

# **GRUPPO ASTRONOMICO TRADATESE**

*Aprile 2008*

## **7° CORSO DI AGGIORNAMENTO PER INSEGNANTI**

### **8° Lezione: La NUOVA COSMOLOGIA**

**Rel. C.Guaita**

#### **LA COSMOLOGIA DOPO WMAP.**

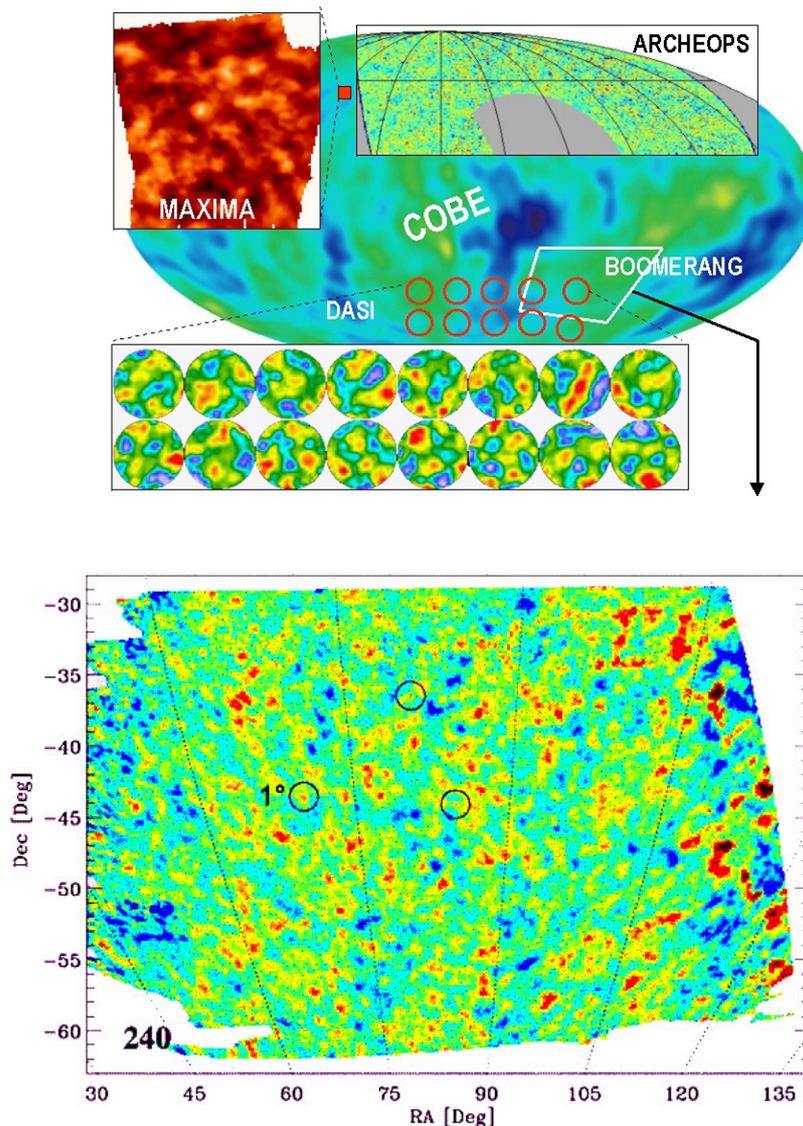
*L'origine dell' Universo alla luce delle nuove mappe del fondo cosmico di radiazione (Boomerang, WMap), (la materia e l'energia oscura, i multi-universi e la teoria delle stringhe).*

Per rispettare al massimo lo scopo didattico del corso, queste note si riferiscono particolarmente al problema della radiazione fossile a 3°K ed a tutti i complessi studi che sono stati intrapresi dopo la storica scoperta di Penzias a Wilson.

