

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea in Astronomia

Dipartimento di Fisica e Astronomia

**ESPERIMENTI PER LA MISURA DELLA
RADIAZIONE COSMICA DI FONDO
A MICROONDE**

Tesi di laurea di:

GERD DANI

Relatore:

Prof. LAURO MOSCARDINI

Anno Accademico 2016/2017

A Nonna e a Baba

INDICE

<u>INTRODUZIONE</u>	1
----------------------------------	---

CAPITOLO 1

1.1 Breve Storia dell'Universo	3
1.2 Scoperta ed Evoluzione della Radiazione Cosmica di Fondo	6
1.2.1 Misurazione della Radiazione Cosmica di Fondo	7
1.3 Le Anisotropie della Radiazione Cosmica di Fondo	9

CAPITOLO 2

2.1 Osservazioni e Rilevazioni della Radiazione Cosmica di Fondo ..	11
2.2 Il satellite COBE	11
2.3 L'esperimento BOOMERanG	15
2.4 Il satellite WMAP	18
2.5 Il satellite PLANCK SURVEYOR	22
2.6 Altri Esperimenti e problemi connessi ad essi	26

CAPITOLO 3

3.1 Polarizzazione della radiazione cosmica di fondo	28
3.2 Prospettive future	30

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....33

RINGRAZIAMENTI.....35

INTRODUZIONE

In questo mio elaborato di tesi, vengono trattati in maniera qualitativa gli aspetti principali della radiazione CMB con maggiore focalizzazione sulle tecnologie che ne hanno permesso la scoperta e il relativo studio che è di vitale importanza nello sviluppo della cosmologia moderna.

In cosmologia, la **radiazione cosmica di fondo a microonde** abbreviata spesso in **CMB**, dall'inglese *Cosmic Microwave Background Radiation*, è la radiazione elettromagnetica residua prodotta dal Big Bang che permea l'Universo. A partire dagli anni '60 fino ad oggi, centinaia sono stati gli esperimenti (da Terra e da Spazio) che hanno permesso di ottenere sempre più informazioni sulla radiazione cosmica via via con sempre maggiore sensibilità e accuratezza.

Grazie ai risultati ottenuti, è possibile ad oggi confermare la bontà della teoria inflazionaria e comprenderne meglio l'evoluzione temporale dal Big Bang ad oggi.

Numerosi sono gli esperimenti previsti nell'immediato futuro che avranno il compito di migliorare ancora di più la nostra conoscenza: verranno infatti utilizzate strumentazioni tecnologiche sempre più innovative in grado di scrutare nel profondo lo Spazio che ci circonda.

CAPITOLO 1

1.1 Breve Storia dell'Universo

Circa 13,8 miliardi di anni fa, il nostro Universo emerse da una sorta di “singolarità” attraverso un processo chiamato Big Bang. Su questo stadio primordiale, condizioni fisiche troppo estreme nell'applicazione delle teorie rendono scarse le nostre conoscenze. Sappiamo però che nella primissima fase iniziale, l'universo era composto da un concentrato caldissimo di energia, soggetto a fluttuazioni di natura “quantistica”.

La durata di questa prima fase è stata quantificata pari a circa 10^{-36} secondi.

In una fase immediatamente successiva, e per un tempo altrettanto breve, la pressione decelerò in modo iperbolico facendo sì che l'universo potesse espandersi di 10^{40} volte: porzioni di spazio molto più piccole di un nucleo atomico furono, così, proiettate su scala cosmica. Questa fase si chiama “inflazione”, che fino alle prove ottenute dallo studio della radiazione cosmica di fondo, veniva postulata soltanto teoricamente. L'espansione fu prodotta da quelle stesse forze fondamentali, allora riunite sotto forma di un'unica forza di interazione, che oggi governano le leggi della natura: la forza di gravitazione, la forza elettromagnetica, la forza di interazione debole e la forza di interazione forte (le ultime due osservabili soltanto a livelli subatomici e subnucleari, nelle interazioni tra le particelle elementari).

La forza di interazione agì solo per una frazione infinitesima di secondo sufficiente però a dilatare enormemente le dimensioni dell'universo nascente. Tale fu la violenza di quel primo impulso che, nonostante la forza di attrazione

gravitazionale contrasti costantemente il moto di deriva delle galassie, l'espansione dell'universo continua tutt'ora.

Via via che l'universo si espandeva, la sua temperatura diminuiva. A poco a poco l'energia disponibile non era più sufficiente a permettere lo scambio tra fotoni e particelle di materia e l'universo, per quanto ancora in fase di espansione e di raffreddamento, incominciò a “stabilizzarsi”. Un centesimo di secondo dopo l'inizio, la temperatura era scesa a 100 miliardi di gradi. Inizialmente il numero di neutroni era uguale a quello di protoni, ma in seguito i neutroni, instabili, iniziarono a decadere in protoni ed elettroni, spostando l'equilibrio. Un decimo di secondo dopo l'inizio, il rapporto neutroni-protoni era 19 : 31 e la temperatura era scesa a 30 miliardi di gradi. Un secondo dopo la nascita dell'universo, il rapporto era di 6 neutroni contro 19 protoni, la temperatura era scesa a 10 miliardi di gradi e la densità dell'intero universo era "solo" 380.000 volte quella dell'acqua. Da questo punto in poi, i cambiamenti incominciarono a rallentare. Ci vollero 14 secondi perché la temperatura scendesse a 3 miliardi di gradi, ovvero raggiungesse le condizioni in cui avvengono normalmente i processi di fusione nucleare all'interno delle stelle. In tali condizioni, neutroni e protoni incominciarono ad aggregarsi, formando per tempi brevissimi nuclei di deuterio che subito venivano spezzati da nuove collisioni.

A tre minuti dall'inizio la temperatura era scesa a un miliardo di gradi. Esistevano soltanto 7 neutroni ogni 43 protoni, ma i nuclei di deuterio erano stabili e resistevano alle collisioni. La combinazione dei neutroni e protoni a formare nuclei stabili permise la sopravvivenza dei neutroni, che altrimenti, se fossero rimasti isolati, sarebbero completamente decaduti.

Da questo istante, fino al termine del quarto minuto dall'inizio, ebbe luogo una serie di reazioni nucleari che portò alla formazione di nuclei di elio e di altri

nuclei leggeri, a partire da protoni e nuclei di deuterio, in un processo noto come nucleosintesi.

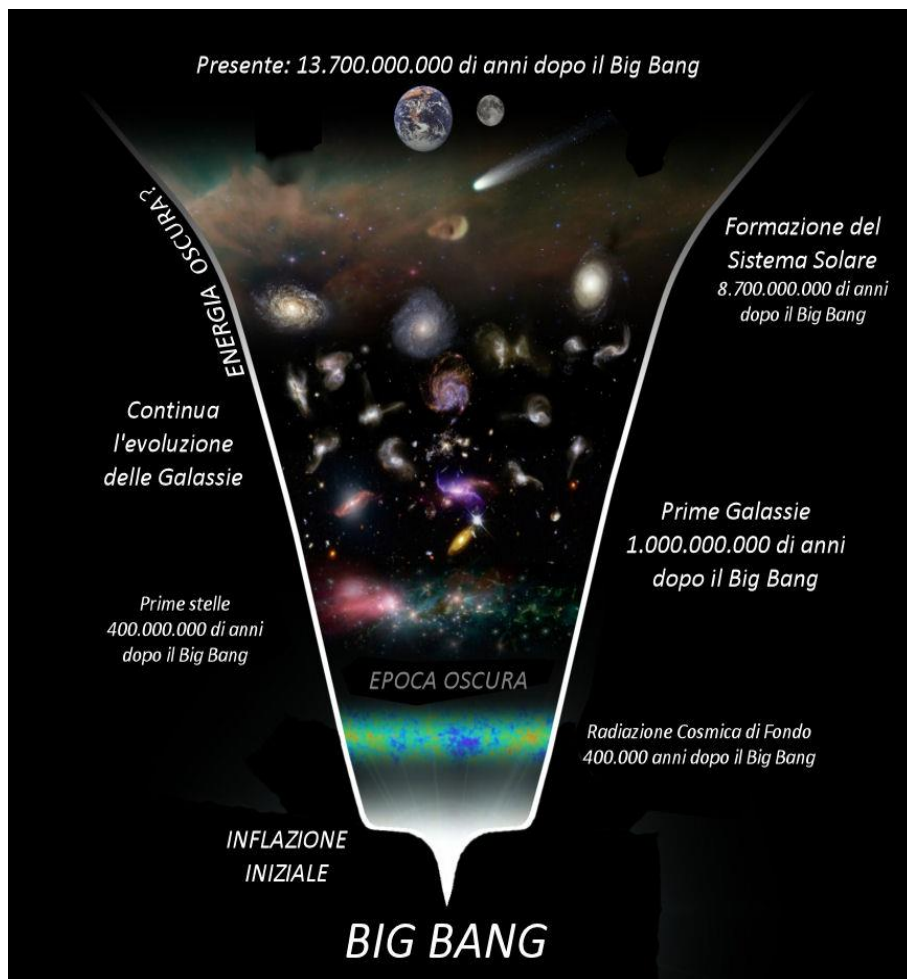


Figura 1: Origine ed Evoluzione dell'Universo. Rif. NASA

Meno del 25 % della materia nucleare finì convertita in forma di elio; tutto il resto, tranne una frazione minore dell'1 %, in elementi più pesanti dell'idrogeno. La temperatura era tuttavia ancora troppo elevata perché questi nuclei potessero legare a sé elettroni e formare atomi stabili. A 30 minuti dall'inizio, la temperatura dell'universo era di 300 milioni di gradi e la densità era scesa drasticamente, a circa il 10 % di quella dell'acqua. I nuclei di idrogeno ed elio, dotati di carica elettrica positiva, coesistevano con elettroni liberi, carichi negativamente; sia i nuclei che gli elettroni, data la loro carica elettrica, continuavano a interagire con i fotoni. La materia si trovava nel cosiddetto stato di plasma, come è oggi

all'interno del Sole. Questa attività proseguì per circa 300.000 anni, fino a che l'universo in espansione si fu raffreddato più o meno alla temperatura a cui si trova oggi la superficie del Sole, vale a dire a circa 6000 °C. In queste condizioni, gli elettroni erano in grado di rimanere vincolati ai nuclei così da formare atomi stabili. Nel successivo mezzo milione di anni, tutti gli elettroni e i nuclei si legarono a formare atomi di idrogeno ed elio. Gli atomi, elettricamente neutri, cessarono di interagire con la radiazione. Da questo punto in poi l'universo divenne trasparente, nel senso che i fotoni di radiazione elettromagnetica potevano fluire liberamente negli spazi cosmici.

