

La radiazione cosmica di fondo

L'osservazione dell'universo "nel suo insieme"



Federico Pasqualotto
V liceo scientifico sez. A
Collegio Ballerini
Anno scolastico 2008 – 2009

Indice

Introduzione	3
Capitolo 1. Coincidenze spiegate: ovvero come sia possibile rivoluzionare la scienza con un'antenna.	5
1.0: <i>Il fondo cosmico di microonde</i>	5
1.1: <i>Penzias, Wilson e la casuale scoperta</i>	5
1.2: <i>La vera natura della radiazione di fondo: una prova schiacciante a favore del "Big bang"</i>	8
1.3: <i>Premesse: il redshift cosmologico, il fattore di scala, la densità di massa-energia di una componente di fotoni</i>	10
1.4: <i>Il passaggio dall'era dominata dalla radiazione all'era dominata dalla materia</i>	12
1.5: <i>La liberazione della radiazione cosmica di fondo e la sua evoluzione</i>	13
Capitolo 2. La cosmologia con il fondo cosmico: ovvero l'utilità di un rumore radio dai più profondi recessi dell'universo.	17
2.0: <i>L'anisotropia della radiazione cosmica e l'universo primordiale</i>	17
2.1: <i>Scale angolari e spettro di potenza della radiazione cosmica di fondo</i>	18
2.2: <i>La determinazione di alcuni parametri cosmologici a partire dalla misurazione della radiazione cosmica di fondo</i>	22
Capitolo 3. Il satellite Planck e i recenti sviluppi: ovvero in che modo un telescopio riesca a vedere più lontano degli altri.	27
3.0: <i>Nuovi strumenti, nuove prospettive</i>	27
3.1: <i>Il satellite Planck: le specifiche e la missione</i>	30
3.2: <i>Gli esperimenti: High Frequency Instrument e Low Frequency Instrument</i>	32
Conclusione. Enigmi cosmici: ovvero la necessità di spiegare il 96 per cento della materia nell'universo.	36
Bibliografia, sitografia e fonti fotografiche	39

In copertina: Vincent Van Gogh, Sternennacht (Notte stellata), olio su tela, 73x92 cm, 1889, Museum of Modern Art, New York

Introduzione

“Chi ha raggiunto lo stadio di non meravigliarsi più di nulla dimostra semplicemente di aver perduto l'arte del ragionare e del riflettere”¹

Sin dal primo impatto col mondo della Fisica, essa mi ha catturato. Il primo incontro avvenne durante il terzo anno di liceo quando, in visita all'Università degli Studi di Milano per partecipare ad un laboratorio di Biologia, entrammo *en passant* nel Dipartimento. L'esperienza fu abbastanza particolare, poiché davanti a me si parò quella che sembrava una grossa scatola metallica, posta in fondo all'atrio. In un primo momento, fui tentato di capire il significato della suddetta scatola, ma anche leggendo la targhetta ad essa appesa, la quale recava scritto “camera di Wilson”, non vi riuscivo.

Così, sebbene possa apparire alquanto strano, il Dipartimento ha iniziato ad esercitare su di me un grande fascino ed un grande ascendente, ponendomi questioni che, al tempo, ritenevo piuttosto essenziali per la mia esistenza: che cos'era quella enorme scatola? E poi, che cosa si parava dietro la facciata di quel mondo?

L'anno seguente, in quarta scientifico, scoprii che la grande scatola serviva al rilevamento di particelle atomiche di alta energia, le quali lasciavano nel gas soprassaturo contenuto in essa delle tracce in guisa di piccole gocce, piegate a piacere dai campi magnetici. Ebbi inoltre la fortuna di partecipare a dei seminari di Fisica moderna, la quale esercitava su di me un fascino alquanto marcato; ma l'evento più “drammatico” fu la partecipazione ad un laboratorio di tre giorni, nel quale prendemmo in considerazione la radiazione cosmica di fondo. Dopo un pomeriggio introduttivo, in cui ci vennero spiegati molti fatti teorici, ci preparavamo per due pomeriggi di sperimentazione, grazie alla quale ingenuamente ritenevo avremmo misurato proprio quella radiazione. Fummo invece introdotti in una piccola sala nella quale rimanemmo per tutto il pomeriggio a testare le caratteristiche angolari di un'antenna.

Un'attività poco poetica. Ed in effetti, la Fisica pare a molti una disciplina poco poetica: a volte, come in quella circostanza, lo è parso anche a me. Ma ritengo con forza che essa, nonostante tutto, assuma un valore al di là dello squallore del mero aspetto numerico.

La mia ricerca prende le mosse proprio da quel pomeriggio in cui testai l'antenna. Essa, benché in se stessa sia poco poetica, fa parte di una entusiasmante storia che dura da più di quarant'anni, in cui io mi trovai, quasi senza accorgermene, immerso. Sebbene sia anch'essa *storia di vermicelli*², ho ritenuto opportuno approfondirla, per le notevoli conseguenze da essa derivanti, di ordine fisico in primo luogo, ma anche di ordine cosmologico e, in qualche misura, filosofico. Essa è la storia di una forma di “luce” a microonde che da 300.000 anni a partire dal *Big Bang* pervade uniformemente l'universo. Tramite la sua analisi, si è giunti a notevoli conclusioni in campo astronomico, soprattutto negli ultimi anni, con l'adozione di sofisticate tecnologie.

Nell'approfondimento ho scelto pertanto di procedere con un'impostazione quadripartita: inizialmente si tratterà della scoperta della radiazione cosmica di fondo e della sua comprensione a livello



Figura 0: la camera di Wilson (camera a bolle) conservata nell'atrio del Dipartimento di fisica

¹ MAX PLANCK, *Scientific Autobiography and Other Papers*, New York 1949, PHILOSOPHICAL LIBRARY

² LUIGI PIRANDELLO, *Il fu Mattia Pascal*, Milano 1904, TREVES

teorico. In secondo luogo, si prenderanno in considerazione le notevoli conseguenze a livello cosmologico, nella conoscenza dell'universo nel suo insieme, assunte dalla radiazione stessa. Quindi si procederà ad una concisa esposizione del satellite *Planck*, frutto di diciassette anni di lavoro da parte di un *team* internazionale di fisici, tra cui alcuni dell'Università degli Studi di Milano. Infine si delineeranno dei cenni sui problemi ancora aperti nel nostro modello fisico dell'universo, tesi ad evidenziare come l'attuale modello del cosmo sia ancora a livelli di forte incompletezza.

Nell'approfondimento si sono rivelati di fondamentale importanza i contributi dedotti dall'esperienza di laboratorio presso l'Università degli Studi di Milano, nel febbraio 2008. Un notevole apporto è stato inoltre fornito da alcuni aggiornamenti sulla missione *Planck* che ho potuto ricevere subito dopo il suo lancio (avvenuto il 14 maggio 2009), assistendo ad una conferenza divulgativa di Marco Bersanelli, il 23 maggio 2009.

Capitolo 1. Coincidenze spiegate: ovvero come sia possibile rivoluzionare la scienza con un'antenna.

1.0: Il fondo cosmico di microonde

L'astronomia è stata caratterizzata, sin dai suoi albori, da uno strumento il quale ha completamente mutato, in seguito alla rivoluzione scientifica, la nostra concezione dell'universo intero: il telescopio. In tal modo, la classica immagine dell'astronomo, assorto a scrutare il buio della notte, si ripete anche in tempi moderni. Basti pensare ad Edwin Hubble, a cui si devono le approfondite ricerche sull'espansione dell'universo; egli scoprì la famosa "legge di Hubble" misurando dal celebre telescopio Hale di monte Palomar, in California, nel 1929.

Nella seconda parte del Novecento, tuttavia, si è verificata un'evoluzione tecnologica a ritmi frenetici. Anche l'astrofisica e l'astronomia hanno risentito dell'epocale cambiamento, così che l'astronomo non è più colui che, affascinato, osserva il cielo con un telescopio; piuttosto, una sua raffigurazione tipica potrebbe essere quella che lo ritrae di fronte allo schermo di un computer (ciò non toglie, tuttavia, che egli sia comunque affascinato). La tecnologia ha infatti permesso di andare a sondare lunghezze d'onda che vanno al di là del visibile, rendendo così l'uomo capace di vedere anche là dove l'occhio umano avverte il buio assoluto.

La trattazione dell'universo svolta utilizzando tali tecniche risulta essere alquanto peculiare: non si osserva la luce emessa nelle ultime centinaia di milioni di anni da galassie più o meno simili alla nostra, ma si scandagliano forme di radiazione impercettibili all'occhio umano, come la radiazione cosmica di fondo. In quanto invisibile agli occhi, essa non venne scoperta prima del 1965: l'umanità si accorse della sua presenza per un evento fortuito.



Figura 1.1: E. Hubble mentre osserva il cielo

1.1: Penzias, Wilson e la casuale scoperta

La compagnia telefonica *Bell*, nel 1964, aveva commissionato la ricerca sulle comunicazioni con un satellite (il satellite *Echo*); per la ricezione di dati dal satellite il *Bell Telephone Laboratory* disponeva di un'un'antenna, a forma di "corno", di circa 6 metri di diametro. Tali caratteristiche la rendevano ideale per l'osservazione degli oggetti stellari nelle frequenze delle onde radio.

Due radioastronomi, Arno A. Penzias e Robert W. Wilson, cominciarono ad utilizzare l'antenna per misurare l'intensità delle onde radio ad elevate latitudini galattiche, ossia approssimativamente in maniera perpendicolare al piano della Via Lattea.

Questo tipo di misurazione risulta essere alquanto ostico. Le onde radio provenienti dalla nostra galassia possono essere considerate come una sorta di "rumore", paragonabile a quel rumore "bianco" presente nel momento in cui si sintonizza una radio analogica su una frequenza dove non si verifica alcuna ricezione. Risulta pertanto difficile discernere la misura cui si è interessati da tutti i fattori che producono un "rumore" simile, i quali tuttavia non rientrano nell'emissione del corpo celeste. Ad esempio, al "rumore" della galassia (che si vuole misurare) si aggiungono quello prodotto dai circuiti interni dell'antenna, quello prodotto dall'atmosfera, e molti altri fattori indesiderati.

Penzias e Wilson desideravano avere una misurazione dell'emissione radio della nostra galassia, ovverosia del cielo stesso (e non di un particolare oggetto). Pertanto si doveva procedere alla sistematica eliminazione di ogni forma di segnale che proveniente non dal cielo, ma da fattori esterni, o interni all'antenna.

Alcuni controlli preliminari dell'antenna avevano rivelato delle discrepanze alle quali non si poteva fornire una spiegazione, ma a cui era associato, con grande probabilità, un eccesso di rumore elettrico interno all'antenna. Per eliminare ogni sorta di dubbio, Penzias e Wilson si servirono di un dispositivo noto come «carico freddo» (*cold load*), il quale serviva da "confronto" per le misurazioni: esso consisteva in un campione di elio liquido raffreddato a circa 4 Kelvin. Penzias e Wilson operarono in tal modo: misurarono prima la potenza proveniente dal *cold load*, ed in seguito la potenza proveniente dal cielo. Sottraendo dalla misurazione del cielo la misurazione del *cold load* (la quale rendeva conto unicamente del rumore elettrico dell'antenna) si poteva dunque discriminare il rumore elettrico dell'antenna, misurando unicamente i contributi esterni ad essa.



Figura 1.2: Penzias e Wilson in primo piano, la massiccia struttura dell'antenna sullo sfondo

A causa della minuzia con cui l'antenna era stata costruita, Penzias e Wilson ritenevano che il rumore elettrico all'interno della sua struttura dovesse essere minimo. Nell'intento di verificare questo assunto, cominciarono le osservazioni alla lunghezza d'onda di 7,35 centimetri, in corrispondenza della quale i cosmologi non prevedevano particolari fonti di radiazione dall'universo. Penzias e Wilson avrebbero solamente dovuto sottrarre il restante contributo di "rumore" derivante dall'atmosfera, e si attendevano, a quel punto, di avere segnale zero. Sarebbe stato allora possibile procedere allo studio della galassia stessa a una lunghezza d'onda maggiore, attorno a 21 centimetri, in corrispondenza della quale si prevedeva che il rumore radio galattico fosse apprezzabile.

Onde siffatte (la cui lunghezza d'onda è di 7,35 cm oppure 21 cm) sono note come "microonde". Il prefisso *micro-* non è posto perché la loro lunghezza d'onda sia breve, ma poiché, in confronto alle onde utilizzate dai radar nella seconda guerra mondiale, esse sono più corte.

Non poco stupore destò la scoperta di un considerevole segnale, nella primavera del 1964, alla lunghezza d'onda di 7,35 centimetri. La sua caratteristica più misteriosa era l'uniformità. Tale rumore non dipendeva dalla direzione in cui il cielo era osservato, non variava con l'ora del giorno o con l'avvicinarsi delle stagioni. Penzias e Wilson esclusero che tale radiazione provenisse dalla nostra galassia. Se così fosse stato, ragionevolmente i due radioastronomi avrebbero dovuto ricevere un forte segnale dalla galassia di Andromeda, M31, alla stessa lunghezza d'onda di 7,35 centimetri. Tale segnale non veniva ricevuto. Il fatto più sorprendente, tuttavia, risultava essere l'assenza di ogni variazione in funzione della direzione del rumore a microonde: tale connotazione metteva in evidenza la provenienza delle onde da un volume dell'universo infinitamente più grande della nostra Via Lattea.

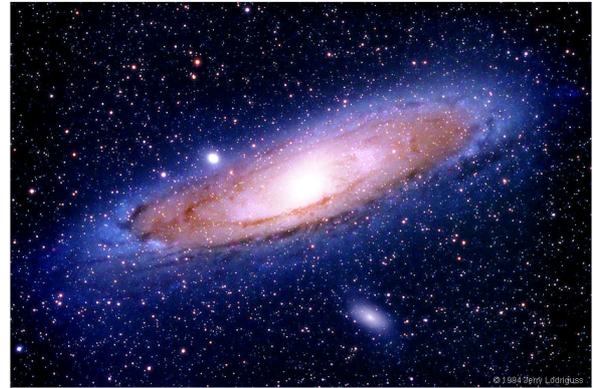


Figura 1.3: la galassia di Andromeda, M31 nel catalogo di Messier

La necessità dell'eliminazione di ogni rumore radio all'interno dell'antenna divenne perciò prioritaria. In particolare, si sapeva che una coppia di piccioni era andata ad alloggiare nell'imbuto dell'antenna. I piccioni furono catturati e spediti alla sede di Whippany dei Bell Laboratories; liberati, furono nuovamente trovati nella antenna di Holmdel alcuni giorni dopo; catturati di nuovo, furono finalmente scorggiati dal fare dell'antenna una piccionnaia con il ricorso a mezzi più energici. Eliminata la presenza dei piccioni, all'inizio del 1965 si smontò l'antenna per ripulirla accuratamente. Tuttavia tale procedura provocò solo una minima diminuzione del rumore radio ricevuto. Rimaneva pertanto inspiegata la provenienza del rumore radio.

L'unico dato numerico di cui disponevano Penzias e Wilson consisteva nell'intensità della radiazione da loro osservata. Essi la descrissero utilizzando il linguaggio dei radiotecnici, i quali associano ad ogni radiazione una temperatura caratteristica. Come più ampiamente descritto nel § 1.5, un corpo perfettamente opaco, cavo al suo interno

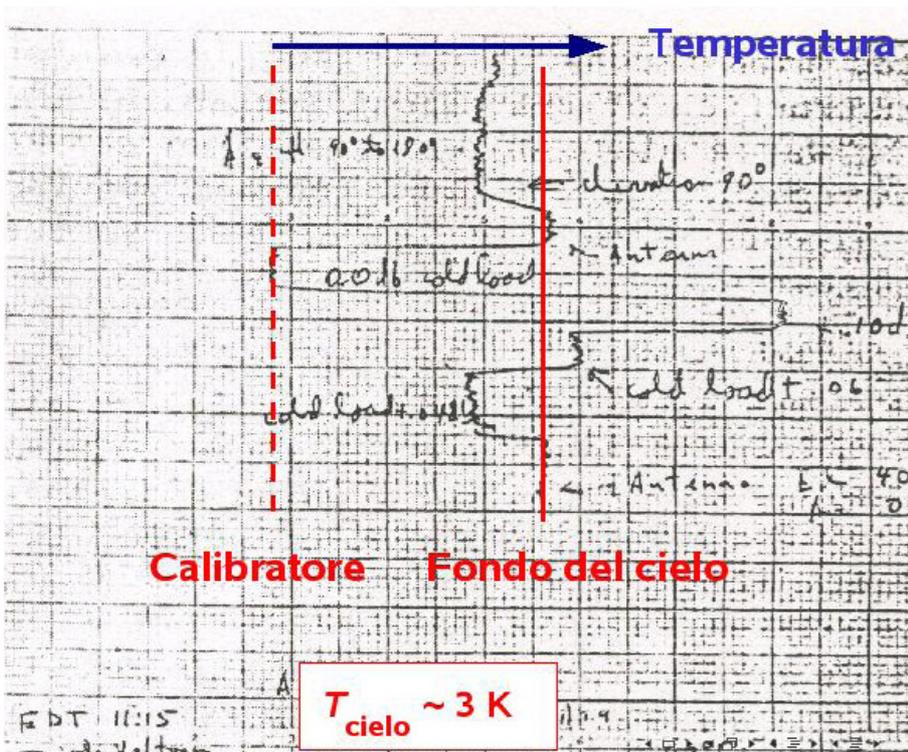


Figura 1.4: misurazione svolta da Penzias e Wilson sull'antenna a Holmdel. Si possono notare la temperatura del calibratore (cold load, il picco più a sinistra) e il fondo del cielo, sensibilmente discostato da esso.

zando il linguaggio dei radiotecnici, i quali associano ad ogni radiazione una temperatura caratteristica. Come più ampiamente descritto nel § 1.5, un corpo perfettamente opaco, cavo al suo interno

(in gergo “corpo nero”), emette radiazione con caratteristiche determinate dalla sua temperatura. Così, è possibile immaginare l’universo come un corpo cavo, il quale emette una certa radiazione (quella misurata da Penzias e Wilson). A tale radiazione è possibile associare una temperatura, detta “temperatura equivalente”, ovvero la temperatura alla quale dovrebbe trovarsi l’universo in modo tale da emettere le onde captate da Penzias e Wilson.

Dalle misurazioni svolte, Penzias e Wilson dedussero la temperatura equivalente della radiazione osservata, ed essa risultava essere di circa 3,5 gradi al di sopra dello zero assoluto: una discrepanza apprezzabile, ma molto fine. Perciò Penzias e Wilson ebbero una cura maniacale nell’esaminare le caratteristiche dell’antenna, in modo tale da poter essere certi della effettiva provenienza di tale discrepanza dal cielo, e non da errori di tipo elettrico. Le misurazioni sarebbero state rivoluzionarie: non fu subito chiaro che tale scoperta costituiva, dopo la scoperta della legge di Hubble, la seconda grande svolta nella cosmologia del XX Secolo.