#### **1) LA RADIAZIONE FOSSILE PRIMA DI MAP.**

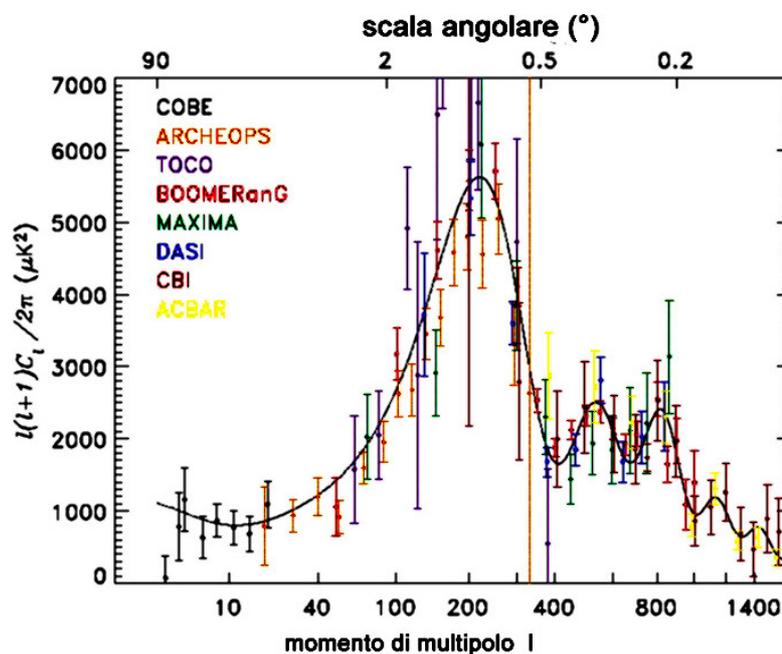
La scoperta, da parte di Penzias e Wilson nel 1965, che una RADIAZIONE FOSSILE A MICROONDE ( CMB= Cosmic Background Microwave radiation) pervade in maniera isotropa e omogenea tutto il Cosmo, ha fornito, come ben noto, la prima prova sperimentale e fondamentale del Big Bang. Si è dovuto aspettare però, fino al 1990 perché il satellite COBE (Cosmic Background Explorer) fornisse le prime misure quantitative (vedi anche Lettera GAT N.43 di Maggio-Giugno 1990). In particolare **due furono i risultati principali di COBE** : 1) la misura dello spettro energetico della CMB tra 1 cm e 100 microns (con lo spettrometro FIRAS=Far Infrared Absolute Spectrometer) che è risultato spettacolarmente coincidente con la curva teorica di un corpo nero a 2,73 °K (si tratta dell' attuale temperatura dell' Universo, nato da una sfera di fuoco di 10 miliardi di °K e poi raffreddatosi in conseguenza di un'espansione che dura da circa 14 miliardi di anni); 2) La scoperta di anisotropie su grande scala della CMB, ossia di minime deviazioni nella temperatura media in grado di spiegare la formazione delle galassie e la loro distribuzione (lo strumento adibito era il DMR=Differential Microwave Radiation, in grado di misurare differenze di temperatura di qualcosa come 1\10000 °K). In effetti, dopo 4 anni di elaborazioni dei dati, **COBE ha per la prima volta scoperto chiare anisotropie nel fondo cosmico di radiazione**. Per quanto di importanza basilare, queste anisotropie (leggi: zone a maggiore o minore temperatura) apparvero immediatamente troppo ampie (diciamo di almeno dieci volte) per giustificare anche le maggiori strutture cosmiche note (leggi: ammassi e superammassi di galassie). Ben presto ci si rese conto che questo era dovuto alla risoluzione decisamente troppo scarsa dello strumento DMR ( 7-10° ! ) : COBE, insomma, aveva 'visto' irregolarità oggettive nella CMB, ma in maniera molto 'sfocata', quindi senza riuscire a coglierne i dettagli più minuti. Dettagli che, secondo i calcoli teorici più raffinati, dovrebbero avere dimensioni angolari di circa 1°. Il perché è complesso ma possiamo tentare di farne una semplificazione. Dunque, finché la temperatura dell' Universo primordiale era > 3000°K, la radiazione NON poteva sfuggire in quanto diffusa dal mare di particelle atomiche ( elettroni e protoni) che non si erano ancora unite a formare i primi atomi neutri (idrogeno ed elio) : quindi l' Universo era opaco e per noi 'invisibile'. L' Universo divenne invece 'trasparente' alla radiazione (quindi per noi 'visibile') quando elettroni e protoni cominciarono a 'ricombinarsi' in atomi neutri : questo fu possibile solo 400.000 anni dopo il Big Bang, perché solo allora la temperatura divenne sufficientemente

