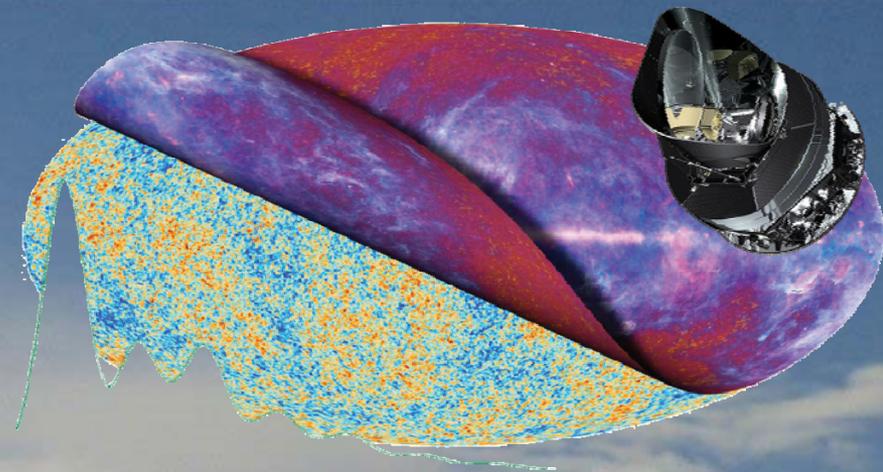


BOOMERanG e oltre



Paolo de Bernardis

Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma

Conferenza nazionale sulla ricerca in Antartide

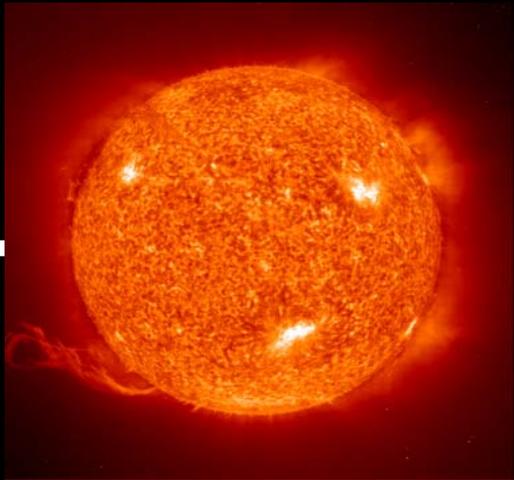
Accademia Nazionale dei Lincei - Roma - 20/Ottobre/2015



Sempre più lontano !

- Da secoli gli astronomi osservano l'universo, sempre più lontano. Spinti solo dalla curiosità, ma consci dell'importanza dei loro risultati per la Fisica e la comprensione della Natura.
 - Qual è la massima distanza da cui possiamo ricevere luce o segnali elettromagnetici ?
 - Cosa c'è laggiù ?
 - Quanto tempo fa è partita la luce che oggi ci arriva da laggiù ?
 - Quali erano le condizioni fisiche all'epoca ?
 - Come si è evoluto l'universo da allora ad adesso ?
 - Come si è evoluto prima di allora ?
- Grazie alle straordinarie caratteristiche della stratosfera Antartica, e all'infrastruttura di ricerca realizzata sul continente, è stato possibile rispondere in termini quantitativi alle domande sopra.
- Con l'esperimento BOOMERanG abbiamo ottenuto per la prima volta (nel 1998) una immagine nitida dell'universo primordiale, usando la luce più antica che esiste nell'universo: il fondo cosmico di microonde.
- In questo intervento descriverò la problematica scientifica, i due esperimenti BOOMERanG, i loro risultati, il loro impatto in fisica e cosmologia, e come la loro eredità sia stata usata dagli esperimenti successivi nel settore, in Antartide e nello spazio.

Sole



8 minuti luce
8 minuti fa



Terra



Galassia di Andromeda



Terra



← 2 milioni di anni luce
2 milioni di anni fa

QSO



Terra



1000 milioni di anni luce
←
1000 milioni di anni fa

Galassie
più lontane

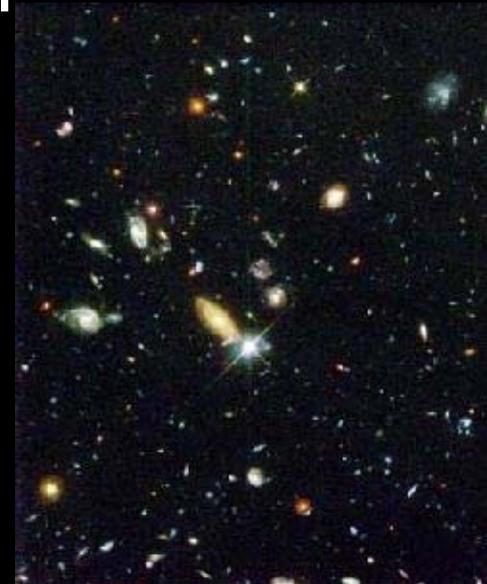
Terra



10000 milioni di anni luce



10000 milioni di anni fa

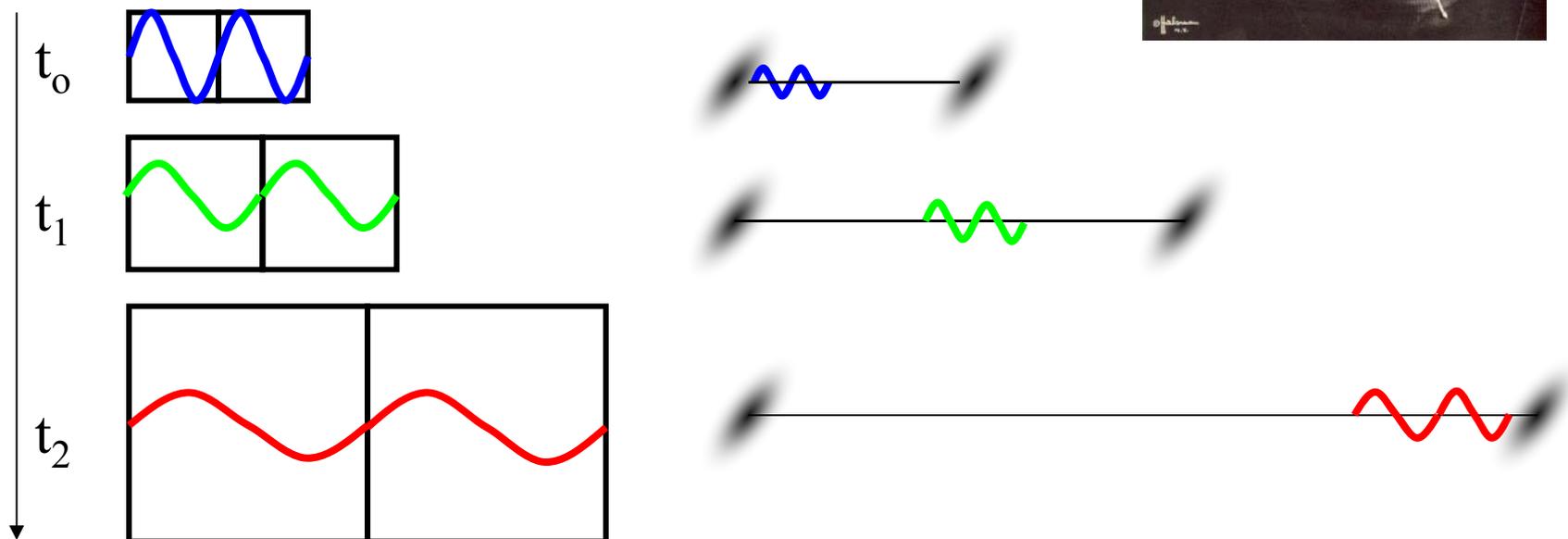
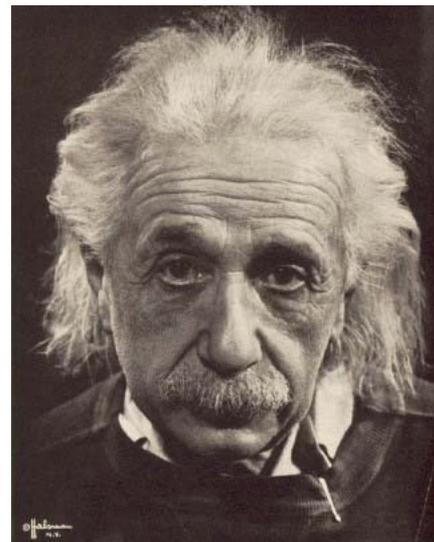


Sempre più lontano

- Possiamo osservare ancora più lontano, e quindi ancora più indietro nel tempo ?
- Tanto indietro da osservare *l'origine dell'universo* ?
- A logica si, ma come ? Abbiamo bisogno di una *teoria* che ci guidi nello scegliere l'osservazione da fare.
- La teoria deve essere sempre basata su fatti che riguardano l'oggetto in studio, nel nostro caso l'universo intero.
- Che cosa sappiamo dell'universo intero ?
 - che, almeno per quanto si può vedere, è costituito da galassie, fino ai limiti delle nostre possibilità osservative.
 - che le galassie hanno uno spettro di emissione spostato verso il rosso, tanto più quanto più sono lontane (Hubble, 1930 circa, con infinite verifiche e raffinamenti successivi)

Percorrendo distanze cosmologiche, la luce cambia colore

Secondo la relatività generale di Albert Einstein, se la luce si propaga in un mezzo in espansione, la sua lunghezza d'onda si allunga esattamente come tutte le altre lunghezze. Questo spiega il redshift e la legge di Hubble.



Sempre più lontano

- Possiamo osservare ancora più lontano, e quindi ancora più indietro nel tempo ?
- Tanto indietro da osservare *l'origine* ?
- A logica si, ma come ? Abbiamo bisogno di una *teoria* che ci guidi nello scegliere l'osservazione da fare.
- La teoria deve essere sempre basata su fatti che riguardano l'oggetto in studio, nel nostro caso l'universo intero.
- Che cosa sappiamo dell'universo intero ?
 - che, almeno per quanto si può vedere, è costituito da galassie, fino ai limiti delle nostre possibilità osservative.
 - che le galassie hanno uno spettro di emissione spostato verso il rosso, tanto più quanto più sono lontane (Hubble, 1930 circa, con infinite verifiche e raffinamenti successivi)
- Interpretazione fisica di questi fatti: l'universo è in espansione, e l'espansione fa aumentare, esattamente come le distanze cosmiche, anche le lunghezze d'onda della luce che viaggia nell'universo.

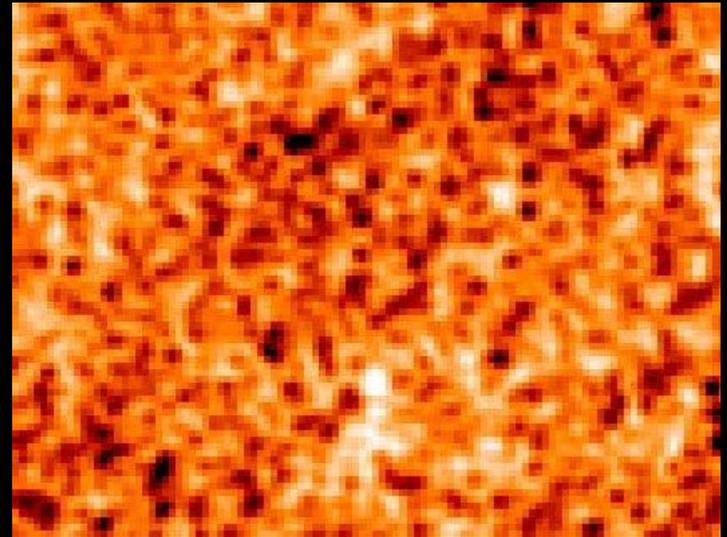
Idee, teorie, verifiche

- **Teoria:** un mezzo in espansione si raffredda. Quindi l' universo primordiale era più denso e più caldo di quello attuale. (George Gamow, circa 1950).
- **Previsioni:** Più indietro nel tempo andiamo ad osservare, più caldo sarà l' universo che osserviamo.
- Se guardiamo abbastanza lontano, e quindi abbastanza indietro nel tempo, vedremo una fase nella quale l' universo era caldo quanto la superficie del sole.
- Come dal sole proviene radiazione di tipo termico (*corpo nero*) anche dall' universo primordiale deve provenire lo stesso tipo di radiazione.
- Come non possiamo osservare l'interno del sole, che è ionizzato e quindi opaco, non potremo osservare epoche antecedenti a quella in cui l'universo era caldo come il sole.

Idee, teorie, verifiche

- Siccome l' universo si è espanso parecchio da allora, la radiazione di corpo nero prodotta nell' universo primordiale avrà lunghezze d' onda molto più lunghe di quella che proviene dal sole.
- **Indicazioni per le misure:** Per studiarla dobbiamo dotarci di telescopi per lunghezze d' onda lunghe. Quanto ? 1000 volte più lunghe della luce visibile. Microonde di alta frequenza. *Telescopi per microonde.*
- Costruendoli potremo ottenere una immagine dell' universo primordiale, vedere come era fatto e capire qualcosa della sua origine.

Granulazione solare



Gas incandescente
sulla superficie del
Sole (5500 K)

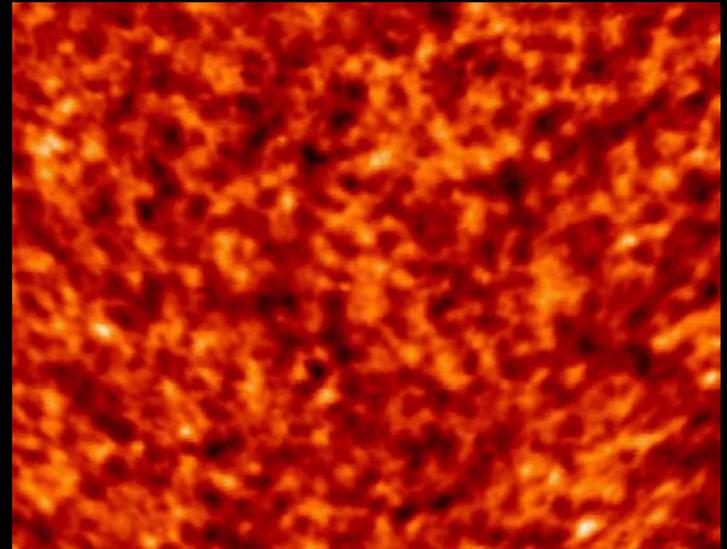
8 minuti luce

Qui, ora

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

14 miliardi di anni luce

Qui, ora



Mappa di BOOMERanG dell' Universo Primordiale

La fotosfera
Cosmica

Terra



13.7 miliardi di anni luce



13.7 miliardi di anni fa

Arno Penzias e Robert Wilson scoprono
il fondo cosmico nel 1965.
Ottengono il Premio Nobel nel 1977.



Negli anni successivi si capisce che la radiazione cosmica di fondo ha uno spettro di corpo nero a circa 3K. Ma se ne può **fare un'immagine ?**

C'è bisogno di risoluzione angolare e sensibilità !

- La radiazione cosmica di fondo proviene dall'epoca in cui la temperatura scende sotto 3000K, 380000 anni dopo il big-bang e 13.7 miliardi di anni fa, ed ha un redshift pari a 1100.
- Quindi nella sua immagine si deve vedere l'effetto degli orizzonti causali: regioni separate più di 380000 anni luce non hanno avuto tempo di interagire, sono causalmente sconnesse:
- Queste regioni sottendono un angolo pari a :

$$\theta = \frac{3.8 \cdot 10^5 \cdot 1100}{13.7 \cdot 10^9} = 1^\circ$$

- Se si vogliono risolvere, si deve usare un **telescopio di diametro dell'ordine del metro ...**

$$D \gg \frac{\lambda}{\theta} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{1/57.3} m = 0.11 m \quad \rightarrow \quad D \approx 1 m$$

- ... ed un **rivelatore molto sensibile**, data l'alta isotropia misurata nei decenni dopo la scoperta (tutti limiti superiori all'anisotropia).
- E c'è bisogno di un **sito molto freddo e secco**, per evitare l'assorbimento delle onde millimetriche da parte del vapor d'acqua atmosferico.

Il gruppo di Francesco Melchiorri in Sapienza sviluppa da tempo esperimenti CMB. Appena veniamo a sapere delle spedizioni Italiane in Antartide, si decide di spedire in Antartide un telescopio da 1 metro, con un rivelatore bolometrico raffreddato a 0.3K.



PdB appena arrivato a Terranova Bay (Antarctica, Nov. 1986, seconda spedizione nazionale)



Scarico delle casse con l'esperienza
A Baia Terranova (Nov. 1986)



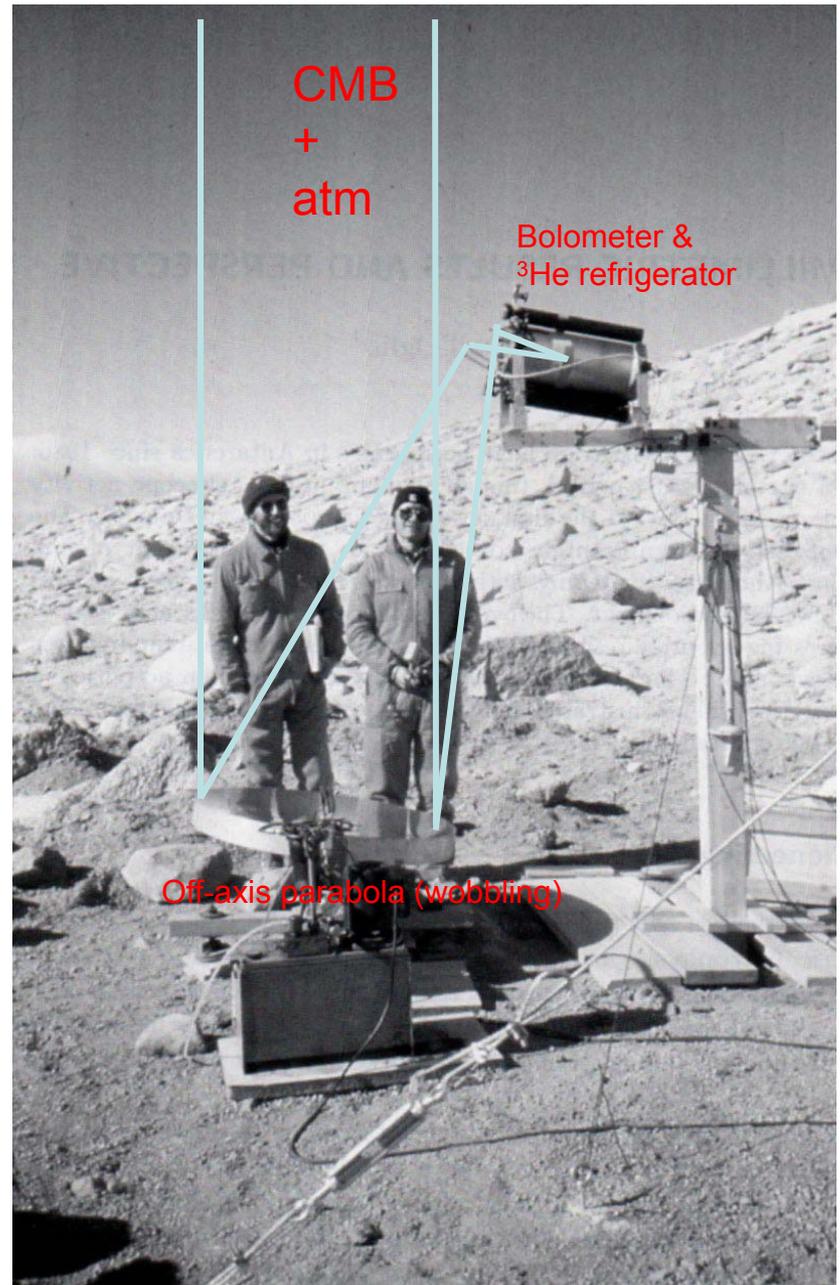
The first CMB
telescope in
Antarctica
(Nov. 1986)

P. de Bernardis (left)
G. Dall' Oglia (right)



The first CMB
telescope in
Antarctica
(Nov. 1986)

P. de Bernardis (left)
G. Dall' Oglia (right)





Transferring
liquid Helium
(Antarctica,
Dec. 1986)





Data analysis
in the
container
...(Antarctica,
Dec. 1986)

... while outside
the catabatic wind
rules (Antarctica,
Dec. 1986)



Risultato:

$$\frac{\Delta T}{T} < 2.5 \cdot 10^{-4} \quad @95\%CL$$

G. Dall'Oglio, P. de Bernardis, *Observations of cosmic background radiation anisotropy from Antarctica*, Ap.J. 331, 547 (1988)

un sensibilissimo limite superiore, ma ancora insufficiente per una misura. Per questo continuiamo a cercare siti più freddi e secchi di Baia Terranova d'estate, come il Pamir d'inverno o la stratosfera.

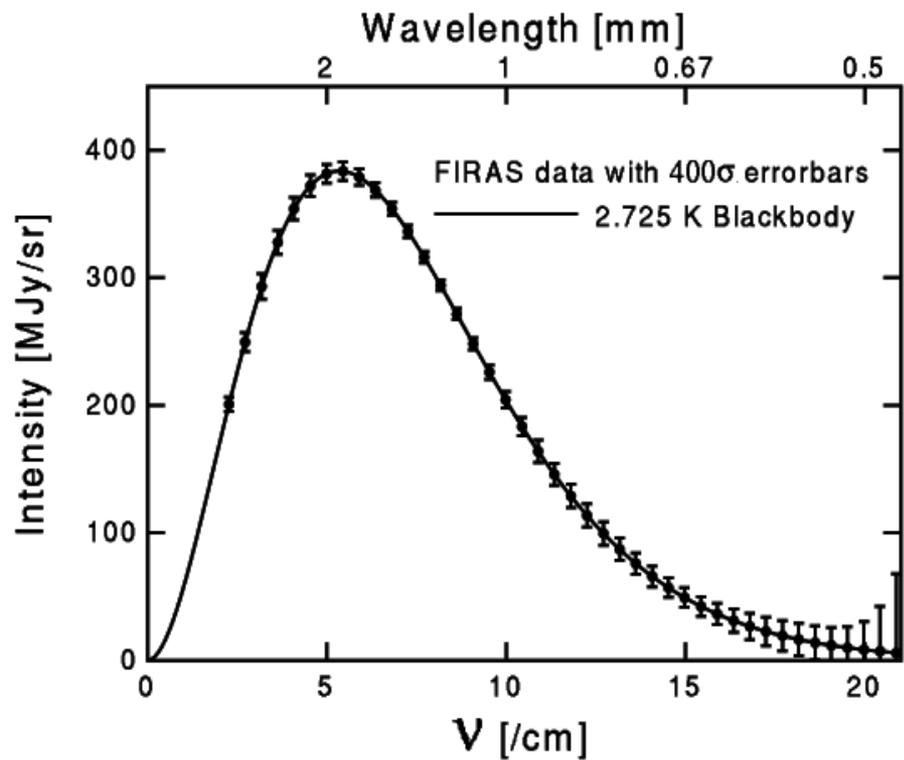
Pamir (1990): site testing at the Shorbulak telescope (4500 m osl)

Myself and Silvia Masi near the only suitable vehicle to reach the observatory.