1.2: La vera natura della radiazione di fondo: una prova schiacciante a favore del “Big bang”

Il significato del misterioso rumore a microonde cominciò ben presto a essere chiarito. I due studiosi pubblicarono sull’*Astrophysical journal* (vol. 142, p.419-421) una nota dal modesto titolo di *A measurement of Excess Antenna Temperature at 4,080 Mc/s*, ovvero: *Misurazione di una temperatura in eccesso all’antenna a 4080 milioni di cicli al secondo*. In tale nota non si forniva alcuna prospettiva teorica rispetto all’evidenza sperimentale. L’approccio teorico venne approntato da un gruppo di ricercatori formato da Dicke, Peebles, Roll e Wilkinson, i quali tentarono di spiegare come il segnale osservato dai ricercatori della Bell fosse in realtà una “radiazione fossile”, risalente ai primordi dell’universo. La nota di riferimento è *Cosmic Black-Body Radiation*, comparsa sull’*Astrophysical journal* (vol. 142, p.414-419, subito dopo la nota di Penzias e Wilson). Nonostante ciò, nel 1978 il premio Nobel in merito a tali scoperte venne conferito solamente a Penzias e Wilson, e non si proferì il nome del gruppo di scienziati i quali avevano fornito il dato teorico.

A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

Measurements of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna (Crawford, Hogg, and Hunt 1961) at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about 3.5° K higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our observations, isotropic, unpolarized, and

Figura 1.5: incipit della nota di Penzias e Wilson

A livello qualitativo, il ragionamento teorico sotteso a tali argomenti risulta essere il seguente. Se, come ha evidenziato Hubble, l’universo è in espansione, esso, in un arbitrario momento indietro nel tempo, dovrà necessariamente essere stato molto più denso e molto più caldo di ora. Infatti l’universo può essere paragonato ad un gas: comprimendosi, esso si riscalda. Dunque, più si va indietro nel tempo, più le condizioni di temperatura si fanno elevate.

Ciò comporta che, in un dato istante, la materia e la radiazione erano “accoppiate” in maniera così inscindibile che vi era perfetto equilibrio tra di esse. La materia era ad un livello energetico tale che ogni fotone emesso da una particella veniva subito assorbito da un’altra, e da essa riemesso, in un continuo scambio.

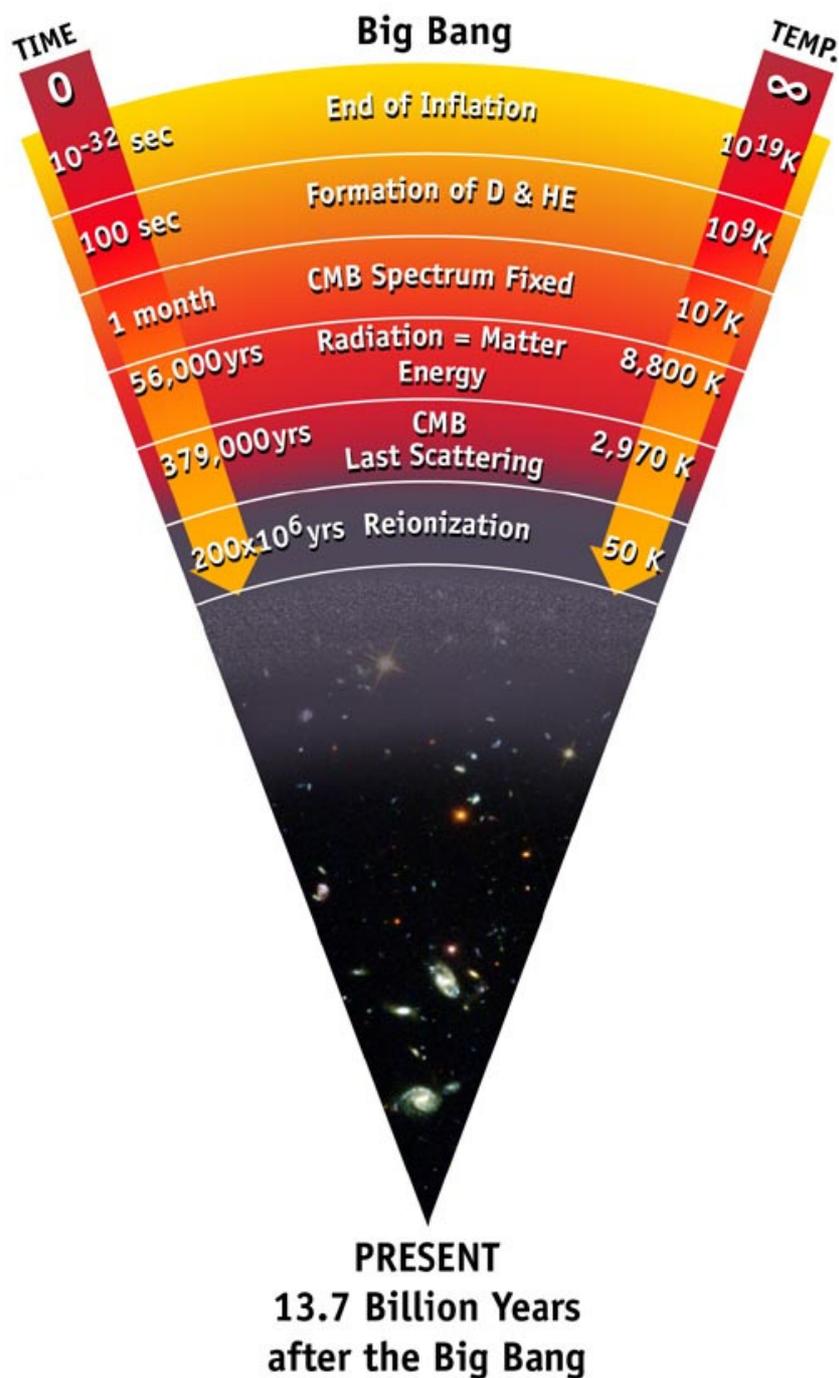


Figura 1.6: storia dell'universo. Si noti la superficie di ultimo scattering ("last scattering", V anello dall'alto), quando la materia si è disaccoppiata dalla radiazione.

Tuttavia, espandendosi l'universo, vi deve essere stato un momento in cui la materia si "disaccoppiò" dalla radiazione. Ovverosia, la materia, dato il minore livello energetico e la minore densità, diventò "trasparente" alla luce. Al miscuglio primordiale di materia e di radiazione, così, si sostituì la dualità materia-radiazione. Questo istante è detto *superficie di ultimo scattering*, ovvero di "ultima diffusione". Pertanto, i fotoni che, prima della *superficie di ultimo scattering* erano in equilibrio con la materia vengono, con il disaccoppiamento materia-radiazione, liberati. Tali fotoni, appunto, trasformati dal tempo e dalle condizioni cosmologiche, costituiscono la fonte di quel segnale di disturbo rilevato da Penzias e Wilson. I paragrafi seguenti si concentrano su tale descrizione, analizzandola più nel dettaglio.

1.3: Premesse: il redshift cosmologico, il fattore di scala, la densità di massa-energia di una componente di fotoni

Edwin Hubble, nel 1929, giunse alla conclusione che, comunque si guardi nello spazio circostante la terra, le galassie si stanno allontanando a velocità sempre maggiore. Non potendo misurarne direttamente la velocità, il suo metodo di misurazione si basava sul cosiddetto “spostamento verso il rosso”, conosciuto anche come *redshift*. È infatti noto come le onde (siano esse luminose, acustiche, ...) emesse da una sorgente che si allontana dall'osservatore siano da esso avvertite a lunghezze d'onda maggiori. Così, avvertiamo il suono di un'ambulanza che si allontana da noi più grave. In questo modo, Hubble scoprì che le galassie si allontanano da noi in quanto le lunghezze d'onda della luce osservata sono “spostate verso il rosso” rispetto alle lunghezze d'onda emesse.

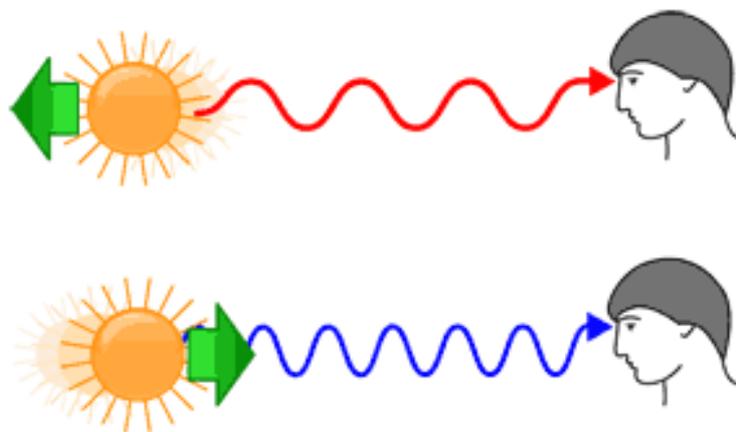


Figura 1.7: *redshift e blueshift*. Il *redshift* si verifica quando la sorgente si allontana dall'osservatore (in alto), invece il *blueshift* (spostamento verso il blu, il contrario del *redshift*, in basso) si verifica quando la sorgente si avvicina all'osservatore.

Tuttavia, secondo la relatività generale, l'espansione di Hubble non è determinata da un semplice allontanarsi delle galassie tra di loro, ma è un sintomo del fatto che tutto lo spazio-tempo si espande. Questo implica la necessità di una reinterpretazione del *redshift* cosmologico. I calcoli qui di seguito vengono tutti basati sul modello del *big bang*, il quale è il modello comunemente accettato dai cosmologi.

Nella seguente trattazione si farà uso dell'espressione “fattore di scala”, in simboli: $a(t)$ (il fattore di scala ad un tempo t). Si attribuisce convenzionalmente al tempo attuale un fattore di scala pari a uno: $a(t_0) = 1$, dove t_0 è il tempo attuale, così che, per epoche più remote (in un generico istante t), sarà $a(t) < a(t_0)$, poiché l'universo si espande.

(a) Si consideri ora un fotone, emesso ad una lunghezza d'onda λ_{em} al tempo t , quando il fattore di scala era $a(t)$, e viene rilevato da un telescopio al tempo attuale t_0 , quando $a(t_0) = 1$. La sua lunghezza d'onda al momento della rilevazione sarà quindi:

$$\frac{\lambda_{oss}}{\lambda_{em}} = \frac{a(t_0)}{a(t)} = \frac{1}{a(t)}$$

Infatti, essendo le lunghezze d'onda delle lunghezze, varieranno proporzionalmente al fattore di scala. Ma abbiamo detto che $a(t) < a(t_0)$, e quindi $\lambda_{oss} > \lambda_{em}$. In altre parole, la lunghezza d'onda è aumentata semplicemente a causa dell'espansione dell'universo. Il *redshift* cosmologico risulta quindi essere:

$$1 + z = \frac{\lambda_{oss}}{\lambda_{em}} = \frac{a(t_0)}{a(t)} = \frac{1}{a(t)}$$

Prima conclusione: Il redshift **non è dovuto all'effetto Doppler**, ma è un effetto puramente gravitazionale, conseguenza dell'espansione dell'universo.

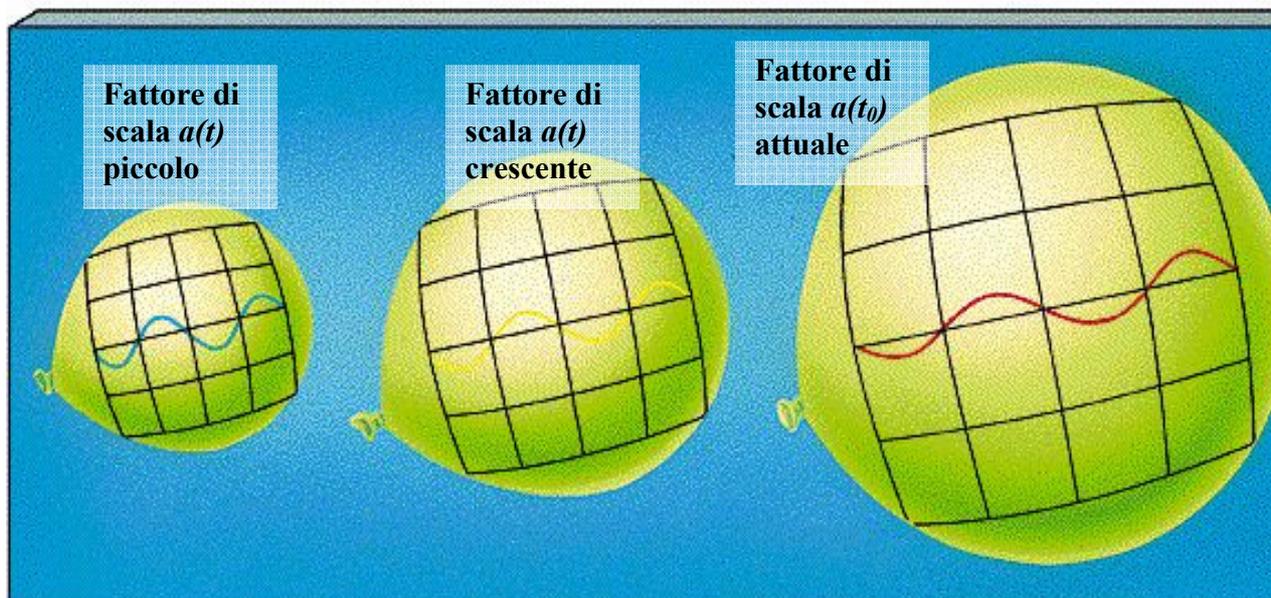


Figura 1.8: lo spostamento verso il rosso della radiazione proveniente dalle galassie lontane non è causato dall'effetto Doppler, dovuto alla velocità delle galassie stesse, ma è dovuto alla dilatazione einsteiniana dello spazio. Nella figura, il palloncino non è l'universo; l'universo è la superficie del palloncino, la quale, espandendosi, fa in modo che anche le onde al suo interno si "stirino" verso lunghezze d'onda maggiori. Il fattore di scala aumenta da sinistra verso destra.

(b) **L'espansione dell'universo non influenza materia e radiazione in modo uguale.** La densità di massa-energia della materia, *se questa non è ultrarelativistica*, decresce in maniera proporzionale all'inverso del volume dell'universo (infatti è $\rho = E/V$, dove ρ è la densità, E la massa-energia e V il volume in cui essa è contenuta). Si ha inoltre che il volume dell'universo è proporzionale al cubo del fattore di scala (perché l'espansione avviene in tre dimensioni spaziali), pertanto si avrà che $\rho \propto a(t)^{-3}$ (1). Ma da quanto argomentato precedentemente si ha che $1 + z = \frac{1}{a(t)}$. Combinando questa con la (1) si ottiene: $\rho \propto (1 + z)^3$. Considerando ora la densità *di materia non relativistica* ρ_m si può scrivere, per quanto sopra argomentato:

$$\rho_m = \rho_{m0}(1 + z)^3,$$

dove ρ_{m0} è la densità di materia ad un certo istante iniziale t_0 e $(1 + z)$ è il *redshift* cosmologico. Questa relazione lega l'espansione dell'universo all'evoluzione della densità **di materia non relativistica**.

Per quanto riguarda invece i fotoni, particelle relativistiche, essi subiscono una perdita di energia addizionale, dovuta appunto al *redshift* cosmologico, che ne aumenta le lunghezze d'onda e pertan-

to ne diminuisce le energie. Tale perdita è proporzionale ad $a(t)^{-1}$. Si ha quindi che la densità di massa-energia di una componente di fotoni (espressa in termini di massa per unità di volume) evolve come segue:

$$\rho_\gamma = \rho_{\gamma 0}(1+z)^4$$

Seconda conclusione: si può notare pertanto come le particelle ultrarelativistiche (costituenti la radiazione) siano influenzate maggiormente dall'espansione dell'universo rispetto alla materia ordinaria.

1.4: Il passaggio dall'era dominata dalla radiazione all'era dominata dalla materia

Dalle ultime due formule ricavate si ottiene un risultato notevole: facendo il rapporto membro a membro fra l'ultima e la prima si ha:

$$\frac{\rho_\gamma}{\rho_m} = \frac{\rho_{\gamma 0}}{\rho_{m 0}}(1+z)$$

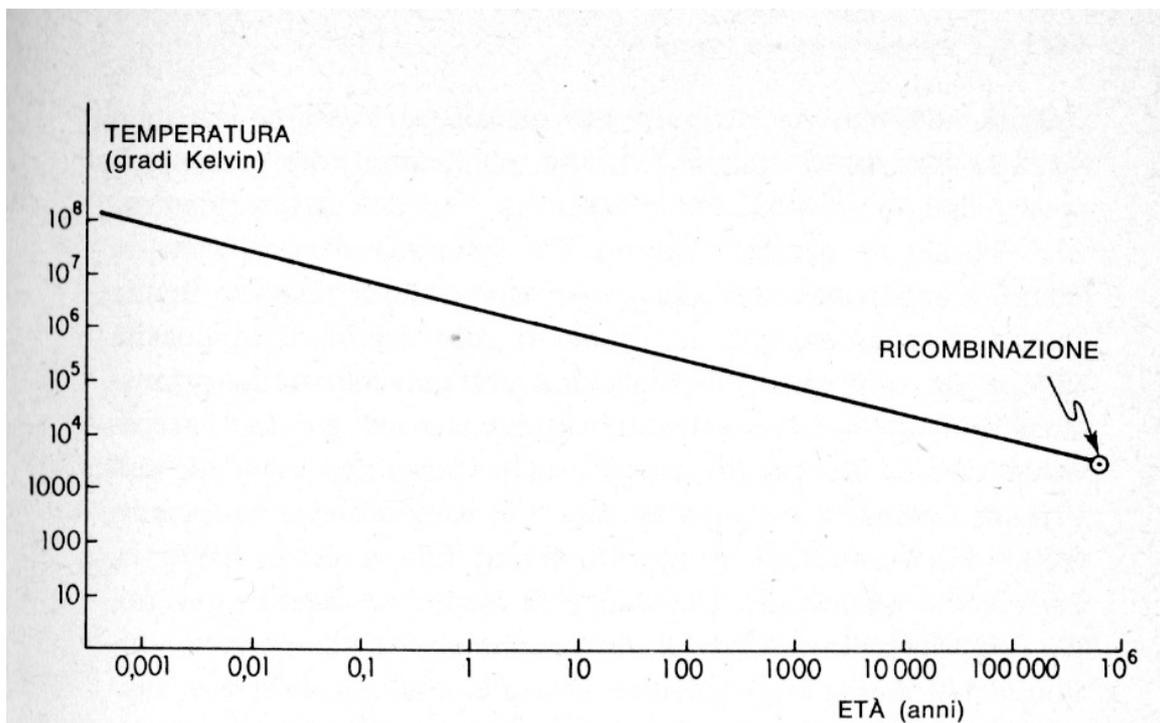


Figura 1.9: L'era dominata dalla radiazione. La temperatura dell'universo è rappresentata in funzione del tempo, per il periodo compreso tra la fine della nucleosintesi e la ricombinazione di nuclei e di elettroni in atomi.