E' il residuo di questa radiazione, oggi a una temperatura di -270 °C, che viene rilevata dai radiotelescopi e interpretata dagli scienziati come **radiazione cosmica di fondo**. A partire da qualche centinaio di migliaia di anni dopo l'inizio, essa cessò di interagire con la materia; ancora oggi, leggere differenze di temperatura nelle radiazioni cosmiche di fondo provenienti da diverse regioni del cosmo, ci indicano come la materia era distribuita nell'universo a quell'epoca.

Stelle e galassie si formarono a partire da un milione di anni circa dall'inizio, soltanto dopo che materia e radiazione si furono disaccoppiate.

1.2 Scoperta ed Evoluzione della Radiazione Cosmica Di Fondo

La Radiazione Cosmica di Fondo venne scoperta nel 1964 dagli astronomi statunitensi Arno Penzias e Robert Woodrow Wilson che li portò a conseguire il Premio Nobel nel 1978. In realtà la radiazione di fondo venne predetta nel 1948 da George Gamow, Ralph Alpher, e Robert Herman, i quali durante la tesi di dottorato, riuscirono a predire l'esistenza di radiazione di corpo nero con temperatura pari a 5 K, anche se due anni dopo la ricalcolano a 28 K. Nonostante i risultati ottenuti vennero discussi per svariati anni, la maggioranza della comunità astronomica non era ancora particolarmente interessata ai temi della

cosmologia. La predizione di Alpher e Herman fu riscoperta da Yakov Zel'dovich all'inizio degli anni 1960, e indipendentemente predetta da Robert Dicke contemporaneamente. La prima pubblicazione della radiazione di fondo come un fenomeno rilevabile apparve in un breve elaborato degli astrofisici sovietici A. G. Doroshkevich e Igor Novikov, nella primavera del 1964. Nel 1965, Arno Penzias e Robert Woodrow Wilson ai Bell Laboratories in New Jersey costruirono un radiometro Dicke che intendevano utilizzare per la radioastronomia e gli esperimenti di comunicazione via satellite ma si accorsero che tale strumento soffriva di un eccesso di temperatura di antenna di 3,5 K ai loro occhi inizialmente inspiegabile ma che successivamente venne attribuita alla *Radiazione Cosmica di Fondo*.

1.2.1 Misurazioni della Radiazione Cosmica di Fondo

Le misurazioni della radiazione cosmica di fondo hanno fatto della teoria inflazionaria del Big Bang il modello standard delle origini dell'universo. Questa

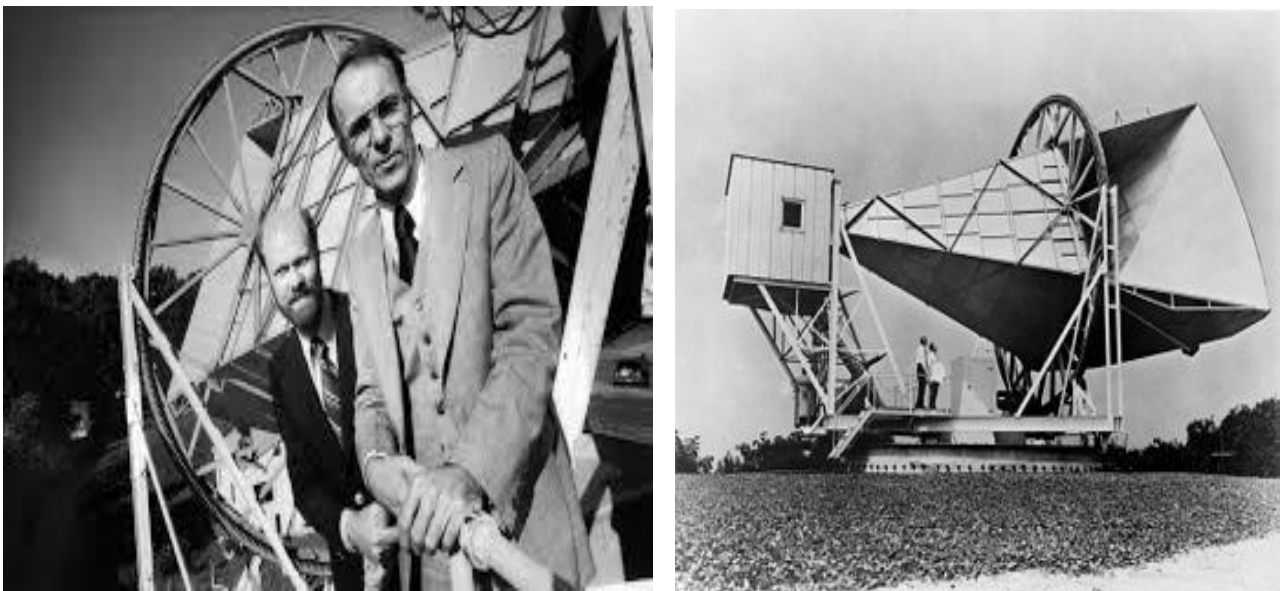


Figura 2: A sinistra Arno Penzias e Robert Woodrow Wilson. A destra il radiometro Dicke. Ref. NASA

teoria prevede che le fluttuazioni primordiali del campo di densità da cui si sono

originate le strutture cosmiche, siano originariamente di natura casuale, e seguano una distribuzione di probabilità approssimativamente Gaussiana. Attualmente i recenti esperimenti dimostrano che tale radiazione di fondo è caratterizzata da uno spettro di corpo nero alla temperatura di 2.725 K.

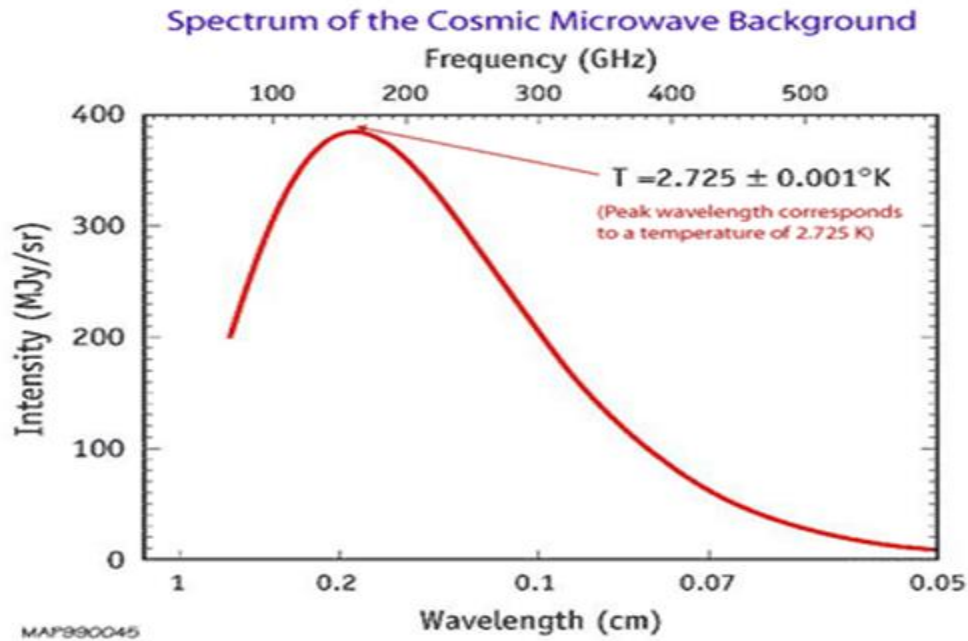


Figura 3: Distribuzione di Probabilità dello spettro della CMB. Ref. University of California, LA

Per calcolare la dipendenza della temperatura dall'espansione bisogna considerare un volume che si espande con lo stesso tasso di espansione dell'universo a: $V \sim a(t)^3$; la radiazione di corpo nero in questo volume può essere visto come un gas di fotoni la cui densità di energia ϵ_{rad} varia come una funzione della temperatura:

$$\epsilon_{rad} = \alpha T^4$$

dove α è la costante di corpo nero. Dalla formula si deriva la pressione di radiazione P_γ come:

$$P_\gamma = \epsilon_{rad} / 3$$

Il gas di fotoni deve obbedire alla prima legge della termodinamica:

$$\delta Q = dE + P\delta V$$

dove δQ rappresenta gli scambi di calore del nostro gas con l'esterno, il cui contributo netto nell'universo è nullo; P è la pressione del gas e δV è la variazione di volume. Allora considerando l'espansione:

$$dE = -P(t)dV$$

Per i fotoni del CMB vale: $E = \varepsilon V = \alpha T^4 V$ e $P(t) = \alpha T^4/3$; sostituendo e derivando rispetto al tempo:

$$\alpha(4T^3 dT V + T^4 dV) = \frac{-1}{3}\alpha T^4 dV,$$

$$\frac{1}{T} dT = \frac{-1}{3V} dV;$$

ricordando la dipendenza cubica del volume dal tasso di espansione possiamo riscrivere la nostra equazione come:

$$d(\ln T) = -d(\ln a)$$

Questo implica una relazione $T \sim a^{-1}$. Ad alti redshift la temperatura della radiazione CMB è più alta ma lo spettro conserva la stessa forma di quelli misurati ad altri z ; sostituendo infatti quanto trovato nella formula della Planckiana, insieme all'andamento della frequenza $\nu \sim a^{-1}$ otteniamo che la forma resta costante (resta costante il rapporto $h\nu/kT$), ma viene normalizzato il tutto per un fattore $(1+z)^4$.

1.3 Le Anisotropie della Radiazione Cosmica di Fondo

Le fluttuazioni dell'Universo primordiale, necessarie per la creazione delle attuali strutture cosmiche hanno lasciato un'impronta nella radiazione cosmica

di fondo che viene caratterizzata da anisotropie nella sua temperatura, le quali vennero osservate per la prima volta solo nel 1992 ad opera del satellite COBE di cui parlerò più avanti. Le anisotropie possono essere distinte in 2 categorie:

- PRIMARIE: fluttuazioni che si sono generate al momento della ricombinazione.
- SECONDARIE: fluttuazioni che si sono generate dopo la ricombinazione legate ad effetti quali le interazioni con il gas caldo o il potenziale gravitazionale, tra la superficie di ultimo scattering e l'osservatore.