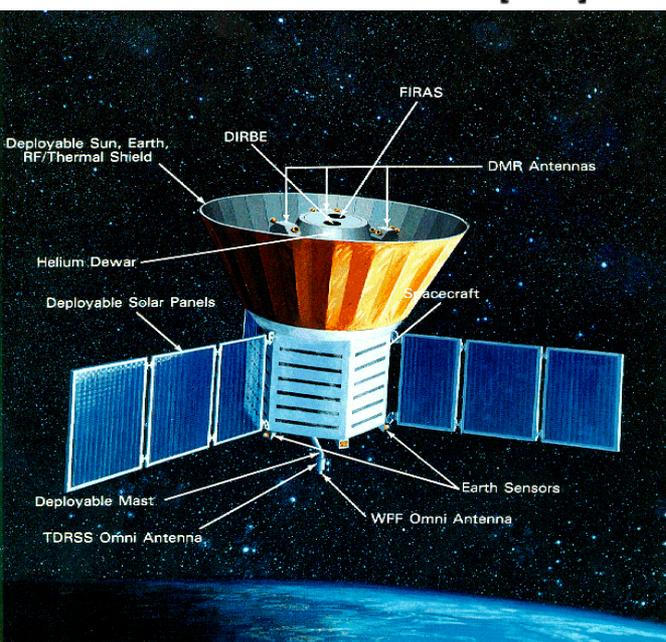
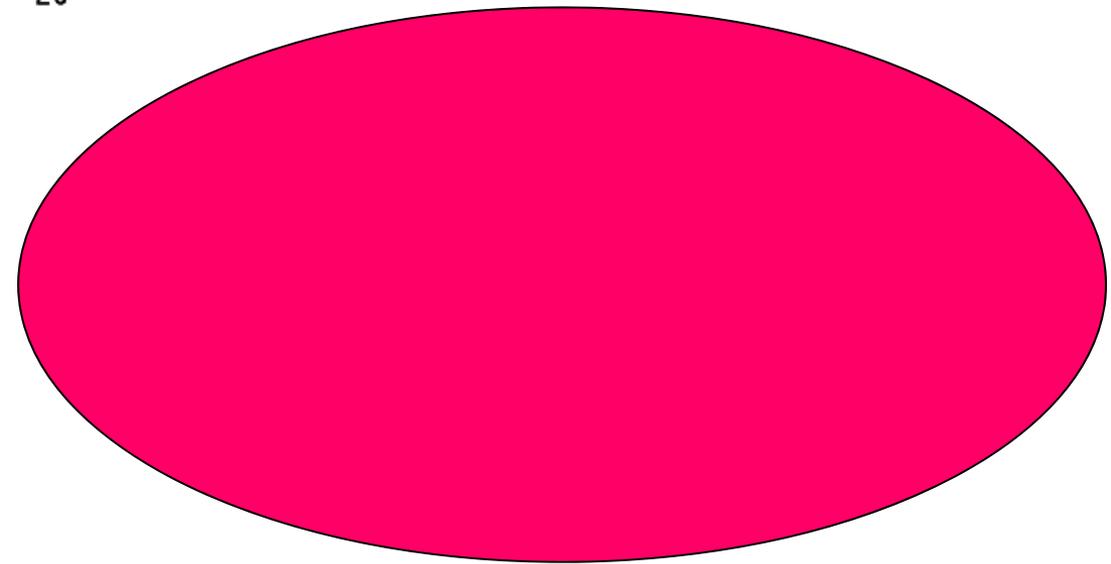
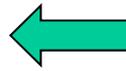
COBE

- Nel frattempo viene lanciato il piccolo satellite COBE della NASA, che, con l'esperimento DMR, mostra l'esistenza di anisotropie CMB, a livello di 10 parti per milione.
- Il satellite è piccolo e non può ospitare un telescopio da 1 metro. La risoluzione angolare di COBE è dell'ordine di 10 gradi, insufficiente per osservare gli orizzonti causali nell'universo primordiale.
- Ma ormai si è capito che il segnale c'è, e quindi si allestiscono sia in Italia che negli USA esperimenti con telescopi da 1 m su pallone stratosferico.



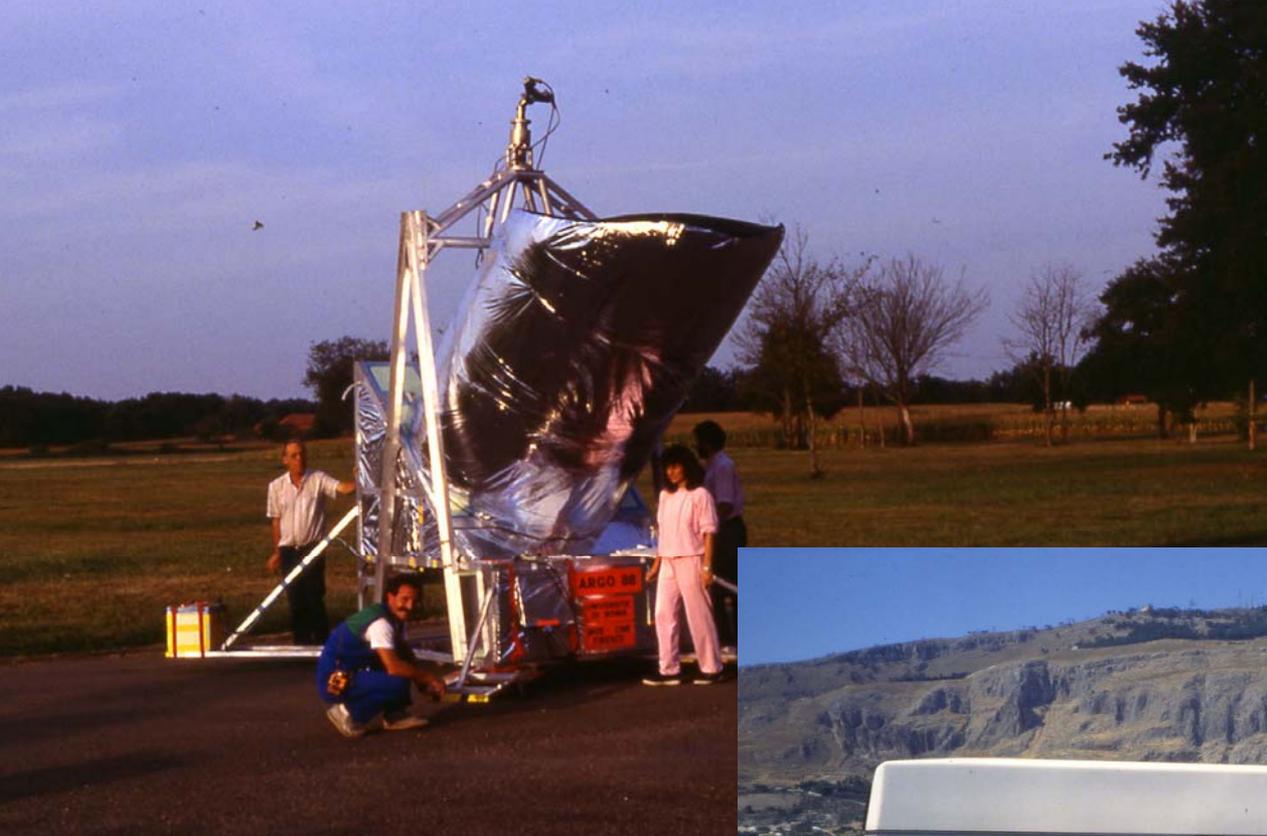
COBE (1992) L' universo iniziale era caldo e denso.

Spettro Termico (da COBE-FIRAS ed altri esperimenti)
 ... **ed anisotropia** (dell'ordine di 30 ppm da COBE-DMR, ma solo **a grandi scale**)



John Mather e George Smoot (COBE, 1992)
 Premio Nobel nel 2006

1988 Aire sur l' Adour
(France)
The first m-sized CMB
telescope



1992 Trapani

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

Additional upper limits !



1992: inizio collaborazione internazionale BOOMERanG

- Congresso a Roma su CMB
- Risultati del pallone ARGON (Roma)
- Risultati del pallone MAX (Berkeley)
- Voli più lunghi sono possibili dall'Antartide
- Paul Richards e Francesco Melchiorri
- Andrew Lange, io e Silvia Masi siamo incaricati di realizzare un esperimento per pallone stratosferico a lunga durata.
- Silvia conia l'acronimo BOOMERanG.

<http://oberon.roma1.infn.it/boomerang>
<http://www.physics.ucsb.edu/~boom>

ASI
NASA
NSF
PNRA
PPARC

*A. Lange * Caltech*

ENEA

ING

IROE

*P. de Bernardis * La Sapienza*

NERSC

QMWC

UCSB

U. Cardiff

U. Toronto



1998-99

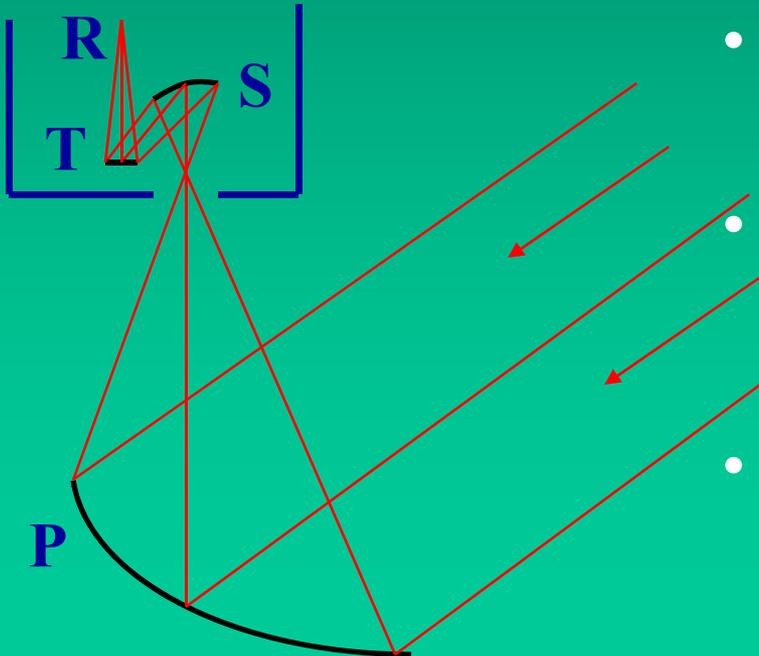
BOOMERanG-LDB



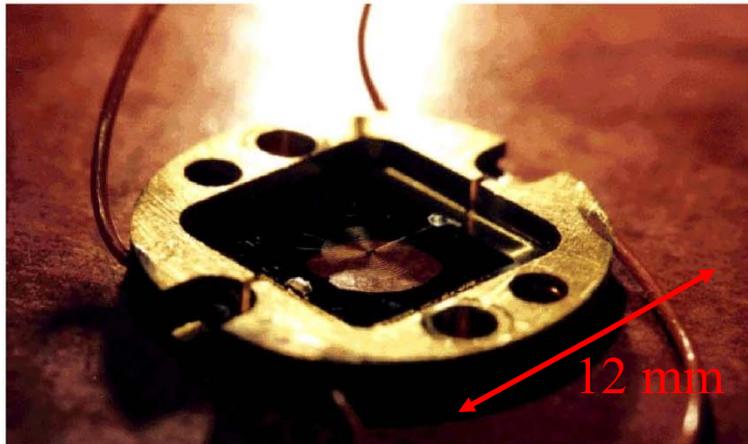
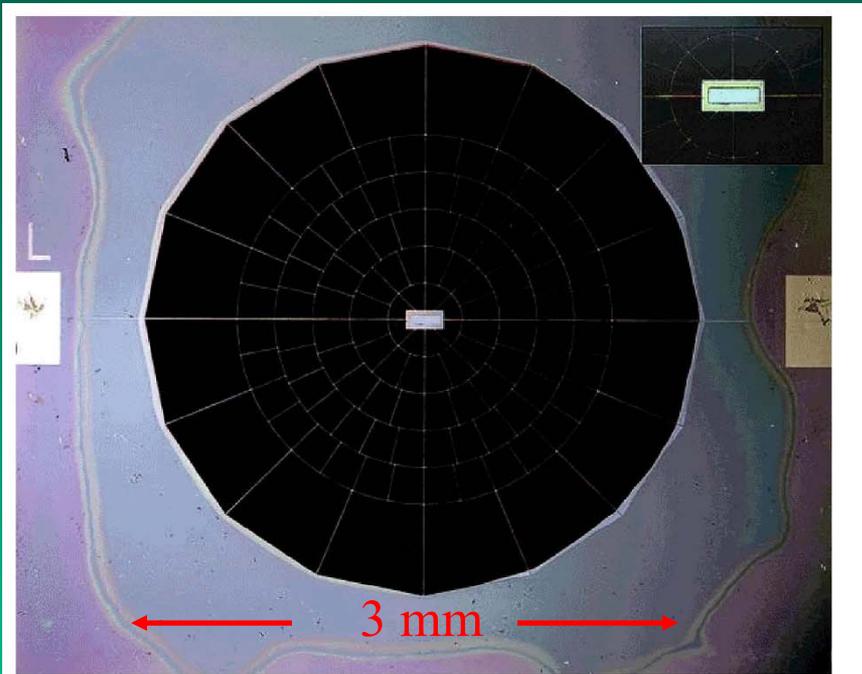
1) Il telescopio per le microonde



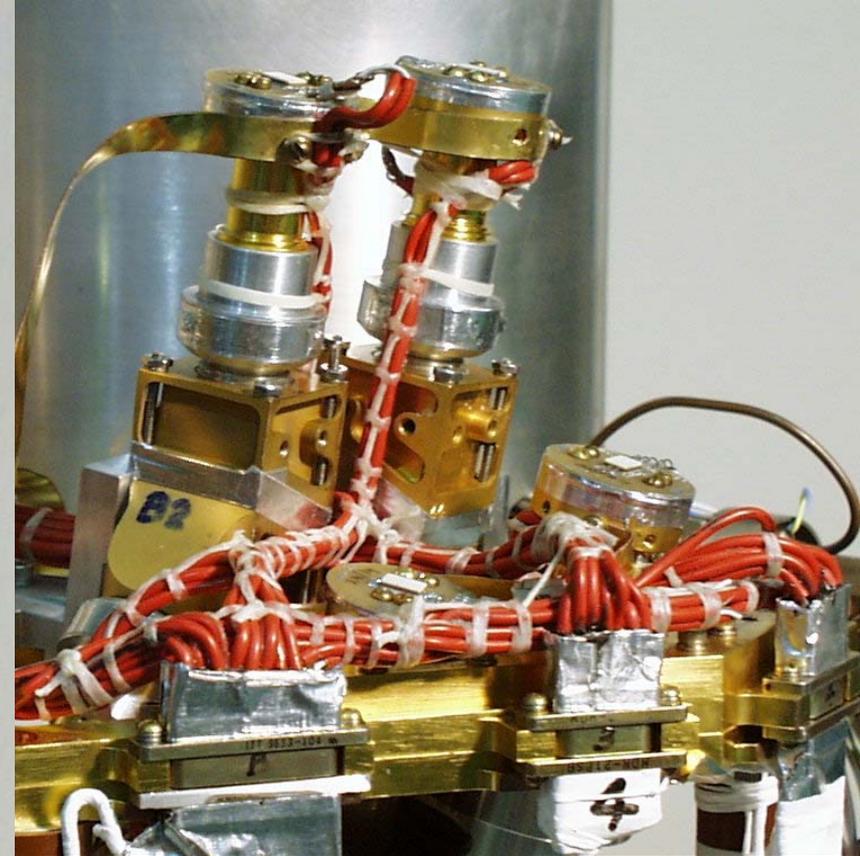
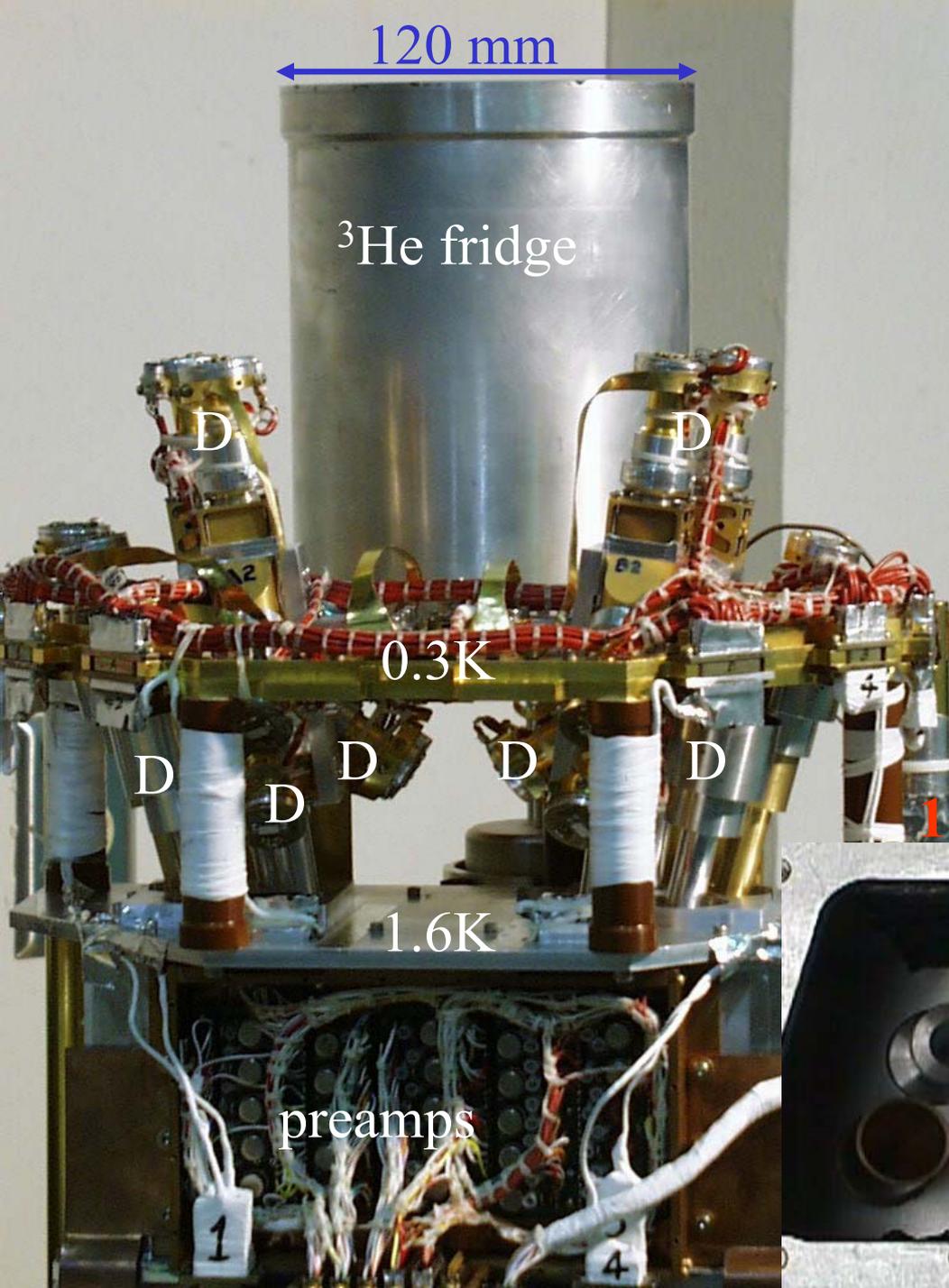
- Il *telescopio*, progettato a “La Sapienza”, raccoglie la debole radiazione a microonde e la concentra sui rivelatori. Lo specchio primario ha dimensioni ragguardevoli: 1.3m
- E' un **telescopio fuori asse**, che raccoglie *esclusivamente* radiazione proveniente dalla direzione osservata. *Anche un solo miliardesimo della potenza proveniente da direzioni sghembe rovinerebbe le misure!*
- E' fatto con specchi metallici, in alluminio, da 1.3 metri di diametro, perche' sono isotermi ed emettono poche microonde.
- Lo specchio principale e' stato costruito a San Dona' di Piave (Marcon), il secondario ed il terziario presso l' officina del Dipartimento di Fisica de La Sapienza
- Secondario e terziario sono raffreddati a -271°C (2 Kelvin) dentro il criostato, insieme ai rivelatori.



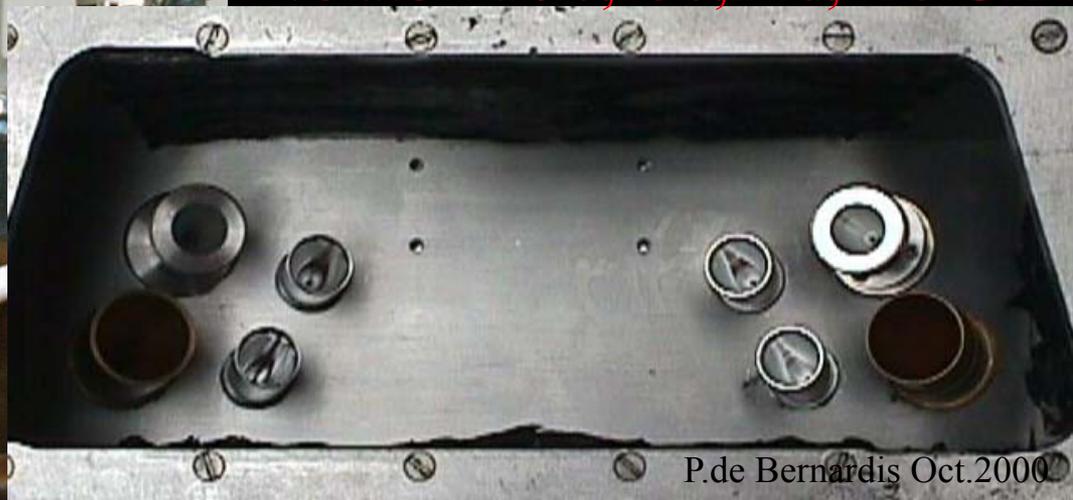
2) I rivelatori di microonde



- Sono sensibilissimi *bolometri a ragnatela* per onde millimetriche, realizzati a Caltech e JPL.
- Raccolgono i fotoni a microonde e si scaldano leggermente (pochi miliardesimi di grado). Questo produce a sua volta una variazione di resistenza elettrica in un cristallo di germanio, che viene misurata. Più microonde arrivano, e più cambia la resistenza.
- Montati nel fuoco del telescopio di BOOMERanG hanno una sensibilità tale da misurare *il calore prodotto da una caffettiera sulla luna* !
- Per funzionare devono essere raffreddati a 273 gradi sotto zero (0.3 K).



