

**Missione Planck:**  
**Misura della Radiazione Cosmica di Fondo**

**Visita di studio presso Laben - Alenia Spazio, Vimodrone (Milano)**

**A cura di E. Daddi e J. Groccia**

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Missione Planck.....                                                     | 1  |
| 1. Introduzione.....                                                     | 3  |
| 1.1. Come mai da millenni stiamo tutti col naso all'insù? .....          | 3  |
| 1.2. La nascita della Cosmologia .....                                   | 5  |
| 1.3. COBE e WMAP .....                                                   | 6  |
| 1.4. Planck .....                                                        | 8  |
| 2. Laben.....                                                            | 10 |
| 2.1. Nascita e sviluppo.....                                             | 10 |
| 2.2. Come si evolve una Missione Spaziale .....                          | 11 |
| 2.3. Qualità, sicurezza e affidabilità.....                              | 15 |
| 3. Aspetti scientifici della Missione Planck .....                       | 16 |
| 3.1. Quanto lontano posso guardare nel tempo?.....                       | 16 |
| 3.2. Radiazione Cosmica di Fondo .....                                   | 20 |
| 3.3. Significato della Radiazione Cosmica e delle sue fluttuazioni ..... | 22 |
| 3.4. Da COBE a Planck .....                                              | 25 |
| 4. LFI: Low Frequency Instrument.....                                    | 27 |
| 4.1. Cosa è LFI.....                                                     | 27 |
| 4.2. Albero di prodotto di LFI.....                                      | 30 |
| 4.3. LFI Radiometer .....                                                | 32 |

# 1. Introduzione

## 1.1. Come mai da millenni siamo tutti col naso all'insù?

Fin dalla nascita dell'Universo, l'uomo ha sempre osservato il cielo. Fino a poco tempo fa, questa attività era basata solo su speculazioni, in quanto non c'erano riscontri osservativi sull'origine, sull'evoluzione e sulla costituzione materiale dell'Universo.

Le prime teorie interessanti sul problema della nascita dell'Universo e delle leggi che lo regolano, risalgono al 1915, quando Albert Einstein, nello scrivere le sue equazioni sulla relatività e nell'applicarle alla derivazione delle nuove leggi della gravitazione (dopo quasi 200 anni da quelle formulate da Newton), inserì una costante, detta cosmologica.

Questa "Costante Cosmologica" serviva ad evitare che la sua soluzione cosmologica non portasse le equazioni sulla relatività a divergere, creando così un Universo incapace di stare in piedi. Einstein sosteneva che l'Universo fosse stazionario e immutabile, quindi inserì questa costante cosmologica affinché tenesse compatta tutta la materia dell'Universo.



Figura 1: Edwin Hubble

Alcuni anni dopo, però, l'astronomo **Edwin Hubble**, guardando le galassie lontane, scoprì che queste ultime si allontanano da noi, infatti, se ipotizziamo di avere un certo numero di elementi in un moto rotatorio, posso vedere, tramite uno spettrografo, le frequenze alle quali questi oggetti emettono luce (intesa come radiazione elettromagnetica). Ottengo uno spettro con delle righe posizionate su determinate frequenze, ma se guardo lo stesso spettro prodotto dagli elementi che fanno parte delle galassie lontane, noto che esso è traslato interamente e rigidamente verso il rosso, ovvero shifta verso il rosso. Questo fenomeno è chiamato appunto "Redshift" ed è causato dall'effetto Doppler, ovvero vedo la frequenza di radiazione emessa da un corpo che si sta allontanando da noi ad una frequenza leggermente più bassa, in base alla velocità di avvicinamento o allontanamento del corpo che stiamo considerando.

Hubble notò che più sono lontane le galassie, più è grande la loro velocità di allontanamento, inoltre la velocità di fuga delle galassie è direttamente proporzionale alla distanza da noi, questo si osserva in tutte le direzioni, ciò significa che lo spazio si sta espandendo.

Anche Hubble introdusse una costante chiamata appunto "Costante di Hubble", che esprime la proporzionalità tra la distanza di un oggetto e la sua velocità di fuga rispetto ad un osservatore che sta sulla Terra. La scoperta di Hubble portò Einstein a definire la sua costante cosmologica come "il più grande errore della sua vita".

Appurato che l'Universo era, ed è tuttora, in espansione, si decise di riesumere una teoria formulata indipendentemente da Friedman nel 1922 e da **George Lemaître** nel 1927: la "Teoria del Big Bang".

Lemaître supponeva che l'Universo si fosse sviluppato a partire da uno stato iniziale di densità elevatissima, che via via si fosse espanso fino ad ottenere l'attuale densità media, ovvero un Universo che contenga le stelle, le galassie, gli ammassi di galassie e così via.

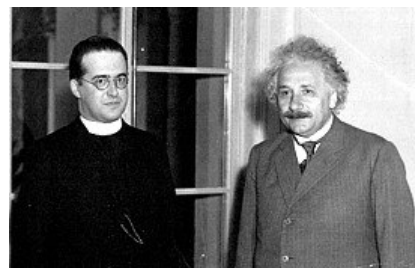


Figura 2: Lemaître e Einstein



Figura 3: George Gamow

Nel 1948 un fisico russo, **George Gamow**, prevede una radiazione, chiamata "Radiazione Cosmica di Fondo". In pratica ipotizzava che, se l'Universo si è generato a seguito di una grande esplosione, quest'ultima deve aver emesso una radiazione ad una certa frequenza, che in questo periodo di tempo si è espansa insieme allo Spazio.

Nei primi istanti, questo allargamento può essere avvenuto a velocità superiore della velocità della luce, per cui adesso noi saremmo in grado di "vedere" questa radiazione; se all'inizio ho una certa lunghezza d'onda, man mano che l'universo si espande, anche la stessa lunghezza d'onda si dilata.

Secondo i calcoli di Gamow, oggi dovremmo essere in grado di osservare una radiazione nella gamma delle microonde.

Tutti i corpi a temperatura diversa dallo 0 assoluto emettono una radiazione elettromagnetica e lo spettro di questa radiazione emessa dipende dalla temperatura a cui si trova il corpo in osservazione. Il "Corpo Nero" è un corpo ideale che emette e riassorbe esattamente la stessa radiazione, la radiazione incidente o emessa ha uno spettro particolare che segue la cosiddetta "Legge di Planck". Se effettivamente c'è stato il Big Bang, noi dovremmo poter osservare una radiazione che corrisponde all'emissione di un corpo nero alla temperatura di circa  $3^{\circ}\text{K}$ , questa radiazione deve essere la stessa indipendentemente dalla direzione di osservazione.