Le anisotropie primarie sono state causate da variazioni di densità, di velocità del gas e di potenziale gravitazionale sulla superficie dell'orizzonte di ultimo scattering. Mentre le secondarie sono variazioni di temperatura aggiuntive prodotte invece da altri fenomeni, quali ad esempio la presenza di grandi ammassi di galassie lungo il tragitto che i fotoni hanno percorso per arrivare a noi a partire dall'orizzonte di ultimo scattering. L'effetto è dovuto alle buche di potenziale gravitazionale.

L'entità di queste fluttuazioni (cioè quanto ampia è la variazione in temperatura), e la loro dimensione caratteristica in termini angolari sulla mappa, ci danno informazioni dirette sulla storia che i fotoni hanno vissuto, ovvero su ciò con cui sono entrati in contatto e che li ha generati, fornendoci dunque importantissime informazioni su tutto quello che è stato dell'Universo dall'epoca della ricombinazione fino ad oggi, tempo in cui osserviamo la radiazione.

CAPITOLO 2

2.1 Osservazioni e Rilevazioni della Radiazione Cosmica di Fondo

In questo capitolo l'attenzione si focalizza principalmente su quelle che sono state tutte le varie osservazioni del CMB attraverso le tecnologie e gli esperimenti che si sono susseguiti negli ultimi decenni e che hanno maggiormente contribuito allo sviluppo delle conoscenze del fondo cosmico.

Dopo la scoperta della radiazione CMB, sono stati condotti centinaia di esperimenti da terra per misurare e caratterizzare i segnali costituenti la radiazione.

2.2 IL satellite COBE

L'esperimento più famoso è il Cosmic Background Explorer, satellite lanciato per la prima volta nel 1989 dalla NASA, il quale osservò e quantificò le anisotropie su grande scala al limite delle sue capacità di rilevazione. Progettato dalla NASA e posto in orbita al poligono Western Space Center, California, mediante vettore Delta, ha sondato la distribuzione spaziale ed energetica della radiazione fossile a microonde che pervade l'intero spazio cosmico, frutto del disaccoppiamento fra la radiazione e la materia a seguito del Big Bang. Il laboratorio posto a bordo, caratterizzato da altissima tecnologia, ha perlustrato il cielo da un'orbita quasi polare percorsa in 90 minuti, a 900 km di quota. I suoi tre apparati principali hanno operato perfettamente durante tutto il tempo di autonomia (un anno). Un primo apparato, lo *spettrometro assoluto per l'infrarosso lontano* (FIRAS) ha proceduto all'esame della radiazione cosmica fra i 100 micrometri e 1 cm di lunghezza d'onda, rivelando la radiazione attraverso un'antenna a tromba e conducendola a interferire con una sorgente di riferimento mediante un

dispositivo di Michelson. L'esperimento si è proposto di individuare la radiazione termica dissipata nei processi che dettero origine alle protogalassie.



Fig.4 – Struttura del COBE. Ref Nasa

Il secondo apparato è costituito dal *radiometro differenziale per microonde* (DMR) installato per confrontare la radiazione proveniente da coppie distinte di aree celesti. Due antenne a tromba, orientate in direzioni opposte, 30° rispetto all'asse di rotazione della sonda collegate in alternanza allo stesso ricevitore hanno eseguito campionature e confronti fra i segnali ricevuti in un campo di 7° d'ampiezza, rilevando anisotropie termiche dell'ordine di 1 parte su 100 mila. Il terzo rilevatore a bordo ha studiato il *fondo diffuso nell'infrarosso* (DIRBE) con lo scopo di individuare la radiazione emessa, a suo tempo, dalle prime generazioni stellari. Lo schema ottico è quello di un telescopio a riflessione con specchio di 20 cm in grado d'intercettare un campo di $0,7$ gradi di diametro; l'apparecchio, puntando a 30° dall'asse del satellite, ha affidato ai movimenti di rotazione e di orbitazione il compito di esplorare l'intera volta celeste, misurandone l'intensità del flusso. I risultati della missione COBE sono stati

raccolti dal National Space Science Data Center che ha pubblicato le informazioni ottenute in un atlante di carte celesti.

Due dei principali ideatori e realizzatori di COBE, John C. Mather e George F. Smoot, hanno ricevuto il Premio Nobel per la Fisica del 2006 per i risultati conseguiti dal satellite.

Per avere un'idea dei risultati ottenuti mediante il satellite COBE è necessario visualizzare Figura 5, in cui la misura vera e propria corrisponde alla prima mappa in alto, che vediamo palesemente contraddistinta da due regioni soltanto, una in blu ed una in rosso, rappresentanti un effetto di allontanamento e avvicinamento (blueshift e redshift, rispettivamente) della radiazione osservata. Questa prima mappa di fatto non visualizza nulla della CMB, e prende il nome di **componente di dipolo**. La componente di dipolo non è altro che una componente fissa che si genera nel momento in cui l'osservatore si muove rispetto alla sorgente.

Il moto che causa la componente di dipolo è proprio quello del nostro Sistema Solare. Questo fa sì che vediamo la radiazione di una metà di cielo, quella rivolta nello stesso verso del moto, che si avvicina rispetto a noi, visualizzata come temperatura più calda in rosso. Questo effetto è dovuto al fatto che quando la sorgente si avvicina a noi (o meglio in questo caso noi ci avviciniamo alla sorgente), la sua frequenza diventa più alta, e quindi corrispondente ad una temperatura più elevata. Viceversa invece l'altra metà opposta del cielo vedrà la sorgente allontanarsi, causando un redshift e quindi facendo diminuire la frequenza, cioè abbassando la temperatura (colorata in blu). La prima operazione necessaria è dunque eliminare questa componente di dipolo perché non legata alle anisotropie primarie. Con opportuni calcoli del moto del Sistema Solare e contemporaneamente della Via Lattea, è possibile quantificarla e dunque toglierla dalla mappa con una sottrazione. Quello che otteniamo è la seconda immagine al centro in cui si nota una distinta regione rossa in orizzontale. Questa

componente non è una enorme disomogeneità nella CMB ma è l'effetto della nostra galassia, la Via Lattea, osservata lungo il piano del disco galattico. A causa dell'elevata densità del gas lungo il piano del disco, si ha un conseguenziale aumento di temperatura che diventa dominante a causa della forte radiazione emessa in sua corrispondenza. Anche questa sorgente è da eliminare dal contributo totale in modo da ripulire ulteriormente la mappa e lasciare soltanto i contributi dati dal segnale cosmico. Una volta effettuata questa seconda operazione di correzione, il risultato finale è mostrato nella terza mappa in basso.

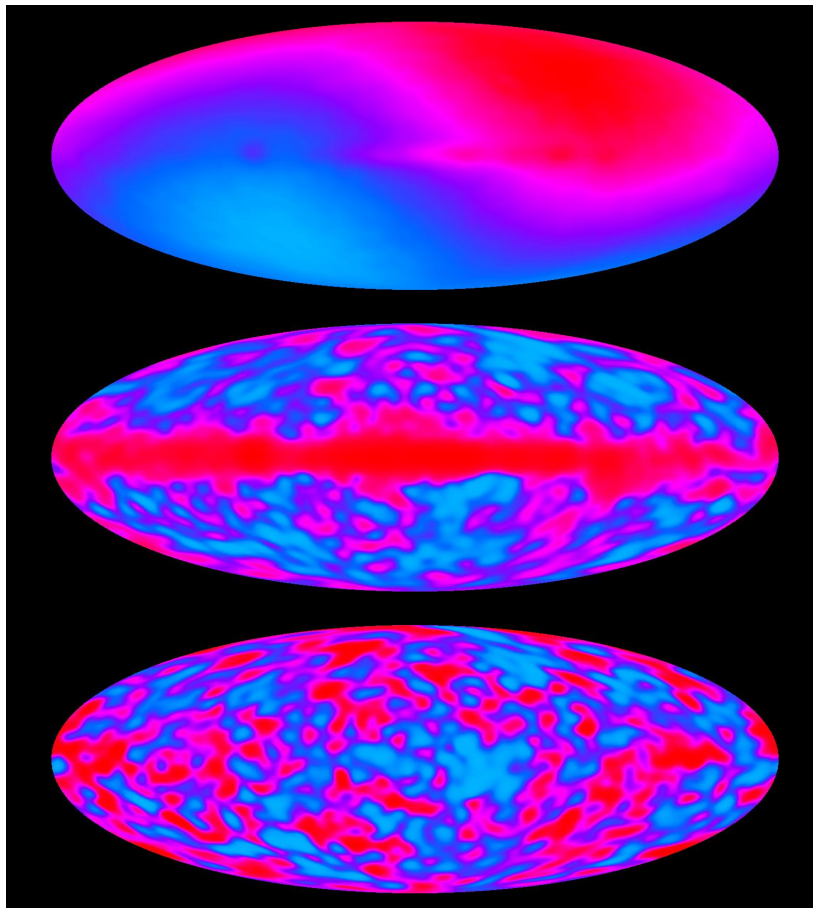


Fig.5- Mappa della CBR ottenuta da COBE. In alto, l'originale non corretta, dominata dalla componente di dipolo dovuto dal moto del Sistema Solare e della Via Lattea. Al centro la versione corretta sottraendo la componente di dipolo. In basso la mappa definitiva, senza la componente di dipolo e quella di emissione della Via Lattea. Ref. NASA

E' necessario sottolineare che queste "macchie sono solo piccolissime variazioni di temperatura rispetto al valore di 2.2725 K, pari a circa lo 0.00001 %, quindi davvero molto ridotte.

Grazie a tale esperimento si è stati in grado di confermare che la teoria dell'inflazione cosmica fosse quella giusta come teoria principale di formazione delle strutture cosmiche.