16 rivelatori a 90,150,240,410 GHz



2 bis) Il sistema criogenico



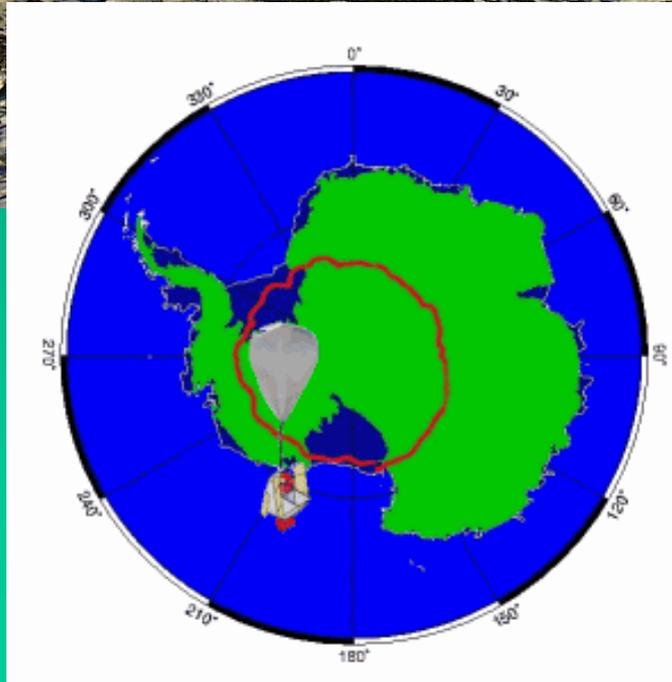
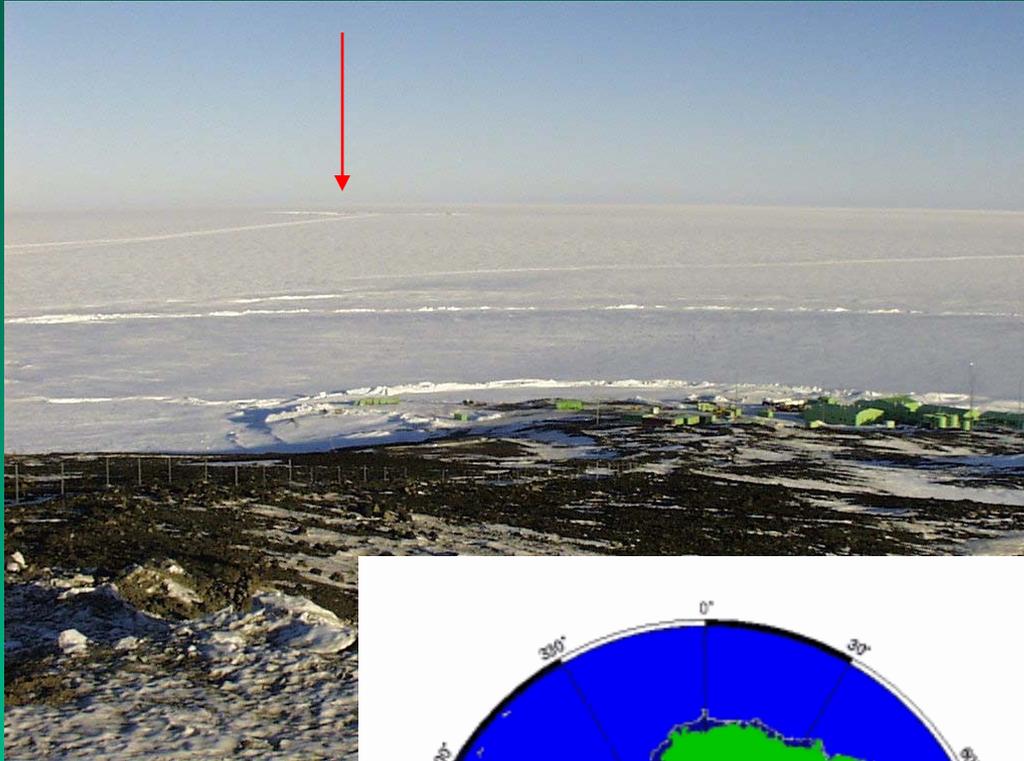
- Costruito in collaborazione tra ENEA di Frascati e Università di Roma, è una macchina termica complicata che, usando azoto liquido, elio liquido ed elio-3 liquido raffredda i rivelatori e li mantiene stabilmente a 0.28 K (-273 C) per tutta la durata delle misure (15 giorni), funzionando automaticamente senza interventi esterni.



Masi et al. 1999, *Cryogenics*, 39, 217

Masi et al. 1998, *Cryogenics*, 38, 319

3) La località

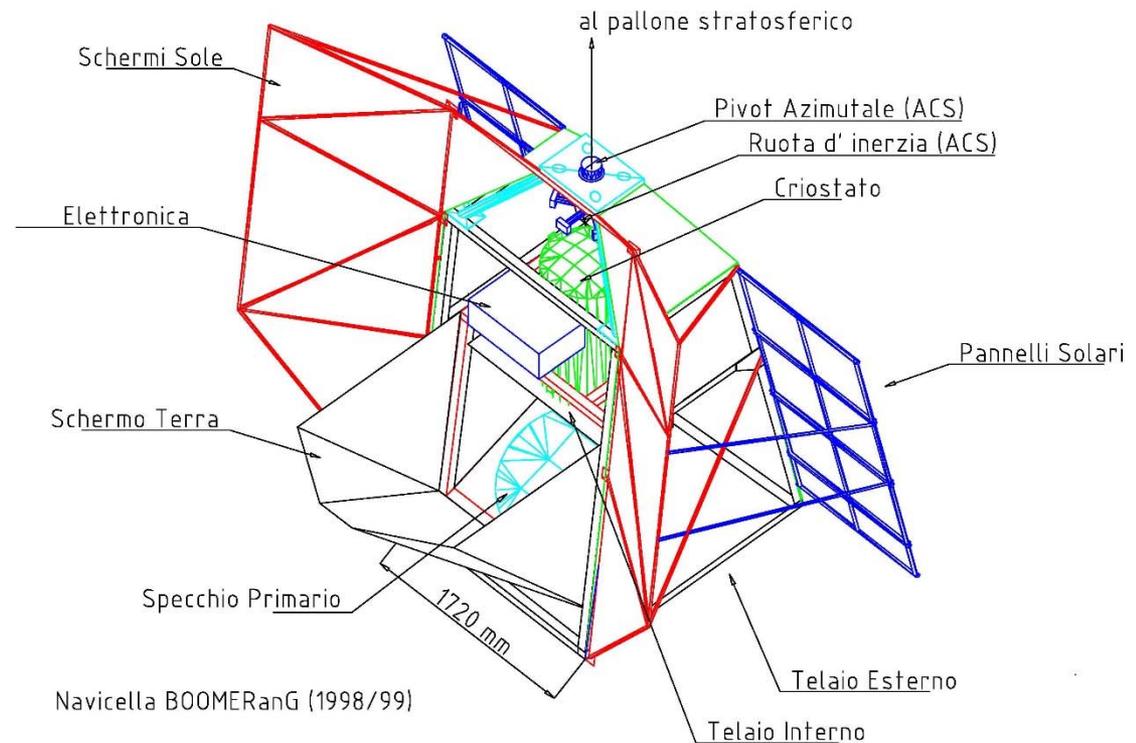


- L'atmosfera terrestre emette fortemente nelle microonde. Far misure di fondo cosmico da terra e' come voler fare immagini di galassie nel visibile di giorno.
- A quota di pallone stratosferico (37 km) l'emissione dell'atmosfera terrestre e' estremamente ridotta.
- Il pallone stratosferico costa circa 100 volte meno di un satellite.
- La NASA-NSBF lancia palloni stratosferici dall'**Antartide**, che circumnavigano il continente in 1-2 settimane. Questo permette di ripetere le misure molte volte, in modo da essere sicuri del risultato.

La Navicella

La navicella è stata progettata presso “La Sapienza” e costruita dalla Meccano di Fabriano.

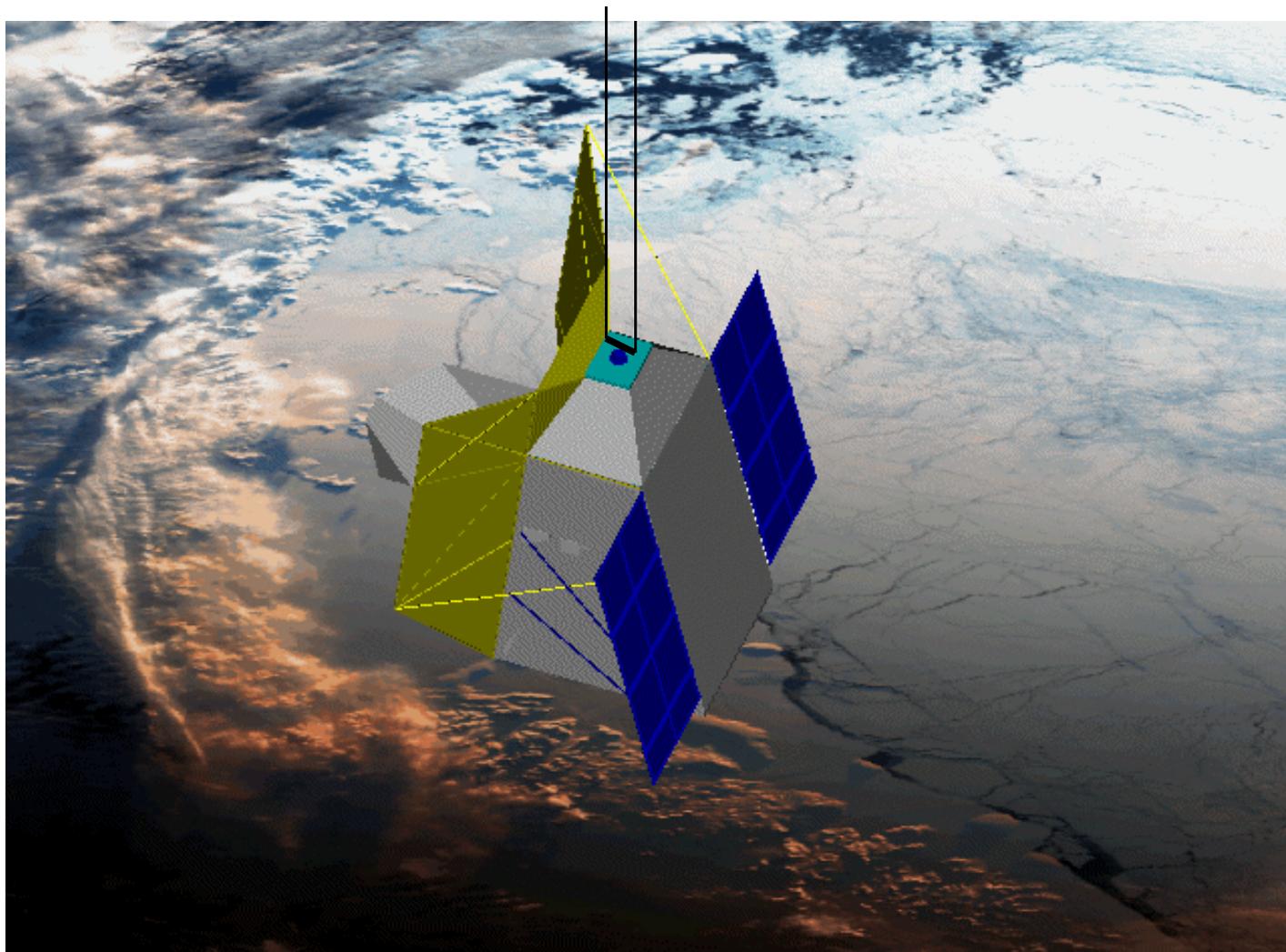
Grandi schermi termici impediscono di raccogliere le microonde generate dal sole e dalla terra.



Navicella BOOMERanG (1998/99)

La scansione del cielo

- L'immagine del cielo deve essere costruita pazientemente e, osservando una direzione alla volta e registrando i dati
- La scansione deve essere molto dolce e costante (da 1 a 2 gradi al secondo)





WILLIAM-FIELD - Mare di Ross - Antartide

Base Scott - Mare di Ross - Antartide



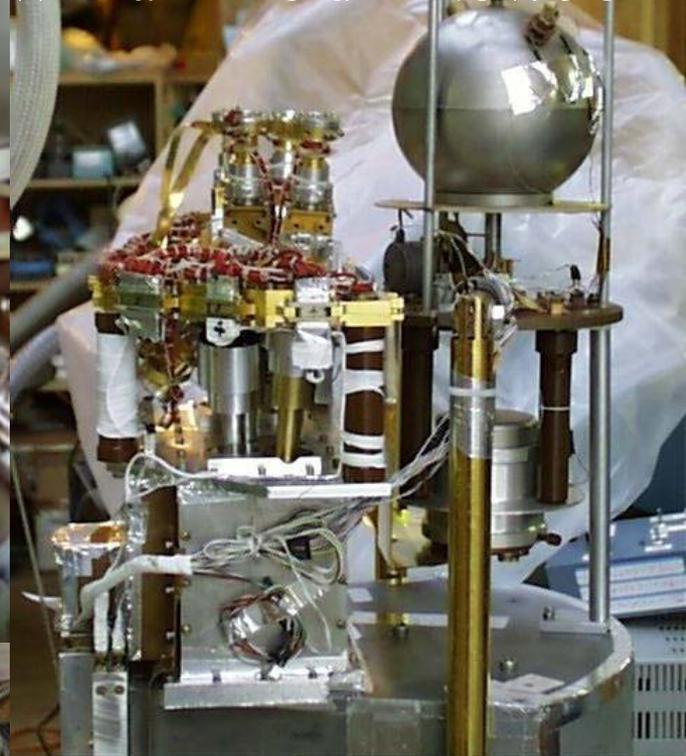


Il laboratorio di William Field



L'arrivo di BOOMERanG / fine Ottobre 1998





Lavoro di assemblaggio e test dello strumento a William Field – Nov. 98



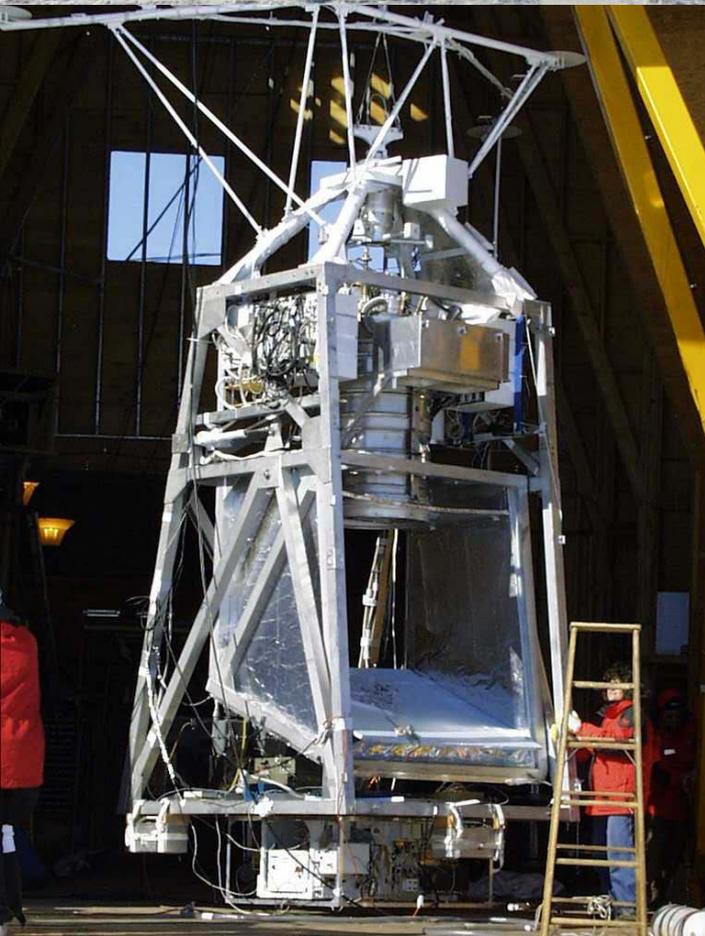


Lavoro di assemblaggio e test dello strumento a William Field – Nov. 98



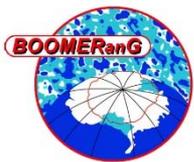
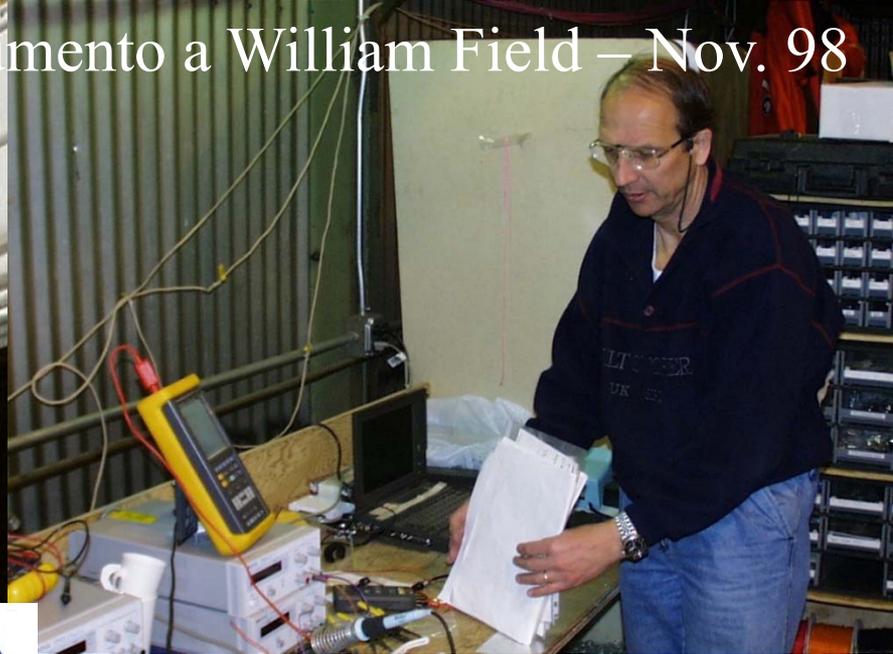
BEAM Calibration

At ground calibration with **artificial planet** (tethered blackbody + CCD monitor)



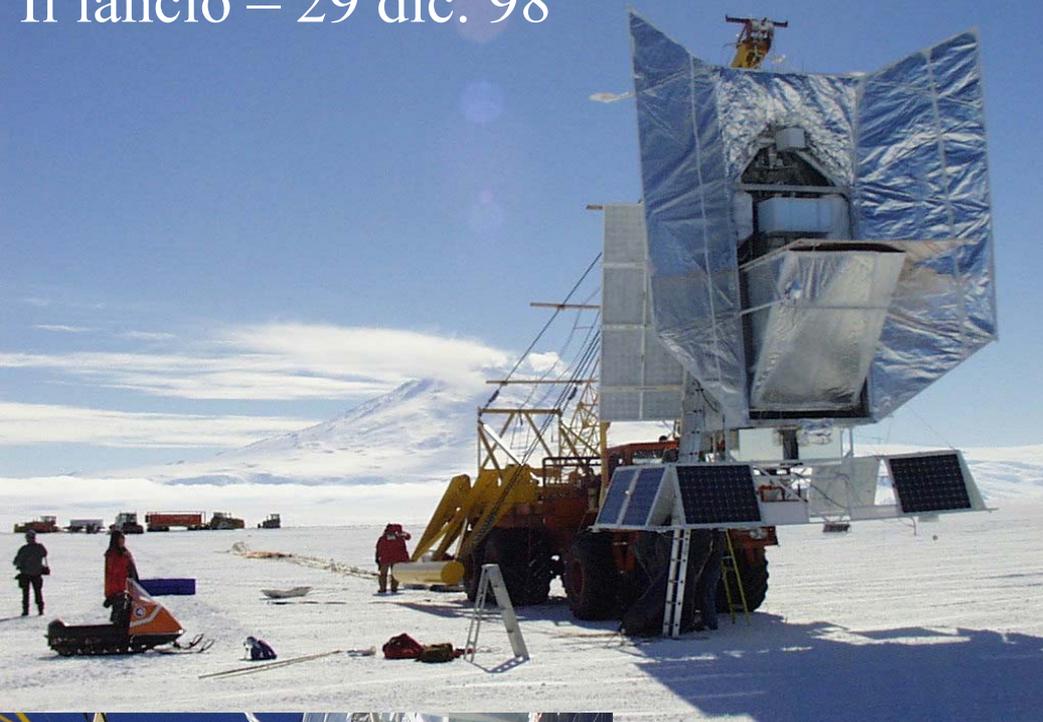
Artificial Planet
Diam = 20, 40 cm
Dist. 2 km
(4, 8 arcmin)

Lavoro di assemblaggio e test dello strumento a William Field – Nov. 98





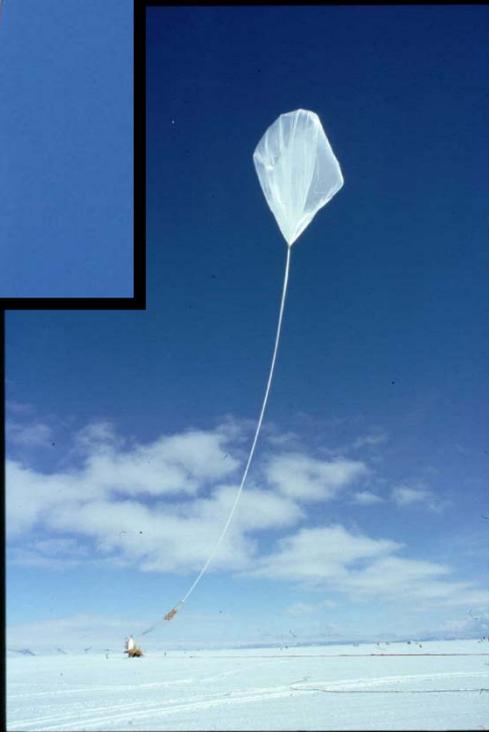
Il lancio – 29 dic. 98



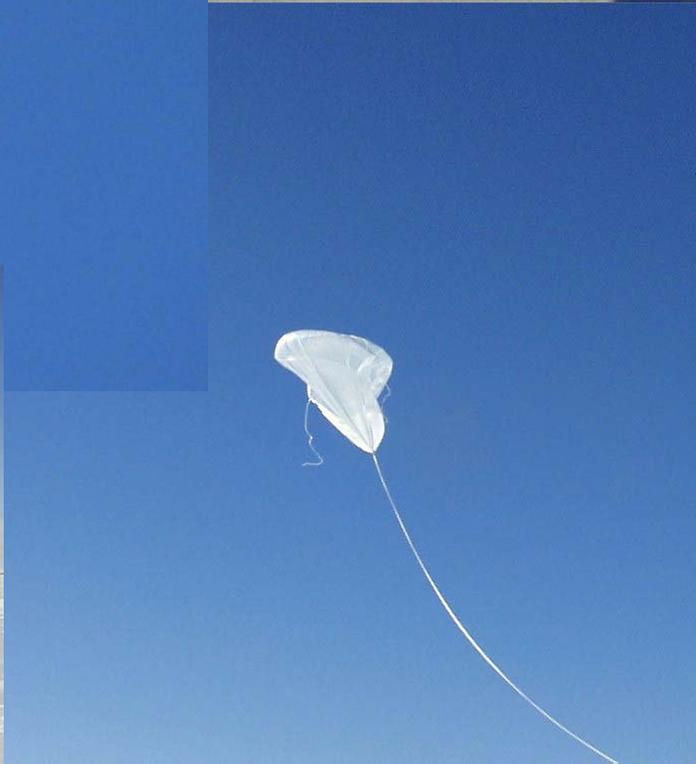
Il lancio: 29/12/1998



Il lancio: 29/12/1998



Il lancio – 29 dic. 98

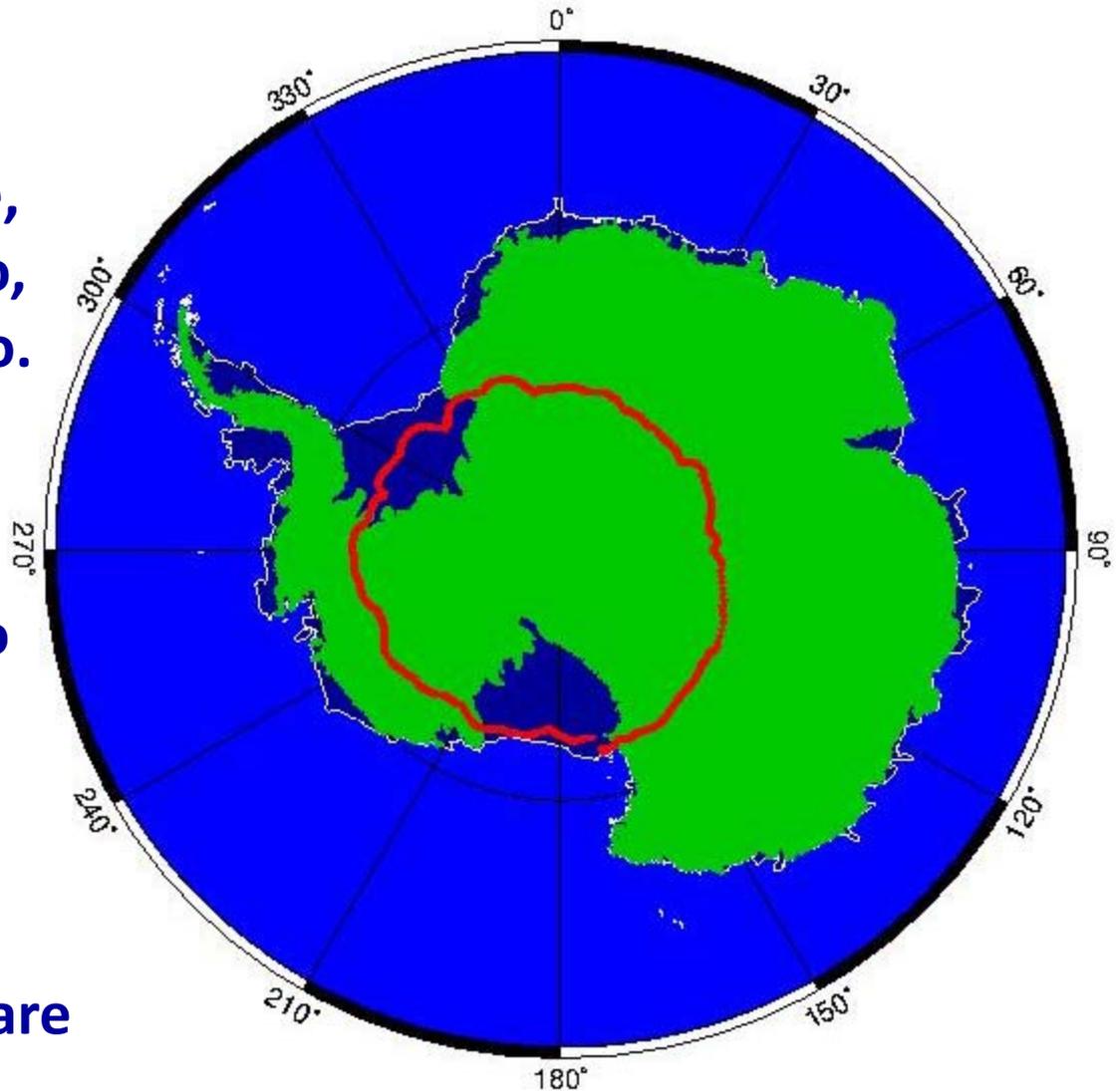


Il viaggio fortunato della navicella: a 37 Km di quota, in balia delle correnti a getto, ha circumnavigato

l' Antartide 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.