bassa ( $<3000^{\circ}\text{K}$ ) da permettere l'unione di elettroni e protoni in atomi neutri. La luce, dunque, dovette 'viaggiare' per circa 400.000 anni prima di poter filtrare liberamente. Questo significa che le dimensioni assolute delle anisotropie del fondo cosmico devono essere, in media, proprio di circa 400.000 a.l. (anni luce): ebbene, si può dimostrare che 'oggetti' di queste dimensioni devono mostrarsi ai nostri occhi ('distanti' ormai circa 14 miliardi di anni) sotto una dimensione angolare di  $1^{\circ}$ . Sono però possibili anche piccole porzioni di anisotropie di taglia minore, strettamente legate ai principali parametri cosmologici (per esempio materia visibile, materia oscura, rapporto materia/radiazione, ecc). Bisogna inoltre ricordare che sia nel momento della 'ricombinazione' sia nel momento della formazione delle prime stelle (che hanno ri-ionizzato l'ambiente arricchendolo di elettroni liberi) la CMB deve essere stata in piccola parte polarizzata (ossia costretta ad oscillare su un solo piano) dagli elettroni liberi presenti: la ricerca di questa polarizzazione diventa quindi di grande interesse, perché aggiunge preziose informazioni alla storia dell' Universo primordiale. Da qui uno sforzo tecnologico crescente, negli ultimi 10 anni, per creare strumenti sempre più sofisticati sia in sensibilità, sia in risoluzione angolare, sia nella estensione di cielo analizzata.



Uno dei primi esempi fu **CAT** (Cosmic Anisotropy Telescope), un sistema di tre antenne che ha lavorato in maniera sperimentale presso l'Università di Cambridge dal Marzo'94 all'Aprile '95. CAT fece da prototipo per **VSA** (Very Small Array) che, sempre a cura dell' Università di Cambridge, venne installato all' inizio del 2000 a Tenerife (sul Teide a 2400 metri di altezza). Si trattava di un sistema di 14 antenne che per un anno (Sett.2000-Sett.2001) ha lavorato su tre regioni di  $8 \times 8^{\circ}$ , raggiungendo una risoluzione di circa  $0,5^{\circ}$ . Nel 1997 è stato introdotto dall'Università di Princeton un altro progetto denominato **MAT** (Mobil Anisotrope Telescope). Si trattava di un telescopio di 85 cm (preventivamente collaudato da due voli in pallone l'anno precedente sotto la sigla di QMAP) trasportato a 5.500 m di altezza sul Cerro Toco, nel deserto cileno di

Atacama (a  $-23^{\circ}\text{S}$  e  $67^{\circ}$  Ovest) : esso ha esplorato un'ampia zona anulare di cielo attorno alla declinazione celeste  $-15^{\circ}$ , arrivando alla conclusione che **le anisotropie presenti nella CMB sembravano statisticamente addensarsi attorno alle dimensioni medie di  $1^{\circ}$** . Nel Dicembre 2000 il Caltech, sempre in pieno deserto di Atacama, a 5080 m di altezza, ha confermato e migliorato questi risultati grazie allo strumento **CBI** (Cosmic Background Images), un complesso di 13 radioantenne in grado di lavorare tra 26 e 36 GHz. Ben presto, però, ci si è resi conto che per ottenere risultati ottimali era necessario osservare da postazioni assolutamente secche, fredde e dotate di grande trasparenza: da qui la scelta del continente antartico e/o di palloni aerostatici. Il primo esperimento antartico fu allestito dalla Cornegy Intitution al polo Sud presso la base Amundsen-Scott per quattro estati dal 1993 al 1997: denominato **PYTHON**, era costituito da un telescopio di 0,75 metri in grado di mappare, prima a 90 GHz e poi a 43 GHz, un centinaio di gradi quadrati di cielo con una risoluzione variabile tra  $1^{\circ}$  e  $10^{\circ}$ . Nel 1998-99 Python è stato sostituito da **VIPER**, un telescopio da 2 metri in grado di esaminare regioni di  $10^{\circ}\times 10^{\circ}$  con una risoluzione massima di  $0,4^{\circ}$ . I risultati di queste osservazioni hanno per la prima volta fatto sospettare, nella distribuzione delle anisotropie della CMB, oltre al picco principale centrato attorno a  $1^{\circ}$ , **anche la presenza di picchi secondari su scale minori**.