2.3 L'esperimento BOOMERanG

L'esperimento BOOMERanG (acronimo inglese di Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics) è un esperimento che ha misurato la radiazione cosmica di fondo di una porzione limitata dello spazio tramite tre voli sub-orbitali di un pallone areostatico. È stato il primo esperimento in grado di fornire un'immagine **ad alta definizione** delle anisotropie della temperatura della radiazione cosmica di fondo. Tramite un telescopio, posto ad un'altitudine di 37 km circa, è stato possibile ridurre l'assorbimento delle microonde (prodotte dalla radiazione di fondo) da parte dell'atmosfera terrestre. Il telescopio dell'esperimento BOOMERanG e' stato prodotto parzialmente dall'Universita' di Roma "La Sapienza". E' caratterizzato da un grande specchio primario fuori asse di 1,3 metri di diametro, costruito in modo che possa ricevere solo il fondo cosmico a microonde, filtrando la luce diffusa; infatti per questo motivo, sono stati aggiunti speciali schermi (realizzati all' Universita' della California a Santa Barbara) per respingere le microonde prodotte dal Sole e dalla Terra. Le microonde raccolte dallo specchio sono convogliate in un criostato che contiene i rivelatori. Il criostato (realizzato tra La Sapienza e l'ENEA di Frascati) raffredda a soli 0.3 gradi sopra lo zero assoluto i sensibilissimi rivelatori (realizzati al Caltech/Jet Propulsion Laboratory di Pasadena) e li mantiene operativi per tutta la durata del volo. I rivelatori installati sono in totale 16 e

possono misurare variazioni di temperatura di pochi miliardesimi di grado in un secondo di osservazione. L'elettronica di bordo (realizzata dal Caltech e dall'Universita' del Massachussets) elabora i segnali ricevuti dai rivelatori, li acquisisce, li memorizza e li invia alla telemetria satellitare della NASA. A bordo sono installati anche sei computer per la gestione del puntamento, dell'esecuzione delle misure e l'acquisizione dei dati.

Il pallone che ha trasportato BOOMERanG nella stratosfera, a 37 km di quota, e' stato lanciato in Antartide il 29 dicembre 1998 sul mare ghiacciato di fronte al vulcano Erebus.



Fig.6- Lancio dell'esperimento BOOMERanG in Antartide. Ref.

<http://cmb.phys.cwru.edu/boomerang>

Qui lo strumento e' stato montato, collaudato e calibrato per 2 mesi e mezzo prima del lancio. Il personale italiano che ha partecipato al lancio faceva parte della XIV spedizione italiana organizzata dal Programma Nazionale di Ricerche in Antartide. La navicella contenente il telescopio ed i sensori di microonde era alta 6 metri e aveva una massa di 1.500 Kg. Il pallone conteneva un milione di metri cubi di elio gassoso. L' esperimento e' rimasto in quota per 10 giorni e mezzo,

durante i quali ha funzionato automaticamente eseguendo migliaia di scansioni del cielo. Le scansioni sono state eseguite grazie ad una ruota d'inerzia che faceva ruotare la navicella intorno al gancio di sospensione al pallone. Questo sistema, insieme all'elettronica di controllo è stato realizzato all'Istituto per le ricerche sulle onde elettromagnetiche del Cnr di Firenze. La realizzazione dell'apparecchiatura è terminata nel 1996. Nel 1997 la navicella è stata provata in un breve volo (6 ore) in Texas che nonostante fosse di breve durata ha prodotto risultati scientifici rilevanti.

I due voli successivi sono stati effettuati nel 1998 e nel 2003: BOOMERanG è stato fatto girare attorno al polo sud sfruttando il vortice polare, ritornando al punto di partenza dopo due settimane, da qui il nome della missione (effetto boomerang).

I dati dell'esperimento sono stati utili per calcolare lo spettro di potenza delle anisotropie su scale minori rispetto a COBE, consentendo di rivelare il primo picco legato alla distanza angolare rispetto alla superficie di ultimo scattering con un'alta precisione.

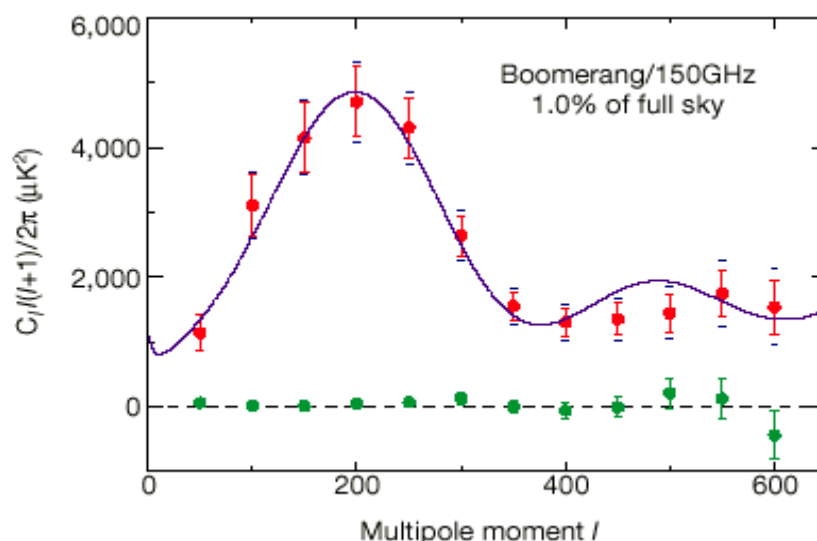


Fig.7- Spetto angolare ottenuto dalle osservazioni dell'esperimento BOOMERanG.

Rif. CALTECH

Questi dati, combinati con altri dati riguardanti la costante di Hubble, hanno dato come risultato finale che **la geometria dell'universo è piatta**. Questo risultato supporta la prova dell'esistenza dell'energia oscura. I dati del volo del 2003 del BOOMERanG hanno dato come risultato un segnale con un altissimo rapporto segnale-rumore, utili per la mappatura dell'anisotropia della temperatura della radiazione di fondo e per la misura della polarizzazione della radiazione così come mostrato in Fig. 8.

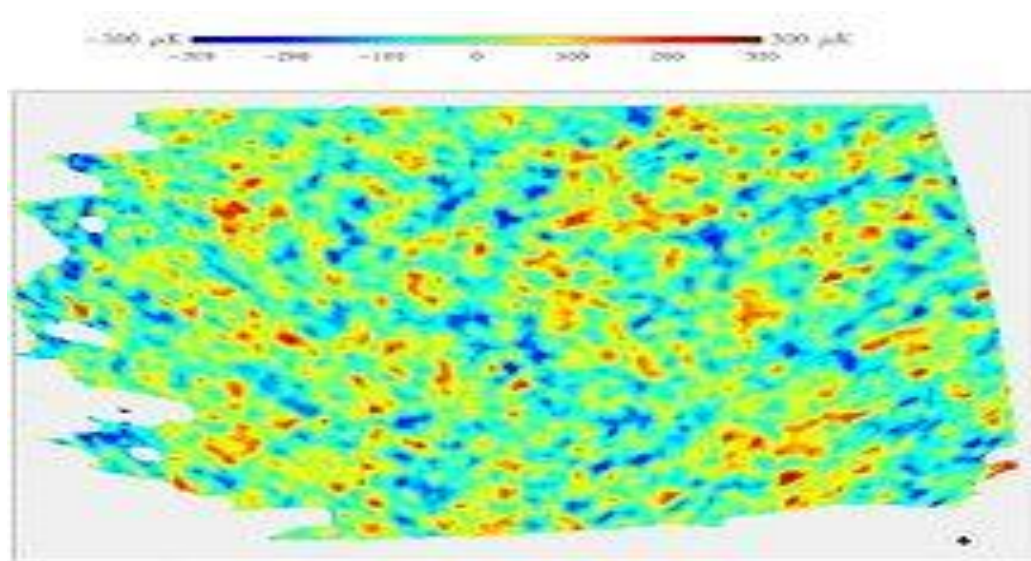


Fig.8- Anisotropia della radiazione di fondo rilevata da BOOMERanG

Rif. <http://cmb.phys.cwru.edu/boomerang>

2.4 Il satellite WMAP

Il Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), conosciuto anche come sonda spaziale per l'anisotropia delle microonde, è stato un satellite che ha misurato la radiazione cosmica di fondo a seguito del Big Bang: un progetto che ha visto la collaborazione tra il Goddard Space Flight Center della NASA e l'Università di Princeton. Il satellite WMAP è stato lanciato il 30 giugno 2001, alle ore 19:46 (GDT) dallo stato della Florida. Il WMAP è stato l'erede del satellite COBE, ed il secondo satellite di classe media (MIDEX), previsto dal

programma Explorer. Tale satellite è stato così chiamato in onore di David Todd Wilkinson (1935-2002).

Il WMAP è caratterizzato da specchi primari gregoriani di dimensioni 1,4 metri e 1,6 metri, rivolti in direzioni opposte tra loro, i quali focalizzano il segnale ottico su specchi secondari grandi 0,9 m x 1,0 m. Questi specchi sono stati modellati per ottenere delle prestazioni ottimali: riflettono il segnale verso sensori ondulatori, posti sul piano focale tra i due specchi primari.

I ricevitori sono costituiti da radiometri differenziali sensibili alla polarizzazione elettromagnetica. Sono presenti 20 alimentatori, 10 per ogni direzione, dai quali i radiometri raccolgono i segnali; la misura finale corrisponde alla differenza tra i segnali provenienti da direzioni opposte. Per meglio distinguere i segnali di disturbo provenienti dalla Via Lattea, WMAP ha lavorato su 5 frequenze radio discrete, da 23 GHz a 94 GHz.

La base del WMAP è costituita da un pannello solare di 5 metri di diametro, il quale tiene la sonda costantemente all'ombra durante il rilevamento della radiazione di fondo. Al di sopra del pannello si trova l'apparato di raffreddamento della sonda. Tra questo apparato di raffreddamento e gli specchi, è posizionato un guscio cilindrico per l'isolamento termico, della lunghezza di 33 cm.