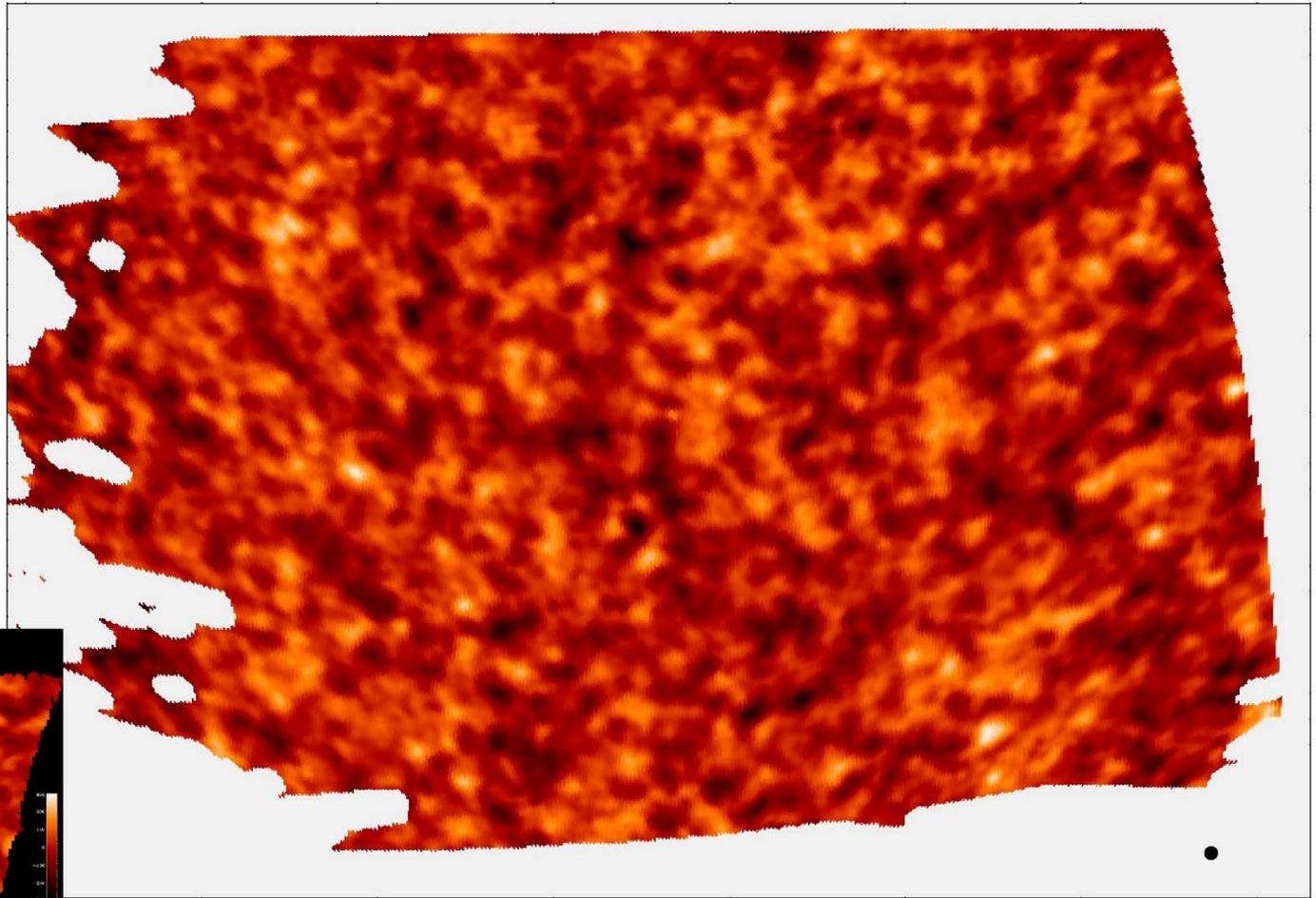
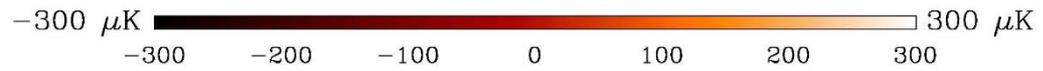


Recupero – 9/1/99

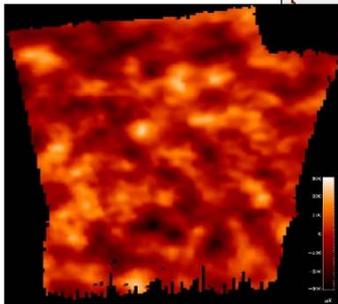


2000-04-12

Boomerang/LDB CMB map



MAXIMA-1



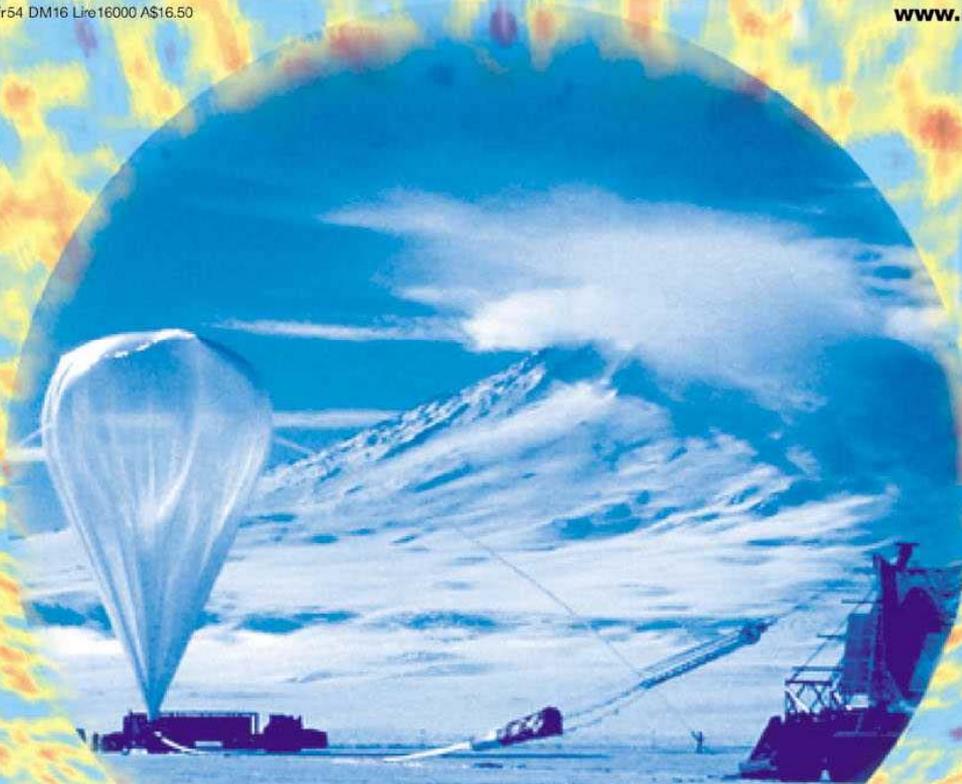
27 April 2000

International weekly journal of science

nature

£5.45 €8.29 FFrs54 DM16 Lire16000 AS\$16.50

www.nature.com



Background to a flat Universe

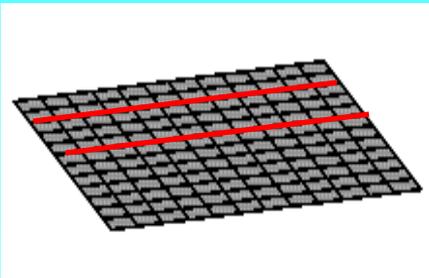
Che geometria ha il nostro universo ? Dipende da quanta massa-energia c'è !

Densità
Critica

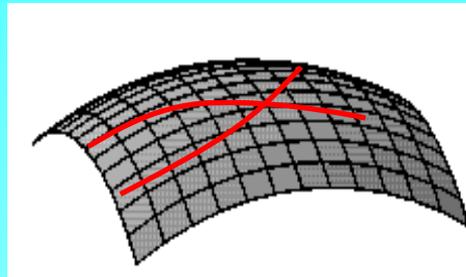
Densità
piu' alta

Densità
piu' bassa

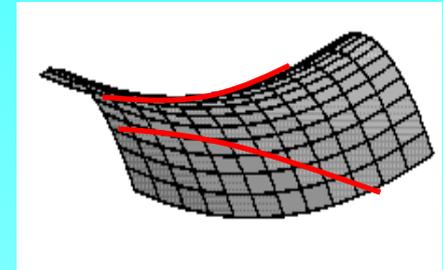
Spazio Euclideo in 2-D



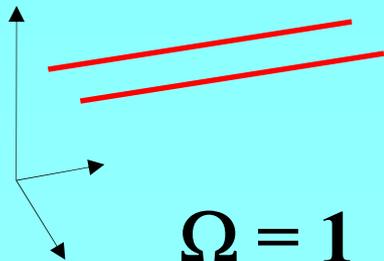
Spazio curvo in 2-D
(curvatura positiva)



Spazio curvo in 2-D
(curvatura negativa)

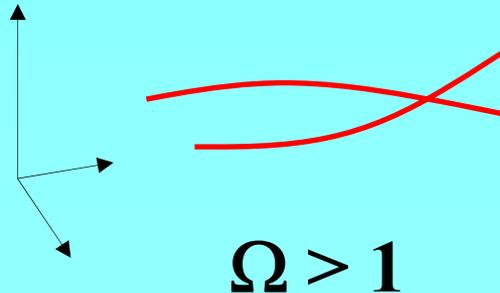


Spazio Euclideo in 3-D



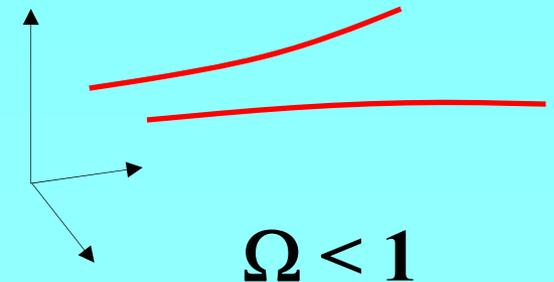
$$\Omega = 1$$

Spazio curvo in 3-D
(curvatura positiva)

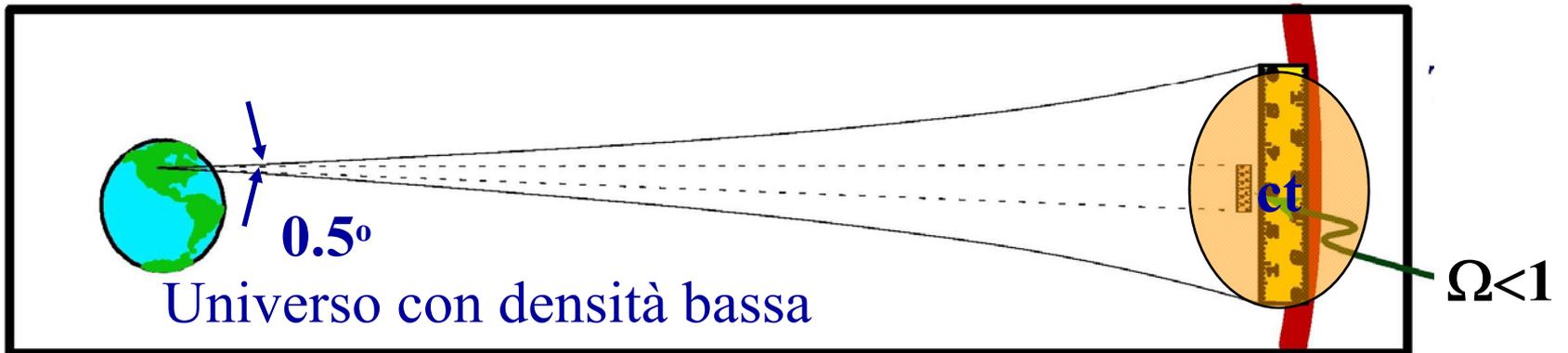
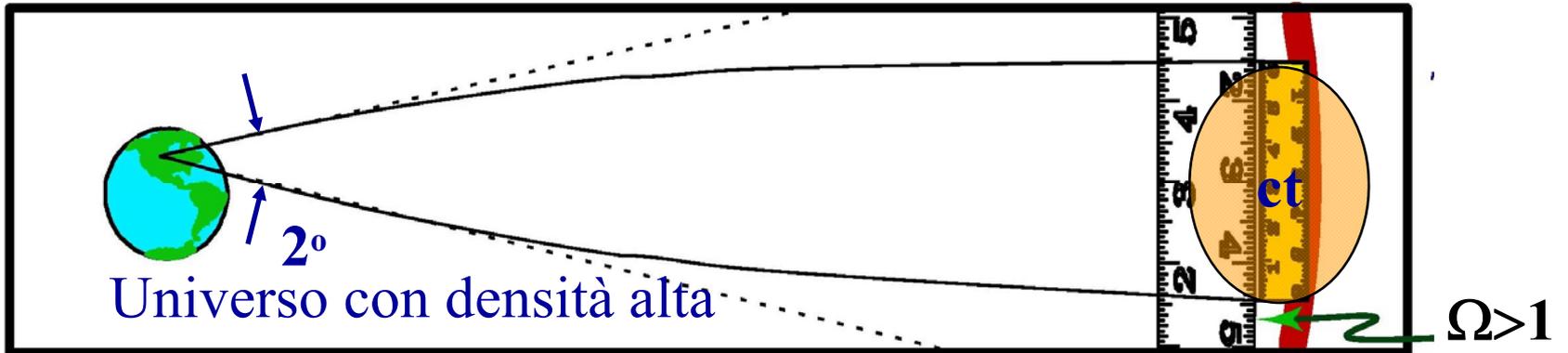


$$\Omega > 1$$

Spazio curvo in 3-D
(curvatura negativa)



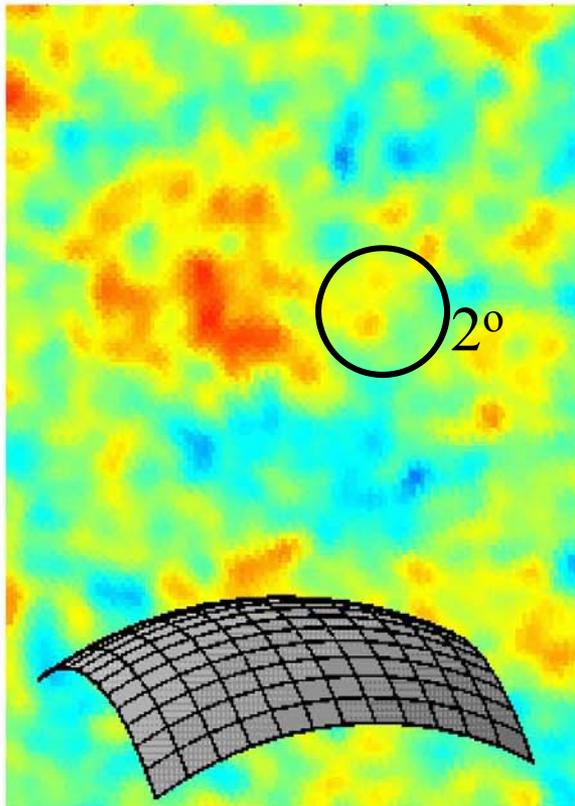
$$\Omega < 1$$



Le dimensioni delle strutture nella radiazione di fondo

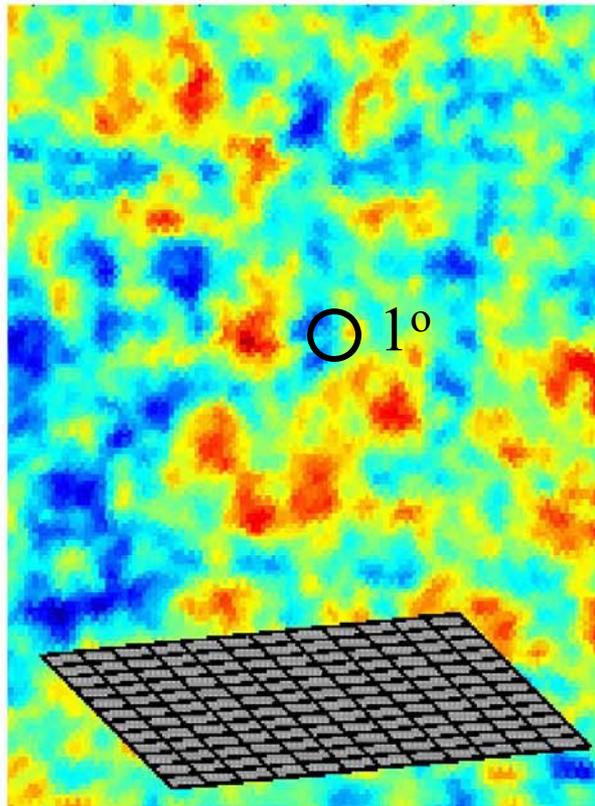
Universo ad alta densita'

$$\Omega > 1$$



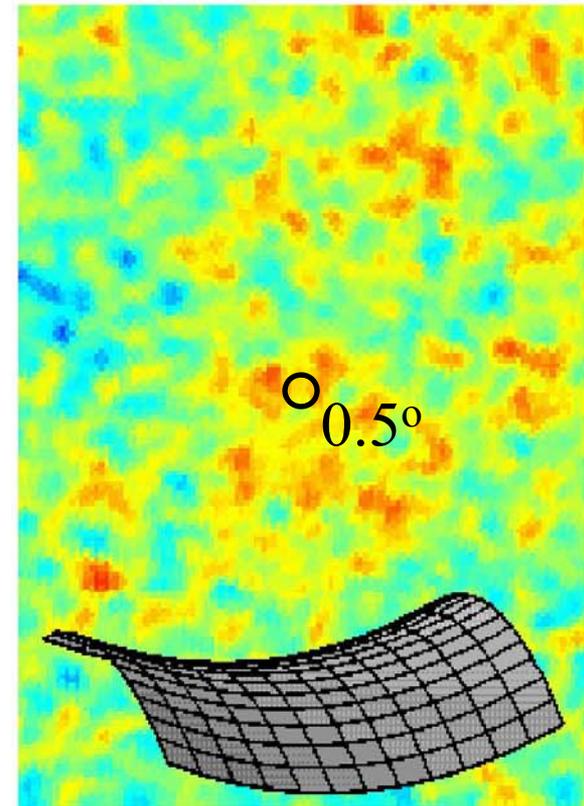
Universo a densita' critica

$$\Omega = 1$$



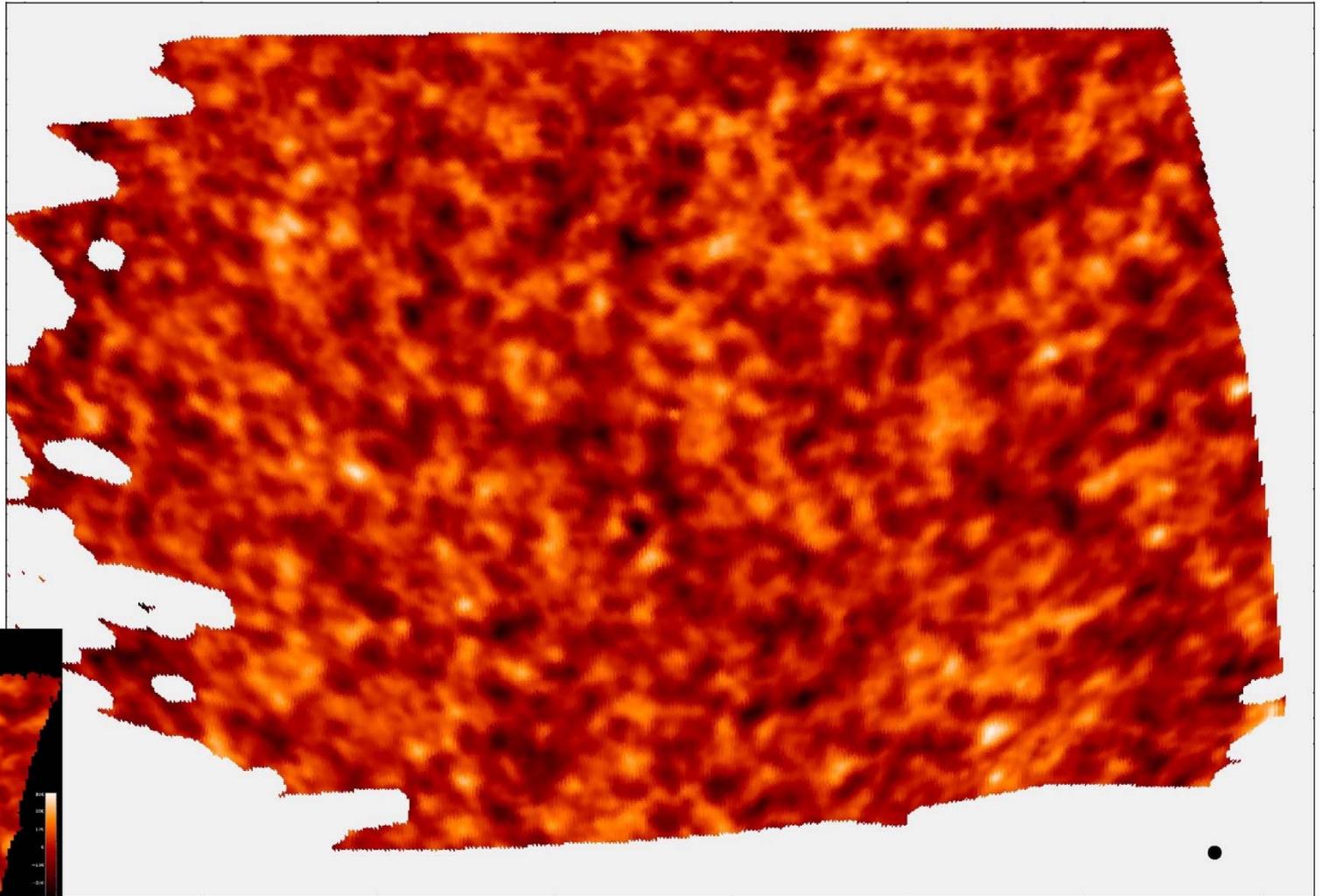
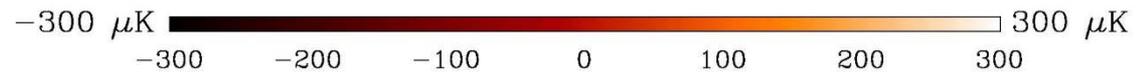
Universo a bassa densita'