Pertanto, posti costanti i due parametri iniziali $\rho_{\gamma 0}$ e $\rho_{m 0}$ si avrà che **ad alto redshift (z) l'universo era dominato dalla radiazione**; infatti il loro rapporto è proporzionale allo spostamento verso il rosso: quando l'universo era nelle sue fasi iniziali, in esse il fattore di scala era molto piccolo, e ciò determinava un alto *redshift* (vedi § 1.3). In quegli istanti, la situazione dell'universo era analoga a quella degli interni stellari, dove la radiazione è in equilibrio termodinamico con la materia.

Basandosi su alcuni calcoli sui dati cosmologici attuali, si giunge a stimare il *redshift* z_{dec} presente all'istante in cui la materia si disaccoppiò dalla radiazione. Si ha che

$$z_{dec} \approx 1090$$

Tale *redshift* corrisponde ad un'epoca compresa tra 10^{10} e 10^{13} secondi dall'inizio dell'universo. Come vedremo (vedi § 2.2), recenti misurazioni (WMAP, NASA 2008) fissano tale epoca a 380.000 ± 5.000 anni dall'inizio dell'universo, il che conferma la previsione teorica (infatti 1 anno $\approx \pi \times 10^7$ sec). Alle condizioni di temperatura che si avvicinavano ai 3000 K, dal plasma primordiale di particelle elementari in equilibrio termico, l'universo "viene alla luce", ed avviene la prima combinazione ("ricombinazione") dei nuclei atomici con gli elettroni.

1.5: La liberazione della radiazione cosmica di fondo e la sua evoluzione

Quando l'espansione raffreddò il plasma cosmologico, elettroni e nuclei si combinarono in atomi, disaccoppiandosi finalmente dai fotoni (la cosiddetta "superficie di scattering"). Tali fotoni sono giunti fino a noi, costituendo una prova "fossile" della presenza di un plasma primordiale. È appunto tale radiazione "fossile" quella captata da Penzias e Wilson nel 1965.

La prima caratteristica che tale radiazione deve assumere è l'**isotropia** (dal greco "isos" = stesso, e "tropos" = direzione, rotazione) (1). Ciò significa che, in qualunque direzione si osservi, le sue peculiarità non mutano. Non muta in intensità, polarizzazione, lunghezza d'onda, spettro. Pertanto, qualunque punto noi osserviamo nel cielo, dovremmo ricevere da esso una costante radiazione a circa 3 K. Tale proprietà discende essenzialmente dal fatto che nei primi istanti l'universo era talmente omogeneo in modo tale da produrre una radiazione ad alta isotropia (anche se, in realtà, lo è solo in prima approssimazione, come vedremo nel § 2.0).

Inoltre, sorge spontanea una questione (2): se la radiazione è stata emessa circa un milione di anni dopo il Big Bang, non si capisce la ragione per cui noi dovremmo avvertirla ancora oggi. Infatti, essa si sarebbe esaurita nei pochi istanti dopo la sua creazione.

Tuttavia, come ben evidenziato dalla *Figura 1.10* (alla pag. seguente), siccome la velocità della luce nell'universo non è infinita, più guardiamo in lontananza nello spazio, più guardiamo indietro nel tempo. Inoltre, la luce di tutto l'universo non è ancora giunta a noi. Siccome prima della "ricombinazione" l'universo era opaco, non dovremmo vedere niente più in là di tale radiazione. Quindi, in un certo senso, la radiazione cosmica di fondo è l'ultimo confine dell'universo da noi osservabile (anche se l'universo, in realtà, si estende ben al di là di tale confine). Ma, **per noi, qui ed ora**, al di là di tale confine vi è (ammesso di potere definire un tempo assoluto, astrazione sbagliata ma utile) il plasma primordiale. Da quanto argomentato si evince che, se la luce continua ad arrivarci scoprendo aree nuove dell'universo, che nel passato non era possibile vedere, essa continua a giungerci dal passato, ed in particolare da quell'istante in cui la materia si disaccoppiò dalla radiazione.

Il terzo aspetto rilevante che tale radiazione deve assumere è lo **spettro di corpo nero** (3). Vi sono alcuni sistemi che possono essere schematizzati secondo il modello di "corpo nero": essi sono quegli oggetti che, in buona approssimazione, assorbono tutta la radiazione elettromagnetica incidente (e quindi non ne riflettono). Essi producono radiazione a diverse lunghezze d'onda per irraggiamento termico, così che noi, accendendo una lampadina ad incandescenza, possiamo scorgere la luce bianca, composta sia da luce blu, che da luce verde, che da luce rossa, ... L'emissione di una lampadina, così come quella delle braci incandescenti, così come quella di una serpentina incandescente, rientrano tutte con buona approssimazione nello spettro di corpo nero: tutte le volte in cui l'energia termica viene diffusa per irraggiamento sottoforma di radiazione elettromagnetica, si ha che tale radiazione è descritta dallo spettro di corpo nero.

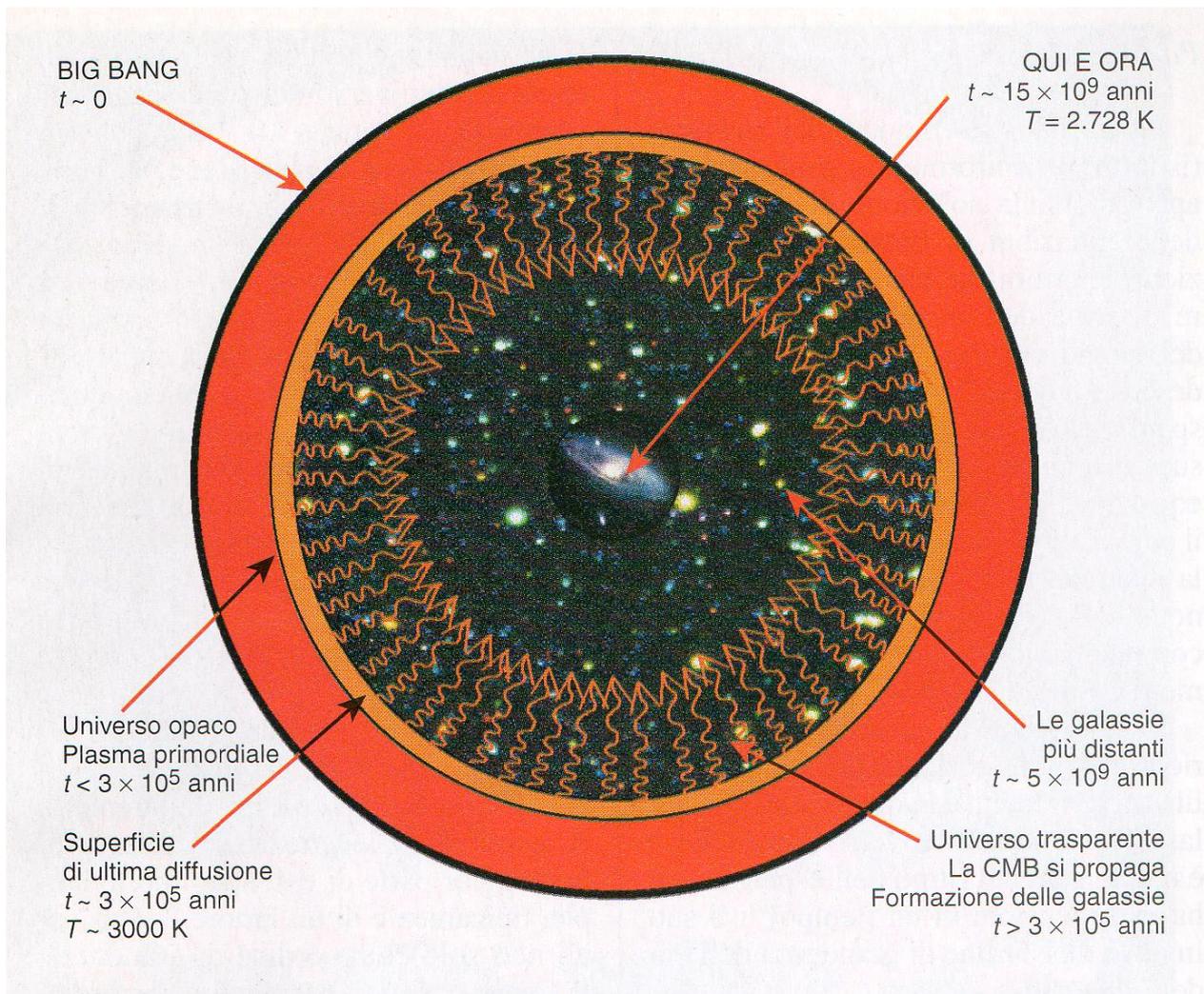


Figura 1.10: nel diagramma, andando dal centro verso l'esterno, troviamo oggetti via via più lontani da noi sia nello spazio che nel tempo. Il tempo è misurato a partire dal big bang, circa 15 miliardi di anni fa. I fotoni del fondo cosmico di microonde sono stati diffusi per l'ultima volta (superficie di ultimo scattering) quando l'età dell'universo era circa 300 mila anni. Da allora hanno viaggiato liberamente portandoci un'immagine dell'universo primordiale.

In termini più precisi, lo spettro di corpo nero descrive come, al variare della frequenza (o della lunghezza d'onda della radiazione) vari la sua intensità (vedi *Figura 1.11*, pagina seguente). Il grafico frequenza-intensità descrive una precisa curva, la cui variabilità è determinata dalla temperatura del corpo nero in questione che emette radiazione elettromagnetica. Più bassa la temperatura, più bassa l'energia, più bassa la frequenza della radiazione, più alta la lunghezza d'onda di picco.

Quest'ultimo asserto qualitativo può essere quantificato come segue: nell'emissione di un corpo nero, la lunghezza d'onda di picco è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta del corpo stesso (*legge degli spostamenti di Wien*). In simboli:

$$T\lambda_{\max} = b$$

In tale relazione, T è la temperatura assoluta, λ_{\max} la lunghezza d'onda alla quale viene emessa la massima potenza radiante, b una costante pari a 2.897768×10^{-3} m·K. Per quanto riguarda dunque la

radiazione cosmica di fondo, bisogna notare che, al momento della prima ricombinazione, si aveva una temperatura molto alta, e pertanto una lunghezza d'onda massima molto bassa.

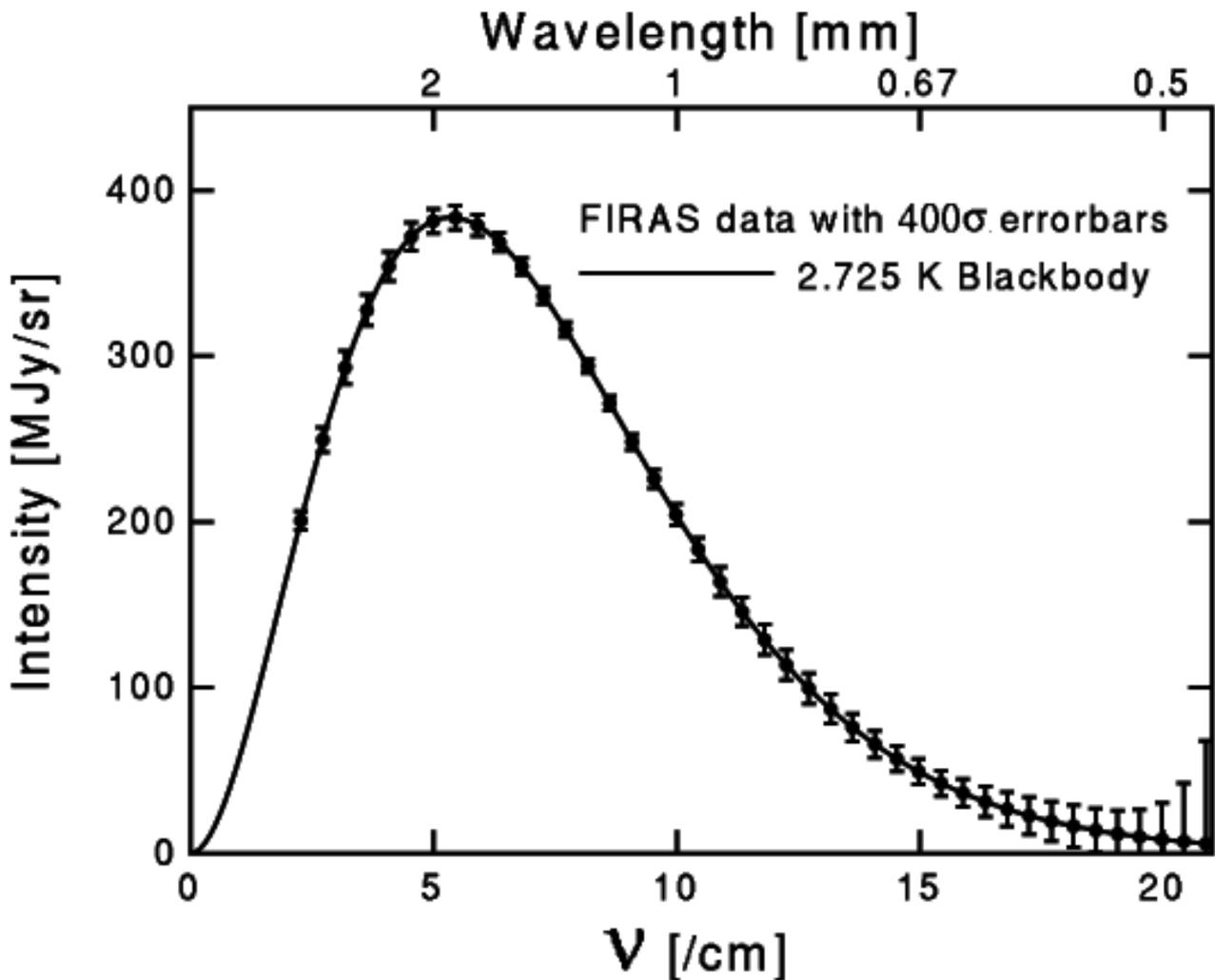


Figura 1.11: Grafico frequenza-intensità della radiazione cosmica di fondo, misurato dal satellite COBE, su cui era presente lo strumento FIRAS (lanciato nel 1989). Si nota la caratteristica andatura della curva con un picco in corrispondenza della massima frequenza. Tale spettro corrisponde all'emissione di un corpo nero a 2,725 K

Tuttavia, col passare del tempo, la lunghezza d'onda, in seguito al *redshift* cosmologico (vedi § 1.3), si è “allungata”. Ciò comporta che la temperatura del corpo nero ideale che descrive la radiazione cosmica di fondo è molto bassa al momento attuale, ed corrisponde a circa 2,7 K, mentre al tempo era molto alta, e precisamente circa 3.000 K. Un semplice passaggio algebrico porta a concludere che $\lambda_{\max} \approx 10^{-3} m$, pertanto le massime emissioni si avranno sull'ordine dei millimetri. Fu questa la radiazione che per primi captarono Penzias e Wilson: loro, tuttavia, la captarono nell'ordine dei centimetri, dove essa è poco meno intensa. Inoltre, da ricerche recenti (WMAP, *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*, NASA 2008) si è riusciti a determinare esattamente lo spettro di corpo nero della radiazione cosmica di fondo (figura 1.12) e ciò è in perfetto accordo con i risultati teorici. Infatti, si è trovata una temperatura di 2,7 K che conduce ad una temperatura iniziale (alla *superficie di scattering*) di 3.000 K. Inoltre lo spettro di corpo nero descritto dalla missione WMAP risulta essere il più preciso mai descritto sinora, e ciò non solo conferma la teoria del Big

Bang, ma porta dei notevoli riscontri alla meccanica quantistica, la cui fondazione proviene appunto dalla determinazione dello spettro di corpo nero.

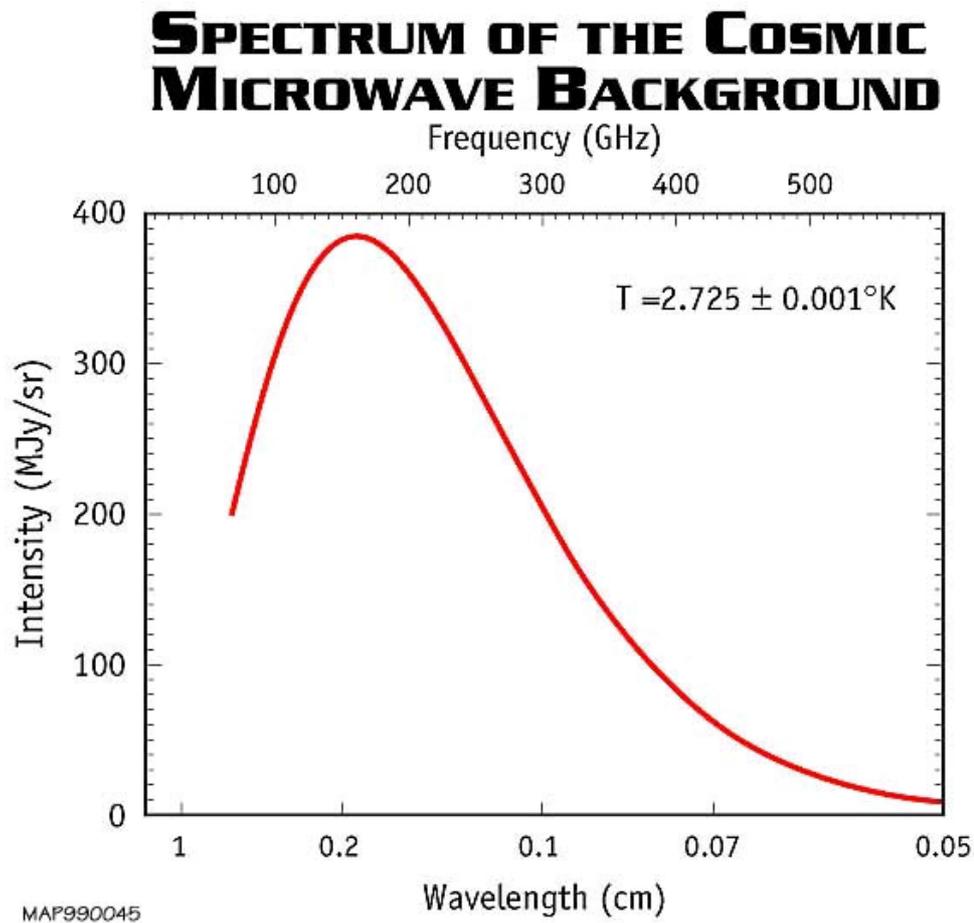


Figura 1.12: spettro della radiazione cosmica di fondo così come è stato determinato da WMAP. Le barre di errore del grafico non si vedono perché sono talmente minuscole da potere essere visualizzate, data l'elevata precisione della misurazione.