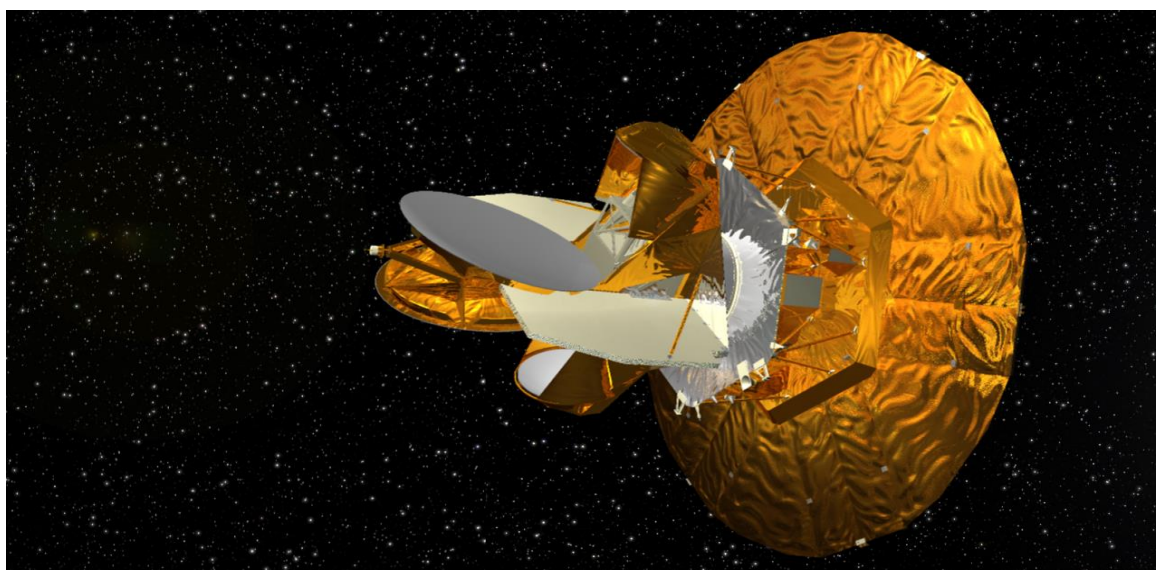


Fig.9 – Il satellite WMAP (Rif. NASA)

Il raffreddamento di WMAP è affidato a dei radiatori passivi, i quali raggiungono una temperatura di 90 K circa ($-183,15^{\circ}\text{C}$); quest'ultimi sono connessi agli amplificatori a basso rumore. Il consumo totale del telescopio è stato di 419 W. La temperatura della sonda è stata controllata da una termoresistenza di platino.

La calibrazione di WMAP è stata effettuata eseguendo una misurazione di Giove rispetto al dipolo della radiazione cosmica di fondo. I dati di WMAP sono stati trasmessi giornalmente tramite un trasponder in funzione alla frequenza di 2 GHz, il quale ha provveduto a trasmettere il segnale ad uno dei telescopi della rete Deep Space Network. Il satellite è stato provvisto di 2 trasponder di cui uno è di riserva; questi sono attivi per circa 40 minuti al giorno onde evitare radio-interferenze. La posizione del telescopio è stata mantenuta stabile, lungo i tre assi spaziali, da uno speciale volano a reazione, da vari giroscopi, da due star tracker e da vari sensori che ne determinano la posizione rispetto al Sole.

WMAP, una volta completata la sua costruzione, è arrivato al John F. Kennedy Space Center il 20 aprile 2001. Dopo un test durato 2 mesi, è stato spedito in orbita tramite un razzo Delta II 7425 il 30 giugno 2001.

Grazie alla straordinaria risoluzione angolare di soli 0,3 gradi, WMAP è riuscito a mappare le anisotropie della CMB su tutto il cielo, ritrovandovi non solo il picco principale a 1, ma anche altri quattro picchi di anisotropie inferiori, da cui è stato possibile dedurre alcuni fondamentali parametri cosmologici: la collocazione attorno alle dimensioni di 1° delle anisotropie principali della CMB conferma che l'Universo è piatto, quindi che la densità della massa totale + energia è esattamente uguale alla cosiddetta **densità 'critica'**, che permetterà all'Universo di espandersi per sempre.

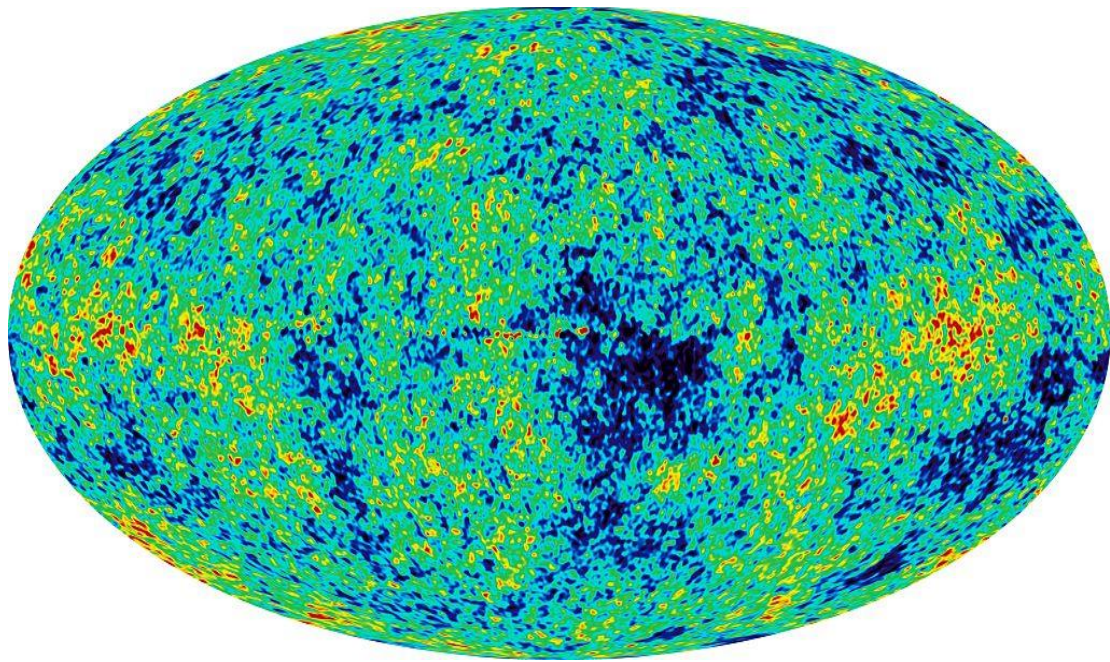


Fig. 10 – Anisotropie CMB ottenute dal WMAP (2003). Rif. NASA

Un picco principale centrato a dimensioni angolari $<1^\circ$ avrebbe invece significato una densità di materia + energia inferiore a quella critica, quindi un Universo in espansione sempre più veloce. Per quanto riguarda i picchi delle anisotropie successive, si può dire che la loro posizione ed intensità (rispetto al picco principale) sono un'indicazione della quantità di materia 'barionica', cioè ordinaria e di materia 'non barionica' ossia oscura. Con i risultati ottenuti da WMAP è stato possibile affermare che nel Cosmo esiste circa il 4,5% di materia ordinaria, contro circa il 24% di materia oscura. Il restante 72% (circa) è costituito da una forma di energia oscura, che dovrebbe produrre un'espansione irreversibile.

Il risultato più innovativo di WMAP riguarda la prima misura delle anisotropie su **grande scala** della parte polarizzata della CMB, da cui è stato possibile dedurre il momento della 're-ionizzazione'.

Di seguito, in Figura 10 è possibile riscontrare il progresso tecnologico ottenuto nel corso degli anni confrontando i risultati rilevati principalmente dal COBE (1992) e il WMAP (2003).

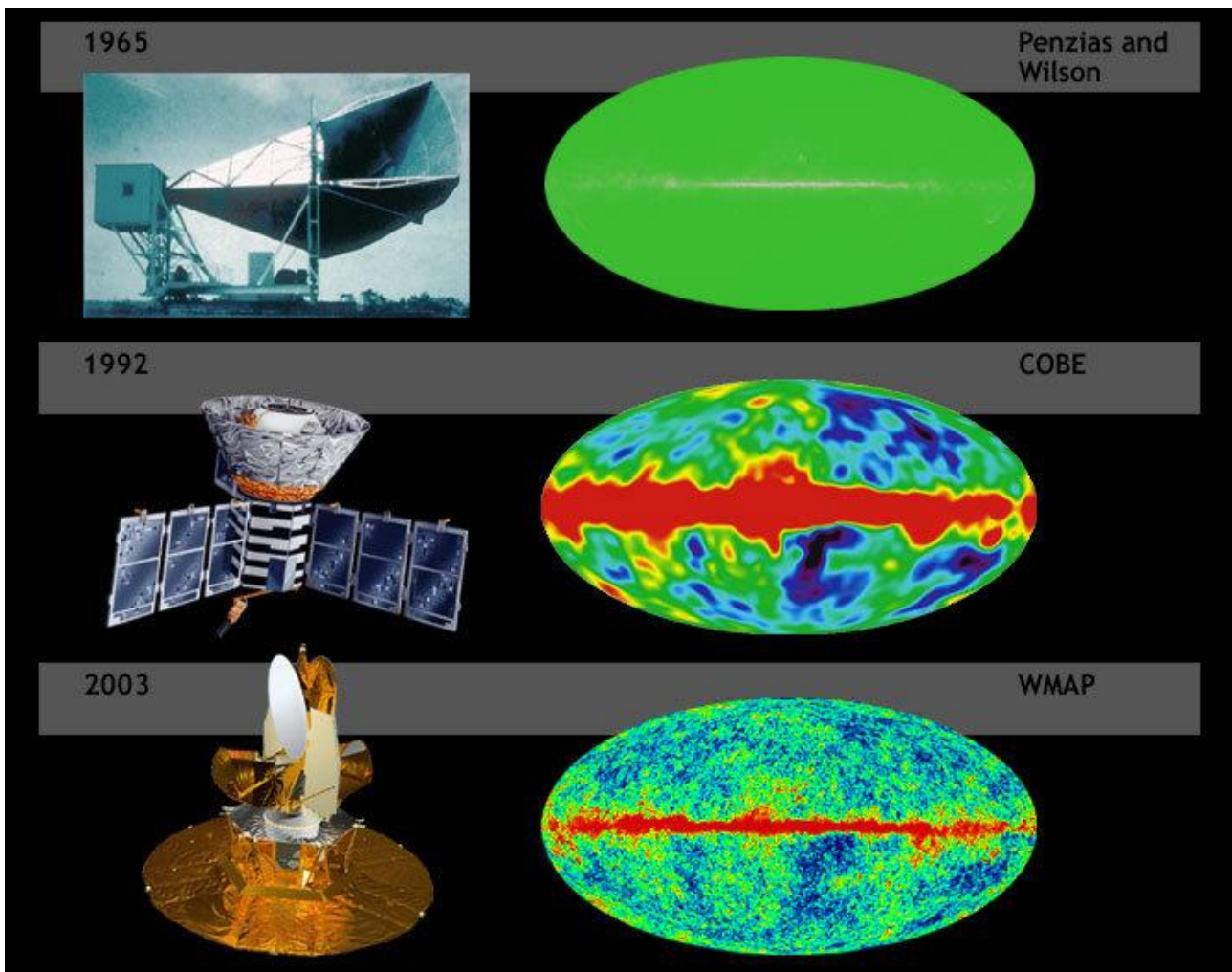


Fig. 11- Comparazione tra i risultati dei 3 esperimenti Penzias and Wilson(1965), COBE (1992) e WMAP (2003). Rif. NASA

2.5 IL PLANCK SURVEYOR

Planck Surveyor è una missione spaziale di terza generazione che segue COBE e WMAP. Rispetto ai primi due strumenti, implementa una serie di importanti migliorie per aumentare la risoluzione angolare e la sensibilità e nello stesso tempo controllare strettamente gli errori sistematici. Il satellite Planck è stato inviato nello spazio nel mese di Maggio 2009 dalla base di lancio di Kourou,

situata in America del Sud, vicino all'Equatore. Il lanciatore era un Ariane 5 ECA, l'ultimo modello dei lanciatori gestiti dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e dall'ente spaziale francese (CNES).