Se andiamo a vedere lo spettro di radiazione di Planck, notiamo che per un corpo a  $3^{\circ}\text{K}$  le componenti maggiormente significative si trovano nella gamma delle microonde, in particolare dai 10 ai 1000 GHz.

Successivamente all'ipotesi di Gamow, si scatena una vera e propria caccia alla radiazione, ma non è affatto facile misurare una radiazione a  $3^{\circ}\text{K}$ , perché tutti i corpi che ci circondano sulla Terra si trovano ad una temperatura di almeno  $300^{\circ}\text{K}$ .

Nel 1963, circa 20 anni dopo, due Ingegneri, facendo delle misure su un'antenna, notarono che per loro era impossibile eliminare una componente di rumore.

I loro nomi erano **Arno Penzias** e **Robert Wilson**, ovvero coloro che trovarono "casualmente" il rumore cosmico di fondo e questa soluzione fu riconosciuta solo nel 1964, dopo misure più accurate.



Figura 4: Penzias e Wilson

## 1.2. La nascita della Cosmologia

Con la misura della radiazione cosmica di fondo, nasce la “Cosmologia” come scienza sperimentale, cioè tutto quello che precedentemente veniva considerato filosofia, religione e fenomeno su cui speculare, adesso diveniva qualcosa di “verificabile”, per cui tutte le precedenti teorie sulla nascita dell’Universo potevano essere valutate sulla base della radiazione cosmica di fondo.

Subito si pensò che la prima luce, che si sarebbe poi trasformata in questa radiazione di fondo, non poteva essere stata emessa all’istante del Big Bang, poiché ad una densità così elevata la materia non è composta da atomi, elettroni o molecole, bensì è un impasto di particelle subatomiche miste ad energia. L’Universo era quindi “opaco”, ovvero sarebbe stata impossibile la propagazione all’interno di quel tipo di Universo, questo sarebbe stato plausibile solo dopo un periodo di raffreddamento, durato circa 300.000 anni. All’epoca della ricombinazione della materia, l’energia rimasta è diventata radiazione.

Nel momento in cui questa radiazione è stata emessa, però, l’Universo non era più omogeneo, perché dopo 300.000 anni si stavano cominciando a creare le stelle e le galassie, questo comporta che la radiazione che si osserva in tutto il cielo, non può risultare uguale in tutte le direzioni di osservazione, ci sono dunque delle “anisotropie”, ovvero piccole differenze tra una direzione e l’altra.

Conoscere la mappa delle temperature, per individuare quanto valgono queste differenze e come sono distribuite sulla sfera celeste, equivale a confermare o a smentire la fondatezza delle varie teorie che sono state formulate sulla struttura e sulla composizione dell’Universo.

La prima teoria dice:

$$\frac{\Delta T}{T} \cong 10^{-2}$$

Cerco delle disomogeneità nell’ordine di  $10^{-2}$  del valore della temperatura, se trovo conferma la teoria è plausibile, altrimenti viene cancellata.

Per questa prima teoria non è stato trovato nulla.

La seconda teoria dice:

$$\frac{\Delta T}{T} \cong 10^{-3}$$

Anche per questa teoria non è stato trovato nulla. Così, tutte le teorie che presentano anisotropie di valore  $\Delta T/T$  maggiore di  $10^{-5}$  sono state falsificate.

### 1.3. COBE e WMAP



Figura 5: COBE

Nel 1992 un satellite della NASA chiamato **COBE** (Cosmic Background Explorer, esploratore del fondo cosmico), scoprì delle disomogeneità nella temperatura della radiazione di fondo dell'ordine di  $10^{-5}$ . Poiché l'ordine di grandezza della temperatura  $T$  della radiazione cosmica di fondo è del grado Kelvin ( $2,67^\circ \text{ K}$ ), per misurare le anisotropie, devo misurare delle differenze di temperatura dell'ordine di  $10 \mu\text{K}$  e posso farlo solo nello Spazio.

La risoluzione spaziale (ovvero la distanza a cui possono stare due oggetti affinché la mappa li distingua come due oggetti separati) con cui è stata ottenuta la mappa di COBE è di  $10^\circ$ .

Questo mantiene in vita ogni teoria che prevede anisotropie dell'ordine di  $10^{-5}$ , l'importante è scoprire l'esistenza della radiazione di fondo e che essa sia anisotropa.

Il responsabile della missione COBE fu George Smoot.

Nel 2002 fu mandato in orbita un satellite americano chiamato **WMAP**, una sonda ad anisotropie, che partecipò alla conferma della scoperta di Wilson, un astronomo americano che misurò la radiazione cosmica di fondo con una risoluzione dell'ordine di 1 grado.

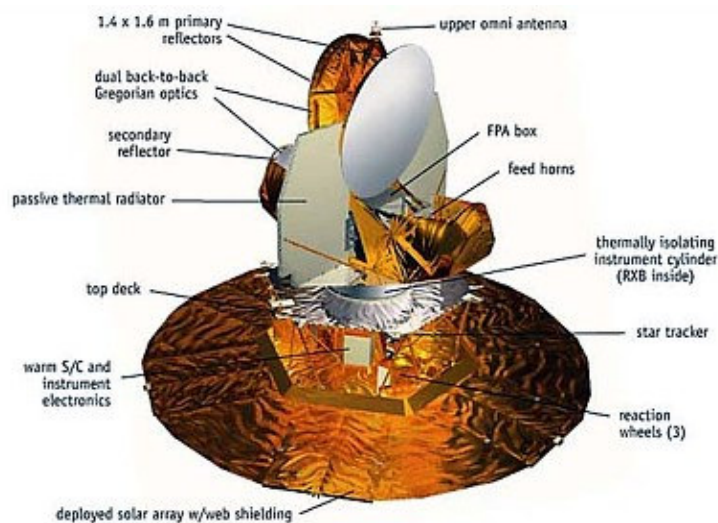
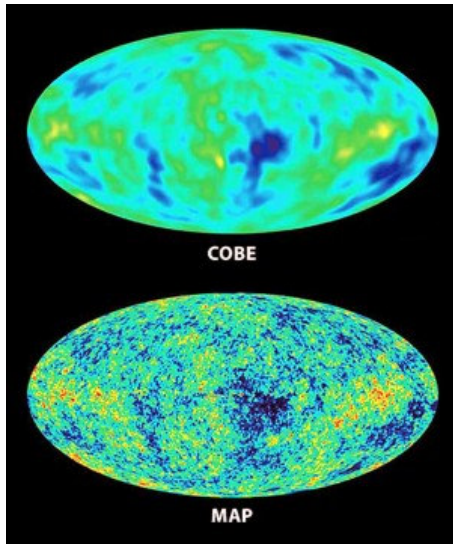


Figura 6: WMAP



**Figura 7: COBE Vs. WMAP**

La mappa fornita da WMAP conferma i risultati trovati dal primo satellite migliorandone la risoluzione.