Capitolo 2. La cosmologia con il fondo cosmico: ovvero l'utilità di un rumore radio dai più profondi recessi dell'universo.

2.0: L'anisotropia della radiazione cosmica e l'universo primordiale

Il fondo cosmico è un mare di radiazione che pervade uniformemente l'universo. In ogni istante, ogni centimetro cubo nell'universo contiene circa 400 fotoni di radiazione, che si muovono in tutte le direzioni alla velocità della luce. Come è stato evidenziato nel precedente paragrafo, la radiazione di fondo (misurata in unità di temperatura) è altamente isotropa.

Ben presto, tuttavia, i cosmologi teorici si convinsero che a qualche livello il fondo cosmico doveva necessariamente presentare una "anisotropia", ovverosia una variazione d'intensità in funzione della direzione d'osservazione. Infatti le grandi strutture come le galassie e gli ammassi di galassie (con dimensioni minori di 10 megaparsec) devono essersi formati a partire da eccessi di densità presenti nel plasma primordiale, che sono poi collassati gravitazionalmente: si sono formate delle zone di accrescimento attorno a dei nuclei in cui la maggiore densità ha attirato materia, che hanno determinato in questo modo la formazione di strutture stabili, come le galassie. Tali disomogeneità, che si sono manifestate alla *superficie di ultimo scattering*, devono ragionevolmente essere state presenti nel plasma primordiale, prima e durante la *superficie di ultimo scattering*. Tali disomogeneità nella materia primordiale devono avere necessariamente influenzato la distribuzione dei fotoni al momento dell'ultima diffusione, influsso che può essere registrato sperimentalmente come "anisotropia" della radiazione cosmica di fondo.

Lo scopo dunque della ricerca sulla radiazione cosmica di fondo risulta descritto nel tentativo di risalire, con la misurazione dell'anisotropia della radiazione, alla distribuzione della materia primordiale, la quale porta alla determinazione di notevoli conclusioni nell'ambito cosmologico. In tal modo, l'ampiezza dell'anisotropia dipenderà da parametri fisici come la densità della materia nell'universo primordiale e la sua composizione; qui di seguito si prenderanno in considerazione delle conclusioni cosmologiche cui si è giunti con la radiazione cosmica di fondo, per poi introdurre in maniera leggermente più generale il modello cosmologico ad oggi più accreditato. Negli anni ottanta, pertanto, si iniziarono le ricerche su tale anisotropia: si giunse, tramite misurazioni sempre più accurate, ad affermare che l'anisotropia era dell'ordine di $\Delta T/T_0 < 10^{-4}$: ciò significa che ogni deviazione ΔT della temperatura della radiazione cosmica dalla sua temperatura media ($T_0 = 2,726$ K) è meno di una parte su diecimila; in altre parole le anisotropie devono avere ampiezza minore di 300 milionesimi di grado centigrado.

È questo, come è facile intuire, un livello di isotropia molto spinto: la radiazione cosmica di fondo è infatti molto omogenea nello spazio. Se dunque si ammette la sola presenza di materia ordinaria al momento del disaccoppiamento, si giunge a determinare, tramite alcuni calcoli cosmologici, il seguente asserto: **non si può rendere ragione dell'alto livello di anisotropia e disomogeneità presente nel nostro universo attuale**. Per convincersi del fatto che l'universo sia disomogeneo basta osservare il cielo notturno: le sue strutture sono compiute, ed in alcuni luoghi (come nel centro delle stelle) si hanno densità altissime, mentre in altri (come nel mezzo dello spazio intergalattico) si hanno densità pressoché nulle. Per spiegare dunque l'alto livello di anisotropia presente oggi in relazione all'altissimo livello di isotropia che invece caratterizzò l'universo al momento della ricombinazione è necessario ammettere l'esistenza di un "coagulante", una forma di materia di cui non è restata traccia, molto massiva, che ha formato dei centri di aggregazione caratterizzati da alto potenziale gravitazionale: esso sarebbe la cosiddetta **materia oscura**.

2.1: Scale angolari e spettro di potenza della radiazione cosmica di fondo

Dalle più recenti e approfondite ricerche sulla radiazione cosmica, le quali fanno uso di satelliti in orbita (e delle quali tratteremo più approfonditamente nel capitolo 3) si deducono molte essenziali informazioni sull'universo. Tale spaventoso ammontare di dati viene riassunto in mappe come la seguente:

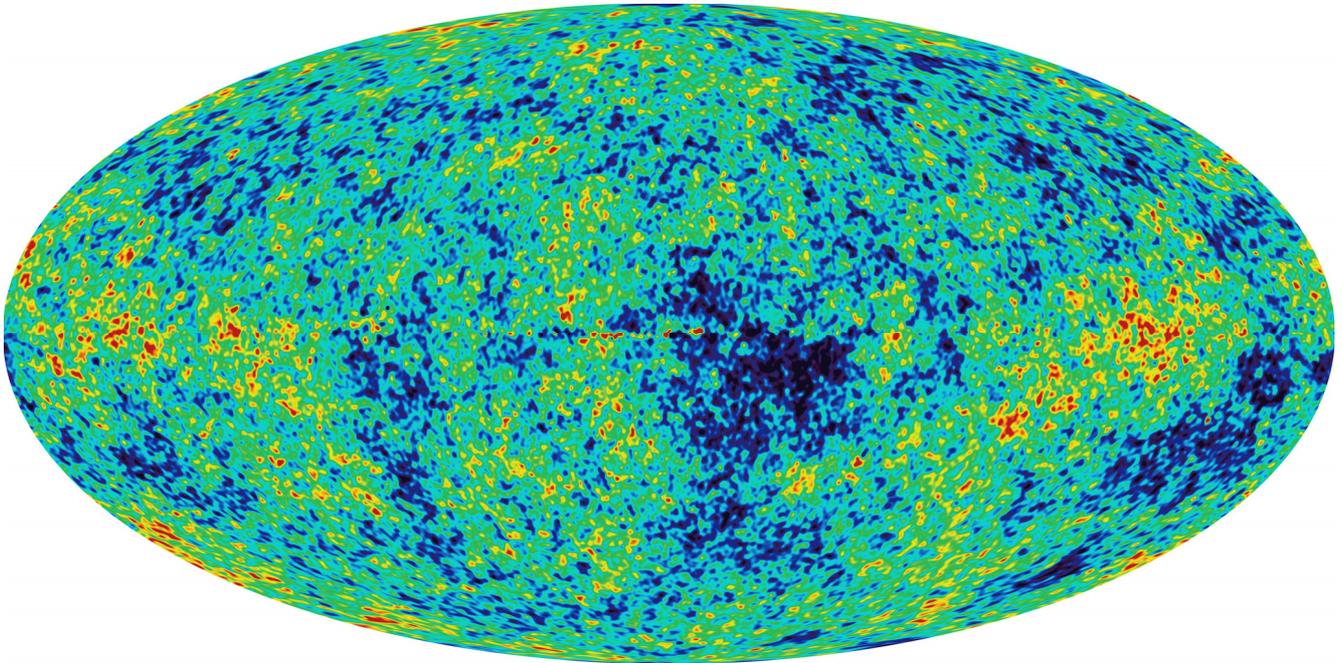


Figura 2.1: mappa del cielo così come raccolta da WMAP (NASA, 2008). Essa è rappresentata in coordinate galattiche, e si possono notare le anisotropie: esse sono le variazioni di colorazione nella mappa. Tipicamente esse sono dell'ordine dei decimi di mK.

In tale mappa, che fa uso di coordinate galattiche, i vari colori indicano le fluttuazioni di temperatura rilevate nella misurazione della radiazione cosmica nelle varie direzioni. Le tonalità verso il giallo e il rosso indicano una temperatura rilevata maggiore della media, invece le tonalità blu indicano una temperatura della radiazione minore della media.

È chiaro tuttavia come si necessiti di un approccio quantitativo al problema: per la ricerca cosmologica si devono ricavare informazioni a partire da questi dati che possano avere un riscontro calcolistico. Da questo procedimento, inoltre, sarà chiaro d'altronde *quale* tipo di informazione si può sperare di ottenere da una siffatta mappa. L'approccio è sostanzialmente il seguente: si immagina l'anisotropia della radiazione come una funzione scalare di tre variabili distribuita su una sfera, e la si scompone in una somma di funzioni elementari, dette "armoniche sferiche" (tramite la trasformata di Fourier). I coefficienti di tali scomposizioni ci consentono di quantificare l'ampiezza dell'anisotropia in funzione della scala angolare Θ alla quale si riferiscono.

Nello svolgimento di tale procedura, gli studiosi hanno trovato conveniente definire una grandezza denominata "ordine di multipolo". Esso è proporzionale all'*inverso* della scala angolare, ed è determinato secondo la formula: $l = \pi / \Theta$. Pertanto i grandi angoli nel cielo corrisponderanno a bassi valori di l , e i piccoli angoli nel cielo corrisponderanno a grandi valori di l . Se si osserva il cielo con uno strumento la cui risoluzione angolare è Θ_0 , la mappa conterrà informazioni sull'ampiezza dell'anisotropia nelle scale angolari che vanno da 180° a Θ_0 , ovvero con ordine di multipolo

$1 < l < \pi / \Theta_0$. La scomposizione in armoniche sferiche della mappa del cielo ci consente di tracciare un grafico con la scala angolare (o l'ordine di multipolo) in ascissa e l'ampiezza della anisotropia a quella scala angolare in ordinata. Esso è chiamato spettro di potenza dell'anisotropia della radiazione, e ci consente di verificare come, su diverse scale angolari, l'anisotropia sia più o meno marcata. Ciò porta a notevoli considerazioni cosmologiche. Consideriamo pertanto due scale angolari caratteristiche, collegate alla fisica dell'universo al momento della *superficie di scattering*.

1. La scala angolare Θ_1 e l'orizzonte al momento dell'ultima diffusione

La prima scala angolare critica, le cui dimensioni corrispondono circa a 1° nel cielo, rappresenta l'orizzonte causale sulla superficie di ultima diffusione. Ovvero, all'esterno di questa scala di grandezze cosmiche niente ha potuto, dall'inizio dell'universo al momento della ricombinazione, influenzarsi in maniera causale. In altri termini, zone al momento dell'ultima diffusione che distano più di un grado nel cielo non possono essere entrate in contatto causale, poiché troppo distanti. Il ragionamento che ci porta a tale conclusione è il seguente: è un dato empirico che nulla può viaggiare più veloce della luce. Pertanto, sulla *superficie di ultimo scattering*, nessun segnale avrà potuto compiere una distanza maggiore di quella compiuta dalla luce dal momento dell'origine dell'universo.

Nei 300.000 anni di vita dell'universo al momento del disaccoppiamento ($t_{dec} \approx 300.000$ anni, dove "dec" sta per *decoupling*), qualunque messaggio può pertanto aver raggiunto al massimo una distanza ct_{dec} : infatti non poteva viaggiare più veloce della luce. In altre parole, la distanza ct_{dec} è l'"orizzonte" alla superficie di ultima diffusione. La scala angolare che corrisponde a tale orizzonte è:

$$\Theta_1 = \frac{ct_{dec}}{D} \approx 1^\circ, \text{ dove } D \text{ è la}$$

distanza rispetto a noi della superficie di ultima diffusione. Le regioni che si trovano all'interno di questa scala angolare hanno avuto il tempo, dall'inizio dell'universo, di entrare in contatto causale. La scala angolare Θ_1 è perciò di fondamentale importanza perché determina la soglia al di sotto della quale i processi fisici possono avere influito sulla storia delle fluttuazioni di densità e quindi sulle anisotropie della radiazione cosmica di fondo.

In particolare essa definisce la dimensione su cui la forza di gravità (a partire dalle perturbazioni iniziali) e le

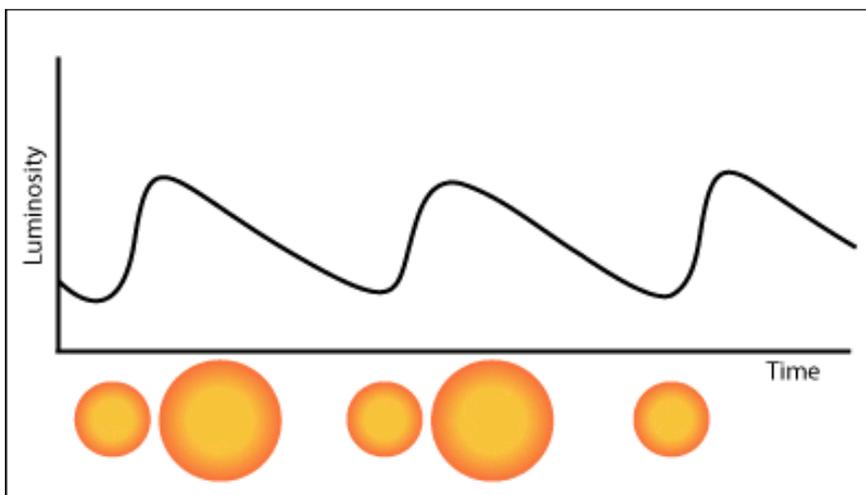


Figura 2.2: la materia, prima del disaccoppiamento, si comportava come avviene all'interno delle variabili cefeidi. Si ha infatti un "gioco a due" fra forza attrattiva, gravitazionale, e forza repulsiva, atomica (e termica). L'oscillazione fra le due ha creato le perturbazioni visibili nella radiazione cosmica di fondo. Nella figura vediamo rappresentata la variabilità di una cefeide nel tempo, con fasi alterne di espansione – contrazione.

interazioni tra la materia e la radiazione hanno potuto agire: infatti neppure la forza di gravità si propaga ad una velocità maggiore di quella della luce; lo facesse, saremmo in grado di mandare informazione nel passato.

All'interno di questa scala angolare, prima del disaccoppiamento, si verificò un processo detto di "risonanza". Infatti là dove la maggiore densità di materia barionica faceva collassare le strutture gravitazionalmente, la radiazione interveniva con una sorta di meccanismo a *feedback* a contrastare la contrazione, analogamente a ciò che avviene all'interno delle variabili cefeidi (Figura 2.2, pagina precedente).

Così, nelle zone all'interno dell'orizzonte tali processi, i quali comportavano inevitabilmente delle onde di pressione, entrarono in risonanza creando delle vere e proprie oscillazioni acustiche del fluido materia-radiazione, in cui la gravità giocava il ruolo di forza di compressione e la radiazione le offriva resistenza. Tali oscillazioni si presentarono nel plasma al momento del disaccoppiamento, e ciò che oggi osserviamo come anisotropia della radiazione cosmica di fondo risultano essere appunto le figure di interferenza di tali onde di pressione del plasma primordiale, "fotografate" al momento dell'ultima diffusione.

Su scale angolari inferiori a Θ_1 ci si aspetta pertanto di osservare, sullo spettro di potenza, una serie di picchi e di avvallamenti, che corrispondono ai massimi ed ai minimi degli effetti prodotti dalle oscillazioni acustiche sui fotoni al momento dell'ultima diffusione.

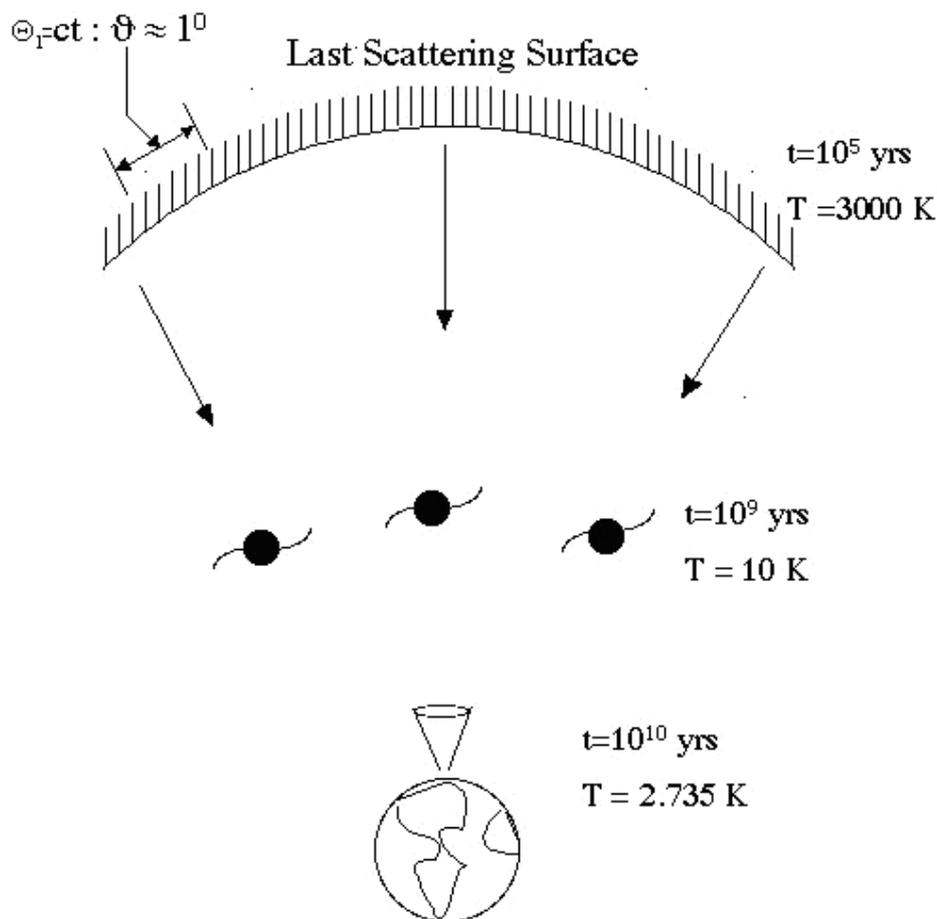


Figura 2.3: la superficie di ultima diffusione. Si può notare come sia visualizzata la scala angolare Θ_1 , che corrisponde a 1° nel cielo.

2. La scala angolare Θ_2 e la diminuzione delle anisotropie a piccole scale angolari.

Il disaccoppiamento tra materia e radiazione avvenne in maniera rapida ma non istantanea, e quindi la superficie dalla quale viene emessa la radiazione di fondo non ha un confine definito esattamente, non è perfettamente sferica. La sfumatura di questa transizione pone un limite alle scale angolari in cui ci si aspetta di osservare anisotropie nel fondo cosmico. Infatti su scale più piccole di quelle che corrispondono a questa transizione le anisotropie vengono “confuse” le une sulle altre. La situazione è analoga a quando si cerca di guardare attraverso un vetro dalla superficie ruvida: i dettagli di ciò che sta dietro al vetro sono limitati dalla scala angolare caratteristica della “ruvidità” del vetro. La scala angolare Θ_2 corrisponde a circa $0,1^\circ$: su angoli più piccoli ci si aspetta che l’ampiezza delle anisotropie del fondo cosmico tenda rapidamente a zero, proprio per questo sovrapporsi di anisotropie. I dettagli della forma dello spettro angolare di potenza delle anisotropie, in particolare la posizione e l’altezza dei picchi e degli avvallamenti nella regione $\Theta_2 < \Theta < \Theta_1$, racchiudono informazioni preziosissime: la forma precisa di questa curva è estremamente sensibile ai valori dei parametri cosmologici fondamentali che definiscono l’evoluzione e la composizione dell’universo. Una misura accurata dello spettro di potenza consente perciò di estrarre informazioni cruciali sui valori di tali parametri. È soprattutto alle piccole scale angolari (al di sotto dell’orizzonte alla superficie di ultima diffusione) che si ricavano le massime informazioni.