I punti sull'equatore terrestre hanno maggiore distanza dall'asse di rotazione della Terra e quindi una maggiore velocità di rotazione: ecco perché le zone equatoriali sono le più adatte per lanciare. Inoltre, le orbite geostazionarie sono orbite equatoriali a 36000 Km di altitudine che hanno un periodo di rivoluzione pari alla rotazione terrestre, quindi appaiono fermi sulla verticale di un punto sull'Equatore terrestre.

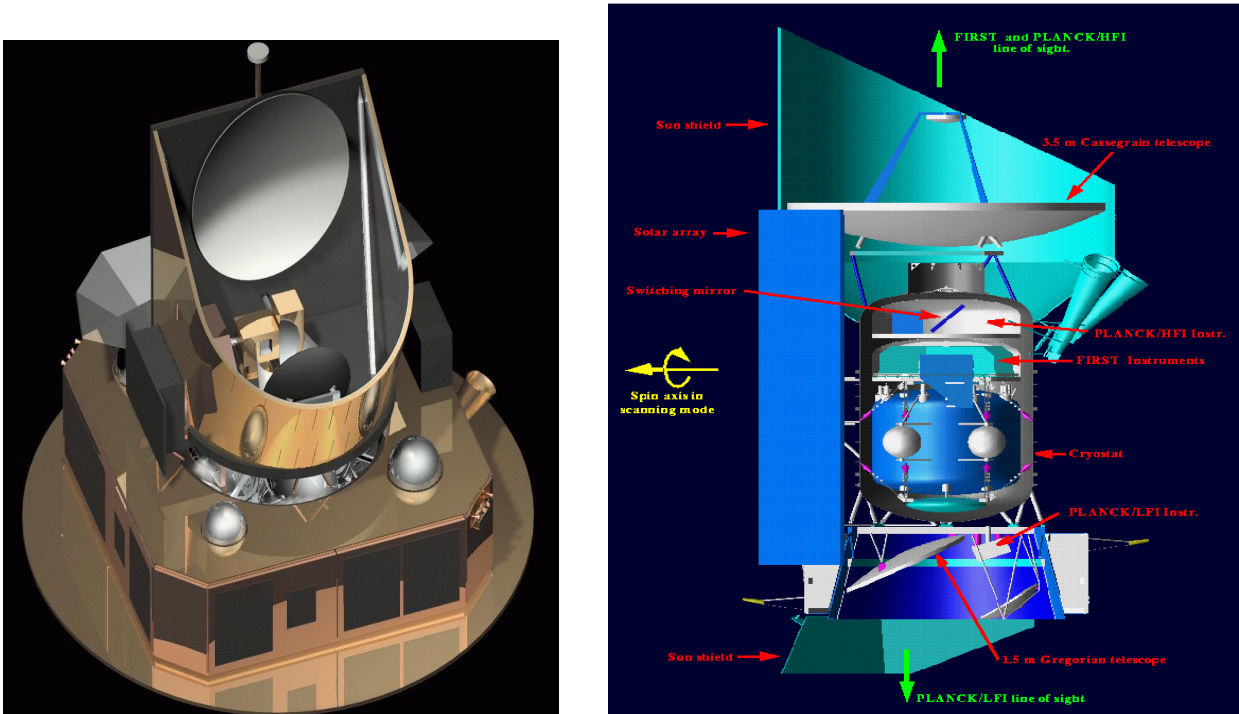


Fig.12 e 13- Rappresentazione dell'esperimento Planck Surveyor e relativo dettaglio dei componenti (Rif. Eather/gov)

L'esperimento Planck nasce dalla fusione di due progetti, COBRAS (poi diventato lo strumento Low Frequency Instrument, LFI) e SAMBA (diventato lo strumento High Frequency Instrument, HFI). Dopo che i due progetti sono stati selezionati, per motivi di efficienza e di risparmio dei costi sono stati riuniti in un unico satellite.

Il **Low Frequency Instrument** è un array di 22 radiometri a pseudo-correlazione che misurano il segnale proveniente dal cielo (attraverso il telescopio) confrontandolo con un carico termico alla temperatura di circa 4,5 K. Questo carico termico ha le caratteristiche emissive di un corpo nero e la tecnica differenziale consente l'abbattimento dell'impatto di fluttuazioni nel guadagno degli amplificatori nel segnale misurato. I 22 radiometri sono suddivisi in coppie collegate alla stessa antenna, dove ognuno misura una componente polarizzata. In questo modo è possibile studiare non solo le anisotropie di temperatura della CMB, ma anche le anisotropie di polarizzazione.

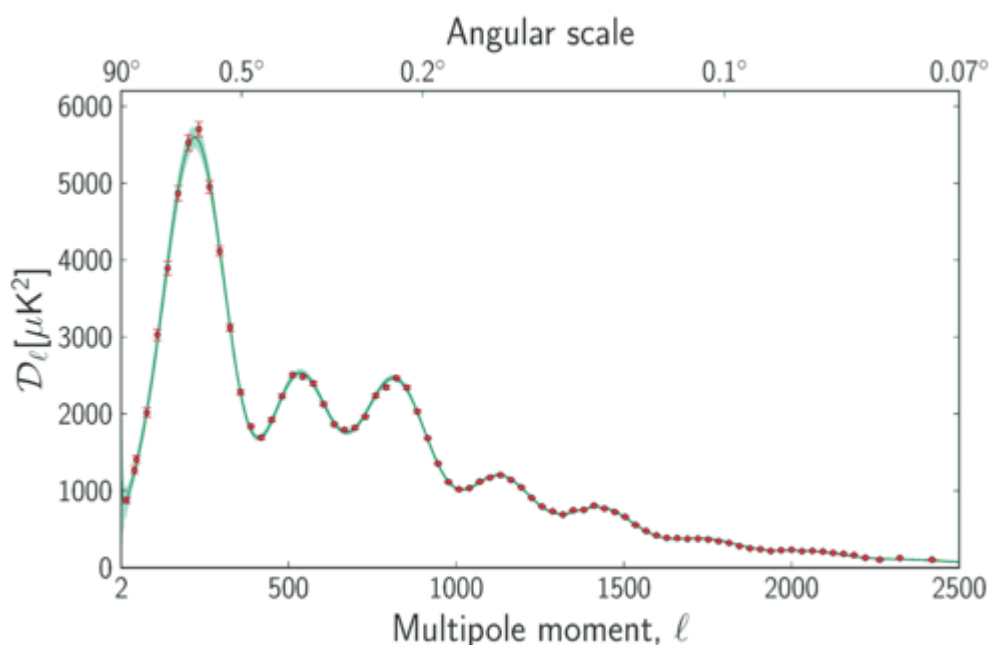


Fig.14- Spetto angolare ottenuto dalle osservazioni del satellite Planck. Rif. Andrew Jaffe, Imperial College London

I radiometri di LFI sono divisi in due parti: la parte *front-end* (contenente un primo stadio di amplificazione) è raffreddata a circa 20 K ed è collegata da una serie di guide d'onda alla seconda parte, detta di *back-end* (a 300 K), dove il

segnale viene amplificato ulteriormente e rilevato da un complesso sistema di acquisizione.

L'**High Frequency Instrument** è un array di bolometri raffreddati a 0,1 K che lavorano nello spettro di frequenza tra 100 e 850 GHz. Alcuni dei bolometri di HFI sono in grado di misurare anche le anisotropie di polarizzazione.

Grazie alla missione Planck è stato possibile ottenere una risoluzione fino a 10 minuti d'arco, raddoppiando il livello di dettaglio di WMAP, e raggiungendo una sensibilità in temperatura fino al milionesimo di grado Kelvin permettendo così di rivelare anche piccolissime fluttuazioni come è possibile verificare in Figura 15. In Figura 16, invece, una visione d'insieme che mette in risalto i risultati e le relative migliorie ottenute nel corso dei decenni dai 3 principali esperimenti spaziali costruiti al fine di indagare sulla radiazione cosmica di fondo. Un ulteriore successo ottenuto con Planck è legato alla precisa misurazione della polarizzazione della CBR, ovvero la direzione in cui oscilla il campo elettrico che costituisce la radiazione elettromagnetica.