Si possono trarre delle prime conclusioni per quanto riguarda la teoria sull'Universo, in particolare esiste un problema che riguarda il fatto che esso sia in espansione, ma non così velocemente come ci si potrebbe aspettare, considerando tutta la materia che contiene.

La materia nell'Universo ha una certa massa e per effetto gravitazionale trattiene la sua espansione che è molto minore rispetto a quello che ci aspetteremmo considerando tutta la materia che c'è, questo è il cosiddetto problema della "Materia Oscura". Infatti solo una minima parte della materia contenuta nell'Universo si è espansa, per cui una buona parte della materia, pur subendo effetti gravitazionali, non emette onde elettromagnetiche, per cui possiamo vederla solamente attraverso i suoi effetti gravitazionali.

Le misure fatte da WMAP hanno consentito di stabilire che soltanto il 4% della materia che sta nell'Universo è materia "visibile" e che dovrebbe esserci un 23% di materia "oscura" (una massa che non si vede ma esercita attrazione gravitazionale). Il restante 73% è chiamata "Energia Oscura", non si sa ancora di cosa si tratti, ma una ipotesi, fatta e subito scartata dalle misure di WMAP, è quella della cosiddetta "Quintessenza".

Rimane nelle ipotesi la costante cosmologica di Einstein, ovvero il più grave errore della sua vita viene riconsiderato, dopo 50 anni, per far tornare il tutto.

## 1.4. Planck

Nel 2007, proiettandoci nel futuro, verrà lanciato un satellite europeo che si propone di misurare la radiazione di fondo, con sensibilità molto maggiore di quanto fatto in precedenza da COBE e WMAP e con rumore e risoluzione spaziale molto minori.

Il nome di questo satellite è in onore di Max Planck, uno dei padri della meccanica quantistica.

**Planck** misurerà le radiazioni su diversi canali nella gamma delle microonde, con una sensibilità al di sopra del milionesimo di grado e con una risoluzione spaziale al massimo di mezzo grado.

Questo satellite è composto da un modulo di servizio, tre schermi termici uno sull'altro e una parte visiva composta da un'antenna. Ha uno schermo per nascondere la luce che viene da una direzione diversa da quella osservata e possiede dei sensori della strumentazione sul piano focale dell'antenna.

Planck osserverà tutto ciò che c'è fra se stesso e la superficie in cui risiede la radiazione cosmica di fondo. Se faccio lo spettro di potenza di questa mappa ottengo un certo andamento che può essere confrontato con gli andamenti teorici ottenuti assumendo diversi valori per le varie costanti fisiche. Ad esempio, se l'andamento dello spettro ottenuto per un certo valore della costante di Hubble corrisponde a quello valutato in base alle misure, si ottiene una stima della costante di Hubble che può essere più accurata delle stime attualmente disponibili.

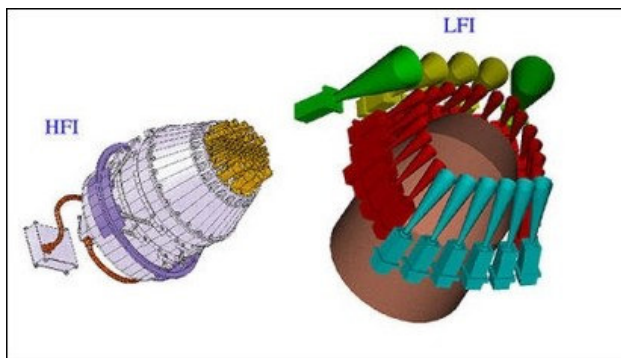


Figura 9: HFI e LFI

possibile con l'antenna del telescopio, l'apertura dell'antenna produce un certo cono d'ombra, al cui interno deve essere posizionato il telescopio, la cui direzione di osservazione non è ancora stata decisa (indicativamente dovrà essere tra i 70°-85° rispetto all'asse di rotazione del satellite).

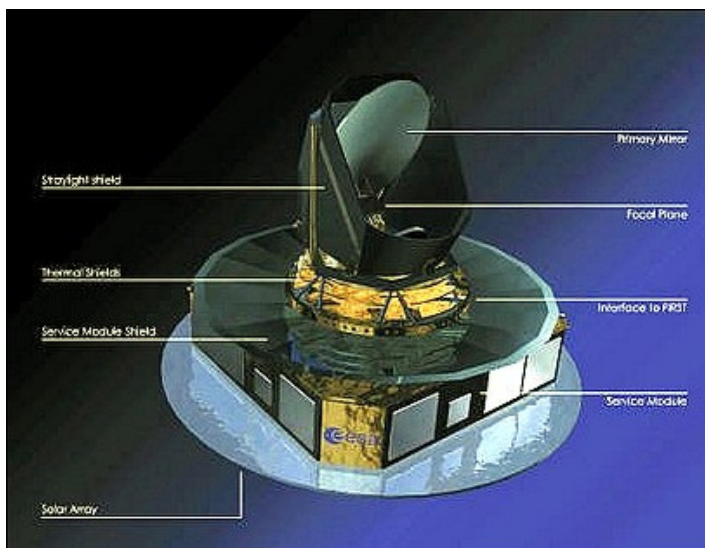
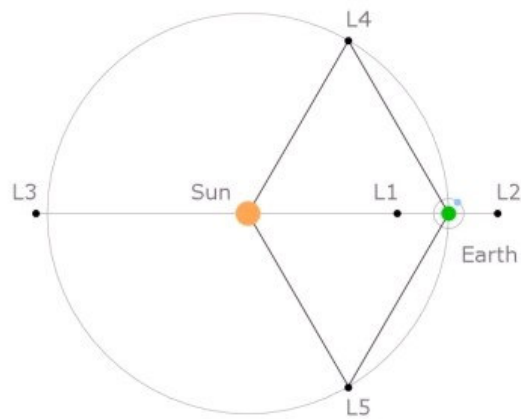


Figura 8: Planck

L'antenna del telescopio è composta da uno specchio parabolico ,da uno specchio secondario,a forma di ellissoide,che focalizza la radiazione ricevuta nell'area occupata dai sensori degli strumenti di misura.

Ogni radiometro, entro la propria banda, può valutare la disomogeneità della radiazione di fondo.