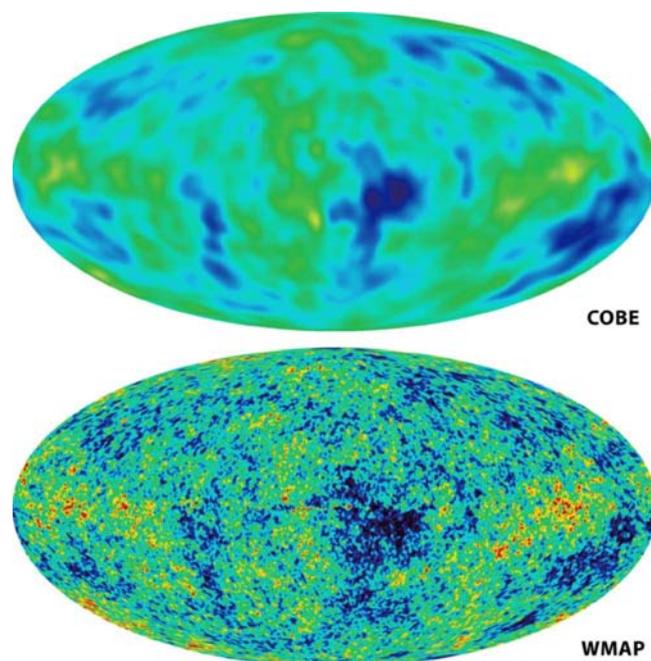


Si arriva così al famoso esperimento **BOOMERanG** (Ballon Observation of Millimeter Extragalactic Radiation and Geomagnetism), frutto del lavoro di un numeroso gruppo internazionale di scienziati, guidati dall'italiano Paolo De Bernardis (Univ. di Roma): lo strumento, basato su uno specchio di 1,3 metri nel cui fuoco sono collocati alcuni rivelatori ultrasensibili a 4 diverse frequenze (90, 150, 240 e 410 GHz), ha volato appeso ad un pallone nella stratosfera antartica, a 38 km di altezza, una prima volta il 28 Dicembre '98 e una seconda volta il 29 Dicembre 2002. I 3000 gradi quadrati (3% di tutto il cielo, attorno a  $-45^{\circ}$  di Latitudine e 5h di Ascensione retta) mappati da BOOMERanG nel Dic. '98 hanno mostrato in maniera definitiva la presenza, nelle anisotropie della CMB, di un picco principale centrato a  $1^{\circ}$  e di una serie di picchi secondari centrati a dimensioni inferiori, in perfetta corrispondenza con quanto richiesto dalla teoria. Da questi picchi secondari è possibile dedurre alcuni importanti parametri cosmologici ma, purtroppo, la risoluzione di BOOMERanG non era sufficiente per un vero studio quantitativo in questo senso. Questi dati vennero confermati quasi in contemporanea dall'esperimento **MAXIMA** (Millimeter Anisotropy Experiment Imaging Array), un telescopio di 1,3 metri a bordo di un pallone, con cui l'Università della California ha mappato una piccola regione di cielo di  $5^{\circ}$  quadrati nell'Agosto '98 e nel Giugno '99. Mancava a questo punto ancora una disamina delle anisotropie della CMB nella regione polare Nord. Così il CNRS francese ha allestito l'esperimento **ARCHEOPS**, costituito da un telescopio da 1,5 metri + 21 rivelatori ultrasensibili che, partendo dalla base scandinava di Kiruna, ha volato per due volte in pallone oltre i 30 km di altezza nella notte artica. Il primo volo è partito il 29 Gennaio 2001 ed ha mappato in 7,5 h il 20% di tutto il cielo attorno al polo Nord a 4 differenti frequenze (143, 217, 353 e 545 GHz). Il secondo volo, partito il 7 Febbraio 2002, ha mappato in 12 h il 30% del cielo settentrionale da 400 microns a 2 mm. In entrambi i casi la risoluzione di soli  $0,5^{\circ}$  ha fornito ampia conferma degli esperimenti precedenti. Mancava però ancora un dettaglio: la ricerca di