$$\Omega < 1$$

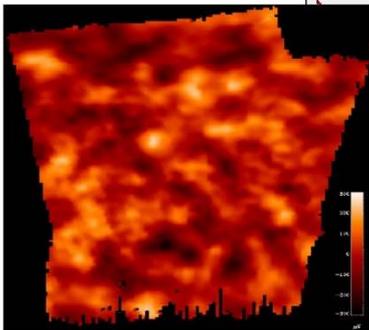


2000-04-12

Boomerang/LDB CMB map

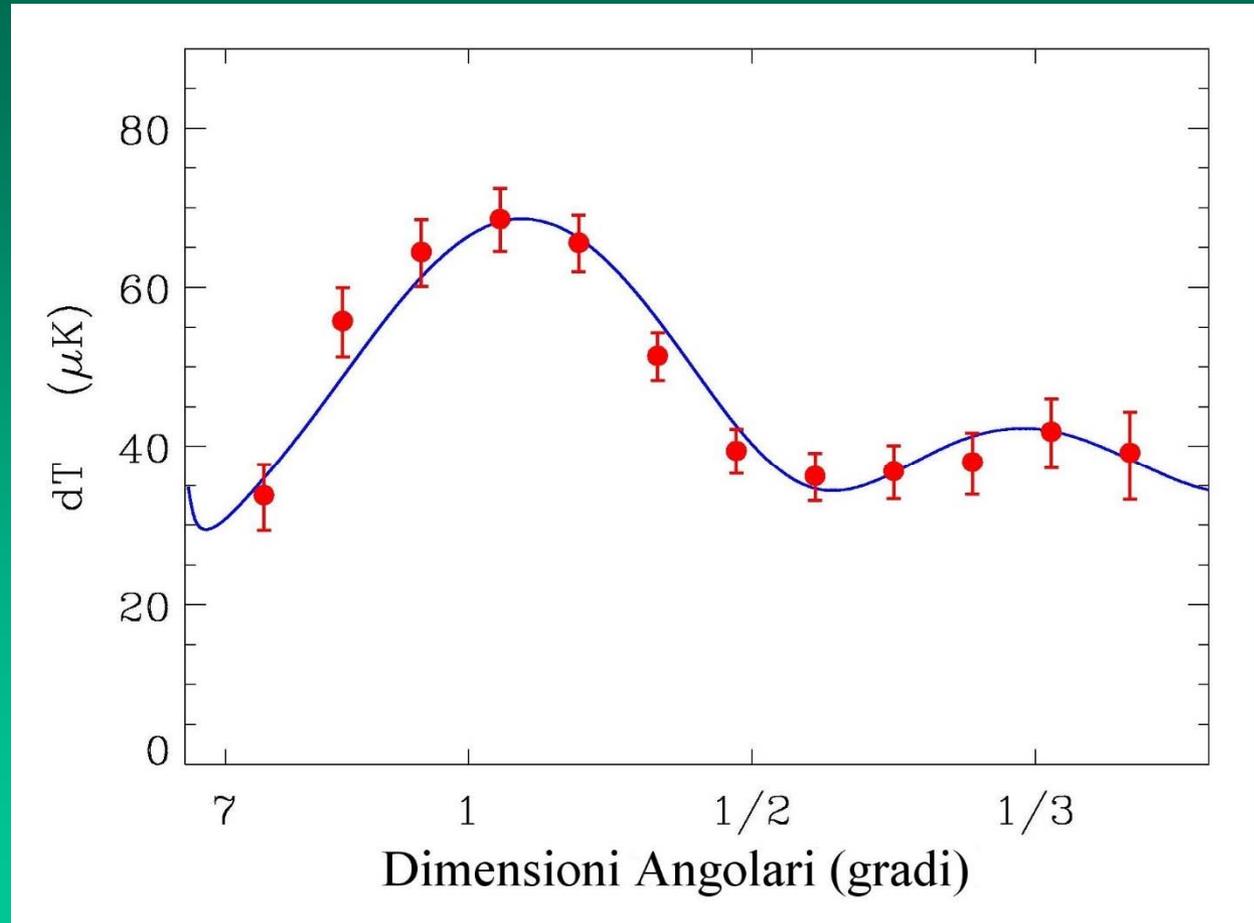


MAXIMA-1



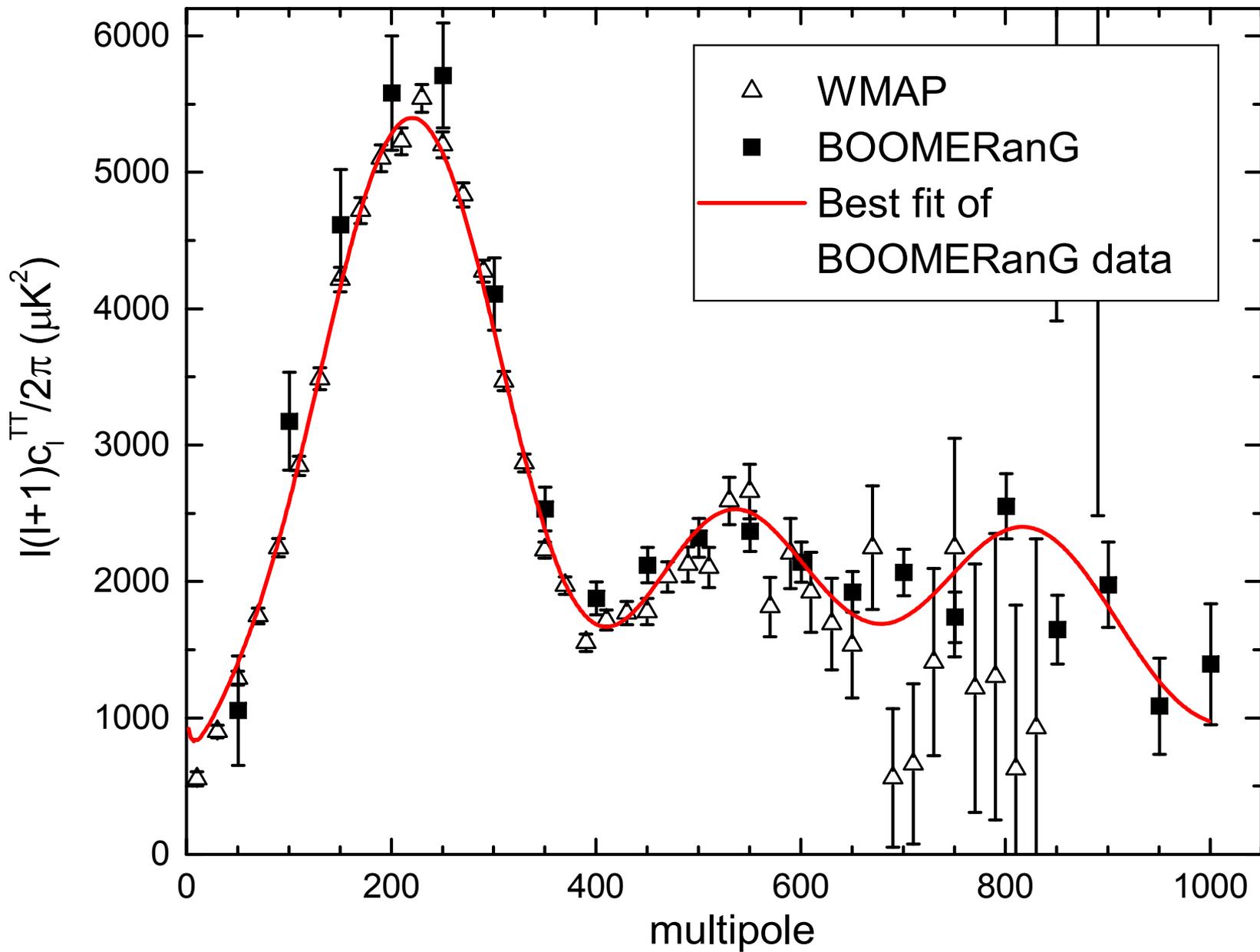
Di che dimensioni sono le strutture osservate ?

- Esiste una procedura matematica, chiamata spettro di potenza, che permette di rispondere alla domanda, calcolando qual' e' l'abbondanza delle macchie di diverse dimensioni.
- Questa puo' essere confrontata con la teoria
- La maggior parte delle macchie hanno dimensioni intorno ad 1 grado, come previsto per una *geometria Euclidea, o piatta*, dell' Universo.
- quindi $\Omega=1$!



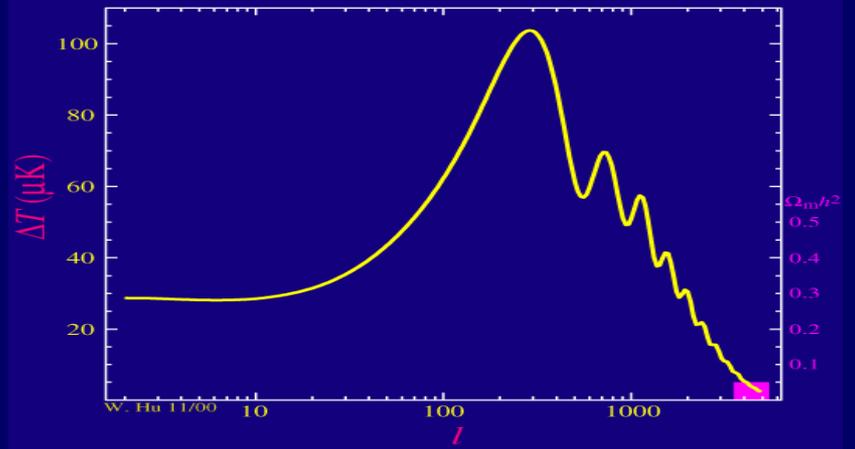
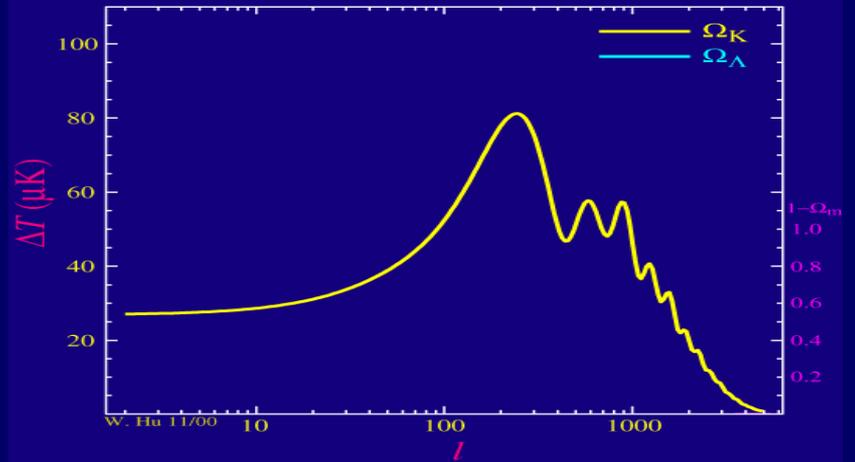
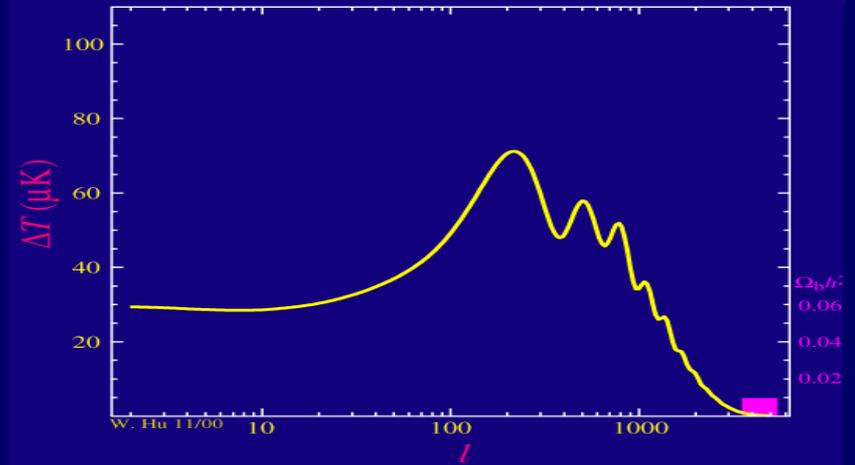
Quindi la densità totale di massa-energia nell' universo è pari alla densità critica $\rho_c = 10^{-29} \text{ g/cm}^3$.

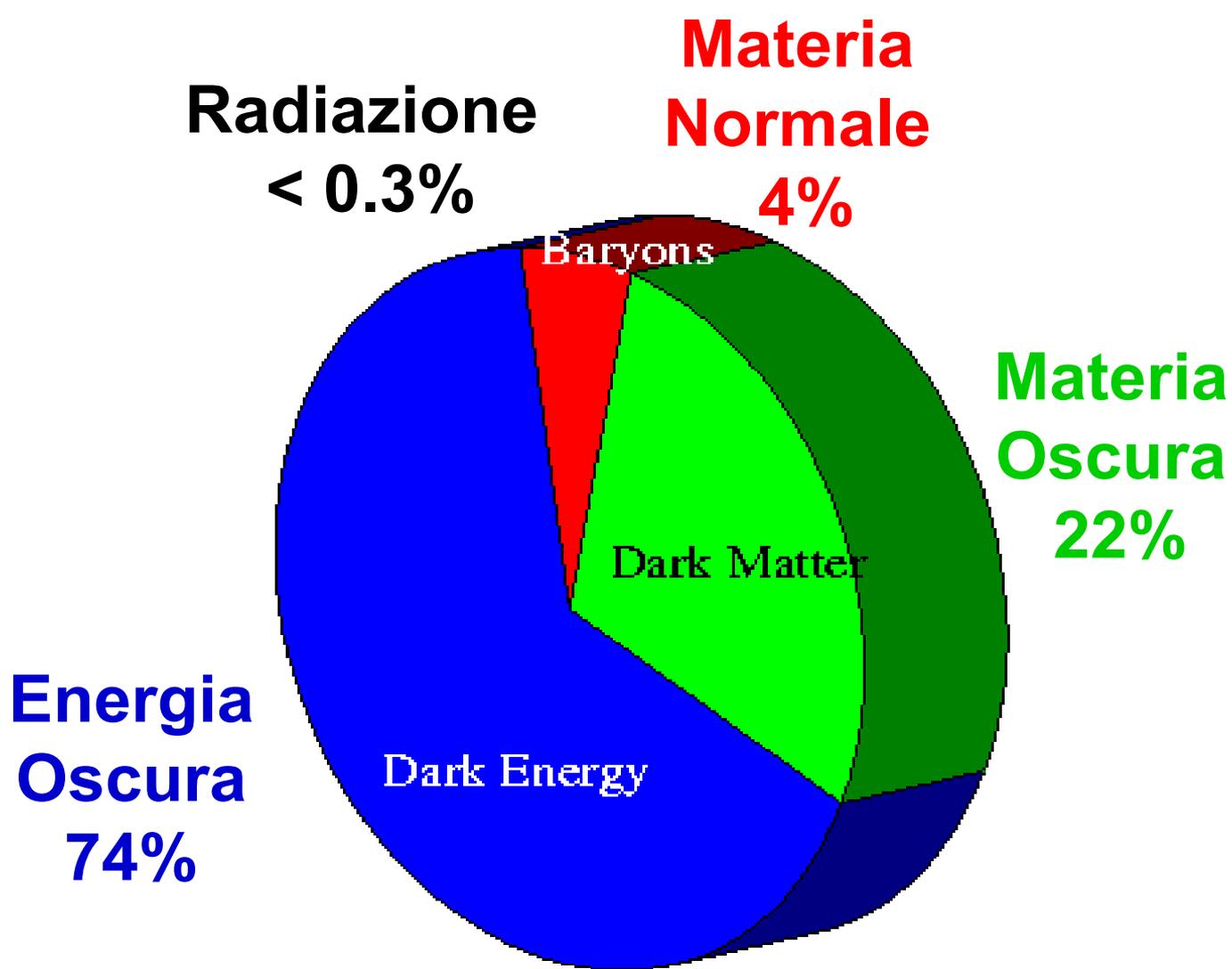
- Da misure indipendenti (luminosità delle stelle e delle galassie, e nucleosintesi primordiale), sappiamo che la densità di materia ordinaria (barionica) presente nell' universo è al più un 4% della densità critica.
- Da misure di curve di rotazione delle galassie, e dal movimento delle galassie negli ammassi, sappiamo che c'è della materia oscura, ma al più in misura del 25% della densità critica.
- Manca un 70% di massa-energia. Energia oscura.



Composition

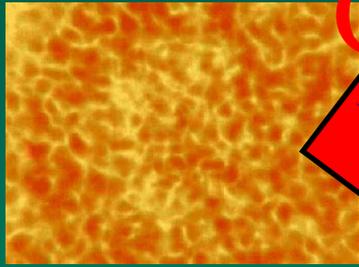
- The composition of the universe (baryons, dark matter, dark energy) affects the shape of the power spectrum.
- Accurate measurements of the power spectrum allow to constrain the energy densities of the different components of the universe.





La “strana” composizione dell’ Universo

Chi crea le strutture ? Inflation !



Dimensioni subatomiche

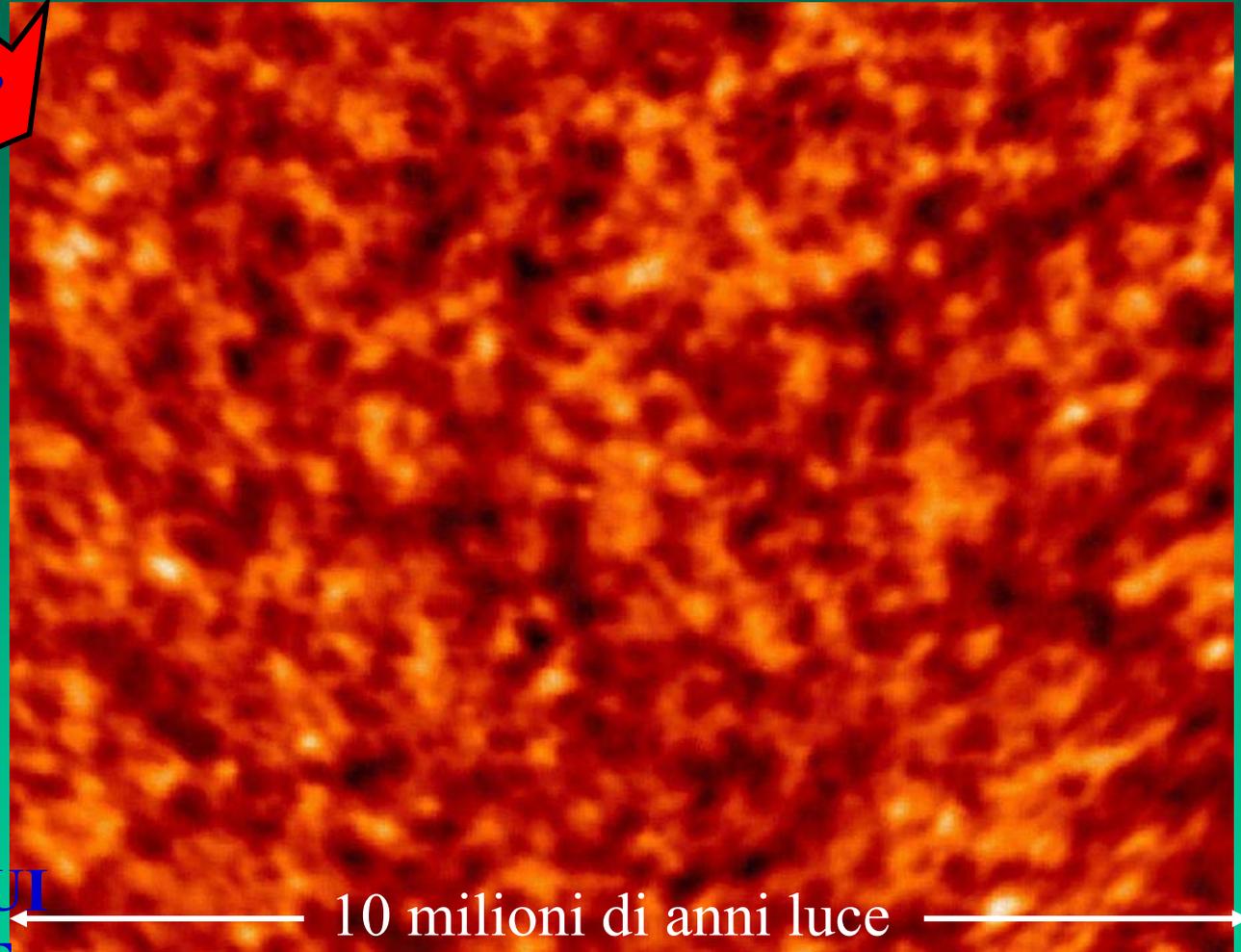
$$T=10^{-32}\text{s}$$

Fluttuazioni quantistiche
del brodo primordiale

Energie tipiche:

$$10^{16}\text{ GeV}$$

(100 milioni di miliardi
di miliardi di eV)