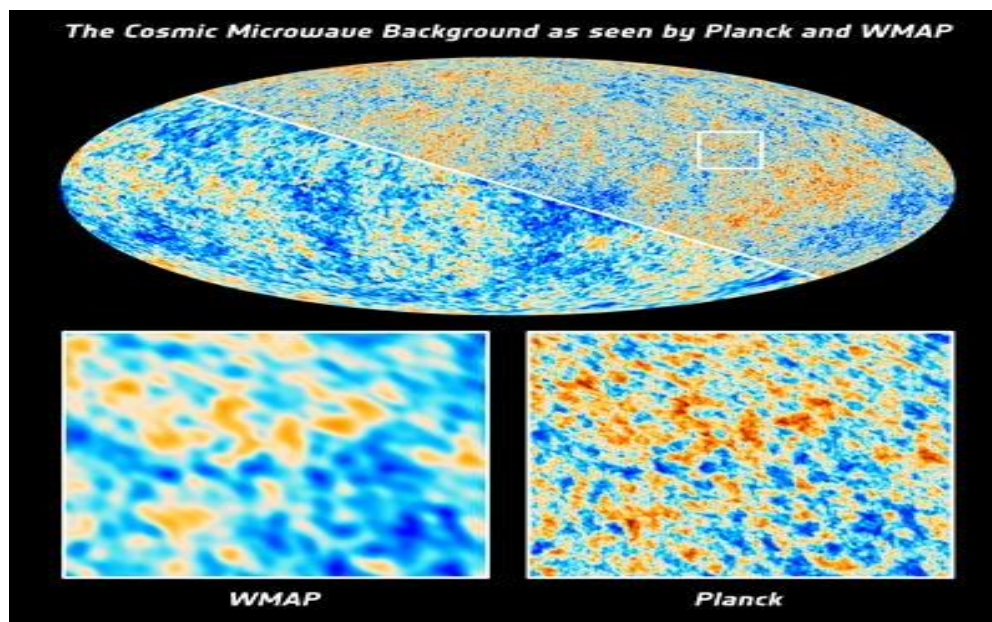


Fig. 15- Confronto della mappa della CMB ottenuta da WMAP e da Planck, utilizzando la stessa scala di colori. Rif. ESA and the Planck Collaboration; NASA / WMAP Science Team

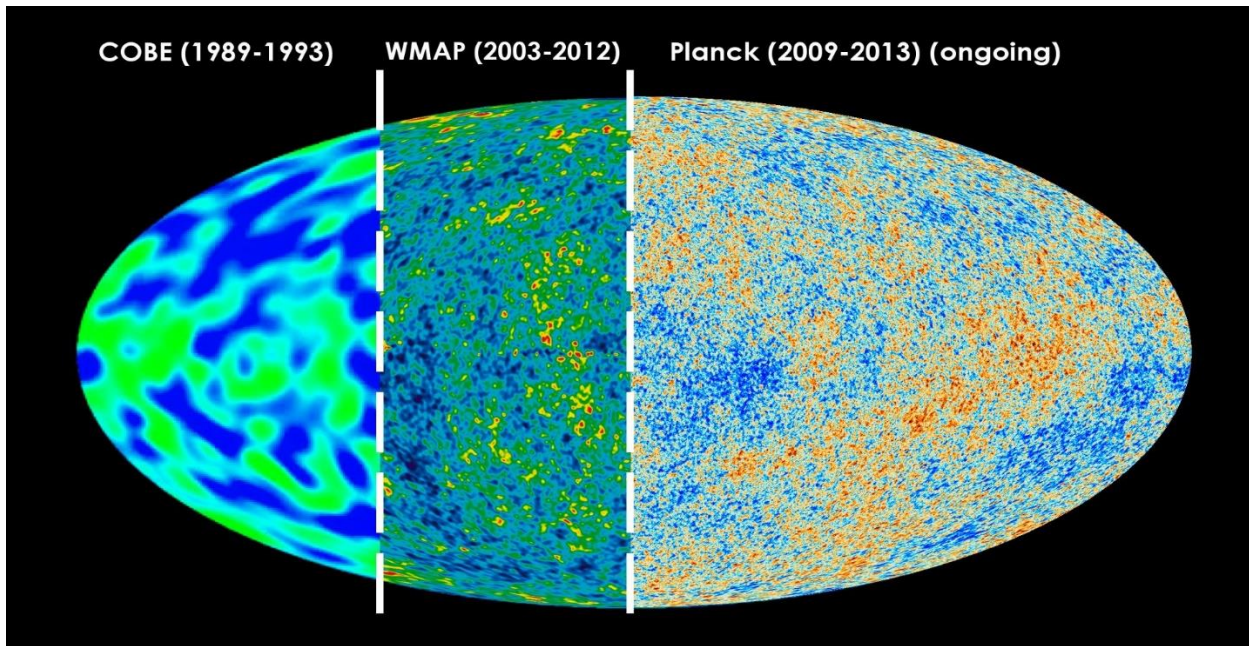


Fig.16 – Evoluzione scientifica e tecnologica nella mappatura della radiazione CMB con i 3 principali satelliti: COBE, WMAP e PLANCK. Rif. ESA

2.6 Altri Esperimenti e problemi connessi ad essi

Centinaia sono gli esperimenti che si sono susseguiti nel corso dei decenni a partire dalla scoperta nel 1964 della radiazione cosmica di fondo, sia da Terra che nello Spazio. Degni di considerazione per i risultati ottenuti sono gli interferometri terrestri, tra cui il telescopio **VSA**, **DASI** e **CBI**, che hanno fornito misurazioni delle oscillazioni con una maggiore precisione. DASI ha effettuato la prima rilevazione della polarizzazione della CMB e CBI ha fornito il primo spettro di polarizzazione E-mode.

I maggiori problemi che caratterizzano i vari esperimenti riguardano i ricevitori, le ottiche del telescopio e l'atmosfera. Sono state sviluppate molte tecnologie per i ricevitori a microonde, come HEMT, il superconduttore-isolante-superconduttore, il circuito integrato monolitico a microonde e il bolometro. Generalmente, gli esperimenti montano complicati sistemi di criogenia per mantenere bassa la temperatura dell'amplificatore. Altri esperimenti consistono

in uno o più interferometri, che si limitano a misurare le fluttuazioni spaziali dei segnali provenienti dal cosmo e sono insensibili alla temperatura media di fondo di 2,7 K.

Ulteriore problema riguarda il rumore $1/f$ intrinseco a tutti i rilevatori. Per minimizzarlo, i gruppi ottici solitamente usano sistemi di lenti e antenne a tromba alimentate. Anche l'atmosfera rappresenta un disturbo in quanto l'acqua assorbe le radiazioni a microonde (principio utilizzato nei forni a microonde): essendo la radiazione di fondo un segnale alla lunghezza d'onda delle microonde, questo problema ne rende difficoltosa l'osservazione da terra. Per questo, lo studio della CMB fa sempre più uso di esperimenti aerei o spaziali. Gli esperimenti a terra, invece, si trovano quasi sempre in posti secchi come le Ande cilene o il Polo sud.

CAPITOLO 3

3.1 Polarizzazione della radiazione cosmica di fondo

Un'altra fondamentale caratteristica osservabile della radiazione cosmica di fondo, oltre alla temperatura, è senza dubbio la sua polarizzazione. Essa deriva dal fatto che l'effetto Compton, che mantiene materia e radiazione accoppiate, ha come effetto quello di polarizzare la radiazione: un fotone colpisce un elettrone che oscilla nella direzione del suo campo elettrico, riemettendone un altro polarizzato nella direzione normale a quella di oscillazione. Se il campo di radiazione fosse isotropo, la polarizzazione di fotoni aventi direzione del campo elettrico perpendicolare tra loro, si bilancerebbe, dando un effetto netto nullo. Per far sì che vi sia un effetto di polarizzazione è necessario che siano presenti anisotropie di quadrupolo che si hanno principalmente nel momento in cui la sezione d'urto cala permettendo così la polarizzazione del campo di radiazione.

A differenza delle anisotropie di temperatura, quelle di polarizzazione hanno una direzione ben definita. Tralasciando gli aspetti matematici, è possibile definire due tipi di modi per descrivere completamente le fluttuazioni di polarizzazione:

- 1) **Modo E:** anisotropie di polarizzazione prodotte esclusivamente da perturbazioni scalari;
- 2) **Modo B:** anisotropie di polarizzazione prodotte solo da fluttuazioni vettoriali e tensoriali.

Un Modo E della polarizzazione è simmetrico, riflette le condizioni fisiche del punto in cui è stato emesso. Un Modo B della polarizzazione indica che la luce è stata distorta a seguito di interazioni con oggetti massicci man mano che si propaga nello spazio prima di raggiungere i nostri strumenti. I Modi B permettono di mappare la distribuzione di materia nell'Universo.

Delle anisotropie Modo E abbiamo già avuto molti riscontri già a partire dall'esperimento WMAP e BOOMERanG ma anche grazie a interferometri terrestri quali DASI, CBI e il telescopio VSA (Figura 18). DASI ha effettuato la prima rilevazione della polarizzazione della CMB e CBI ha fornito il primo spettro di polarizzazione Modo E con una prova convincente che è fuori fase rispetto allo spettro T-mode.

MODELLI DI POLARIZZAZIONE

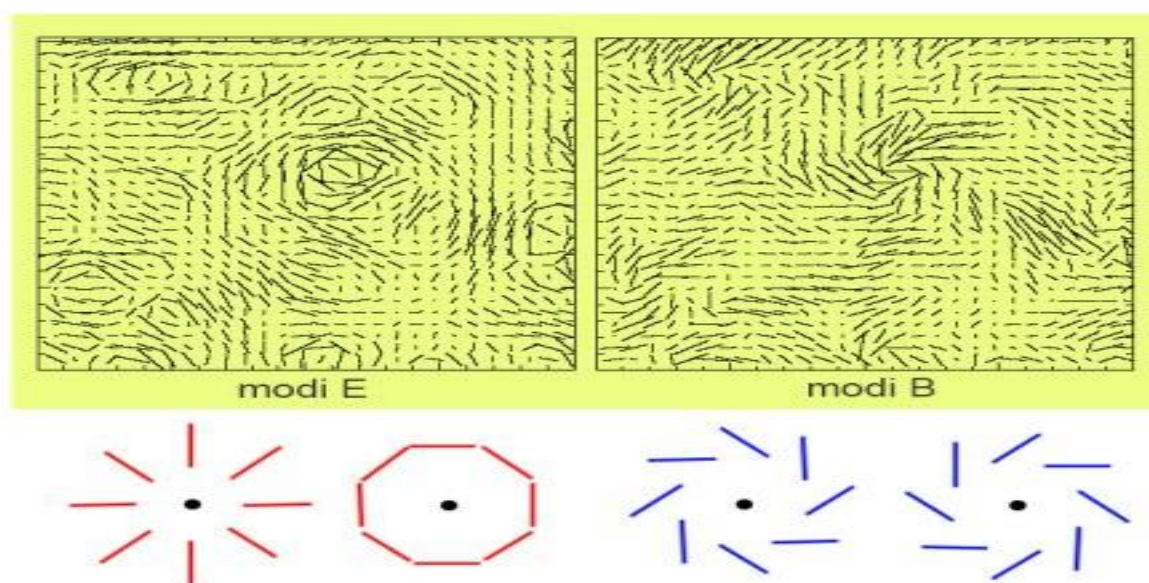


Fig.17- Polarizzazione E-mode e B-mode della radiazione cosmica di fondo. Rif. Wayne Hu

WMAP ha fornito misurazioni molto accurate della fluttuazione su grande scala angolare della CMB, non ha avuto una risoluzione angolare sufficiente per misurare le fluttuazioni su scala minore osservate da terra da altri esperimenti. Grazie a Planck e all'esperimento ACBAR le immagini della radiazione cosmica di fondo prodotte in accordo con quelle dal WMAP e confermano i dati precedenti, ma con una precisione maggiore.