qualche debole polarizzazione nella CMB, che, come accennato in precedenza, avrebbe dovuto prodursi al momento del disaccoppiamento tra materia e radiazione. Il primo tentativo, con esito in realtà incerto, fu condotto dall' Università del Wisconsin con l'esperimento **POLAR** (Polarization Observation of Large Angular Region) tra il 10 marzo e il 29 maggio 2000. Il secondo tentativo, questa volta coronato da successo, è iniziato nel Giugno 2001, presso la basa antartica di Amundsen-Scott, per conto dell' Università di Chicago. Denominato **DASI** (Degree Angular Scale Interferometer) questo esperimento, costituito da 13 antenne da 20 cm operanti tra 26 e 36 GHz, ha lavorato per 271 giorni durante i due inverni australi del 2001 e 2002, su due campi di 3,4° nei pressi del polo sud celeste. Per la prima volta è stata **accertata con alto grado di confidenza una polarizzazione di qualche % nella CMB**, proprio come ci si doveva aspettare nel caso che essa si fosse prodotta nel momento in cui la radiazione ha cominciato ad attraversare liberamente il Cosmo interagendo con gli ultimi elettroni che ancora non si erano ricombinati. In definitiva, dunque, le misure ad alta risoluzione delle anisotropie della CMB hanno ricevuto molteplici conferme, seppur su regioni di cielo molto ristrette.

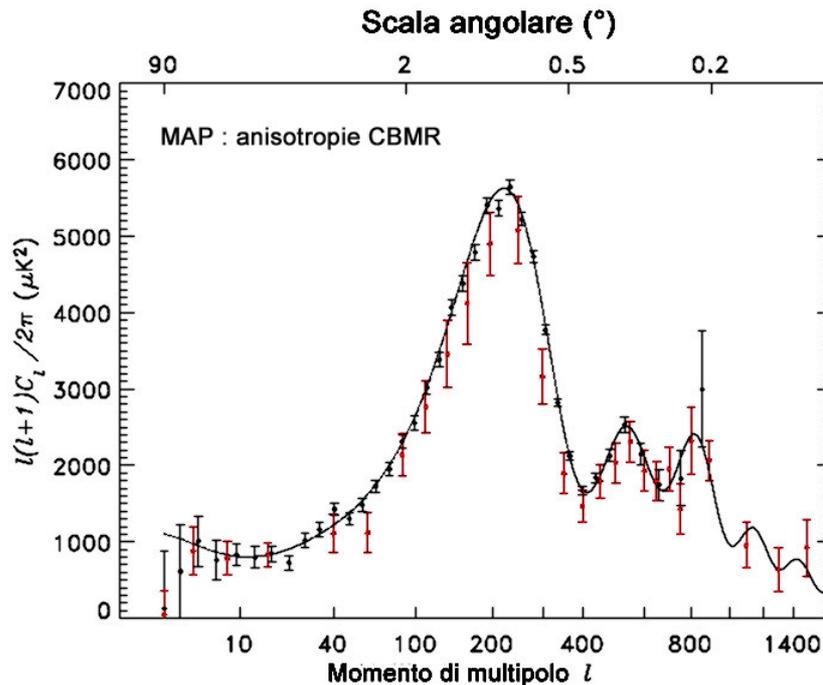
## 2) L 'UNIVERSO DI MAP.

Era a questo punto necessario che misure dotate di grande affidabilità venissero estese a tutto il cielo, in modo che la mappatura prodotta dal satellite COBE nel 1991 potesse essere ripetuta con una risoluzione almeno 10 volte migliore. Quindi era necessaria una nuova missione satellitare dalle caratteristiche assolutamente innovative : è così nato **MAP** (ossia Microwave Anisotropy Probe), un satellite dotato di uno specchio di 1,4x1,6 m e sensori sensibili a 5 bande spettrali tra 23 e 94 GHz, che la NASA ha lanciato nello spazio con un missile Delta II il 20 Giugno 2001 e collocato a 1,5 milioni di km dalla Terra nei pressi del punto lagrangiano L2 (scelto per evitare interferenze sia terrestri che solari). Costo di tutta la missione : 'solo' 150 milioni di \$ (come dire la metà di una giornata di guerra in Iraq...). Divenuto operativo, il satellite ha assunto la denominazione di WMAP, in onore di David. T. Wilkinson, emerito professore di Princeton e padre di COBE e MAP, prematuramente scomparso il 5 Settembre 2002. Grazie alla straordinaria risoluzione di soli 0,3° **MAP è riuscito a mappare le anisotropie della CMB su tutto il cielo, ritrovandovi non solo il picco principale a 1°, ma anche, con precisione prima sconosciuta (circa 1%) , almeno quattro picchi di anisotropie inferiori**, da cui dedurre alcuni fondamentali parametri cosmologici. I risultati del primo anno di osservazione (ne sono previsti altri tre) sono stati presentati dalla NASA a Washington lo scorso 11 febbraio 2003, in una conferenza stampa che ha letteralmente stupefatto tutti gli scienziati che nel mondo si occupano di Cosmologia. Contemporaneamente ben 11 articoli scientifici sono stati pubblicati ufficialmente sull' *Astrophysical Journal*.