10 milioni di anni luce

$$T=300000\text{ anni}$$

Fluttuazioni di densita'

illuminate dalla luce del fondo cosmico

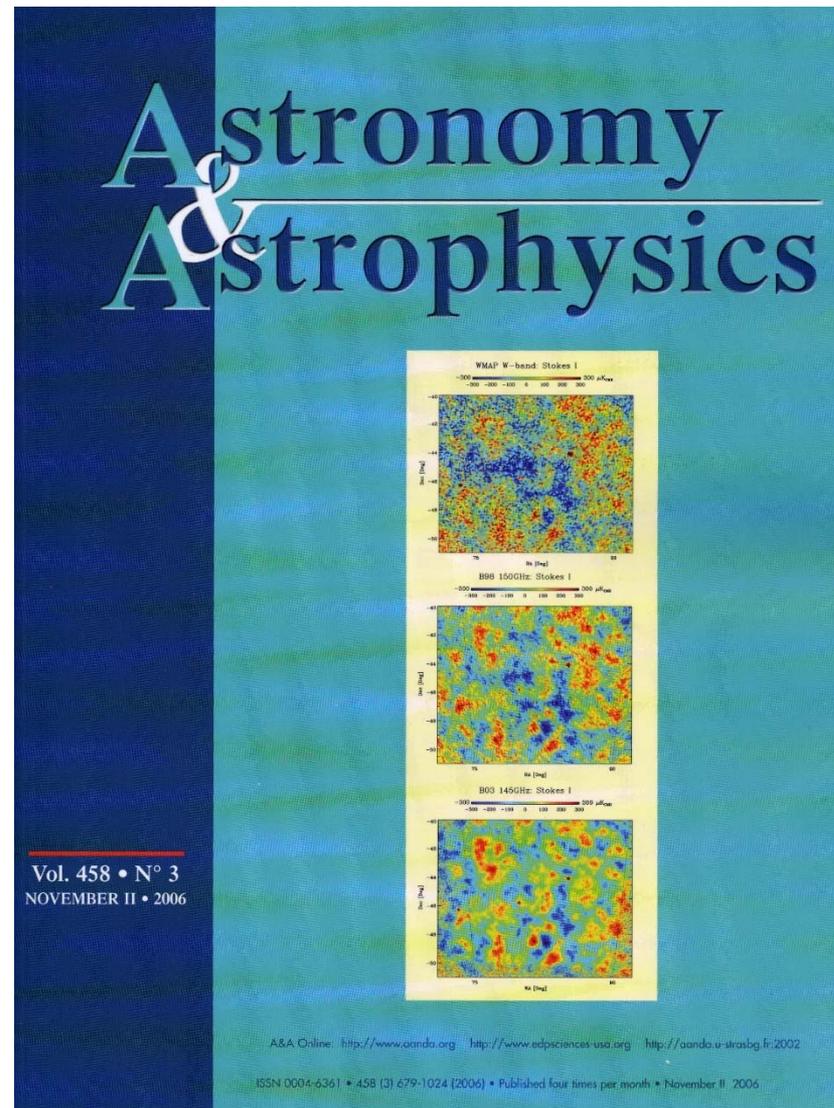
**UNA FINESTRA SUI
PRIMI ISTANTI E**

**SULLA FISICA DELLE
ALTISSIME ENERGIE**

BOOMERanG-03

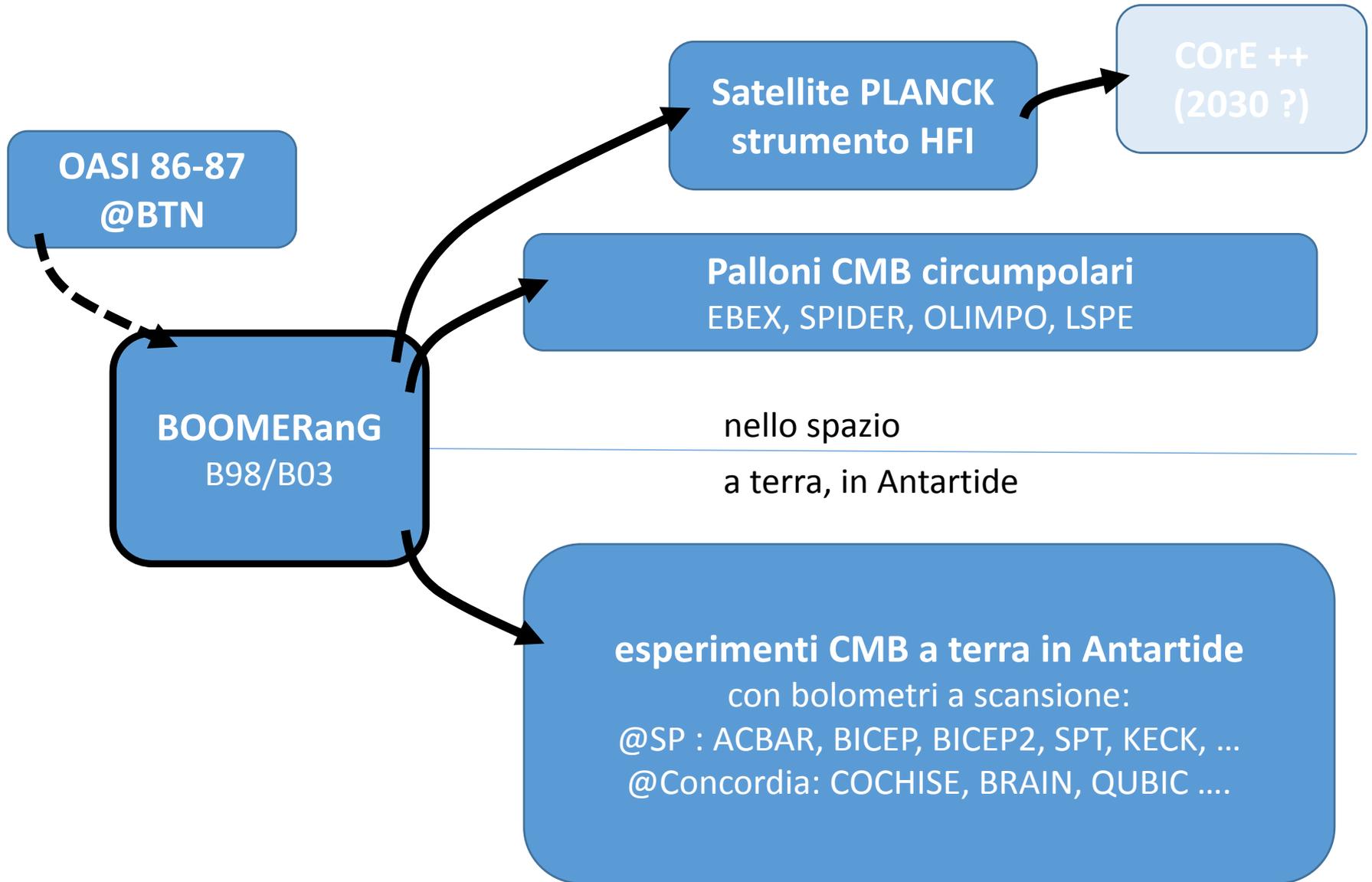
- La navicella viene recuperata, lo strumento viene aggiustato, e vengono modificati i rivelatori, sviluppandone un nuovo tipo, sensibile alla polarizzazione.
- Dopo il successo di BOOMERanG-98, si vuole osservare ancora più lontano. C'è la prospettiva di osservare indirettamente i primi attimi dopo il big-bang, che dovrebbero lasciare una traccia nei modi-B della polarizzazione del CMB.
- Per questo BOOMERanG viene lanciato di nuovo nel gennaio 2003, ottenendo una delle prime misure della polarizzazione di modo-E a livello di 1 ppm, e un limite superiore ai modi-B (Masi et al., Piacentini et al., Montroy et al., Jones et al. 2006).

Masi et al. 2006



BOOMERanG: più di 10000 citazioni nella letteratura successiva
B-98 Nature: 1700 citazioni
Molti premi internazionali: Feltrinelli, Balzan, Dan David, Cocconi

L'eredità di BOOMERanG



Planck: erede *anche* di BOOMERanG

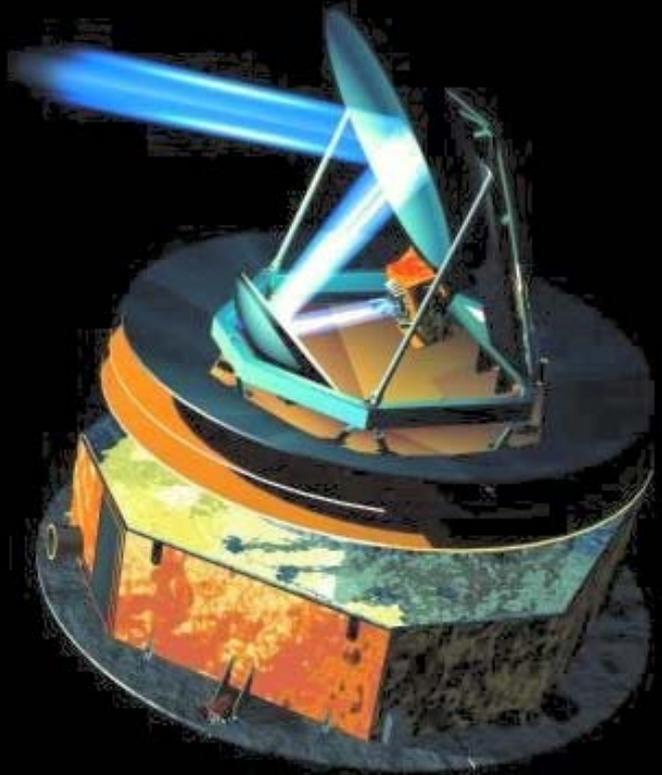
- Stessa strategia di osservazione / scansione
- Stessa strategia multifrequenza
- Stessi rivelatori spider-web per HFI
- Stessi rivelatori PSB per HFI
- Stessi metodi di analisi dei dati



PLANCK

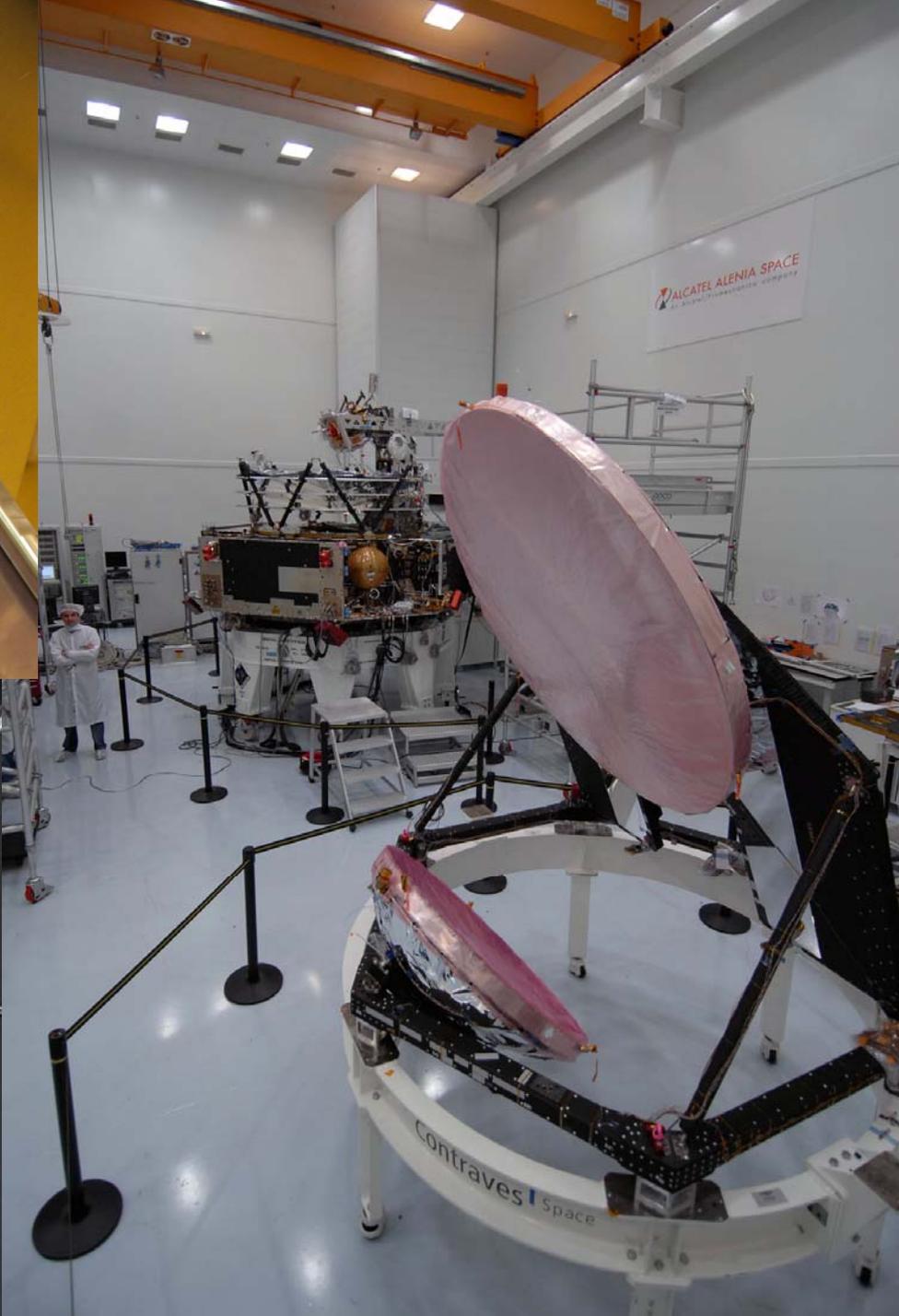
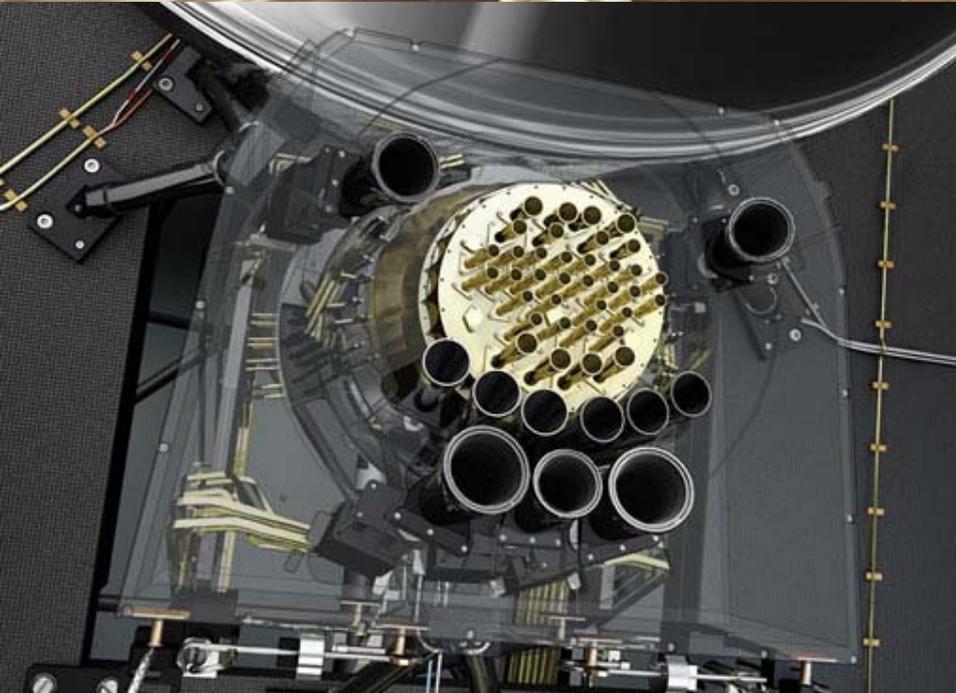
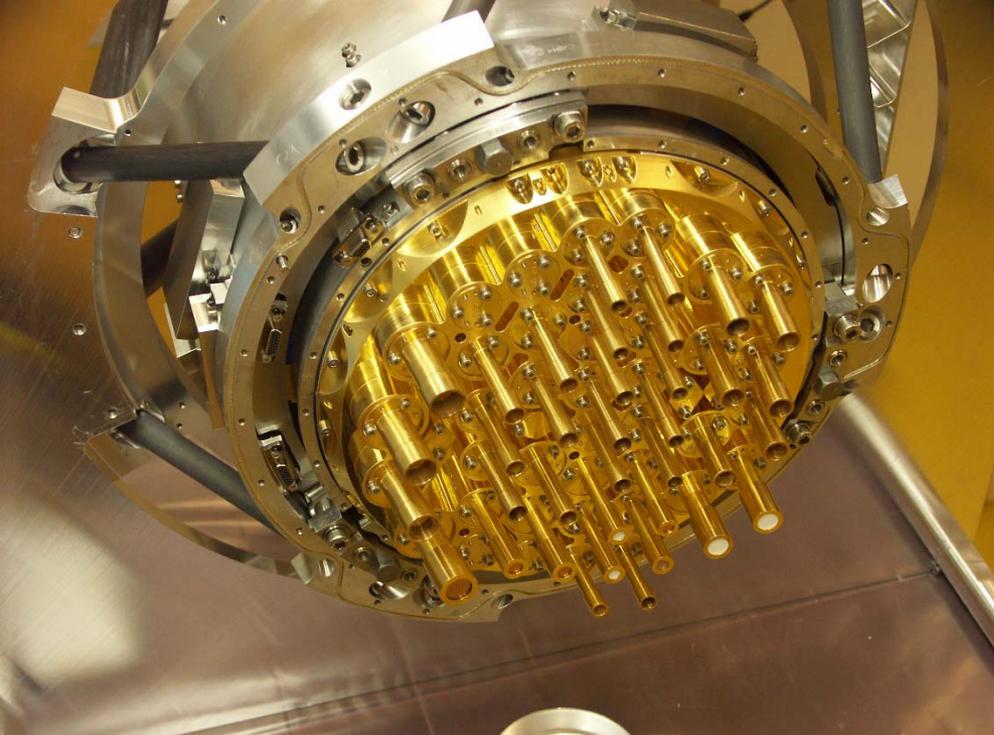
Looking back to the dawn of time
Un regard vers l'aube du temps

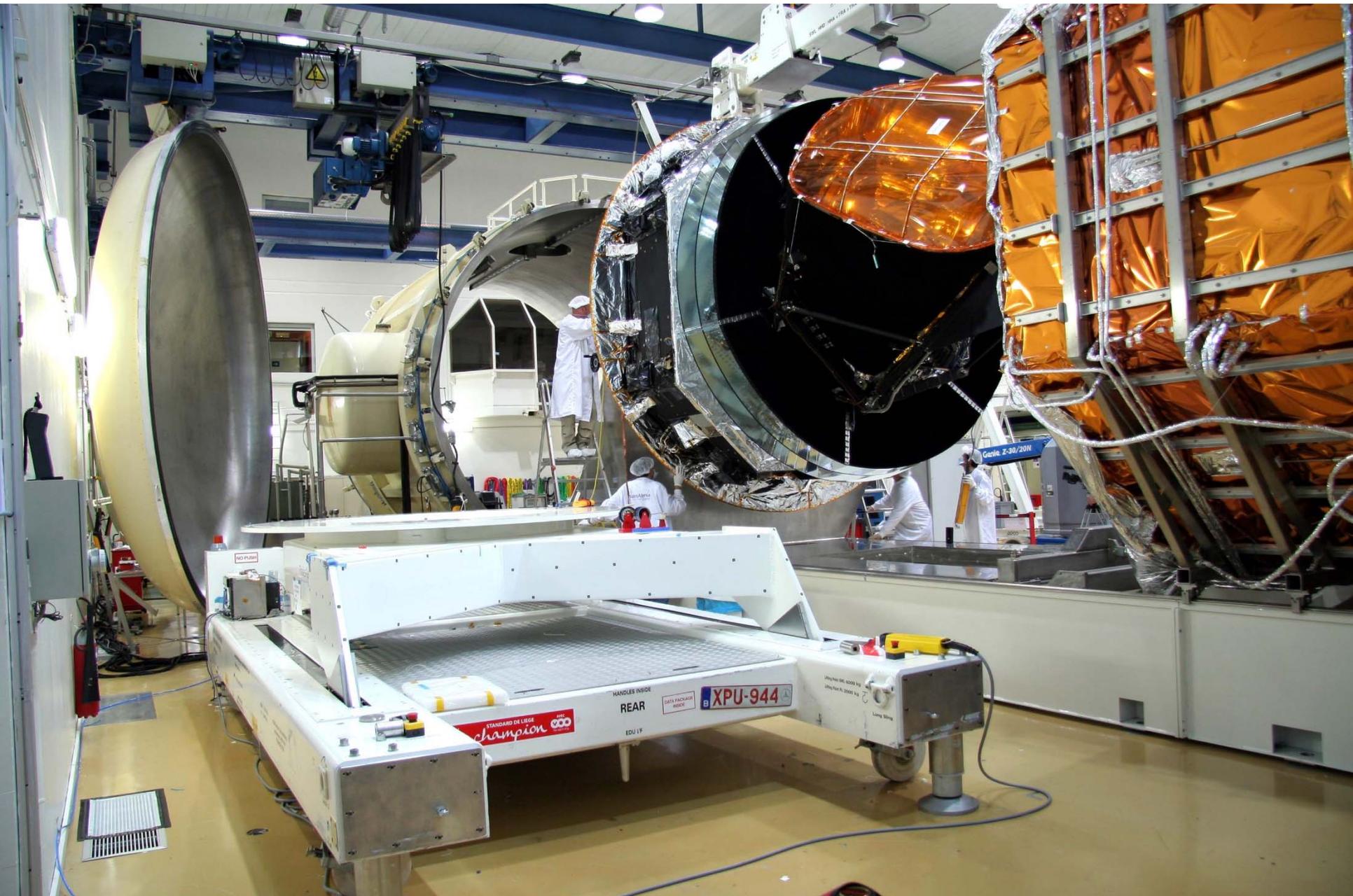




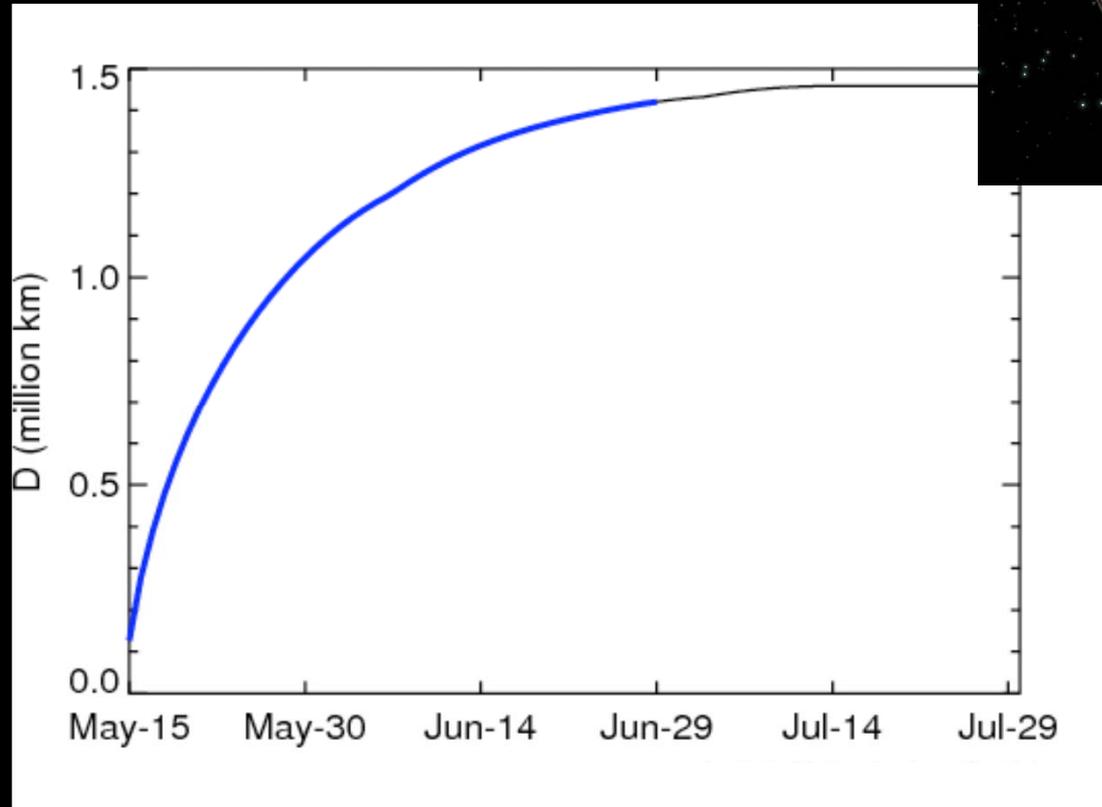
Telescopio fuori
asse, diametro
specchio principale
1.8 m