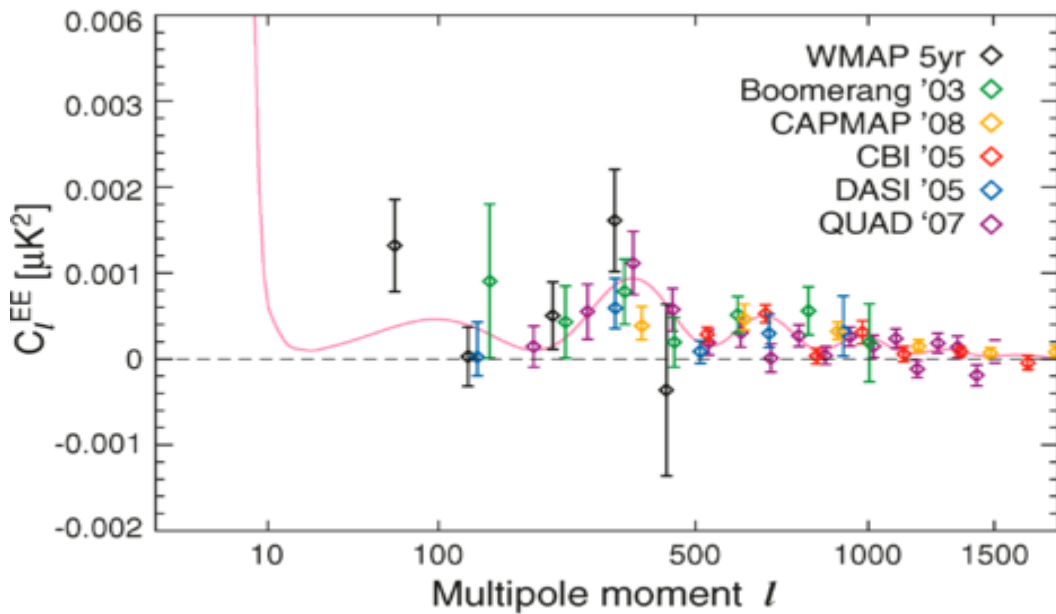


Fig.18- Misurazioni della polarizzazione di tipo E in termini di scala angolare (Rif. Nolta)

3.2 Prospettive Future

Per la misura della polarizzazione di tipo Modo B vari strumenti basati a terra, come il South Pole Telescope in Antartide, il telescopio Clover, l'Atacama Cosmology Telescope e il telescopio QUIET in Cile potrebbero fornire dati fondamentali, non ottenibili da osservazioni satellitari.

Uno già avviato, degno di menzione, è l'esperimento POLARBEAR: situato nel deserto di Atacama nel Cile settentrionale nella regione di Antofagasta ha lo scopo di misurare la polarizzazione del fondo cosmico a microonde. L'esperimento POLARBEAR è montato sul telescopio Huan Tran Telescope (HTT) all'osservatorio James Ax nella riserva scientifica di Chajnantor. L'HTT è situato vicino all'Atacama Cosmology Telescope sulle pendici del Cerro Toco ad un'altitudine di circa 5200 m. POLARBEAR misura i modi-B della polarizzazione generati dall'effetto di lensing gravitazionale dovuta alla distribuzione della materia nell'Universo. Dai primi dati ottenuti, sono state

analizzate le scale angolari più piccole le quali suggeriscono che non solo si possono misurare i B-mode della polarizzazione ma che si possono utilizzare per ricostruire la distribuzione della massa lungo la linea di vista.

Grazie all'esperimento QUBIC, invece, sarà possibile misurare i Modi B della polarizzazione della radiazione CMB su scala media. Nasce come progetto collaborativo tra Francia, Italia, Regno Unito e USA. Il primo modulo, nel 2017 sarà installato ad Alto Chorillo (Argentina) vicino al sito di LLAMA, mentre l'altro modulo sarà installato nella stazione antartica franco-italiana.

Altri progetti saranno sicuramente messi in cantiere affinché sempre più approfondita sarà la conoscenza scientifica della storia dell'Universo.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- 1) A.A. Penzias, R.W. Wilson, A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s, 1965
The Cosmic Microwave Background Radiation, 1996
- 2) Naselsky, Dmitry I. Novikov. Igor D. Novikov. The Physics of the Cosmic Microwave Background
- 3) Arny, Thomas T. (2002). Explorations: An Introduction to Astronomy (3rd ed.). Dubuque, Iowa: McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-241593-3.
- 4) Odenwald, S.; J. Newmark & G. Smoot (1998). "A study of external galaxies detected by the COBE Diffuse Infrared Background Experiment". *Astrophysical Journal*. 500 (2): 554 – 568. arXiv:astro-ph/9610238 Freely accessible. Bibcode:1998ApJ...500..554O. doi:10.1086/305737.
- 5) The Cosmic Microwave Background
How It Changed Our Understanding of the Universe, 2015, Rhodri
- 6) [About WMAP and the Cosmic Microwave Background](#) – Space.com
- 7) Dambeck, Thorsten (May 2009). "Planck Readies to Dissect the Big Bang". *Sky & Telescope*. 117 (5): 24 – 28. OCLC 318973848.

- 8) [Planck mission website](#)
- 9) [Planck science website](#)
- 10) [Planck operations website](#)
- 11) [Planck science results website](#)

- 12) <http://www.astronomia.com/2015/07/05/il-modello-cosmologico-standard-%CE%BBcdm-parte-iii-storia-e-proprieta-della-cbr/>

- 13) *Keating, B.; Moyerman, S.; Boettger, D.; Edwards, J.; Fuller, G.; Matsuda, F.; Miller, N.; Paar, H.; Rebeiz, G.; et al. (2011). "Ultra High Energy Cosmology with POLARBEAR". 1110: 2101. [arXiv:1110.2101](#). [Bibcode:2011arXiv1110.2101K](#).*

- 14) *The Polarbear Collaboration (October 2014). "[A Measurement of the Cosmic Microwave Background B-Mode Polarization Power Spectrum at Sub-Degree Scales with POLARBEAR](#)" (PDF). [The Astrophysical Journal](#). [arXiv:1403.2369](#). [Bibcode:2014ApJ...794..171T](#). [doi:10.1088/0004-637X/794/2/171](#). Retrieved November 16, 2014.*

RINGRAZIAMENTI

Ed eccoci nel faticoso e gioioso appuntamento dei ringraziamenti, in questa pagina ci sono le persone a cui devo tanto e che hanno contribuito in diversa maniera al raggiungimento di questo primo importante traguardo.

Doveroso e sincero è il ringraziamento a Mammina e Papino che mi hanno da sempre sostenuto e incoraggiato in tutte le battaglie della vita. Senza il loro insegnamento, sacrificio e coraggio non avrei mai raggiunto nessun obiettivo e non avrei nessuna forza propulsiva nel cavalcare e vincere le nuove sfide che mi attendono.

Un immenso grazie va alla mia Cicci. La sua dolce presenza e le sue cure da piccolo mi facevano sentire al sicuro, ora da grande è molto più che una semplice sorella: la mia fedele consigliera e confidente, la mia psicologa nei momenti duri ed il mio riso nei momenti belli. Lei è tutto ciò che sono e ciò che voglio essere, fin quando vivrò la porterò sempre con me nel mio cuore.

Un profondo grazie alla mia cara amica Antonella. Lei è la persona più bella e sincera che ho conosciuto in tutta la vita mia. Ricordo ancora con gioia il nostro primo incontro, eravamo per strada in via Zamboni, non avrei mai pensato che di lì in poi sarebbe nata una profonda e sincera amicizia. Ora che sono passati anni mi rendo conto di quanta fortuna ho avuto nel conoscerla, soltanto grazie a lei io ho finalmente raggiunto questo importante obiettivo. Ora che le nostre strade sembrano dividersi, voglio che sappia che potrà sempre contare su di me e che sempre avrà un posto d'onore nel mio cuore. Non potrei mai sdebitarmi del suo prezioso aiuto offertomi senza nulla in cambio. Per questo li dico un immenso GRAZIE.

Un grosso bacio al caro Giosef, un vero amico serio e leale. Con lui ho condiviso dei bei momenti e mi è sempre stato molto vicino, grazie a lui ho imparato tante nozioni; la più importante di tutte è quella di non darmi mai per vinto e lottare sempre per raggiungere gli obiettivi prefissati.

Un grazie al mio relatore prof. Moscardini che con i suoi utili consigli ha permesso di realizzare questo mio elaborato.

Durante questi anni ho incontrato delle belle persone che hanno dato il loro prezioso contributo alla mia crescita personale e universitaria, tra queste ricordo con affetto i miei amici del Morgagni a cominciare dal mio primo coinquilino You-You e poi Fabio, Compadre, Mary i quali mi hanno aperto a mondi ed esperienze fino ad allora sconosciute incitandomi a dare sempre il meglio e a credere di più nelle mie potenzialità, per questo gli porgo un sincero GRAZIE.

Un altro grande RINGRAZIAMENTO va al gruppo formato dal maestro Gigi, Tommy, OTriba e il Biuty, i quali non hanno mai fatto mancare il loro supporto e sostegno in svariate situazioni.

Un doveroso GRAZIE va ai ragazzi dell'ufficio Studenti Disabili, Gianluca, Umby, Paolo e tutti gli altri per il loro continuo e costante sostegno.

In ultima istanza Ringrazio tutti coloro che non ho nominato ma che in questi anni ho conosciuto ed in qualche modo mi sono stati vicino.