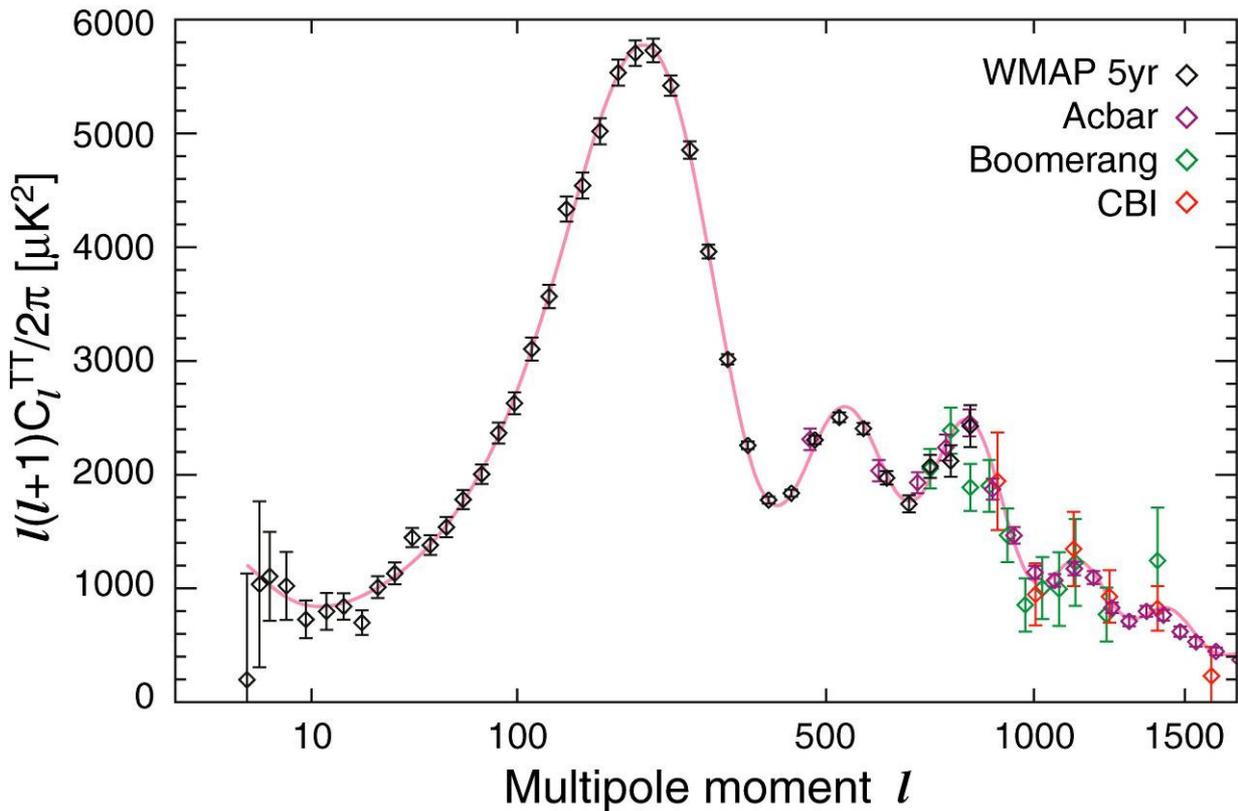


Figura 2.4: spettro di potenza della radiazione cosmica di fondo così come misurato da WMAP (2008), ed altri tre esperimenti. Troviamo in ascissa l’ordine di multipolo l , in ordinata l’ampiezza delle anisotropie. Si possono notare le due scale angolari caratteristiche: Θ_1 corrisponde alla posizione in cui si vede il primo e molto intenso picco, circa a $l = 180$. Θ_2 , invece, corrisponde alla smorzatura dei picchi nella parte destra del grafico, e l’ordine di multipolo l corrisponde a circa 1500.

2.2: La determinazione di alcuni parametri cosmologici a partire dalla misurazione della radiazione cosmica di fondo

I cosmologi, per descrivere l'evoluzione dell'universo, adottano dei modelli matematici. Attualmente, il modello più diffuso e meno difficile è costituito dalla soluzione di Friedmann alle equazioni di Einstein. Avendo questi formulato delle proposizioni circa l'azione della massa sullo spazio-tempo, diede inizio alla moderna cosmologia. Friedmann risolse le complesse equazioni di campo di Einstein³ e la sua soluzione sostanzialmente era volta a determinare il fattore di scala $R(t)$ in funzione del tempo trascorso dall'origine dell'universo (nella precedente sezione 1.3 tale fattore di scala è stato denominato $a(t)$).

La funzione $R(t)$ e la sua derivata, $\frac{dR(t)}{dt}$ indicano pertanto in maniera quantitativa l'espansione dell'universo o la sua eventuale contrazione. Come in tutte le formule concernenti la Fisica, o tutte le riduzioni matematiche di eventi reali, è necessaria l'introduzione di alcune "condizioni iniziali", ovvero dei parametri numerici derivanti dall'osservazione dell'universo. Esse possono essere dedotti, con particolari procedimenti, dalle condizioni attuali dell'universo e determinano, con le debite approssimazioni, l'andatura della funzione $R(t)$, la quale (sempre supponendo la correttezza del modello) descrive l'andatura dell'universo.

Tali parametri cosmologici risultano essere:

1. La costante di Hubble H_0 , la quale è, secondo la legge di Hubble, la costante di proporzionalità fra velocità e distanza di due oggetti molto lontani nel cielo (nella *Figura 2.5*, il coefficiente angolare della retta di regressione).

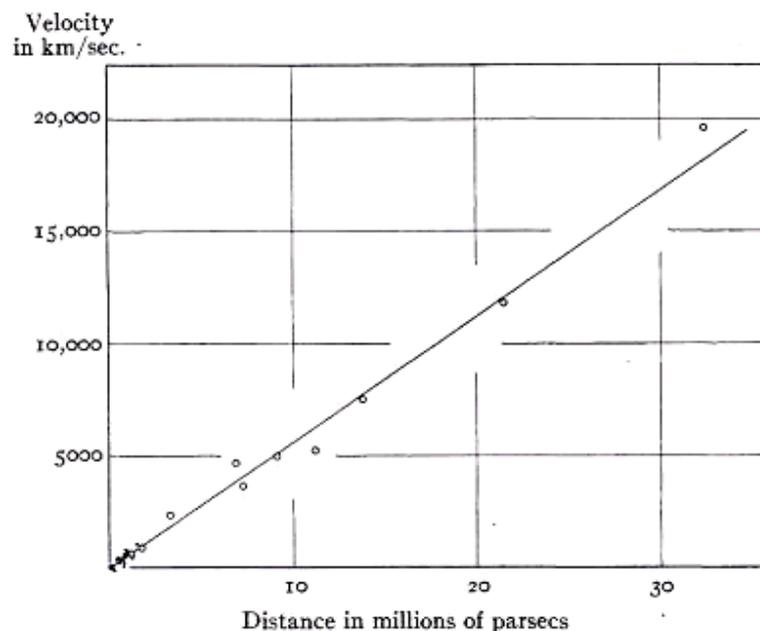


Figura 2.5: la legge di Hubble: esiste una correlazione lineare tra la distanza delle galassie e la loro velocità di allontanamento.

³ A. FRIEDMAN, *Über die Krümmung des Raumes* ("Sulla curvatura dello spazio"), in *Zeitschrift für Physik*, 1922

Infatti, secondo Hubble, una galassia a distanza s da noi si muove in direzione opposta alla nostra con velocità $v = H_0 s$.

H_0 pertanto è dimensionalmente pari a $\left[\frac{v}{s}\right] = [t]^{-1}$, così che il suo inverso ci fornisce l'ordine di grandezza dell'età dell'universo.

2. Il parametro di densità dell'universo Ω_0 : esso determina se l'equazione di Friedmann condurrà ad una indefinita espansione oppure ad una contrazione dell'universo verso un "big crunch". In termini più precisi, se $\Omega_0 > 1$, l'universo si contrarrà indefinitamente fino al big crunch, ovvero $R(t)$ ritornerà, in un certo tempo t , a dimensione zero. Invece, se $\Omega_0 < 1$, $R(t)$ tenderà all'infinito per t tendente all'infinito.
3. Il parametro Ω_0 è definito a partire della somma di due contributi: $\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_\Lambda$. Ω_m è legato al contributo di materia-energia dell'universo, ovvero indica in quale misura la materia e l'energia influiscano sull'espansione dell'universo. Il secondo contributo, Ω_Λ , è associato alla costante cosmologica, che risulta essere legata alla densità di energia nel vuoto. Il parametro Ω_m risulta essere a sua volta composto da due addendi: quello derivante dalla

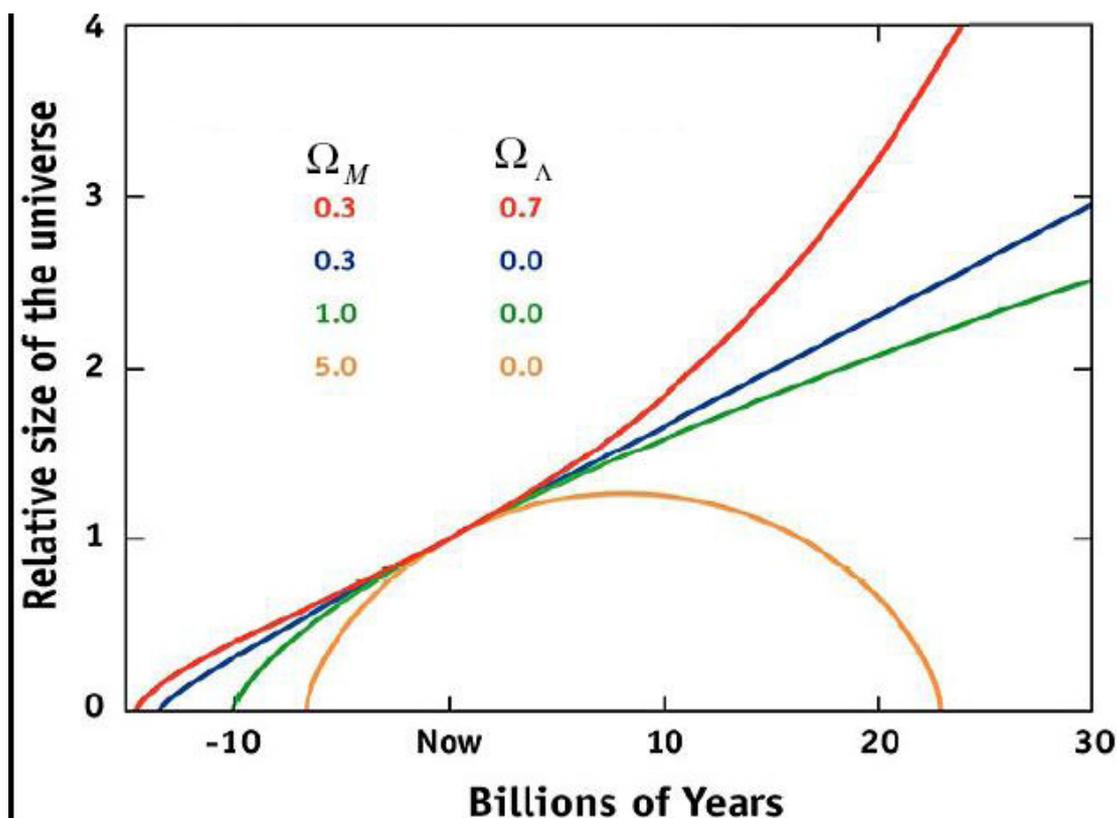


Figura 2.6: il possibile futuro dell'universo. La curva rossa indica un universo in continua espansione, nel quale il contributo dell'energia oscura è rilevante. La curva blu, invece, ipotizza un universo in espansione senza il fattore cosmologico. La curva verde schematizza il modello di un universo "piatto". Infine la curva gialla schematizza la situazione in cui l'universo sia "chiuso", ovvero quella particolare situazione in cui, in un tempo finito, l'universo tornerà a contrarsi per l'eccessivo contributo dato dalla presenza di massa in esso. Si noti che le condizioni attuali (la posizione e la tangente alla retta nel punto "Now") sono sempre verificate.

materia barionica (Ω_B), ovvero tutta quella materia che risulta essere misurabile sperimentalmente, e quello derivante dalla materia oscura (Ω_{DM} , dove DM sta per *dark matter*, materia oscura), ovvero tutta quella materia che deve esistere affinché le osservazioni sull'universo siano coerenti. Essa è puramente presupposta a partire dalla misurazione di alcuni oggetti celesti, i quali non esisterebbero nella maniera in cui li conosciamo se la materia oscura non li pervadesse. Si attendono pertanto ancora evidenze sperimentali circa la natura di tale forma esoterica di materia: un riscontro potrebbe essere fornito dall'esperimento *LHC* (*Large Hadron Collider*, presso il CERN di Ginevra).

4. Infine, un parametro che risulta essere essenziale ai fini della cosmologia sono le perturbazioni del modello di Friedmann. Infatti esso risulta essere valido nell'ipotesi che l'universo sia perfettamente omogeneo ed isotropo, assunzione che chiaramente risulta essere falsa, per quanto già argomentato (§ 2.0). Ciò non viola in alcun modo la sua validità di modello, ma per una descrizione più completa necessitiamo di riscontri sulle sue perturbazioni. Esse risultano essere di due tipi: perturbazioni *scalari*, le quali sono connesse alle disomogeneità della densità dell'universo, di cui si è parlato nella sezione 2.1, e perturbazioni *tensoriali*, connesse all'effetto di onde gravitazionali.

Le caratteristiche di tali parametri possono essere riassunte nella seguente *Tabella 2.1*:

Parametri cosmologici	Caratteristiche
$H_0, \Omega_m, \Omega_\Lambda$	Determinano la dinamica dell'universo : regolano l'andamento del tempo dell'espansione, determinano se essa durerà indefinitamente o meno, ci consentono di determinare la geometria dello spazio in cui viviamo, l'età dell'universo e le dimensioni dell'universo osservabile.
Ω_B, Ω_{DM}	Determinano la natura della materia nell'universo, e gli ingredienti che la compongono.
Ampiezza e forma delle perturbazioni scalari e tensoriali	Descrivono la formazione e l'evoluzione delle strutture su grande scala, e in particolare il modo in cui, dal plasma primordiale, si sono formate le galassie.

Pertanto, gran parte delle peculiarità del nostro universo e della sua evoluzione sono racchiuse in una dozzina di parametri statistici. Essi sono ben visualizzati nella *Tabella 2.2* (alla pag. seguente), la quale reca tutti i parametri cosmologici dedotti dalle osservazioni del satellite WMAP (§ 3.0).

Il fondo cosmico si è rivelato pertanto la miniera di informazioni giusta per tale tipo di speculazione. La misurazione della radiazione cosmica di fondo è quindi essenziale ai fini della determinazione dei parametri cosmologici, come si può intuire da quanto segue. All'interno dell'orizzonte causale nella superficie di ultima diffusione le oscillazioni acustiche del fluido materia-radiazione (misurabili con il procedimento descritto) sono influenzate sensibilmente dal valore relativo delle componenti del fluido, e pertanto dalla natura della materia nell'universo: i due parametri che la descrivono risultano essere Ω_B e Ω_{DM} .

Analogamente il ritmo di espansione H_0 e la densità totale Ω_0 lasciano una traccia indelebile nelle fluttuazioni. In particolare, il valore di Ω_0 è connesso in maniera diretta alla scala angolare $\Theta_{peak,1}$ (dove *peak* sta per "picco") del primo picco delle oscillazioni acustiche dopo la scala angolare Θ_1 (ben visibile nella *Figura 2.4*).

Description	Symbol	WMAP-only	WMAP+BAO+SN
Parameters for Standard Λ CDM Model ^a			
Age of universe	t_0	13.69 ± 0.13 Gyr	13.73 ± 0.12 Gyr
Hubble constant	H_0	$71.9^{+2.6}_{-2.7}$ km/s/Mpc	70.1 ± 1.3 km/s/Mpc
Baryon density	Ω_b	0.0441 ± 0.0030	0.0462 ± 0.0015
Physical baryon density	$\Omega_b h^2$	0.02273 ± 0.00062	0.02265 ± 0.00059
Dark matter density	Ω_c	0.214 ± 0.027	0.233 ± 0.013
Physical dark matter density	$\Omega_c h^2$	0.1099 ± 0.0062	0.1143 ± 0.0034
Dark energy density	Ω_Λ	0.742 ± 0.030	0.721 ± 0.015
Curvature fluctuation amplitude, $k_0 = 0.002$ Mpc ⁻¹ ^b	$\Delta_{\mathcal{R}}^2$	$(2.41 \pm 0.11) \times 10^{-9}$	$(2.457^{+0.092}_{-0.093}) \times 10^{-9}$
Fluctuation amplitude at $8h^{-1}$ Mpc	σ_8	0.796 ± 0.036	0.817 ± 0.026
$l(l+1)C_{220}^{TT}/2\pi$	C_{220}	5756 ± 42 μK^2	5748 ± 41 μK^2
Scalar spectral index	n_s	$0.963^{+0.014}_{-0.015}$	$0.960^{+0.014}_{-0.013}$
Redshift of matter-radiation equality	z_{eq}	3176^{+151}_{-150}	3280^{+88}_{-89}
Angular diameter distance to matter-radiation eq. ^c	$d_A(z_{\text{eq}})$	14279^{+186}_{-189} Mpc	14172^{+141}_{-139} Mpc
Redshift of decoupling	z_*	1090.51 ± 0.95	$1091.00^{+0.72}_{-0.73}$
Age at decoupling	t_*	380081^{+5843}_{-5841} yr	375938^{+3148}_{-3115} yr
Angular diameter distance to decoupling ^{c,d}	$d_A(z_*)$	14115^{+188}_{-191} Mpc	14006^{+142}_{-141} Mpc
Sound horizon at decoupling ^d	$r_s(z_*)$	146.8 ± 1.8 Mpc	145.6 ± 1.2 Mpc
Acoustic scale at decoupling ^d	$l_A(z_*)$	$302.08^{+0.83}_{-0.84}$	$302.11^{+0.84}_{-0.82}$
Reionization optical depth	τ	0.087 ± 0.017	0.084 ± 0.016
Redshift of reionization	z_{reion}	11.0 ± 1.4	10.8 ± 1.4
Age at reionization	t_{reion}	427^{+88}_{-65} Myr	432^{+90}_{-67} Myr
Parameters for Extended Models ^e			
Total density ^f	Ω_{tot}	$1.099^{+0.100}_{-0.085}$	1.0052 ± 0.0064
Equation of state ^g	w	$-1.06^{+0.41}_{-0.42}$	$-0.972^{+0.061}_{-0.060}$
Tensor to scalar ratio, $k_0 = 0.002$ Mpc ⁻¹ ^{b,h}	r	< 0.43 (95% CL)	< 0.20 (95% CL)
Running of spectral index, $k_0 = 0.002$ Mpc ⁻¹ ^{b,i}	$dn_s/d \ln k$	-0.037 ± 0.028	$-0.032^{+0.021}_{-0.020}$
Neutrino density ^j	$\Omega_\nu h^2$	< 0.014 (95% CL)	< 0.0065 (95% CL)
Neutrino mass ^j	$\sum m_\nu$	< 1.3 eV (95% CL)	< 0.61 eV (95% CL)
Number of light neutrino families ^k	N_{eff}	> 2.3 (95% CL)	4.4 ± 1.5

Tabella 2.2: ciò che sappiamo sulla cosmologia. Vengono elencati alcuni valori cosmologici, così come dedotti dalle misurazioni di WMAP, BAO, SN. In particolare, si può notare come la densità di materia barionica (0,04) sia minore della densità di materia oscura (0,21) che a sua volta è minore della densità di energia oscura (0,74). Ciò indica che, a grandi linee, il nostro universo è formato principalmente da energia oscura, che tuttavia (e purtroppo) non sappiamo ancora spiegare. Fonte: esperimento WMAP, http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/dr3/best_params.ps.