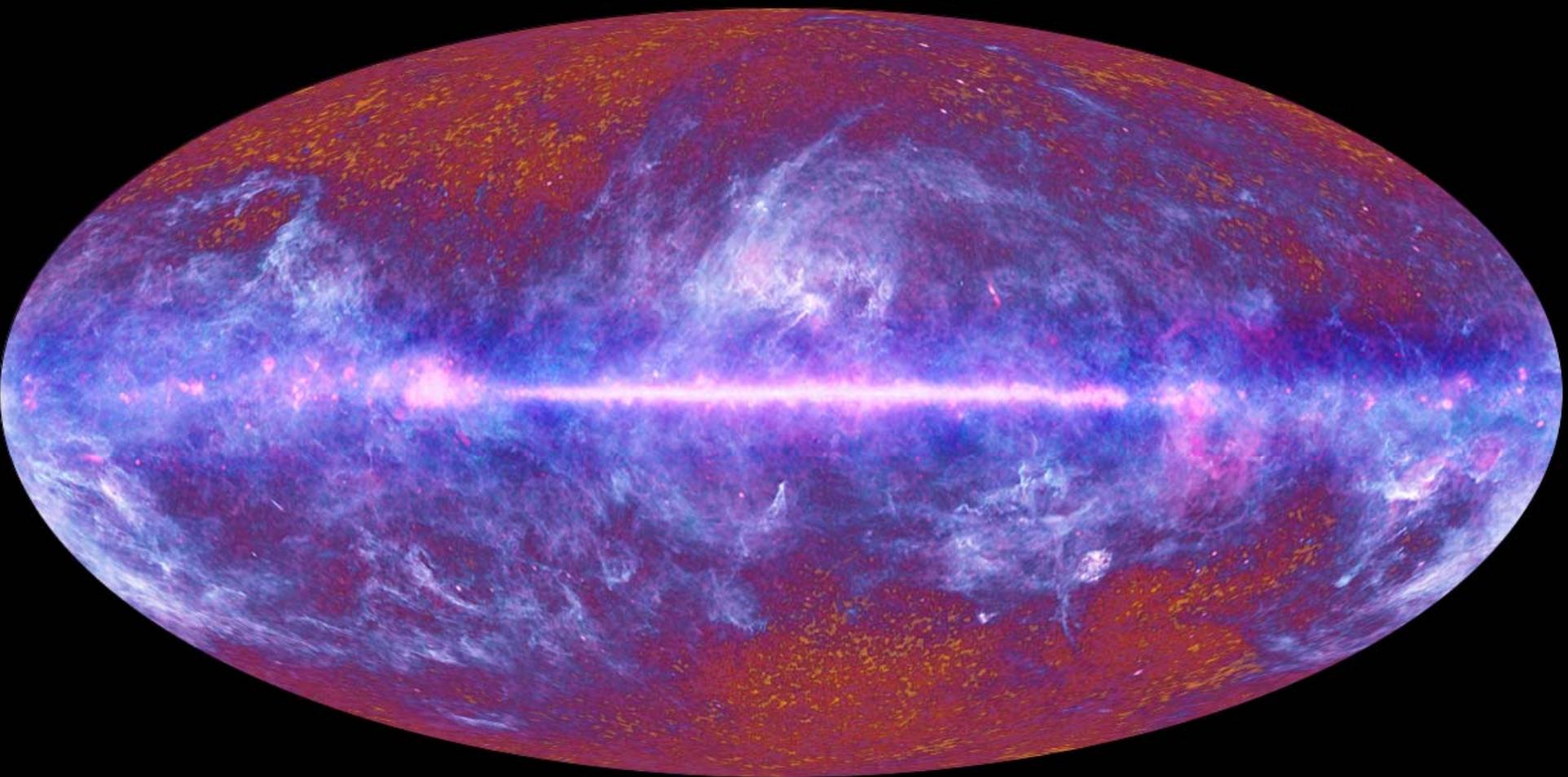








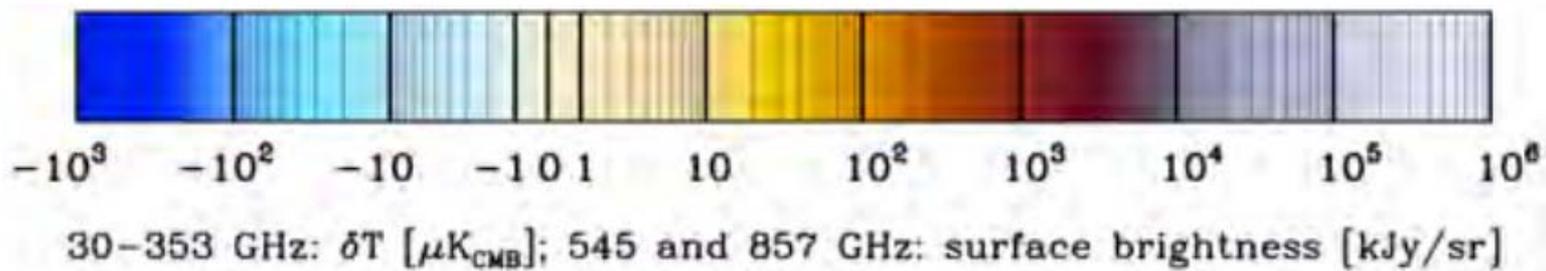
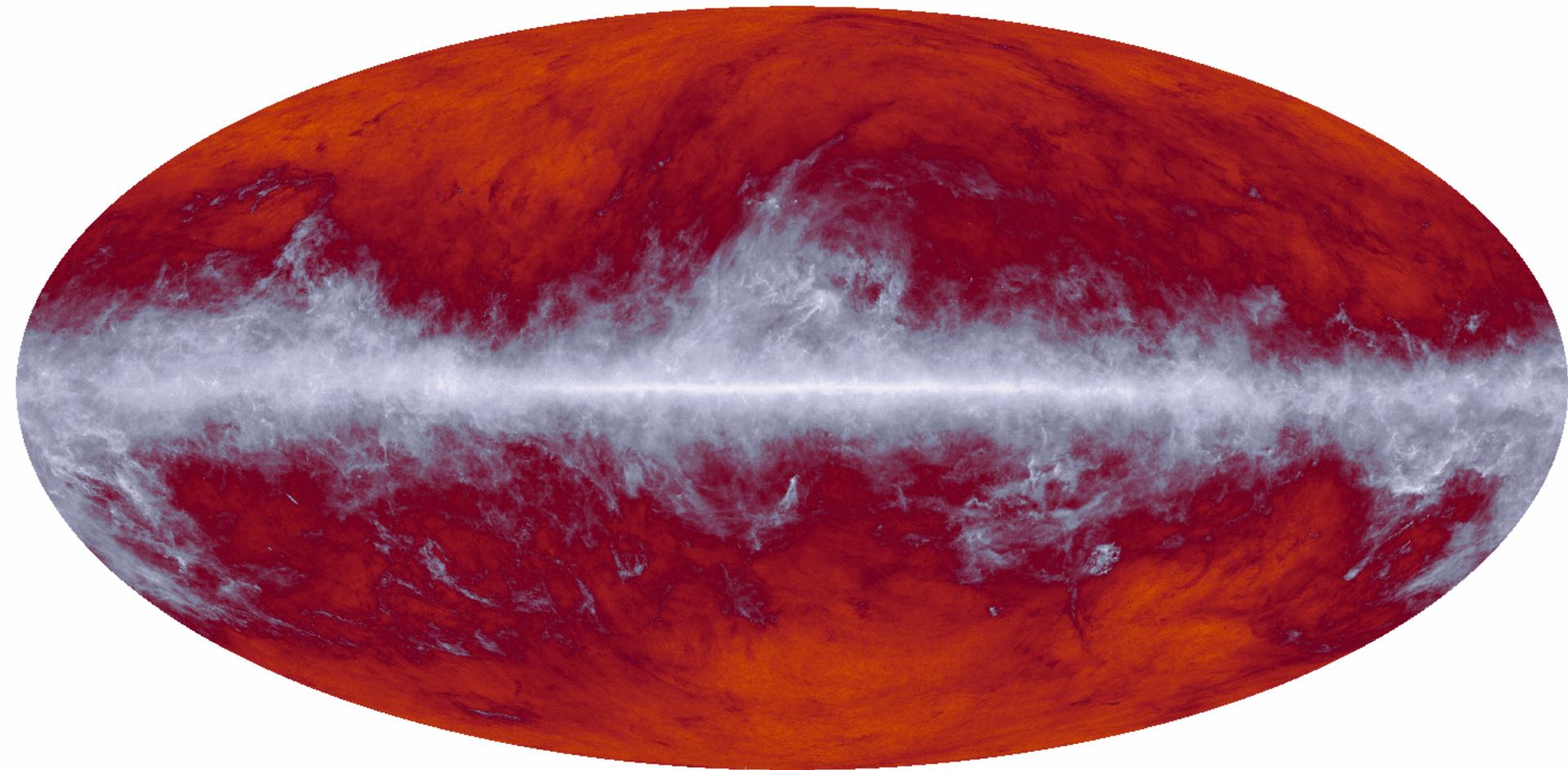
2011 data release



Planck Legacy Maps

6×10^6 pixels (5')

857 GHz



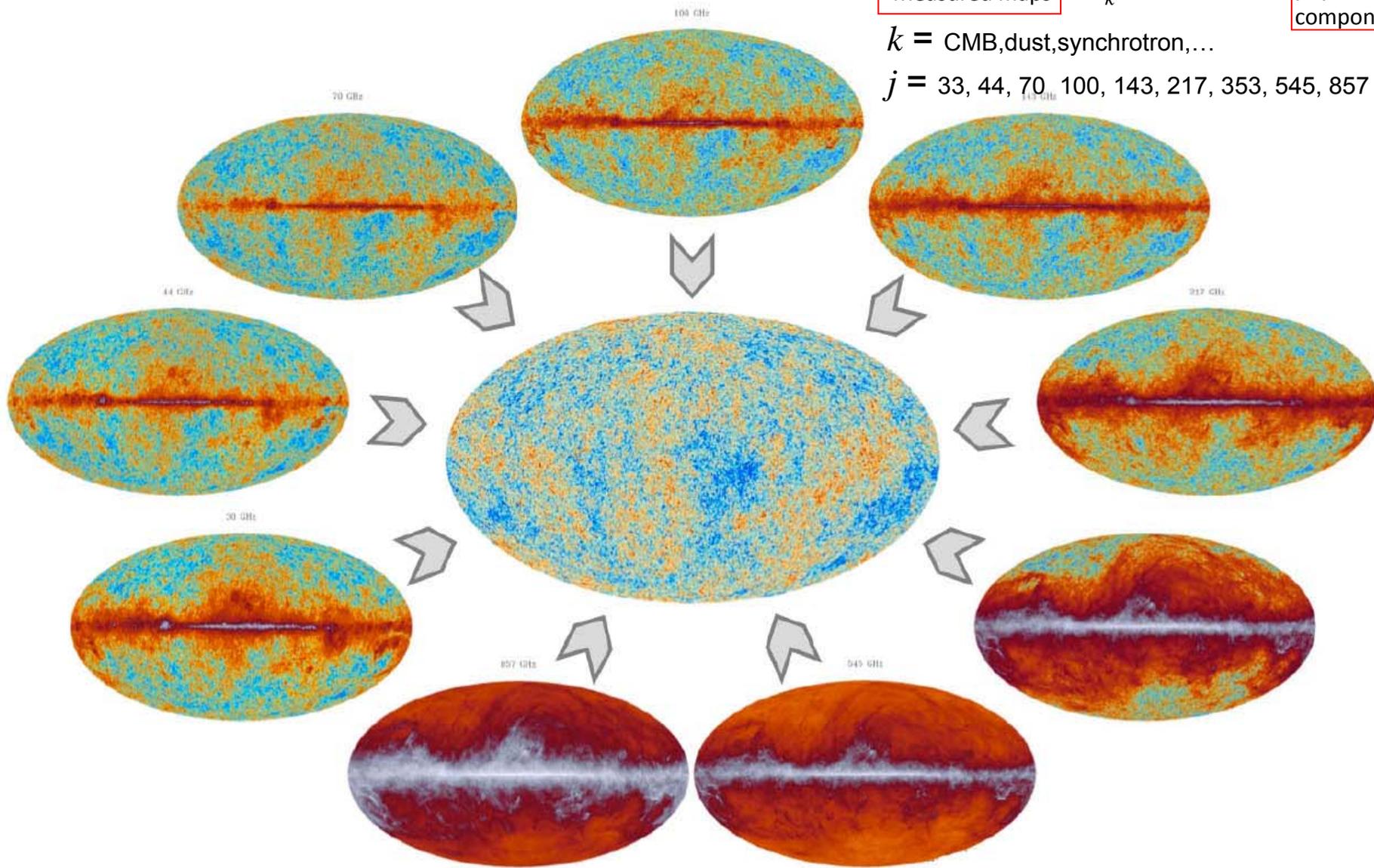
components separation

$$\Delta T(\nu_j, \ell, b) = \sum_k a_k(\nu_j, \ell, b) C_k(\ell, b)$$

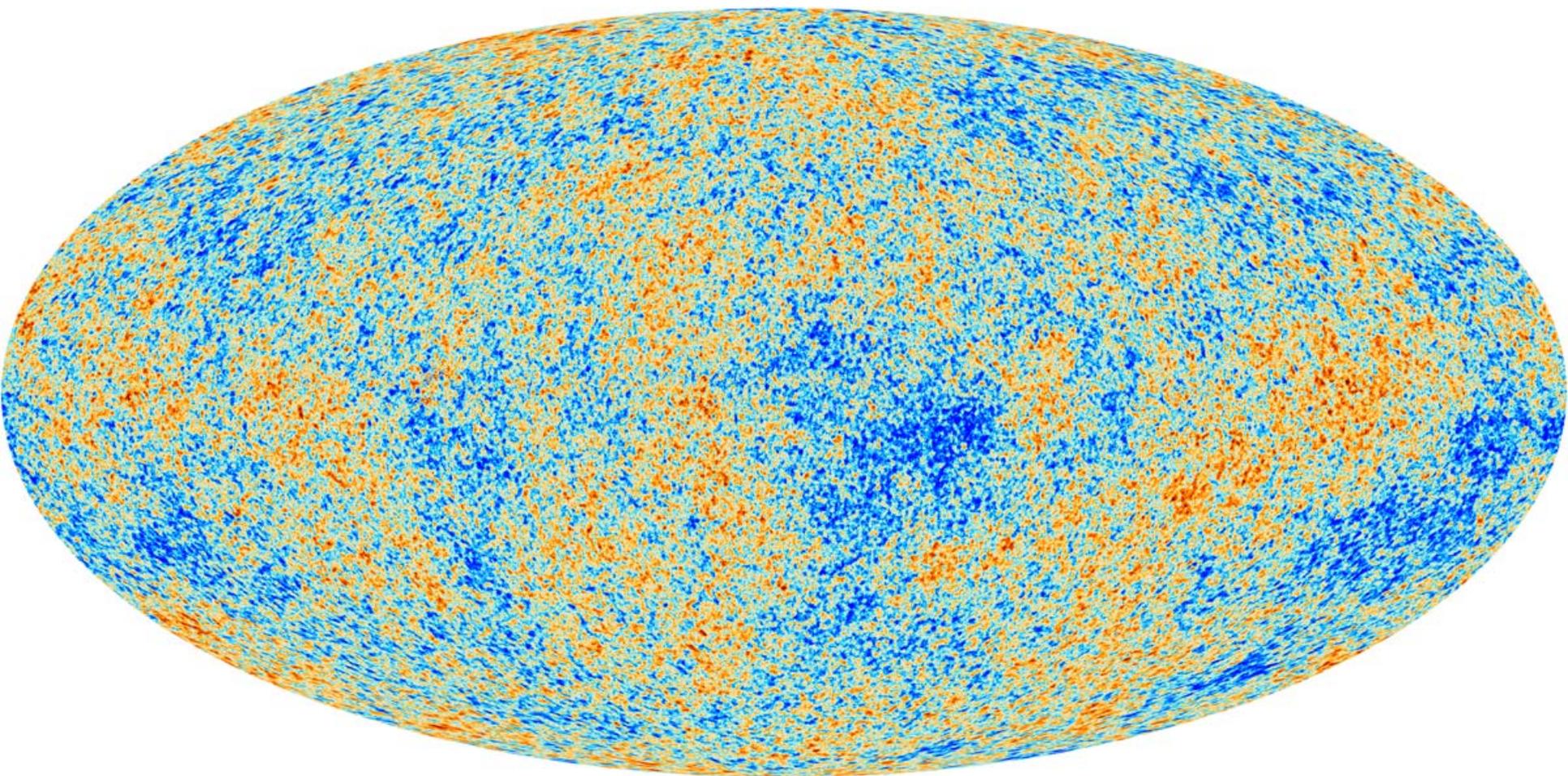
Measured maps physical components

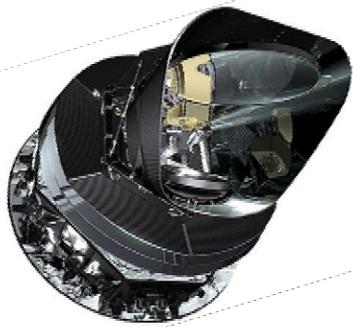
$k = \text{CMB, dust, synchrotron, ...}$

$j = 33, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 \text{ GHz}$

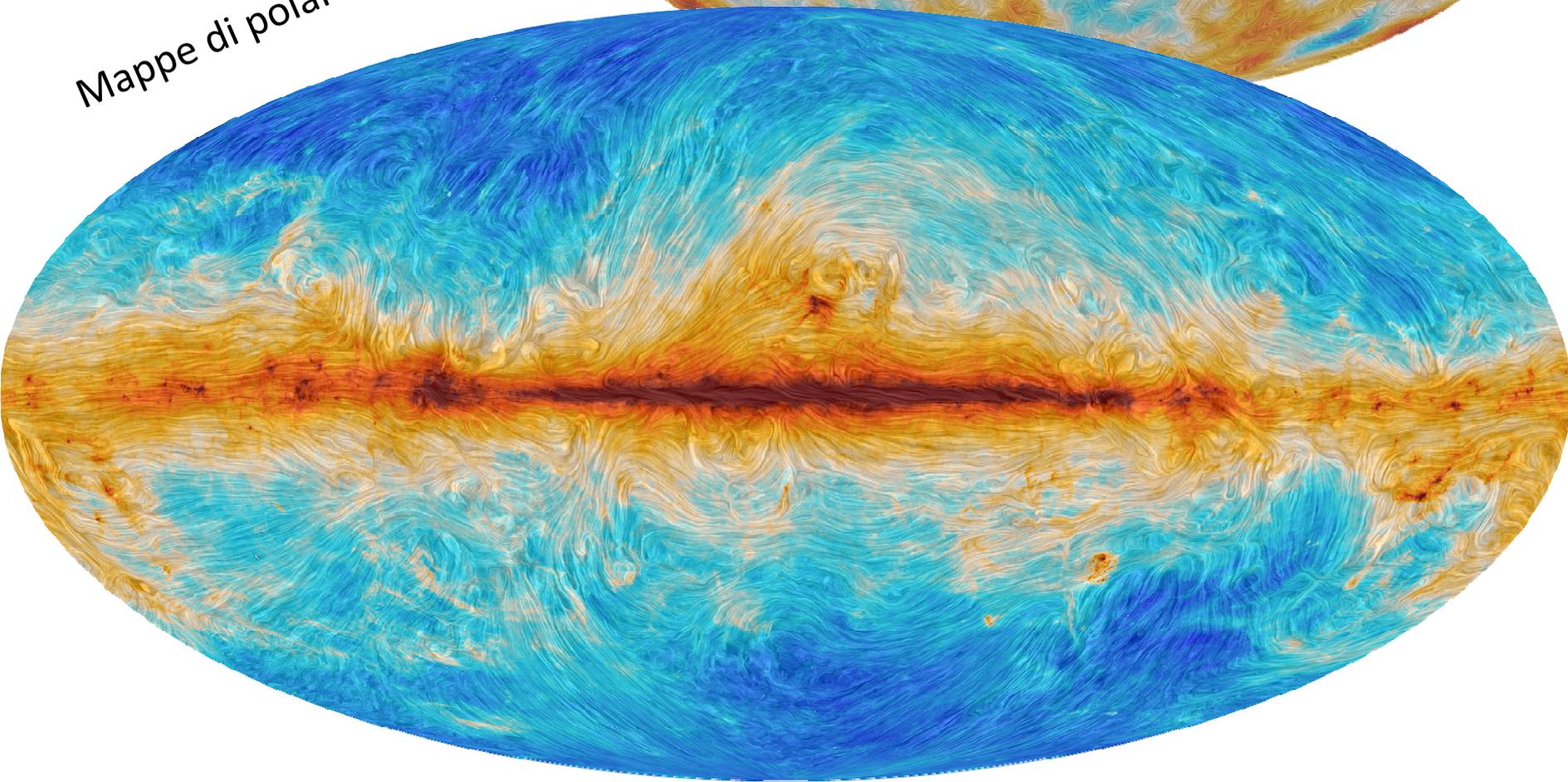
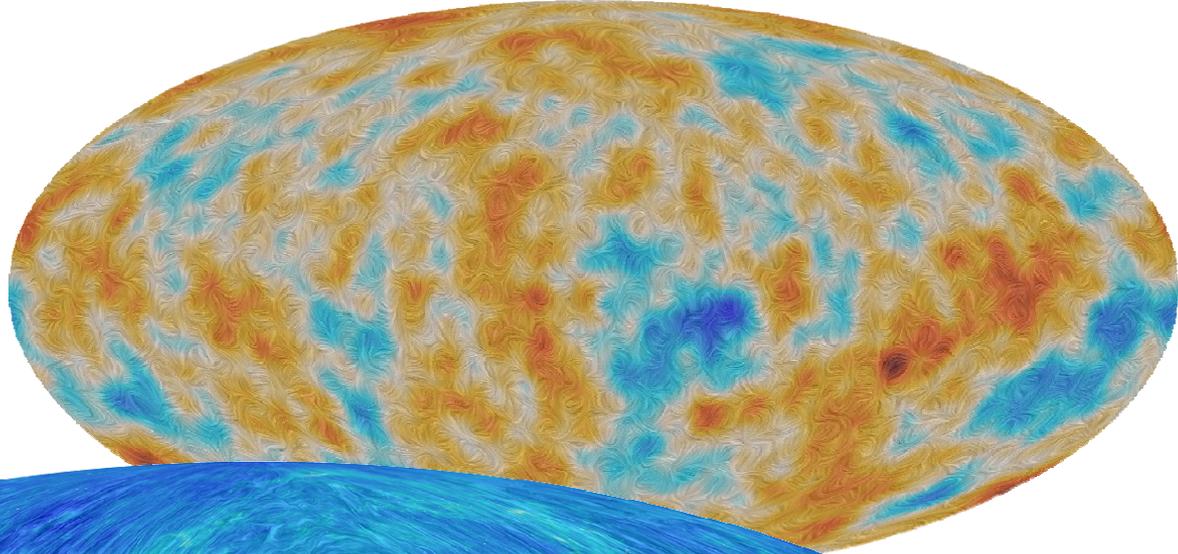


