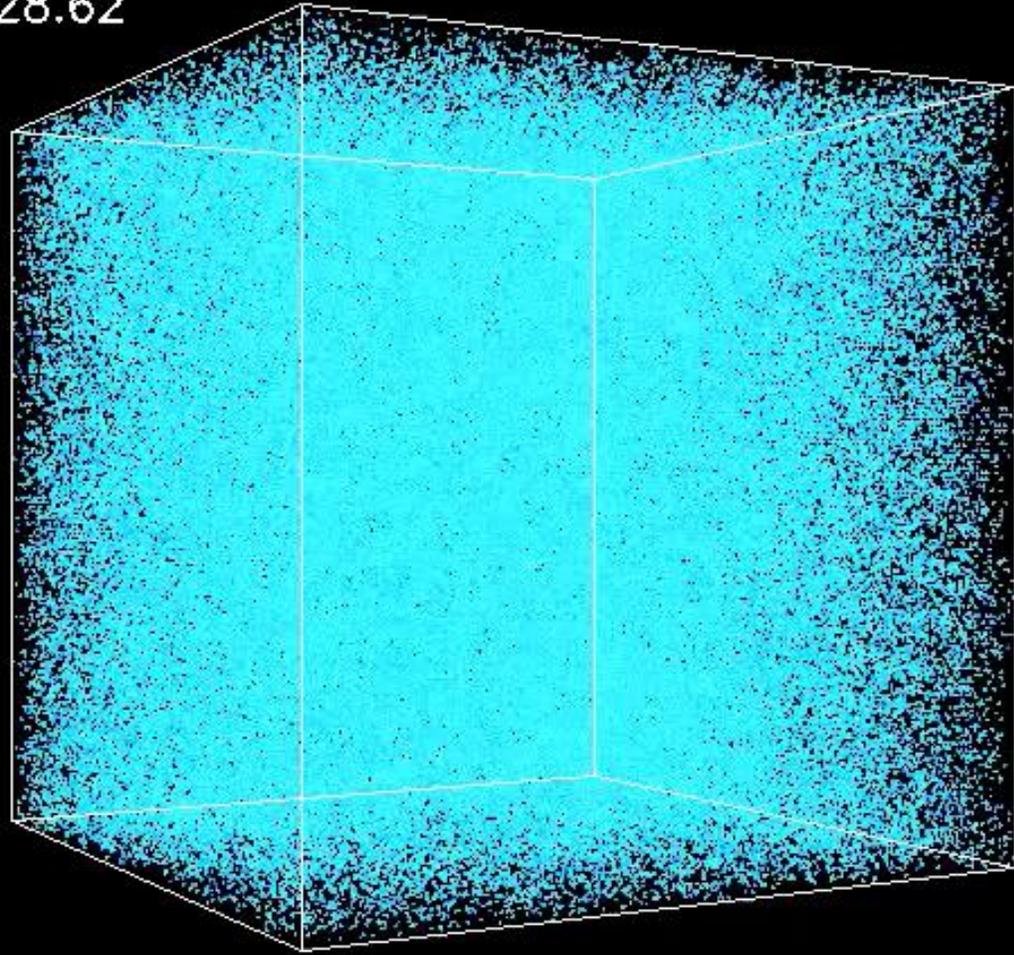


$z = 20.0$

50 Mpc/h



$Z=28.62$



# Riassumendo :

- Partendo dalle *fluttuazioni di densità primordiali*, visualizzate come fluttuazioni di temperatura del fondo cosmico di microonde ...
- ... e assumendo che nell'universo ci siano radiazione, materia ordinaria, materia oscura, energia oscura nelle proporzioni ricavate dalle misure di CMB e di distribuzione delle galassie ...
- ... si conclude che *l'attrazione gravitazionale*, lentamente a causa dell'espansione, ma inesorabilmente, ha prodotto la maestosa *gerarchia di strutture* visibili nell'universo *attuale*.
- Ma chi ha prodotto le fluttuazioni di densità primordiali ?
- Prossimo dialogo.