Planck andrà in orbita attorno a un punto detta del sistema terra-sole( **L2**) .E' un punto d'equilibrio stabile distante 1.5 milioni di chilometri dalla terra e posto ,rispetto al sole,all'estremo dell'orbita terrestre.Un'altra sua caratteristica notevole è che esso si trova sempre allineamento terra-sole.Ciò comporta,da un lato ,minori problemi di stabilità termica,visto che le condizioni di illuminazione del veicolo si mantengono costanti,e dall'altro lato minori problemi di misura,in quanto si è fatto sì che il telescopio non venga mai"accecato"dalla forte radiazione proveniente dalla terra e dal sole.



**Figura 10: Orbita L2**

## 2. Laben

### 2.1. Nascita e sviluppo



Figura 11: Logo

LABEN S.p.A., è una società del gruppo Finmeccanica. E' stata creata nel 1958 per sviluppare e fabbricare strumenti elettronici per la ricerca in fisica nucleare, e si è poi specializzata nel settore spaziale. In particolare, essa svolge la sua attività nella progettazione, realizzazione, qualifica e controllo finale di apparati elettronici di bordo per satelliti e dei relativi sistemi di prova.

Laben è una società altamente specializzata nelle applicazioni per lo spazio, i cui prodotti comprendono strumentazioni e sottosistemi di bordo per satelliti, esperimenti scientifici e sistemi di terra. Essa vanta risultati di particolare rilievo nel campo della navigazione satellitare, con un ruolo molto significativo nel progetto europeo Galileo.

Grazie al know-how sviluppato nei rivelatori di raggi X e Gamma, Laben è impegnata in progetti avanzati per lo sviluppo di applicazioni nel campo medico, con nuove tecniche diagnostiche, ed umanitario, con sofisticati sistemi di ricerca di mine-antiuomo.

Nata per progettare e produrre apparecchiature elettroniche nell'ambito della fisica nucleare, Laben mantiene importanti competenze tecnologiche nella ricerca e nelle applicazioni della fisica nucleare. Laben è oggi impegnata in programmi per lo sviluppo di satelliti scientifici e per l'osservazione della Terra, di sonde spaziali per lo spazio profondo, di lanciatori e satelliti commerciali per le telecomunicazioni, oltre che in esperimenti in microgravità.

Dalla prima messa in orbita nel 1962, le apparecchiature Laben hanno accumulato su decine di satelliti diversi centinaia di migliaia di ore di volo senza guasti. Tra le realizzazioni di punta vi è il telescopio Ibis del satellite Integral, un sofisticatissimo occhio spaziale che consente di raccogliere l'immagine elusiva dei raggi Gamma, la cui analisi rileva eventi cosmici finora sfuggiti agli osservatori tradizionali.

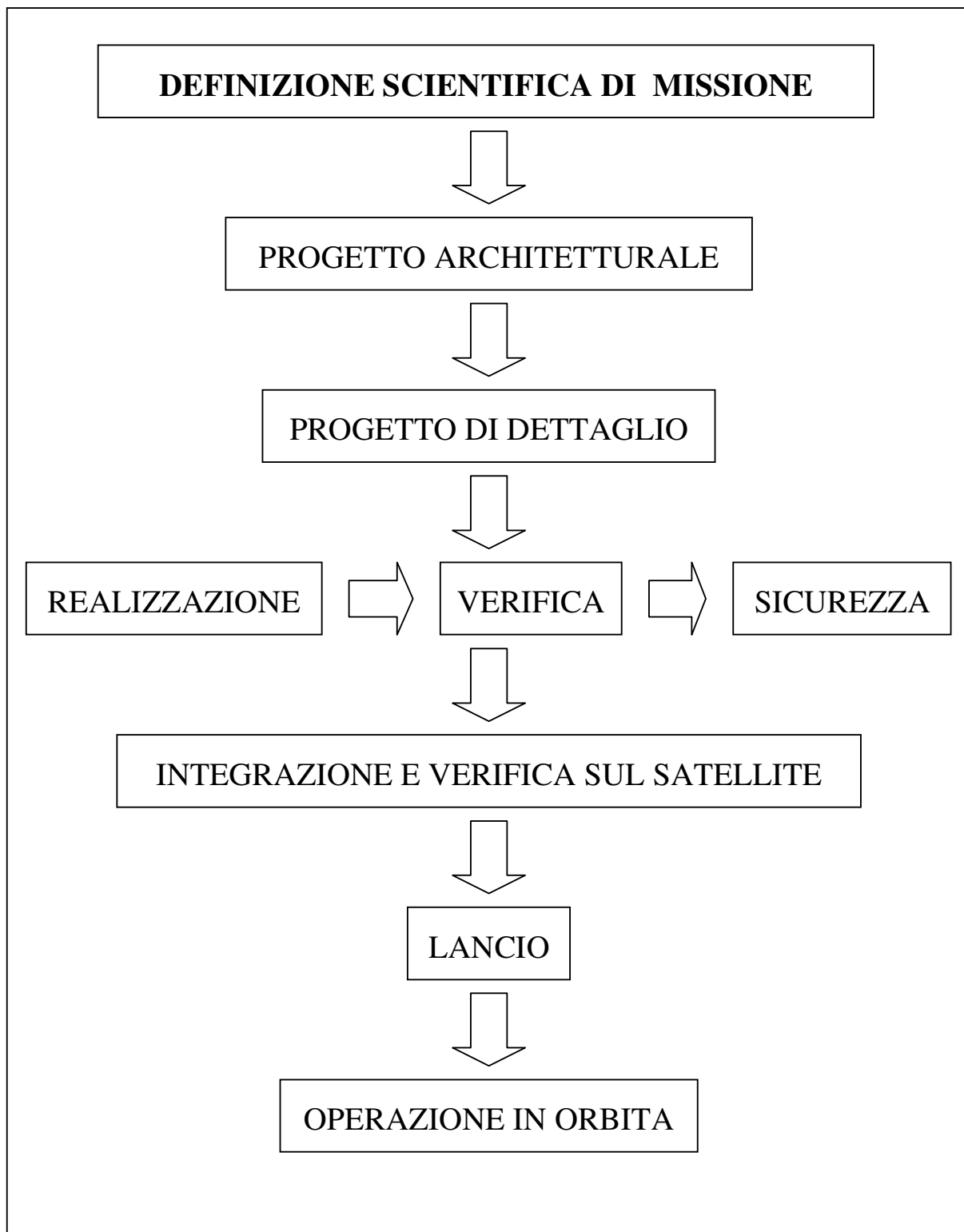
Per le tecnologie collegate alla fisica nucleare, le attività sono concentrate sui sistemi di monitoraggio ambientale delle radiazioni e sulle strumentazioni per esperimenti nella fisica delle alte energie. Le competenze Laben in questo settore sono attestate dal livello dei suoi principali clienti, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e il CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire) di Ginevra.