The CMB component





Mappe di polarizzazione



Angular scale

90°

0.5°

0.2°

0.1°

0.07°

6000

5000

4000

3000

2000

1000

0

**A precision
measurement**

**over three decades
in angle, with the
same instrument
(intercalibration!)**

**You see seven peaks
by eye**

D_ℓ [μK^2]

2

500

1000

1500

2000

2500

Multipole moment, ℓ

Angular scale

90°

0.5°

0.2°

0.1°

0.07°

6000

5000

4000

3000

2000

1000

0

**6 parameters model
(Λ -CDM)**

\mathcal{D}_ℓ [μK^2]

2

500

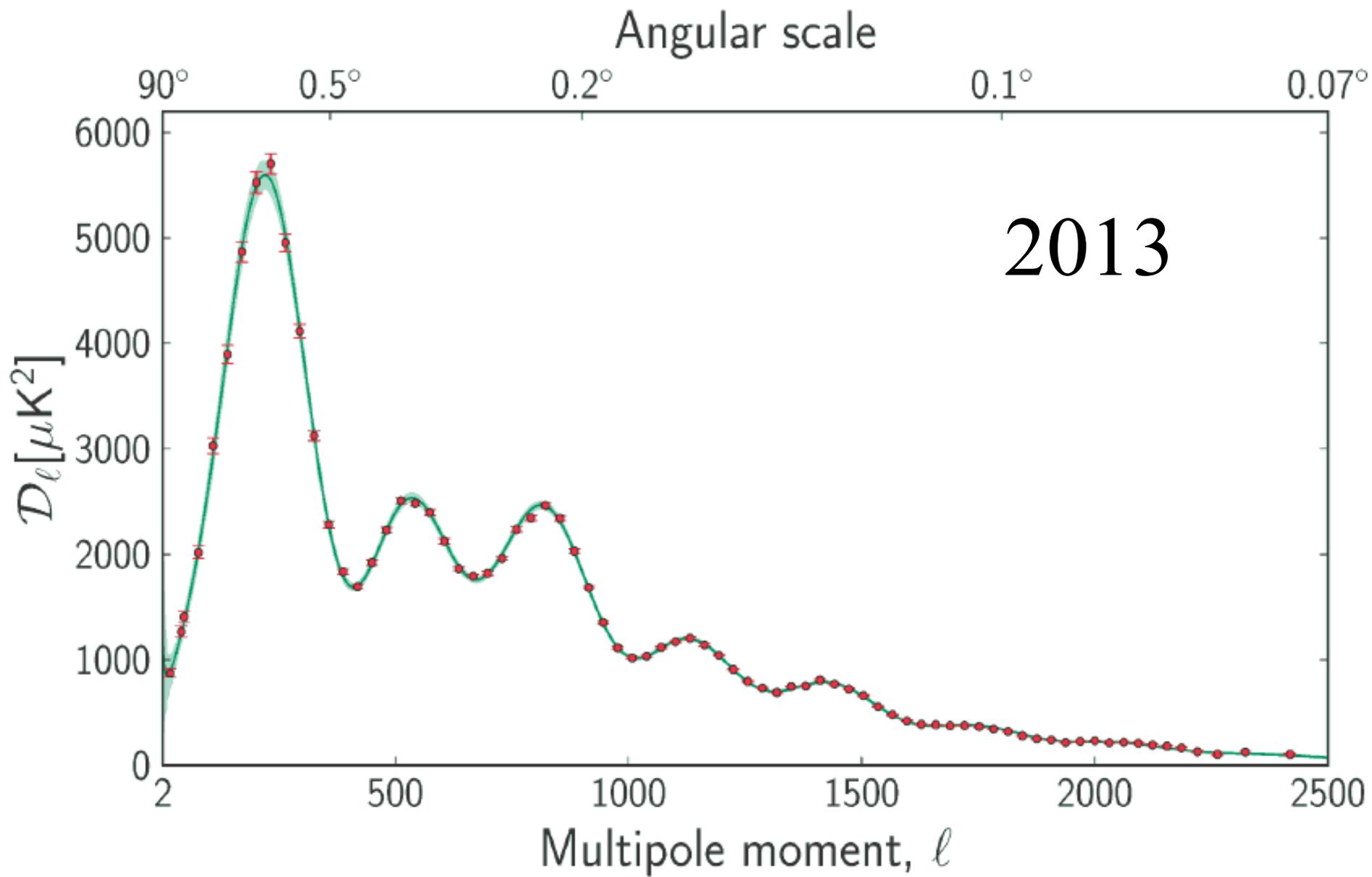
1000

1500

2000

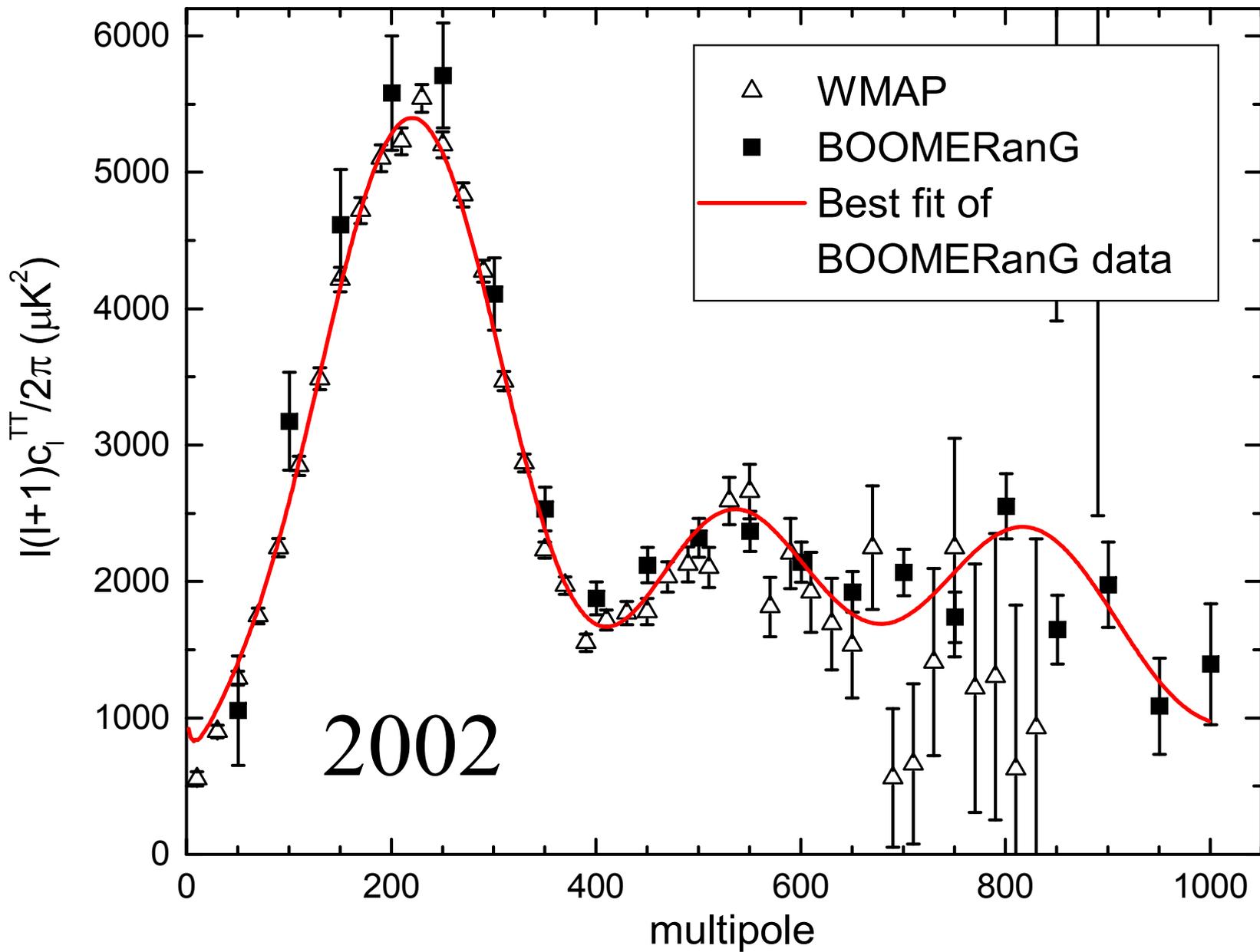
2500

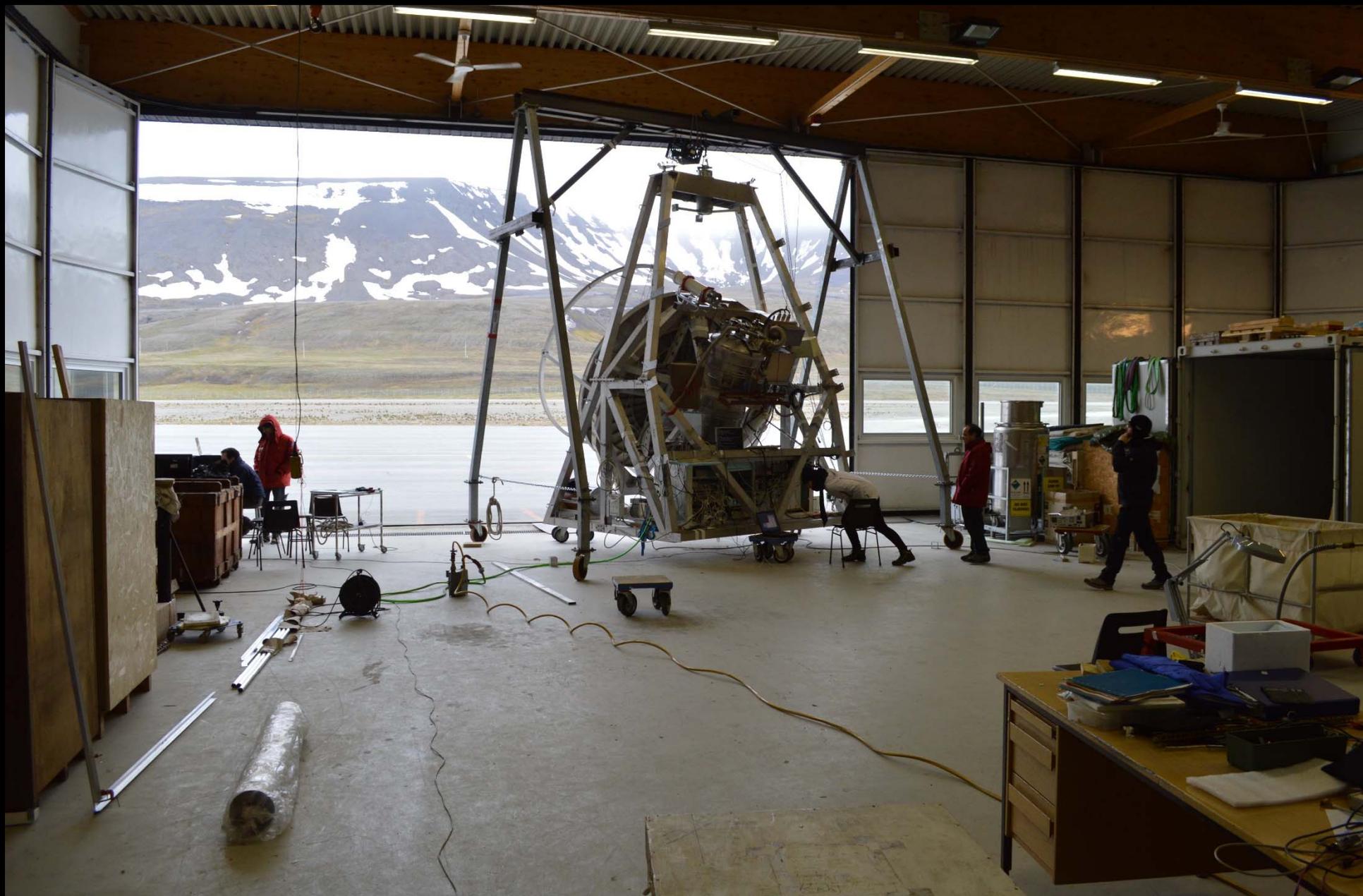
Multipole moment, ℓ



Un trionfo della cosmologia osservativa

- I risultati di WMAP e Planck ed il loro splendido accordo con un modello cosmologico con soli 6 parametri rappresentano un trionfo per la cosmologia osservativa.
- Nelle zone osservate da B98 e B03 l'accordo con Planck è perfetto, ed i primi tre picchi dello spettro di potenza erano già presenti nei dati di BOOMERanG.
- Inoltre Planck-HFI ha raccolto molto dell'eredità tecnologica di BOOMERanG.
- Ed anche i prossimi esperimenti:

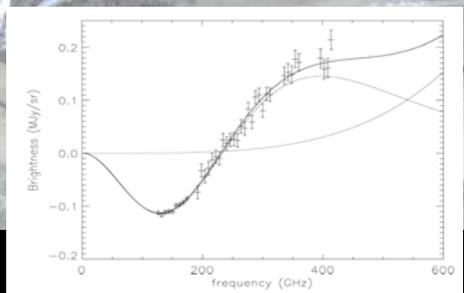




<http://planck.roma1.infn.it/olimpo>

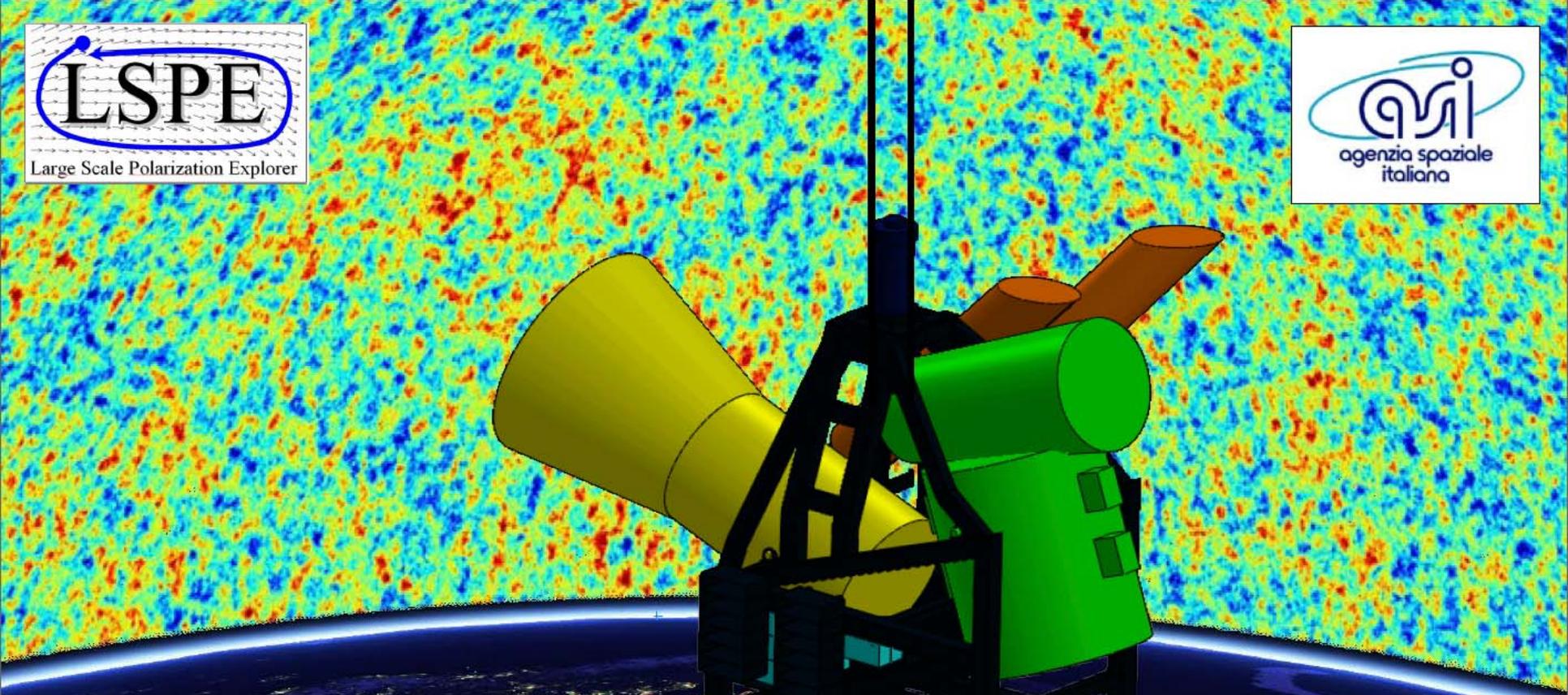


<http://planck.roma1.infn.it/olimpo>





Voli
polari
notturni
LSPE

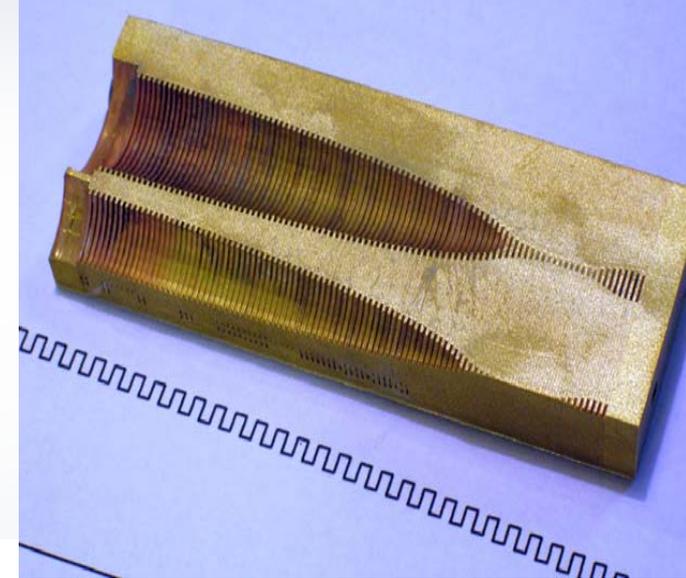
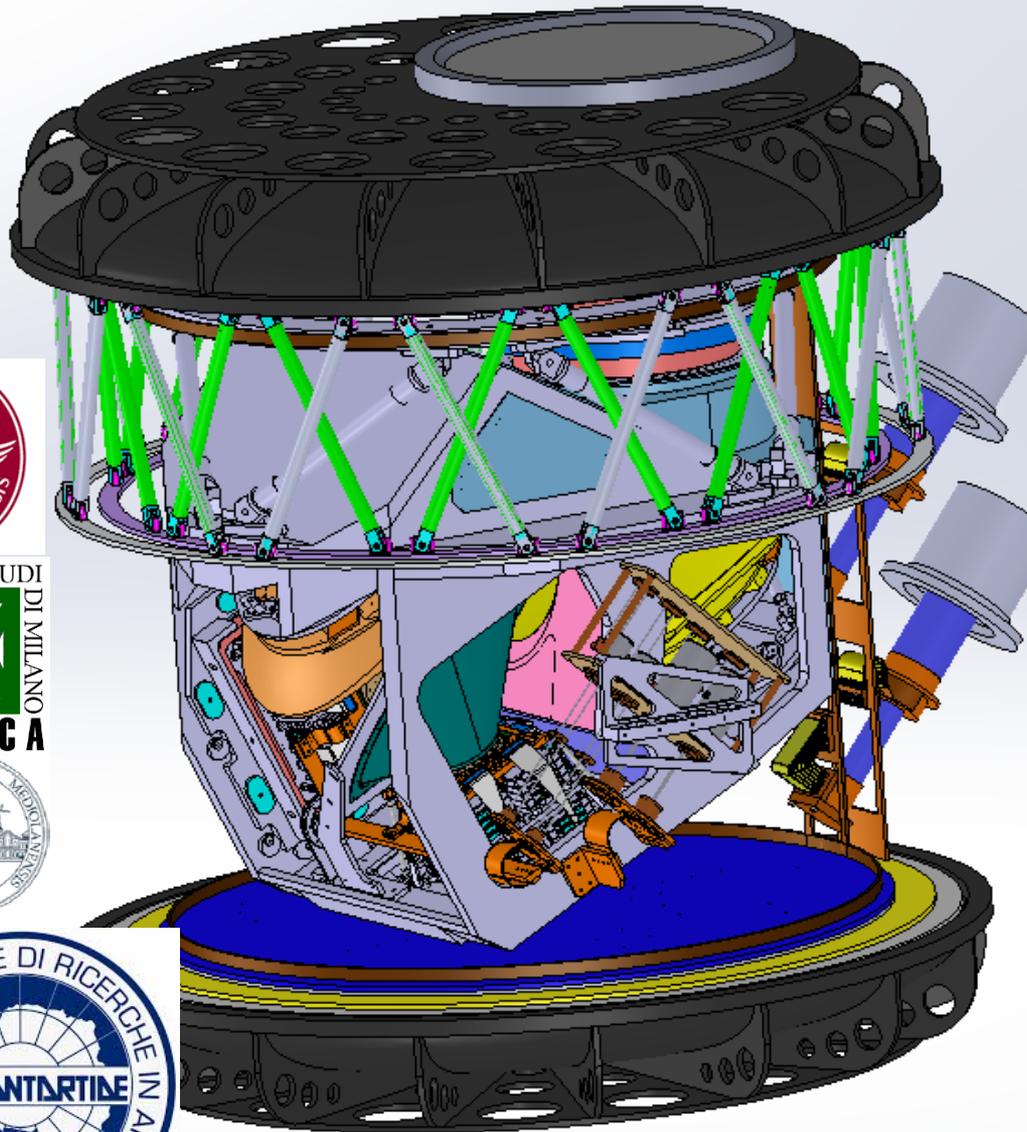


Large Scale Polarization Explorer

<http://planck.roma1.infn.it/lspe>



QUBIC @ Concordia: <http://www.qubic-experiment.org/>



Conclusioni :

- Con l'esperimento BOOMERanG abbiamo esplorato per la prima volta regioni di Universo così lontane da rivelarcene l'immagine più antica.
- L'esperimento non sarebbe stato possibile fuori Antartide, e senza la infrastruttura di ricerca di PNRA, ASI, USAP e NASA.
- Questa immagine ci ha permesso di misurare con grande precisione alcuni parametri globali dell'universo, come la sua densità media di massa ed energia, e la densità di barioni.
- L'esperimento ha anche permesso di sviluppare strumentazioni ottiche, criogeniche ed elettroniche avanzatissime, e metodologie fondamentali per i successivi sviluppi della cosmologia osservativa (Planck) ma anche in settori diversi dalla Cosmologia.
- Ha dimostrato che a volte, con un finanziamento tutto sommato limitato (in Italia da PNRA e ASI, e grazie alla collaborazione internazionale), si possono ottenere risultati di impatto. Ma si tratta di una eccezione fortunata!
- Ed ha formato diversi giovani studenti e ricercatori, confrontandoli con problematiche entusiasmanti e metodologie sperimentali rigorose
- Oggi molti degli studenti di allora lavorano nella ricerca, in Italia e all'estero.
- **Tutti soffriamo ancora del mal d'Antartide, una voglia irresistibile di tornare, continuare, fare di più.**