Infatti, il valore Ω_0 determina la geometria dello spazio, e la geometria dello spazio determina a sua volta sotto che angolo noi vediamo la dimensione dell'orizzonte alla superficie di ultima diffusione. Infatti, minore è Ω_0 , più la superficie di ultima diffusione è piatta, più noi vediamo esteso l'orizzonte di ultima diffusione, più grande è il valore di $\Theta_{peak,1}$. Invece, aumentando Ω_0 , la superficie di ultima diffusione tende a diventare sempre più curva, in modo tale da farci apparire l'orizzonte alla superficie di ultima diffusione più piccolo.

A questo proposito, si può dimostrare quantitativamente che

$$\Theta_{peak,1} = 200 \times \sqrt{\Omega_0}$$

il che fornisce una stima diretta del valore di Ω_0 a partire dalla misurazione del parametro $\Theta_{peak,1}$.

Si è pertanto cercato di enucleare, seppur in maniera sommaria, i legami tra il fondo cosmico di microonde e la cosmologia: essi sono molto profondi, in quanto l'analisi della radiazione cosmica di microonde porta a determinare in maniera piuttosto precisa la natura del nostro universo.

Capitolo 3. Il satellite Planck e i recenti sviluppi: ovvero in che modo un telescopio riesca a vedere più lontano degli altri.

“An experiment is a question which science poses to Nature, and a measurement is the recording of Nature's answer”⁴

“Un esperimento è una domanda posta dall'uomo alla Natura, e la misurazione è la registrazione della sua risposta.”

3.0: Nuovi strumenti, nuove prospettive

Tra le branche della cosmologia moderna che hanno avuto notevoli sviluppi negli ultimi decenni, lo studio della radiazione cosmica di fondo è sicuramente uno degli ambiti privilegiati, il quale ha portato ad alcune innovazioni anche nel campo tecnologico. Infatti, come accennato nel capitolo precedente, la storia della radiazione cosmica di fondo risulta essere tracciata inizialmente da Penzias e Wilson, ed in seguito da alcuni altri esperimenti, volti alla sua misurazione.

L'esigenza fondamentale, in questo caso, risulta essere quella di uscire dall'atmosfera terrestre; d'altronde, si potrebbe argomentare che Penzias e Wilson hanno misurato senza uscire dall'atmosfera.

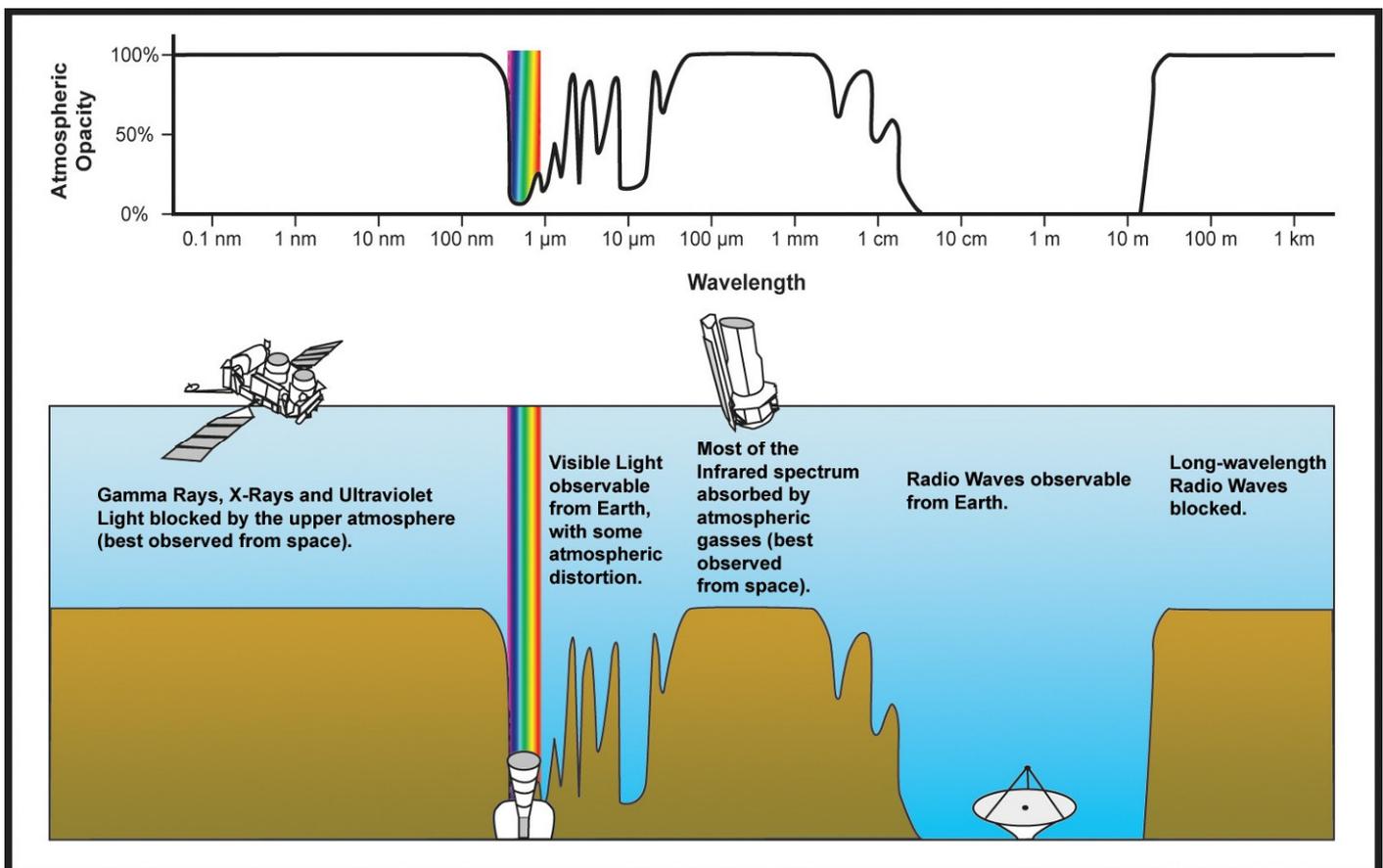


Figura 3.1: “opacità” dell’atmosfera terrestre alla radiazione elettromagnetica in funzione della lunghezza d’onda. Si nota come la radiazione di Penzias e Wilson sia visibile da terra, ma d’altronde la parte interessante dello spettro da analizzare, ai fini della cosmologia con la radiazione cosmica di fondo, sia quella minore ad un centimetro.

⁴ MAX PLANCK, *Scientific Autobiography and Other Papers*, New York 1949, PHILOSOPHICAL LIBRARY

Tuttavia i due scienziati misuravano a 4,080 GigaHertz, frequenza che corrisponde ad una lunghezza d'onda di circa 7 cm. Si evince dal grafico (*Figura 3.1*, pagina precedente) come l'atmosfera terrestre sia trasparente a tale tipo di onde. Come è stato accennato, e come si evince dalle *figure 1.11* e *1.12*, la zona interessante dello spettro elettromagnetico da sondare è proprio quella che è situata a lunghezze d'onda inferiori a 1 cm. Infatti, al di sotto quella lunghezza d'onda si nota l'evoluzione dello spettro di corpo nero della radiazione, e quindi essa deve avere massima intensità proprio in quelle zone. Nondimeno, Penzias e Wilson captarono il segnale anche a lunghezze d'onda di 7 cm circa, ma tale segnale è piuttosto debole e irrilevante ai fini degli studi.

Si profila pertanto la necessità di utilizzare delle sonde che escano dall'atmosfera terrestre, in quanto essa è "opaca" alle microonde da analizzare (con lunghezza d'onda compresa tra 1 cm e un decimo di cm: tale osservazione è facilmente constatabile dal grafico). Le missioni intraprese finora sono state di due tipi: le prime, su pallone aerostatico, il quale, giungendo ad un'altezza di circa 40 km dal suolo, riusciva ad escludere la schermatura della atmosfera (esempi: BOOMERanG, 1998 – 2003; MAXIMA, 1998).



Figura 3.2: esperimento BOOMERanG (1998). Viene preparato il pallone aerostatico che deve raggiungere quota 40.000 m. Il tutto è svolto in Antartide, per la particolare sottigliezza dell'atmosfera e per minimizzare la dispersione termica terrestre.

I contributi più significativi si sono avuti con le missioni al di fuori dell'atmosfera terrestre, con il lancio di satelliti in orbita. Il primo satellite rilevante, COBE, fu lanciato nel 1989 dalla NASA; di esso si è già parlato precedentemente, a proposito dello spettro di corpo nero (§ 1.4); ad esso dobbiamo la scoperta delle anisotropie, sull'ordine dei decimi di millikelvin. Essa venne considerata a livello mondiale, ed a tale proposito George Smoot e John Mather ricevettero il premio Nobel per la Fisica. Inoltre, come è stato affermato, il lancio di COBE determinò la misurazione più precisa mai svolta di uno spettro di corpo nero.

In seguito, nel 2001, venne lanciato il satellite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). Satellite americano, WMAP è ancora in orbita: si prevede che la sua missione finirà nel 2010. WMAP ha portato significativi progressi: siamo ora in grado di stimare con particolare precisione alcuni parametri cosmologici (§ 2.2), e siamo in possesso di una mappa molto dettagliata delle anisotropie della radiazione cosmica di fondo (*Figura 3.3*, pag. seguente).

Sebbene COBE e WMAP abbiano compiuto delle misurazioni molto precise, mappando il cielo il primo a 7°, ed il secondo a 15°, restano delle notevoli domande riguardo alla cosmologia, le quali non possono essere dedotte da tali misurazioni che, peraltro, corroborano in maniera "schacciante" la teoria inflazionaria del big bang. In particolare, misurazioni della radiazione cosmica di fondo con alta risoluzione angolare e sensibilità sono necessarie per determinare le condizioni iniziali per l'evoluzione della struttura dell'universo, l'origine delle fluttuazioni primordiali, ed infine la natura e la quantità della materia oscura.

È così nata la necessità nella comunità scientifica di ottenere delle misurazioni molto più accurate. L'ESA ha pertanto collaborato, con innumerevoli esperti (dei quali una grande rappresentanza è costituita da fisici dell'Università degli Studi di Milano) al progetto di inviare in orbita un satellite necessario per tali misurazioni di precisione.

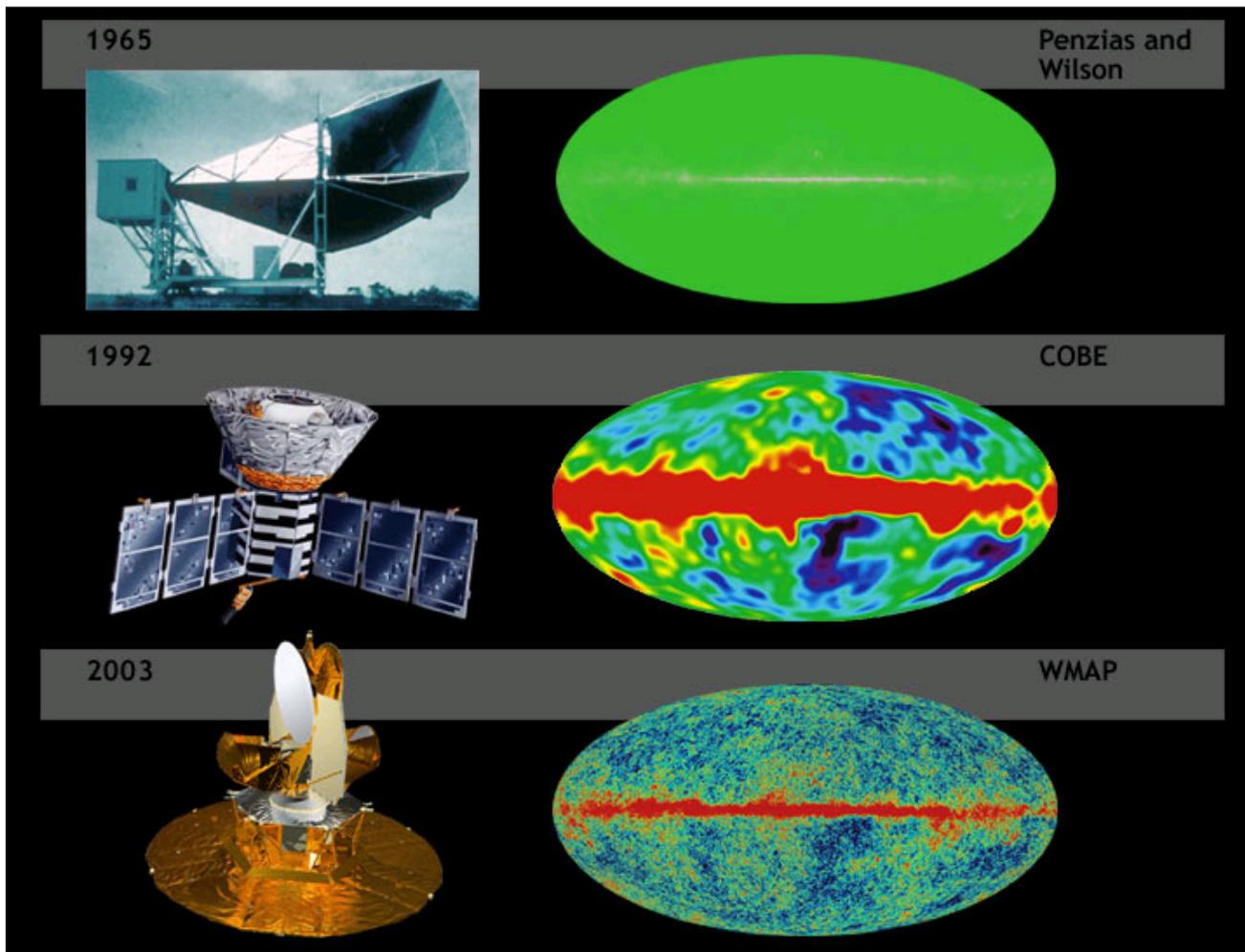


Figura 3.3: l'evoluzione della tecnologia nell'osservazione del fondo cosmico, e le mappe di anisotropia ricavate.

Tale missione, battezzata *Planck* in onore del grande scienziato tedesco Max Planck (1858-1947), ha avuto il suo coronamento con il lancio del satellite nel maggio di quest'anno. Il principale obiettivo della missione *Planck* è quello di misurare le fluttuazione del fondo cosmico con una precisione determinata da fondamentali limiti intrinseci all'astrofisica, oltre ai quali non ci si può spingere. Per svolgere tale compito, *Planck* svolgerà una mappa dell'intero cielo con una sensibilità mai raggiunta precedentemente ($\Delta T / T \approx 2 \times 10^{-6}$, ovvero dell'ordine dei millesimi di mK), con una risoluzione angolare di circa $5'$ e la copertura di tutte le frequenze tra i 30 e gli 857 GHz (quindi con lunghezza d'onda compresa tra circa un centimetro e 3 decimi di millimetro). Tale livello di precisione permetterà a *Planck* di misurare lo spettro angolare di potenza con grande precisione, e permetterà di determinare parametri cosmologici fondamentali come la presenza di materia oscura fredda e la densità di materia barionica con un'incertezza dell'un per cento o persino migliore. *Planck* consentirà di svolgere analisi anche sulla fisica ad energie più alte di 10^{15} GeV, energie che non possono essere analizzate sulla terra (si pensi che LHC, pur compiendo analisi di differente genere, utilizzerà a pieno regime un energia nel centro di massa di 14 TeV, ovvero $1,4 \times 10^4$ GeV). Oltre alle misurazioni cosmologiche, *Planck* produrrà un grande volume di informazioni circa le proprietà di sorgenti extragalattiche nel microonde e sulle proprietà delle sorgenti di microonde all'interno della nostra galassia.