Grazie alle sue consolidate e riconosciute competenze, Laben ha fornito contributi essenziali ai principali programmi spaziali sviluppati dall'ESA, dal CNES (Centre National Etudes Spatiales) e dall'ASI, e a programmi commerciali (Globalstar) e strategici (WEU-MSFS e EUCLID).

Il costante impegno nella ricerca e nell'innovazione ha fatto di Laben uno dei protagonisti del progetto internazionale ARC (Advanced Research Centre on Evolutionary Knowledge for Design Innovation by High-Performance Computing). ARC conduce ricerche per lo sviluppo di nuove tecniche di progettazione software e di applicazioni richiedenti elevatissime prestazioni di calcolo. Nei laboratori Laben, ARC sviluppa attività di ricerca sull'elaborazione dei dati in parallelo, la progettazione di nuovi prodotti ed i sistemi innovativi di fabbricazione. Le applicazioni interessano settori industriali che vanno dall'elettronica alla meccanica e allo spazio.

La qualità dei prodotti è un elemento chiave della cultura aziendale. Il sistema di qualità Laben ha ottenuto la certificazione in accordo alle norme UNI EN ISO 9001 sin dal 1997.

## 2.2. Come si evolve una Missione Spaziale



12. Schema Organizzativo Missione

Una missione spaziale si articola in diversi anni, la durata tipica è all'incirca di 10 anni, nei quali vediamo diverse fasi:

- 1) Definizione scientifica della missione.
- 2) Attività di costruzione e di progetto degli apparati che devono volare, che comprende:
  - Progetto dell'architettura in generale
  - Progetto di dettaglio
  - Fase di analisi
  - Fase di test

Dopo questa importante fase di test, lo strumento viene consegnato al Prime Contractor, che è colui che costruisce il satellite, generalmente sono grandi gruppi industriali (come è l'Alenia Spazio in Europa).

Fatta l'integrazione, la verifica su satellite, segue poi una fase di alcuni mesi dove lo strumento viene testato nelle sue funzionalità, dopodiché si ha l'inizio della missione vera e propria, nella quale lo scienziato inizia a fare scienza con lo strumento.

La definizione della missione avviene, nell'ambito della scienza, a livello internazionale o europeo, viene elaborato un piano pluriennale, dove gli scienziati sono chiamati a dare le proprie idee per gli strumenti futuri che dovranno essere implementati.

In seguito a questo bando vengono selezionate le idee migliori, che tengono conto sia dei tempi, dei costi di realizzazione, sia dell'innovatività scientifica dello strumento che è stato proposto.

Vengono definiti così gli obiettivi scientifici della missione, terminata questa fase comincia quella della costruzione dello strumento, che si articola in più punti:

- a) **Fase di progetto dell'architettura**, dove viene definita la Model Philosophy, cioè la filosofia che si intende implementare per avere uno strumento di volo funzionante, che soddisfi tutti i requisiti proposti. Tipicamente, infatti, vengono realizzati strumenti di laboratorio che dimostrino la funzionalità di ciò che si vuole implementare.

Viene fatto un modello di qualifica che serve per valutare il Design, per garantire allo strumento di funzionare ancora quando viene sottoposto a verifiche ambientali estreme, e infine si procede alla costruzione del modello di volo che verrà installato sul satellite.

Nella prima fase di progetto architetture, vengono stabilite le principali componenti dello strumento. Cosa fondamentale è definire le interfacce, in quanto essendo strumenti molto complessi, il lavoro non viene fatto da un solo contraente, ma da più contraenti. Tipicamente queste strutture sono organizzate a Consorzi, in Europa si riuniscono insieme più nazioni, ognuna delle quali riceve un finanziamento dall'Agenzia Spaziale (per l'Italia si tratta dell'ASI, Agenzia Spaziale Italiana).

Abbiamo parlato di interfacce perché ogni sotto-unità viene considerata come una scatola nera ed è responsabilità di chi si occupa di quel pezzo di realizzarla nei dettagli, è una fase importante, perché da una cattiva gestione delle diverse interfacce nascono i problemi.

Sono definiti, inoltre, i blocchi funzionali dello strumento.

- b) **Fase di dettaglio**, dove si realizzano i disegni costruttivi dello strumento, quindi tutte le parti meccaniche che lo compongono, le scatole elettroniche, i progetti di tutti i sistemi di test (Grounding Support System). Tutto ciò che viene progettato deve essere comunque verificato, in termini di funzionalità. Regola di base è che ogni requisito venga analizzato, inoltre è necessario sin dall'inizio, tener conto di quali test si vogliono usare per fare la verifica.
- c) **Fase di analisi** e fase di costruzione, nella quale vengono costruite tutte le parti meccaniche. Lo strumento viene integrato con alcune parti provenienti dall'estero.
- d) **Fase di test**, nella quale si effettua una verifica delle funzionalità dello strumento. Per esempio, si vede con quale risoluzione di temperatura si osservano le microonde che si analizzano.

Lo strumento deve poter funzionare senza problemi nell'ambiente estremo in cui dovrà operare quando sarà a bordo del satellite. Per questi motivi vengono svolte anche delle verifiche ambientali, divise in 3 principali sotto-gruppi:

- 1) Le vibrazioni.
- 2) Il termovuoto (cioè operare in condizione di assenza di pressione atmosferica).
- 3) Temperature avverse (elevate o molto basse).

Dopo questa fase ci sono dei Feedback sul progetto che possono dire se ci sono o meno delle modifiche da apportare. Nel caso tutto vada bene, lo strumento di volo viene dato al Prime Contractor che lo integra sul satellite, per essere mandato alla base di lancio, dove viene messo sul lanciatore e spedito in orbita.

Il lancio è la fase più critica del ciclo di vita dello strumento, perché in questa condizione lo strumento subisce lo stress maggiore, in particolare stress meccanico, per via delle vibrazioni impresse dal lanciatore.

In seguito al lancio c'è il posizionamento nell'orbita definitiva e c'è una fase di Commissioning, in cui ci sono un certo numero di mesi del servizio in cui gli scienziati ancora non fanno scienza, ma si comincia a verificare che lo strumento si possa accendere e che le temperature siano quelle che ci si aspettava. Se si verificano dei problemi inaspettati, in questa fase è possibile metterle a punto.

Alla fine della fase di Commissioning, inizia la vera e propria scienza, cioè l'acquisizione pianificata dell'Universo.