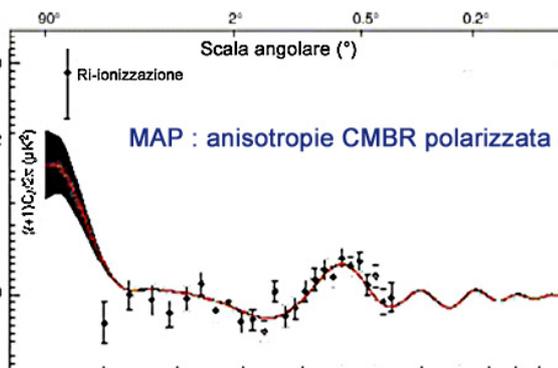


Cominciamo col dire che la collocazione attorno alle dimensioni di 1° delle anisotropie principali della CMB (non una scoperta ma una decisiva conferma di misure precedenti) dimostra che l' **Universo è piatto**, quindi che la densità della massa totale + energia è esattamente uguale alla cosiddetta densità 'critica', che

permetterà all' Universo di espandersi per sempre in maniera omogenea. Una maggior quantità di massa + energia (quindi un Universo destinato a ri-contrarsi nel lontano futuro) avrebbe invece 'dilatato' a dimensioni  $>1^\circ$  le anisotropie principali della CMB. Un picco principale centrato a dimensioni angolari  $<1^\circ$  avrebbe invece significato una densità di materia + energia nettamente inferiore a quella critica, quindi un Universo in espansione sempre più veloce. Per quanto riguarda i **picchi delle anisotropie secondarie**, si può dire che la loro posizione ed intensità (rispetto al picco principale) sono una indicazione della quantità di materia 'barionica', cioè ordinaria (essa, per esempio, aumenta al diminuire dell' intensità del 2° picco), e di materia 'non barionica' ossia oscura : ebbene, MAP ci dice 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 misteriosa forma di Energia oscura, che dovrebbe produrre una espansione irreversibile. **L'espansione iniziò esattamente 13,7 miliardi di anni fa**, essendo possibile calcolare, per la costante di Hubble  $H_0$  un valore di circa  $71 \text{ km}\backslash\text{sec.megaparsec}$ .



Ma, forse, **il risultato più innovativo di MAP riguarda la prima misura delle anisotropie su GRANDE SCALA della parte POLARIZZATA della CMB**, da cui è stato possibile dedurre il momento della 'ri-ionizzazione', ossia l'era di formazione delle prime stelle. Intanto, che le prime stelle abbiano in parte polarizzato (ossia costretto ad oscillare su un piano prefissato) la CMB è spiegabile se si pensa che la nascita delle prime stelle ha prodotto una nuova ionizzazione dell'idrogeno cosmico, con la liberazione di elettroni contro cui, appunto, la CMB si è polarizzata. E' stato davvero sorprendente riscontrare come le dimensioni delle anisotropie della CMB polarizzata siano decisamente minori delle previsioni, concentrandosi attorno a  $0,7^\circ$  : questo significa che **le prime stelle si formarono solo 200 milioni di anni dopo il Big Bang**, quindi 800 milioni di anni prima di quanto si pensasse.



Proprio sul perfezionamento delle misure di polarizzazione è proseguito il lavoro di MAP negli ultimi anni. In attesa di PLANCK (2009), successore di MAP....