3.1: Il satellite Planck: le specifiche e la missione

La progettazione di un satellite risulta essere un compito alquanto arduo, nel quale si devono adottare soluzioni molto fini ed intelligenti, in maniera da sprecare il minimo di risorse possibili: così la fase di progettazione si è protratta per anni. Nel caso di *Planck* la principale fonte di problematiche risulta essere la riduzione degli effetti termici sistematici del satellite sui rilevatori, ovvero sia l'azione della radiazione termica emessa dal satellite. Infatti, per misurare la radiazione cosmica di fondo, la cui temperatura è di circa 2,7 K, *Planck* necessita di essere tenuto a bassissime temperature. Inoltre si è dovuto tenere conto della riduzione delle impurità ottiche, della cosiddetta *straylight* (quei fotoni che fanno il loro ingresso nel rilevatore "di striscio", e quindi sono da sottrarre), delle interferenze elettriche e delle imprecisioni di puntamento. Il primo accorgimento per minimizzare gli effetti sistematici risulta essere quello di inviare *Planck* in un'orbita lontana dalla Terra e dalla Luna, grandi sorgenti di radiazione termica. Pertanto, *Planck* osserverà il cielo dal secondo punto lagrangiano del sistema Terra-Sole, situato circa quattro volte più lontano da noi della Luna (Figura 3.4)

Da quel punto avvantaggiato, il satellite potrà schermarsi non solo dalla Luna e dalla Terra, ma anche dal Sole, e potrà tenere gli strumenti sensibili nell'ombra, volgendo un pannello al sole. Pertanto, una estremità di *Planck*, il cosiddetto *solar array*, sarà sempre illuminata e calda, mentre l'altra, dove si trovano il telescopio e i rilevatori, sarà sempre scura e fredda. In funzione della riduzione della temperatura presso l'estremità fredda, sono collocate tre superfici riflettenti a forma di cono (nella Figura 3.5, essi sono chiamati *V-grooves*)

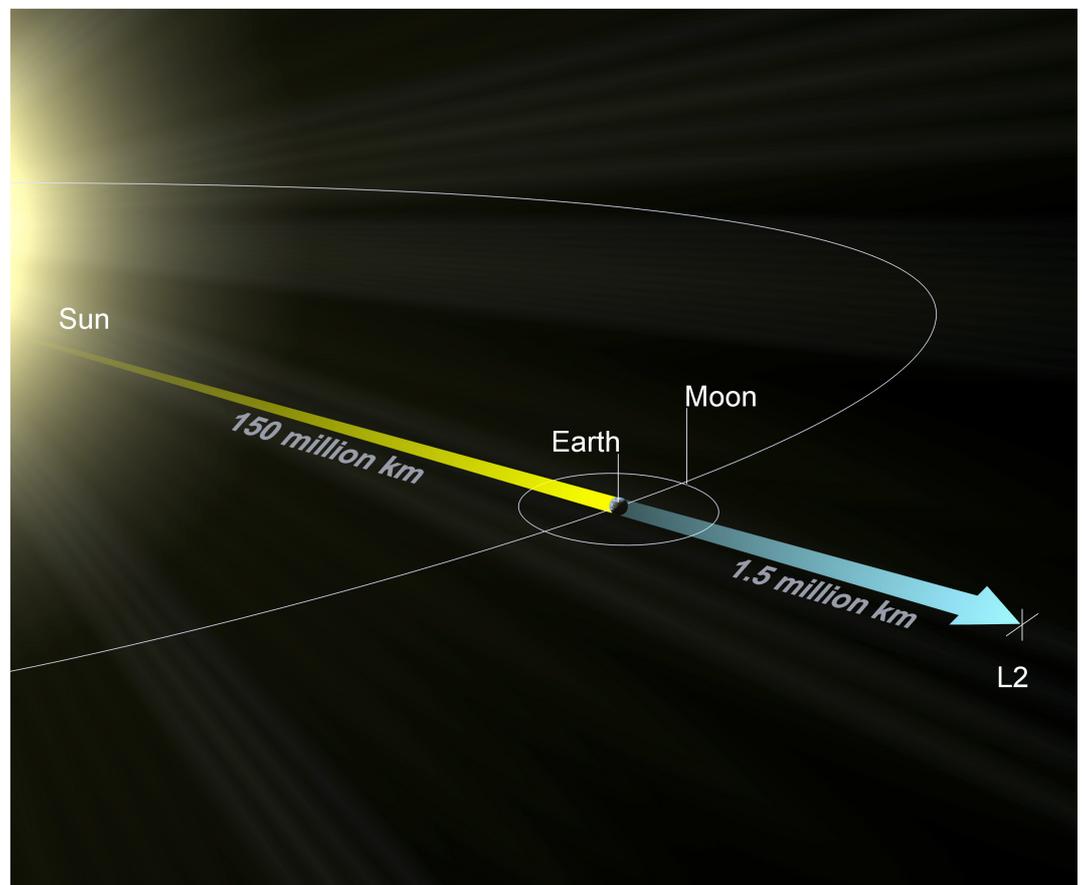


Figura 3.4: il punto lagrangiano L2 del sistema terra-sole, dove resterà Planck, e dove vengono posizionati molti satelliti per l'astronomia. I punti lagrangiani sono quelle regioni dello spazio dove attrazione terrestre, attrazione solare, forza centripeta si annullano vicendevolmente a rendere pressoché nullo il campo attrattivo.

Questi tre elementi permetteranno alla schermatura del *payload* (il cosiddetto *carico utile*, la parte funzionale del satellite) di raffreddarsi passivamente fino a 50 K, e verranno utilizzati per un raffreddamento preliminare del meccanismo criogenico di refrigerazione attiva, il quale porterà il satellite a quelle basse temperature richieste dalle specifiche dei rilevatori sul piano focale. La differenza tra la parte calda del satellite e quella fredda è notevole: nella prima vengono prodotti circa 2000 W di potenza elettrica ad una temperatura di circa 350 K; nella seconda, invece, il meccanismo di raffreddamento rimuove circa 100 nW ad una temperatura di circa 0,1 K. Ciò illustra la notevole tecnologia impiegata nell'isolamento termico delle due parti del satellite.

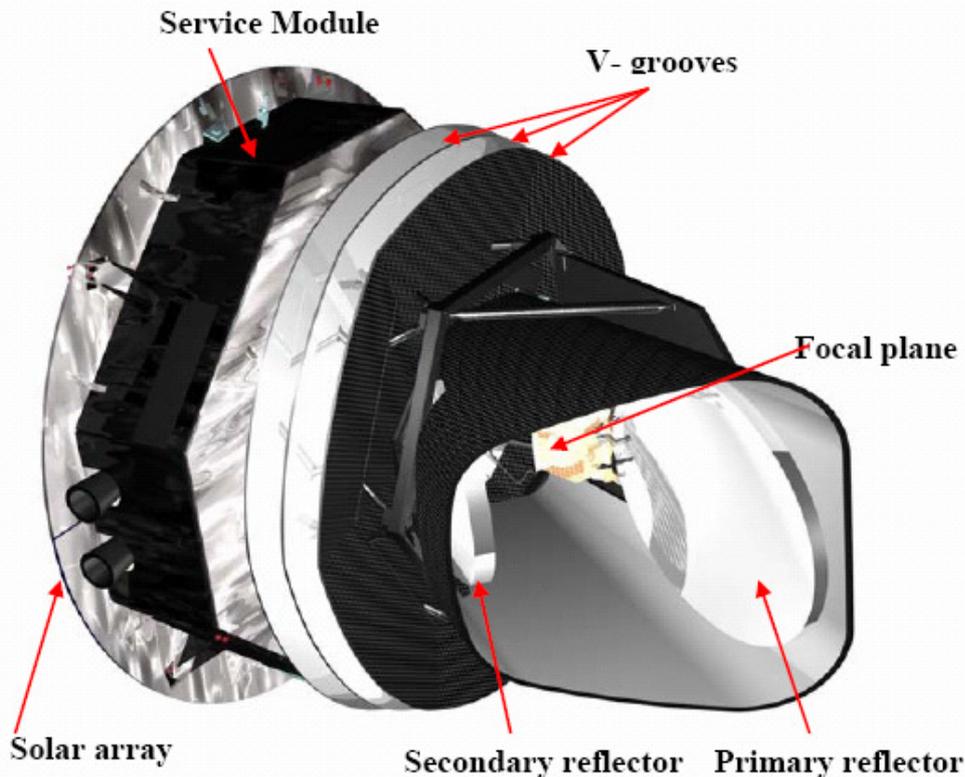


Figura 3.5: configurazione del satellite Planck. Si possono notare il modulo di servizio (service module), parte del velivolo adibita alle funzioni di movimento e connessione con la Terra; gli specchi primario e secondario (primary, secondary reflector); il piano focale (focal plane), dove vengono posizionate le antenne; lo schermo solare contenente i pannelli (solar array), il quale produce energia elettrica; e i tre “solchi a forma di V” (V-Grooves), ovvero i tre pannelli per l’isolamento termico.

Diversamente da quanto accade per la maggior parte dei satelliti, i quali osservano un grande numero di sorgenti celesti puntiformi, *Planck* osserverà un singolo oggetto: il cielo intero. Per mappare l'intera sfera celeste mantenendo una condizione termica stabile, il satellite ruoterà ad una velocità di un giro al minuto attorno ad un asse diretta verso il Sole (precisamente, nella *Figura 3.4*, l'asse congiungente L2, la Terra e il Sole). Nella rotazione, il campo visivo del telescopio copre un arco di 170° (non di 180° , in quanto lo specchio primario risulta essere inclinato di 85° rispetto alla congiungente Terra-Sole). Tale arco è osservato ripetutamente da tutti i rilevatori per 45 minuti. In questo tempo, il moto orbitale del satellite avrà causato uno spostamento di circa 2,5 arcominuti rispetto al Sole; tale discrepanza viene corretta da periodiche attivazioni dei propulsori del satellite, che ricalibrano il cerchio osservato nel cielo dello stesso angolo. In questa maniera, l'intero cielo (seguendo appunto il moto orbitale della Terra, che impiega un anno a compiere una rivoluzione com-

pleta) verrà coperto da *Planck* in sei mesi (infatti basta una rotazione di 180° del satellite attorno al suo asse). Vi sono tuttavia delle complicazioni, dovute alla necessità di comunicare a terra i dati, e di passare più volte su bersagli di “calibrazione”, i quali permettono di verificare quale sia la risposta del rilevatore col variare del tempo.

Planck è stato lanciato, assieme al satellite *Herschel*, da un razzo *Ariane 5* il 14 maggio 2009 dalla Guyana Francese (la postazione più vicina all’equatore posseduta da uno Stato europeo). Alcuni minuti dopo il lancio, i due satelliti si sono separati dal razzo per giungere autonomamente al punto



Figura 3.6: una parte del satellite Planck sta per essere introdotta nella camera di test per lo spazio aperto, nella quale si creano condizioni di vuoto spinto, nel centro Thales Alenia Space presso Cannes.

lagrangiano L2. Saranno necessari circa due mesi affinché *Planck* giunga a destinazione. Una volta arrivato, verranno utilizzati i successivi due mesi per svolgere la calibrazione degli strumenti, e le preparazioni dell’*hardware*. Dopo tale procedimento, *Planck* inizierà a misurare il cielo, e si prevede che tale misurazione verrà svolta almeno due volte.

3.2: Gli esperimenti: High Frequency Instrument e Low Frequency Instrument

Seguiamo dunque il percorso di un’onda elettromagnetica che giunge dalla radiazione cosmica di fondo; dopo avere percorso circa 46 miliardi di anni luce, tale radiazione giunge inaspettatamente a collidere con un’insolita apparecchiatura: il satellite *Planck*. Una volta entrata in contatto con lo specchio primario, il raggio viene riflesso sullo specchio secondario e di qui viene portato al piano focale, su cui sono posizionati gli strumenti *HFI* ed *LFI*. Per ottenere una risoluzione di circa 10 arcominuti nel cielo su di una lunghezza d’onda di tre millimetri (100 GHz), l’apertura del telescopio deve essere di circa un metro e mezzo. L’ottica è congegnata in modo tale da minimizzare la contaminazione di radiazioni da sorgenti al di fuori del cosiddetto *main beam*, ovvero la parte di cielo che si vuole veramente osservare. Dopo essere stato riflesso da primario e secondario, focalizzato a dovere, il raggio viene incanalato nelle cosiddette “antenne corrugate”, delle strutture coniche le

quali hanno il compito di captare il segnale, cercando di evitare tutta la *straylight* proveniente da sorgenti non misurate.

A tale scopo viene svolto uno specifico studio in laboratorio su tali antenne (di cui ebbi una dimostrazione nella “poco poetica” analisi di laboratorio descritta nell’introduzione). Le si posizionano in una camera anecoica, con una sorgente alla frequenza desiderata, e si misura la risposta dell’antenna in funzione dell’angolo di incidenza della radiazione a microonde. Ci si aspetta che si capterà molta potenza quando l’antenna è diretta parallelamente ai raggi, ed invece meno potenza quando l’antenna è rivolta obliquamente oppure perpendicolarmente; il fatto interessante è che si ottengono curve del tipo illustrato nella figura 3.7; in essa, in ascissa viene indicato l’angolo di incidenza e in ordinata la potenza corrispondente, misurata in scala logaritmica. Si noti, in particolare, che la fascia centrale, compresa tra le crocette, il cosiddetto *main beam*, ha l’andamento di una parabola.

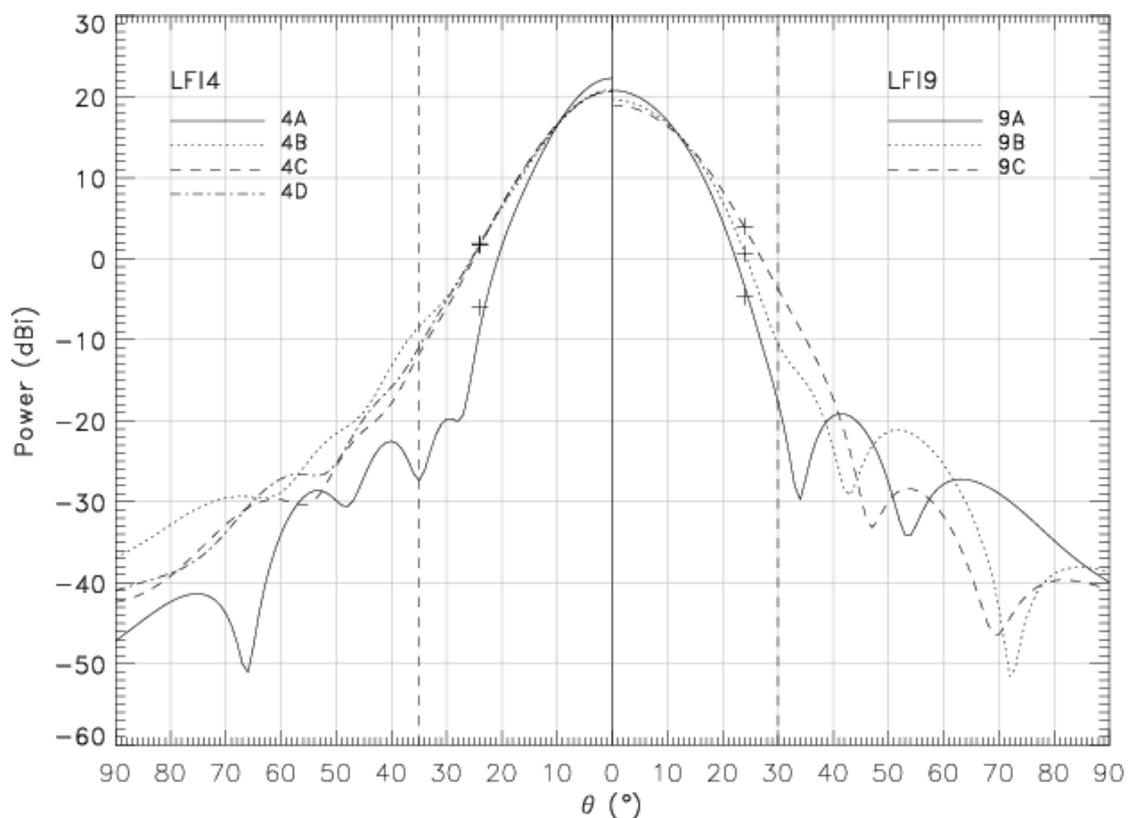


Figura 3.7: risposta di una antenna corrugata al variare dell’angolo di inclinazione rispetto alla sorgente.

Si notino inoltre le fluttuazioni a lato del *main beam*, la cosiddetta *straylight*, minimizzata dalla presenza di corrugazioni.

Nella Figura 3.8 (pag. seguente) si possono notare i due principali strumenti di cui si avvarrà *Planck* per l’analisi della radiazione cosmica di fondo: *HFI* (*High Frequency Instrument*) e *LFI* (*Low Frequency Instrument*). *HFI* andrà a sondare frequenze alte, ed è “alimentato” da tutte le piccole antenne poste al centro del piano focale. *LFI*, invece, riceve il segnale dalle altre antenne, posizionate tutt’attorno ad *HFI*, e di dimensioni sensibilmente maggiori.

Bisogna notare che *LFI* è stato completamente progettato e portato avanti da un'equipe italiana, composta da Reno Mandolesi, Marco Bersanelli e molti collaboratori dell'Università degli Studi di Milano.

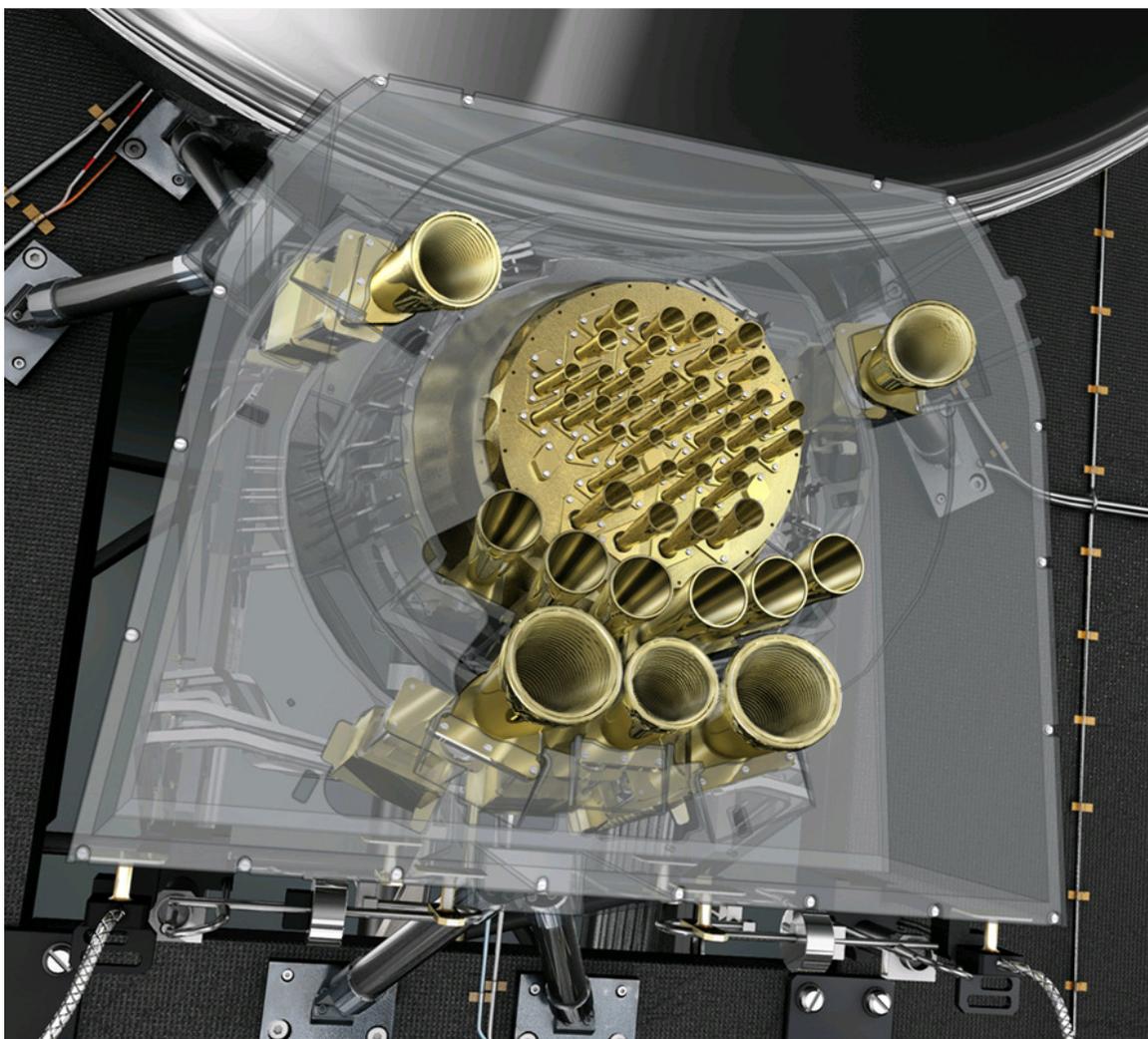


Figura 3.8: HFI ed LFI sul piano focale di Planck

Come si è precedentemente accennato, *Planck* non svolgerà unicamente misurazioni del fondo cosmico. Si misureranno infatti anche notevoli contributi dalla nostra galassia, i quali sono riassunti nel grafico seguente (*Figura 3.9*, pag. seguente), assieme alle diverse bande di frequenza dei due strumenti. In ascissa è rappresentata la frequenza della radiazione osservata, e in ordinata la variazione di temperatura delle varie sorgenti in funzione appunto della frequenza a cui si osserva. Bisogna premettere che tali oscillazioni sono “fotografate” a delle scale angolari di circa un grado: la cosa si fa molto complicata perché le oscillazioni caratteristiche variano di scala angolare in scala angolare. *Planck* andrà ad osservare con una risoluzione angolare di qualche minuto d'arco, il contributo derivante dalla galassia verrà così ridotto. Vengono elencate varie sorgenti, come la CMB (*Cosmic Microwave Background*, radiazione cosmica di fondo), l'emissione di sincrotrone (*synchrotron*), l'emissione *free-free* o per *bremstrahlung* e l'emissione delle polveri interstellari (*dust*).