**Figura 13: Planck**

Nel caso di **Planck** ci sarà un'analisi off-line e una on-line dei dati, che verrà fatta da tutte le nazioni che contribuiscono alla costruzione dello strumento. Quando i vari scienziati elaborano i dati, fanno scienza e pubblicazioni, allora si iniziano le attività per le quali lo strumento è stato concepito.

Planck si colloca fra le varie missioni che studiano l'Universo, nel campo delle onde sub-millimetriche.

L'aspetto importante nelle applicazioni spaziali, che non si verifica nelle applicazioni terrestri, è l'ambiente estremo nel quale lo strumento deve operare e che tale strumento deve essere messo in orbita. L'ambiente estremo include anche i raggi cosmici, ovvero particelle ad alta energia che hanno effetti dannosi sui componenti elettronici, lo strumento deve lavorare nel vuoto e a temperature estreme (il piano focale di Planck, infatti, si trova a 20° K (circa -250° C)). C'è anche il problema dovuto alla Compatibilità Elettromagnetica, in quanto ci sono diversi strumenti a bordo che devono poter funzionare senza interferire l'un con l'altro e infine c'è il problema delle forti sollecitazioni meccaniche subite dallo strumento al momento del lancio, come già accennato. A seguito di queste condizioni estreme, ci devono essere dei requisiti di qualità forti, che ci permettono di costruire un oggetto che funzioni come ci si aspetta.

### **2.3. Qualità, sicurezza e affidabilità**

La qualità è un aspetto molto importante in una Missione Spaziale, ci serve a tenere sotto controllo il rischio legato alla costruzione di uno strumento molto complicato, che dovrà operare in condizioni estreme. A questo scopo, nell'ambito dell'azienda, esiste una figura professionale che ha il compito di verificare che le procedure di qualità siano rispettate. Dal punto di vista della qualità l'obiettivo è quello di costruire un prodotto che sia in grado di rispettare i requisiti richiesti, questa cosa è garantita mediante degli strumenti che la qualità mette a disposizione e costituiscono il "Sistema di Qualità dell'azienda".

Tipicamente, l'organizzazione del flusso di lavoro ha delle procedure ben definite, per esempio esiste una procedura ben definita per quanto riguarda le saldature, per cui il rischio che un oggetto presenti un problema è contenuto.

Il concetto della sicurezza (Safety) è altrettanto importante, deve essere garantita l'incolumità di un eventuale operatore, per esempio non ci devono essere spigoli vivi sullo strumento, in modo tale da non ferire l'operatore.

Ci deve anche essere l'aspetto dell'affidabilità, in quanto devo garantire che lo strumento lavori come previsto per tutto il tempo stimato della missione.

Riassumendo, il progettista porta il progetto di dettaglio, si comprano i componenti, si fornisce una lista per il controllo di qualità imposto dal progetto, quando tutto è pronto si spedisce al Prime Contractor, che se trova degli errori deve mandare il satellite indietro, per eventuali modifiche. Non è possibile montare tutto ciò che si vuole su un satellite, per esempio i microprocessori dell'unità di volo sono molto semplici (8086), perché si preferisce alta affidabilità piuttosto che alta velocità di elaborazione.

### 3. Aspetti scientifici della Missione Planck

#### 3.1. Quanto lontano posso guardare nel tempo?



Figura 14: Einstein

È risaputo che fu **Albert Einstein** a dare inizio alla “Teoria del Big Bang”, ma non tutti sanno che nel 1917, anno in cui fu pubblicata la teoria della relatività generale che gettò le fondamenta della cosmologia moderna, egli non credeva in un universo in espansione. Arrivò ad accettare tale possibilità solo nel 1932 grazie ad alcune soluzioni compatibili con un universo in espansione trovate proprio nelle sue equazioni, con le quali la stessa teoria del big bang trovò conferma.

Dell'universo in espansione si ebbero i primi indizi già dal 1914, ma prima dell'opera di Einstein mancavano le fondamenta su cui basare tale teoria. A quei tempi le strumentazioni ottiche e le tecniche fotografiche non permettevano risoluzioni elevate delle galassie e si riteneva che queste fossero delle nebulose non diverse dalle reali nebulose che si osservavano all'interno della Via Lattea. Non si aveva motivo per pensare che in realtà fossero sistemi stellari esterni alla nostra galassia perché non si avevano cognizioni adeguate su quanto in realtà fossero distanti questi oggetti celesti e su come interagissero tra loro nell'universo.

Il primo ad avere la possibilità di comprendere la reale dinamica dell'universo fu **Vesto Melvin Slipher**, un astronomo americano che lavorava al Lowell Observatory in California. Mentre studiava quella che allora era chiamata la "Nebulosa" di Andromeda, scoprì che si stava allontanando a velocità elevatissima. Nel 1914 aveva già verificato la regressione di tredici nebulose (in realtà galassie), ma non ipotizzò alcuna teoria che giustificasse il loro moto di allontanamento, non si rese conto dell'importanza della scoperta.



Figura 15:  
Slipher



Figura 16: De Sitter

A trovare la prima soluzione che prediceva una "esplosione" dell'universo nelle equazioni di Einstein fu **Willem De Sitter**, un astronomo e cosmologo olandese che, nel 1917, fece ricerche pionieristiche sulla teoria della relatività appena pubblicata. Egli ipotizzò un universo in cui le galassie si allontanino l'una dall'altra come ipotetici punti posti sulla superficie di un palloncino che si gonfia sempre di più. Un osservatore posto in qualunque punto della sua superficie avrebbe la sensazione di trovarsi al centro del moto di espansione ma in realtà si troverebbe agli estremi.

Dopo la Prima Guerra Mondiale l'universo teorizzato da De Sitter fu oggetto di molte discussioni fra gli scienziati e altri nomi noti, tra cui Aleksandr Friedmann, George Gamow, Georges Lemaître e il famoso astronomo inglese Arthur Eddington, fecero ricerche sulle equazioni di Einstein per trovare conferma della teoria.

Il matematico russo Aleksandr Friedmann scoprì un banale errore nell'apparato matematico di Einstein e trovò un'altra soluzione delle sue equazioni che prevedeva un universo in espansione.



Figura 17: Lemaître

Anche **Georges Lemaître**, prete belga che fu allievo di Eddington, scoprì nel 1927 una soluzione delle equazioni che prevedeva un universo in espansione.



Figura 18:  
Eddington

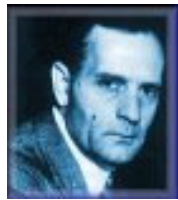


Figura 19:

**Hubble**

**Edwin Hubble** fu invece il primo a comprendere il significato delle scoperte di Slipher venendo a conoscenza delle sue osservazioni. Si iniziò così a parlare di universo in espansione senza una base teorica che potesse giustificare lo strano comportamento di queste "nebulose dinamiche". Einstein conosceva questi studi, ma impostò ugualmente la sua teoria in maniera da non considerare tale possibilità, perché non la riteneva fondata.

Hubble, avendo la fortuna di poter lavorare col più grande telescopio del mondo di quel tempo, il riflettore di 2,5 m di Monte Wilson, assieme al collega Milton Humason, divenne il grande osservatore e raccoglitore di dati empirici del gruppo di sostenitori della *teoria del Big Bang*.

Hubble dimostrò che queste nebulose erano in realtà "universi-isole" esterni formati da miliardi di stelle e non nubi di gas all'interno della Via Lattea.

Egli dimostrò inoltre la sorprendente relazione fra velocità e distanza delle galassie formulando la "**Legge di allontanamento delle galassie**" (quanto maggiore è la distanza, tanto maggiore è la velocità di recessione).

Nel 1929, misurando gli spostamenti Doppler delle righe spettrali di galassie di cui era nota la distanza, trovò una diretta proporzionalità tra la loro velocità di allontanamento e la loro distanza, espressa dalla relazione:

$$v_r = H_0 \cdot d$$

dove  $v_r$  è la velocità di allontanamento in chilometri al secondo,  $d$  è la distanza in Mpc ed  $H_0$  è la costante di proporzionalità, detta anche "Costante di Hubble".

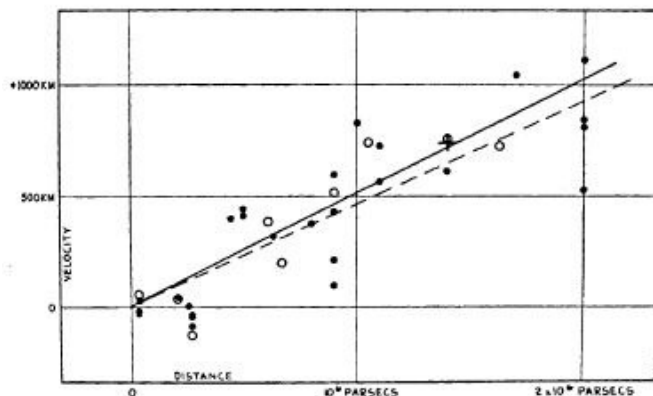
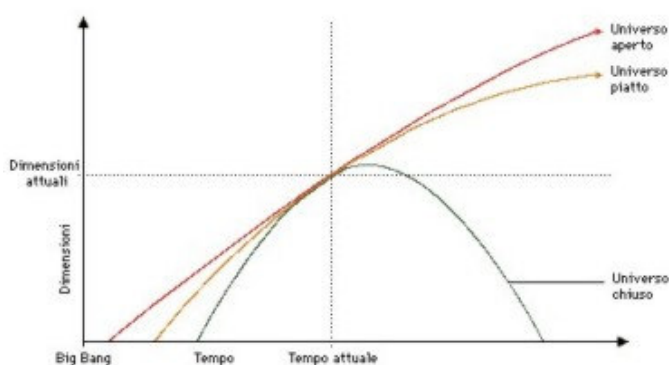


Figura 20: Legge di Hubble

In pratica, più l'oggetto è lontano, più si allontana con maggior velocità e questo vale per tutte le direzioni di osservazione. La misura della costante di Hubble è estremamente difficile e delicata. Il valore più attendibile è 100 km/sec per Mpc, ottenuto dall'astronomo francese G. De Vaucouleurs nel 1979. Quindi, una galassia con  $v_r = 1000$  km/sec si trova a una distanza di circa 10 Mpc.

Nel periodo in cui Hubble faceva le sue osservazioni, Friedmann riprese le equazioni di Einstein e si rese conto che erano compatibili con un Universo in espansione, quindi dinamico. Trovò che



**Figura 21: Grafico della Massa Critica**

esiste un valore critico  $M_c$  per la massa dell'universo. Se la massa totale dell'universo è maggiore di  $M_c$  si deduce che l'universo è chiuso e destinato ad arrestarsi per tornare ad una fase di contrazione.

Se  $M < M_c$  non c'è abbastanza attrazione gravitazionale, per cui l'Universo è destinato ad una continua espansione, fino all'infinito. Esiste una "Condizione Limite" tra Universo chiuso ed Universo aperto, che si verifica quando  $M = M_c$ , in questo caso si parla di Universo piatto.

Dopo ben quindici anni dalla pubblicazione della teoria generale della relatività e dopo aver esaminato gli studi e le ricerche di Hubble, Einstein ammise la possibilità che la struttura generale dell'universo non sia statica. Accettò finalmente l'idea dell'universo in espansione e ammise l'errore più grave della sua carriera scientifica: il cambiamento da lui introdotto in principio nelle sue equazioni perché il concetto di un universo instabile, in espansione, gli sembrava inaccettabile.

**George Gamow**, che fu allievo di Friedmann, trovò indipendentemente un'altra soluzione simile a quella di Friedmann. Fu Gamow ad ipotizzare per primo un universo primario come un "atomo primordiale" di densità enorme. Scienziato nato in Russia ed emigrato negli Stati Uniti nel 1933, modernizzò e perfezionò la teoria dell'universo in espansione di Lemaître e a lui si deve l'espressione "Teoria del Big Bang".



**Figura 22: Gamow**

Negli anni trenta e quaranta, Gamow lavorò con i colleghi Ralph Alpher e Robert Herman alla teoria del big bang della creazione degli elementi (la cosiddetta nucleogenesi). Dalla loro ricerca emerse infine nel 1948 la teoria della radiazione del globo di fuoco cosmico e del suo residuo nell'universo attuale.



**Figura 23: Penzias e Wilson**

Questa radiazione residua, nota come "Radiazione Cosmica di Fondo" fu finalmente scoperta nel 1964 da due tecnici del New Jersey: **Arno Penzias** e **Robert Wilson**, entrambi ricercatori della Compagnia dei telefoni americana Bell. Mentre studiavano le sorgenti dei rumori radio nel dominio delle microonde, scoprirono un segnale anomalo. Cercando di eliminare l'interferenza nelle comunicazioni, captata dalla gigantesca antenna a tromba del radiotelescopio di Holmdel dove lavoravano, scoprirono che il "rumore radio" proveniva da tutte le direzioni e non trovava alcuna plausibile

connessione con sorgenti terrestri o celesti. La radiazione era uguale a quella che sarebbe emessa da un corpo perfettamente radiante a una temperatura di  $2,7^\circ$  Kelvin al di sopra dello zero assoluto ( $-270,3^\circ$  C).