Si noti in che modo *Planck* andrà a studiare le varie lunghezze d'onda: le bande grigie rappresentano ciascuna una banda di sensibilità degli strumenti a bordo di *Planck*. Le prime tre bande verticali corrispondono allo strumento LFI (30, 44, 70 GHz), mentre le ultime cinque bande sulla destra cor-

rispondono alle frequenze analizzate da HFI (143, 217, 353, 545, 857 GHz). La banda centrata in 100 GHz è stata eliminata in seguito a ridimensionamenti di budget (come spesso succede in Italia).

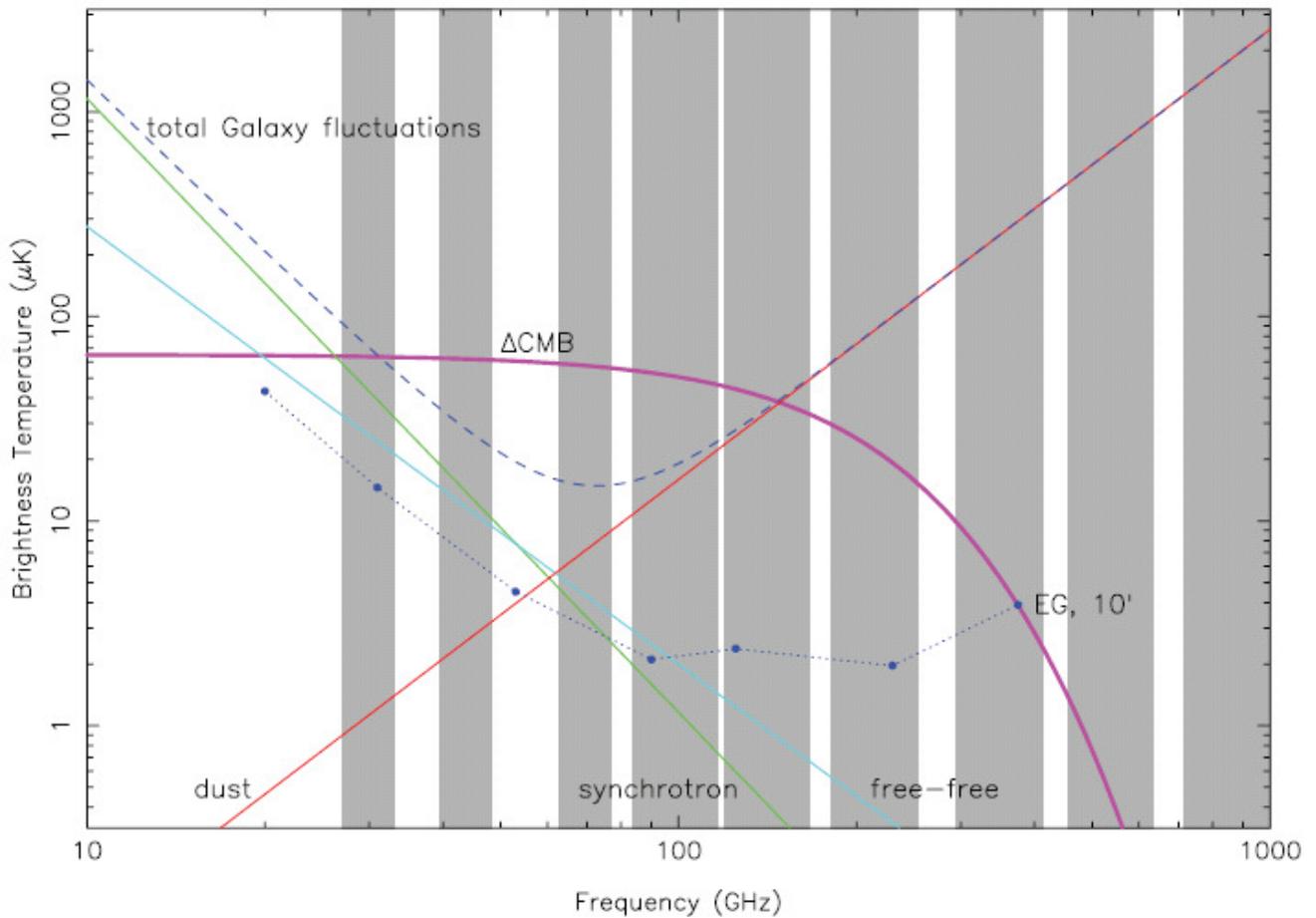


Figura 3.9: le sorgenti captate da Planck, gli strumenti HFI e LFI.

Da quanto argomentato si evince perciò che il satellite non andrà a svolgere compiti mai portati a termine. Esso si occuperà semplicemente di fornire un'immagine del cielo e della radiazione a microonde con una definizione senza precedenti, e proprio tale caratteristica risulta essere innovativa, in quanto la definizione a cui si giunge risulta davvero significativa per la determinazione dei parametri cosmologici.

Conclusione. Enigmi cosmici: ovvero la necessità di spiegare il 96 per cento della materia nell'universo.

*Non domandarci la formula che mondi possa aprirti,
sì qualche storta sillaba e secca come un ramo.
Codesto solo oggi possiamo dirti,
ciò che non siamo, ciò che non vogliamo.*⁵

L'aspetto forse più intrigante dell'analisi condotta dalla Fisica in questi anni è la presenza di domande aperte, di questioni irrisolte. Così che i fisici, alla situazione attuale, non possono affermare che qualche "storta sillaba e secca come un ramo": tali sillabe (anzi, una loro infinitesima parte) risultano essere l'oggetto del presente approfondimento.

Riferendoci alle recenti scoperte svolte da *WMAP* (preso in considerazione nel § 3.0), satellite della *NASA* simile a *Planck*, ed i cui principali risultati sono riassunti nella *tabella 2.2*, si può affermare che il nostro universo, al momento attuale, è molto simile ad un universo "piatto": la sua curvatura (data dalla presenza di massa che influenza lo spazio) non è molto forte. Ciò permette di dedurre, tramite alcuni complessi calcoli, i risultati della *tabella 2.2*. Affinché il tasso di curvatura dell'universo sia quello attuale, vi deve necessariamente essere una notevole quantità di materia e di energia non osservata, ma che tuttavia influisce sulla struttura dello spazio-tempo, rendendolo così come lo osserviamo.

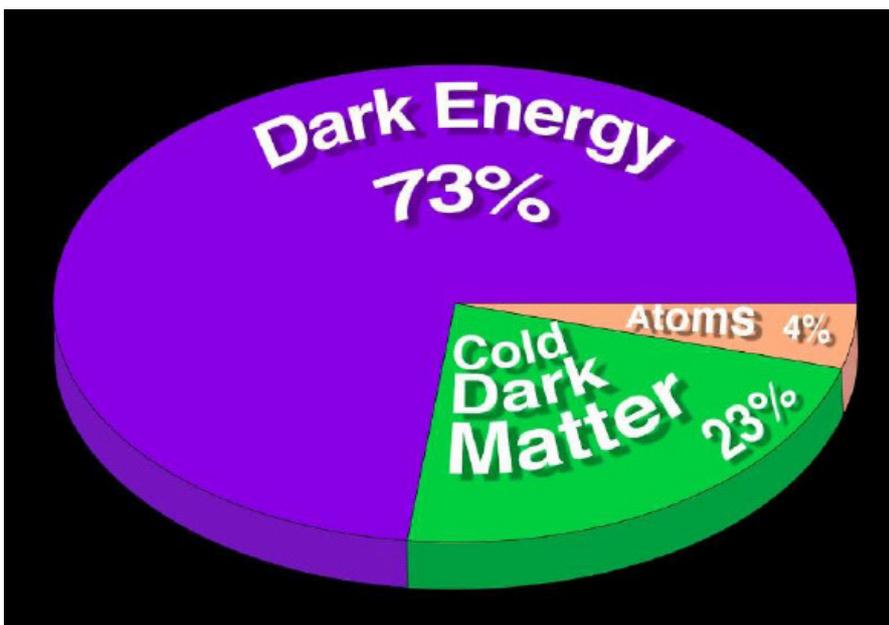


Figura 4.0: il contenuto dell'universo. Gli atomi e tutte le forme di materia osservabili risultano essere solo il 4% del totale. Sappiamo dell'esistenza del resto, ma non conosciamo la sua natura.

altissima energia per studiare il comportamento delle particelle subatomiche.

Da tale sommaria panoramica si può dedurre la stretta connessione tra diversi ambiti della Fisica: le leggi che governano l'universo nel suo insieme, l' "infinitamente grande", sono strettamente legate alle interazioni che si verificano nell' "infinitamente piccolo".

⁵ EUGENIO MONTALE, *Non chiederci la parola*, in *Ossi di seppia*, Torino 1925, GOBETTI

Si è dunque cercato di tracciare, nel lavoro, una breve e incompleta spiegazione di molti aspetti della nostra analisi del cosmo, prendendo come punto di partenza la radiazione cosmica di fondo. Tuttavia, la sostanziale considerazione che tali analisi sottendono prende le sue mosse dal pomeriggio trascorso a compiere misurazioni angolari su di un'antenna. Tale antenna, infatti, è molto simile a quelle installate ora sul satellite *Planck*, che si trova a circa un milione e mezzo di chilometri dalla Terra.

Pertanto, sebbene quelle misurazioni siano state davvero poco poetiche in sé, considerate invece alla luce di tutta la storia che le precede, di tutta la storia che sta loro davanti, non sono così aride come potrebbero apparire in prima istanza. Infatti, esse sono parte di una storia, che dura circa da quattrocento anni: dal 1609, anno in cui Galileo iniziò a guardare il cielo. Da quel momento la natura è stata costantemente la vittima di un interrogatorio da parte degli uomini di scienza. La poesia della Fisica resta tutta qui: l'utopia di cercare un *file rouge* all'interno del cosmo, la irrazionale scommessa nella comprensibilità dell'universo. Il quale si sottopone volentieri al nostro interrogatorio, ponendo a sua volta delle domande non banali. E ciò desta, in qualche modo, un grande stupore. Mi piace identificare lo scopo del presente approfondimento, così come quello della missione *Planck*, in tale scommessa nella razionalità del cosmo.

Al momento attuale (7 giugno 2009) il satellite *Planck* è presso il punto lagrangiano L2 (a circa un milione e mezzo di chilometri dalla Terra), e sta predisponendo tutti i suoi sensori in modo tale da essere operativo e comunicare con il centro di raccolta dei dati (a Trieste) in breve tempo. Presto riceveremo delle notizie del satellite, e forse verremo a conoscenza di ulteriori questioni da risolvere, le quali produrranno ulteriori questioni, e così via.

A conclusione del lavoro pongo un passaggio di Richard Feynman (grande fisico del Novecento), chiosato nell'opera *Lectures on physics*: esso risulta alquanto significativo in relazione alla motivazione profonda del mio lavoro di approfondimento, una contemplazione (attraverso gli occhi della Fisica) dell'universo nel suo insieme.

«But the most remarkable discovery in all of astronomy is that *the stars are made of atoms of the same kind as those on earth*»^{*}

*How I'm rushing through this! How much each sentence in this brief story contains. "The stars are made of the same atoms as the earth." I usually pick one small topic like this to give a lecture on. Poets say science takes away from the beauty of stars – mere globes of gas atoms. Nothing is "mere". I too can see the stars on a desert night, and feel them. But do I see less or more? The vastness of the heavens stretches my imagination – stuck on this carousel my little eye can catch one-million-year-old light. A vast pattern – of which I am a part – perhaps my stuff was belched from some forgotten star [...] Or see them with the greater eye of Palomar, rushing all apart from some common starting point when they were perhaps all together. What is the pattern, or the meaning, or the why? It does not do harm the mystery to know a little about it. For far more marvelous is the truth than any artist of the past imagined! Why do the poets of the present not speak of it? What men are poets who can speak of Jupiter if he were like a man, but if he is an immense spinning sphere of methane and ammonia must be silent?»⁶

«Ma la più sensazionale scoperta di tutta l'astronomia è che le stelle sono fatte di atomi dello stesso tipo di quelli sulla terra»^{*}

*Come mi sto affrettando nella trattazione! Quanto significato contiene ciascuna frase in questa breve storia. "Le stelle sono fatte di atomi dello stesso tipo di quelli della terra". Di

⁶ RICHARD FEYNMAN, *Lectures on physics*, Reading (Massachusetts) 1964, ADDISON-WESLEY, vol. 1, chap. 3, p. 6.

solito scelgo un piccolo argomento come questo per tenere una conferenza. Alcuni poeti sostengono che la scienza tolga la bellezza dalle stelle – ridotte a “banali” ammassi di gas. Non c’è nulla di “banale”. Anche io posso vedere le stelle nella notte deserta, e sentirle. Ma vedo di meno o di più? La vastità dei cieli colpisce la mia immaginazione – bloccato su questa giostra il mio piccolo occhio può catturare luce vecchia di un milione di anni. Un grande disegno – di cui sono parte – forse la materia di cui sono composto è stata scagliata via da una stella dimenticata [...] O vederle col più grande occhio di Palomar: tutte provengono da un comune punto di origine, dove forse erano riunite tutte insieme. Qual è il disegno, o il significato, o il perché? Il mistero non è svelito se è conosciuto in parte. Poiché la verità è ancor più meravigliosa di quanto ogni artista del passato abbia mai immaginato. Perché i poeti moderni non ne parlano? Che uomini sono quei poeti che possono parlare di Giove come se fosse un uomo, ma che, se esso è una enorme sfera rotante di metano e ammoniaca, rimangono muti?»

Bibliografia

STEVEN WEINBERG, *The first three minutes* (I primi tre minuti),
New York 1993, BASIC BOOKS

MARCO BERSANELLI, NICOLA VITTORIO, *Cosmologia con il fondo cosmico di microonde*,
in “Quaderni delle Scienze”, n. 117 (dicembre
2000), pagg. 88-95.

DENNIS SCIAMA, *Modern cosmology* (Cosmologia moderna),
Cambridge 1972, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS

ROBERT OSSERMAN, *Poetry of the universe - a mathematical exploration of the cosmos* (Poesia
dell'universo – l'esplorazione matematica del cosmo),
New York 1995, RANDOM HOUSE

J. TAUBER, M. BERSANELLI, J. M. LAMARRE, *Planck: its science, instrumentation and
measurement techniques*, in “Sterne und
Weltraum”, febbraio 2008

J. TAUBER ET AL., *Planck: the scientific programme (bluebook)*,
rapporto pubblicato sul sito dell'Agenzia Spaziale Europea il gennaio 2005

RICHARD FEYNMAN, *Lectures on physics* (Lezioni di Fisica),
Reading (Massachusetts) 1964, ADDISON-WESLEY

MAX PLANCK, *Scientific Autobiography and Other Papers*,
New York 1949, PHILOSOPHICAL LIBRARY

Sitografia

PIERLUIGI MONACO, dispense del corso di “Introduzione all'astrofisica”, presso l'università di
Trieste, <http://physics.infis.univ.trieste.it/~monaco/node31.html>

C. L. BENNETT ET AL., *First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)
Observations: Preliminary Maps and Basic Results*. Articolo sulle osservazione compiute da
WMAP, http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0302/0302207v3.pdf

M. SANDRI ET AL., *Trade-off between angular resolution and straylight contamination in the
Planck Low Frequency Instrument* (Interazione tra risoluzione angolare e impurità dovute alla *stray-
light* nello strumento a bassa frequenza di *Planck*),
<http://www.aanda.org/index.php?option=article&access=standard&Itemid=129&url=/articles/aa/full/2004/46/aa1435/aa1435.right.html>

Conferenze e stage

DANIELE MENNELLA, *Origine ed evoluzione dell'universo*, conferenza del 4 dicembre 2007
presso il Dipartimento di Fisica dell'università degli studi di Milano

MARCO BERSANELLI, conferenza divulgativa sul lancio del satellite *Planck* presso l'Università
degli studi di Milano, sabato 23 maggio 2009

Esperienza di laboratorio presso il Dipartimento di Fisica, tre pomeriggi di lavoro sulla radiazione cosmica di fondo e sullo studio di un'antenna simile a quelle poste su *Planck*

Fonti fotografiche

<http://www.fisica.unimi.it>

<http://www.astro.rug.nl/>

D. Mennella, Origine ed evoluzione dell'universo, *slide* esposte durante la conferenza

<http://articles.adsabs.harvard.edu/>

<http://conferences.fnal.gov/>

<http://www.pas.rochester.edu/>

<http://www.galacticfool.com/>

<http://www.astro.ucla.edu/>

<http://map.gsfc.nasa.gov/>

<http://www.lbl.gov/>

<http://abyss.uoregon.edu/>

<http://nedwww.ipac.caltech.edu/>

<http://www.mso.anu.edu.au/>

<http://www.cnes.fr/>

<http://lambda.gsfc.nasa.gov/>

<http://zebu.uoregon.edu/>

<http://esamultimedia.esa.int/>