Secondo i calcoli teorici ,doveva essere a questo livello il calore residuo della radiazione del big bang primordiale. Esso stava recedendo praticamente alla velocità della luce ed era perciò spostato verso l'estremo rosso dello spettro, cosicché la sua temperatura originaria di 3000° Kelvin sembrava essere diminuita di un migliaio di volte. La radiazione a microonde da loro rilevata proveniva quindi dall'origine dell'universo. È il residuo della superficie del globo primordiale dell'inizio del tempo, subito prima che esso si fosse raffreddato abbastanza da consentire all'universo di apparire trasparente, e agli atomi e alla materia di cominciare a formarsi dalle particelle subatomiche. La scoperta di Penzias e di Wilson, arrivata a confermare la teoria del Big Bang, fu altrettanto accidentale quanto lo era stata, vari decenni prima, quella della recessione delle galassie da parte di Slipher.

### 3.2. Radiazione Cosmica di Fondo

Accenniamo come prima cosa alla “*Radiazione di Corpo Nero*”.

L’interesse per questo tipo di radiazione scaturisce dalla sua estrema generalità. Meccanismi microscopici diversi producono radiazione di diversa caratteristica, ognuna con proprie lunghezze d’onda peculiari, ovvero ognuna con una propria distribuzione spettrale.

Tuttavia, se l’insieme di atomi ed elettroni sono ammassati in un corpo ad alta densità, la radiazione emessa da ogni particella urta molte volte contro le altre particelle prima di raggiungere la superficie. Indipendentemente dalla sostanza di cui è composto il corpo e dallo specifico meccanismo microscopico che produce i fotoni, lo spettro della radiazione emergente è sempre lo stesso e dipende solo dalla temperatura del corpo.

Questa radiazione è appunto quella del corpo nero, e la sua universalità è dovuta ai ripetuti urti che cancellano la memoria del meccanismo specifico di emissione.

Le stelle, ad esempio, sono oggetti molto densi e l’energia nucleare liberata nel loro centro assume con buona approssimazione uno spettro di corpo nero lungo il tragitto verso la superficie. Ma esiste in natura una radiazione il cui spettro ricalca perfettamente quello di corpo nero. Questa radiazione ha avuto origine insieme all’universo 15 miliardi di anni fa e rappresenta una testimonianza “fossile” in grado di rivelarci indizi preziosi sui primissimi anni di vita del cosmo.

Oltre che dalla materia, l’universo è riempito dalla cosiddetta “*Radiazione Cosmica di Fondo*”.

Essa è stata scoperta nel 1965 da Penzias e Wilson, che per questo vinsero il premio Nobel. Come già accennato precedentemente, questa scoperta fu del tutto casuale. Penzias e Wilson erano due Ingegneri della Bell Telephon che stavano studiando le proprietà del rumore radio dovuto all’atmosfera, in connessione con il progetto del satellite per telecomunicazioni Telestar.

Essi rilevarono un “disturbo” uniforme alle frequenze delle microonde che non poteva essere dovuto ad alcun rumore strumentale o sorgente radio nota. Inoltre il segnale era isotropo, ovvero la sua intensità era sempre la stessa, indipendentemente dalla direzione verso cui si puntava l’antenna. Dopo un’attenta analisi i due Ingegneri giunsero dunque alla conclusione di avere individuato una radiazione di fondo di natura extraterrestre.

L’esistenza di una tale radiazione era stata descritta dal fisico russo George Gamow a metà degli anni ’40, ma questa predizione non era nota a Penzias e Wilson. Fu un gruppo di fisici teorici dell’Università di Princeton a capire immediatamente che il disturbo scoperto era in realtà il calore residuo del Big Bang.

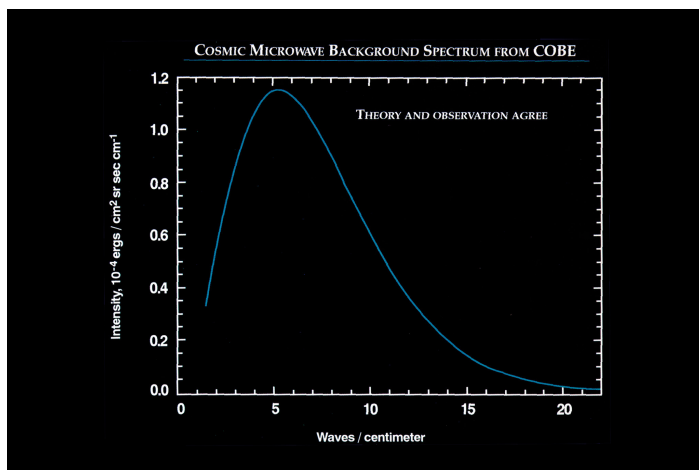


Figura 24: Radiazione Cosmica evidenziata da COBE

In effetti, al tempo della sua scoperta la radiazione cosmica era stata misurata solo a poche lunghezze d’onda, e il suo spettro poteva avere spiegazioni alternative.

Negli ultimi trent’anni, tuttavia, è stato fatto ricorso a tecniche osservative sempre più sofisticate utilizzando antenne da terra, missili, palloni e, per fare un esempio, il satellite COBE, lanciato nel 1991.

Questo satellite ha avuto un vantaggio enorme rispetto alle strumentazioni precedenti: era in grado di evitare

l'assorbimento atmosferico che disturba le osservazioni da terra a lunghezze d'onda submillimetrica.

Lo **spettro evidenziato da COBE** è vicinissimo a quello di un corpo nero ideale alla temperatura di 2,726° Kelvin (-270,274 C).

Nonostante la grande uniformità della radiazione di fondo, COBE è riuscito ad individuare fluttuazioni di temperatura  $\Delta T$ . Dunque la radiazione non ci giunge esattamente con la stessa intensità da ogni direzione, ma regioni diverse della sfera celeste (delle dimensioni angolari di  $\Delta\phi \sim 10^\circ$ ) presentano piccolissime variazioni della temperatura della radiazione di fondo il cui valore percentuale è pari a  $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ .

### 3.3. Significato della Radiazione Cosmica e delle sue fluttuazioni

Come è noto, secondo la **Teoria del Big Bang**, l'universo ha avuto origine da una grande esplosione iniziale in cui la materia aveva valori di densità e temperatura enormi. La materia era composta da particelle elementari ed era così densa da essere totalmente opaca alla radiazione del Big Bang. I fotoni urtavano ripetutamente con la materia e, per quanto abbiamo detto all'inizio, la radiazione assunse lo spettro di corpo nero.

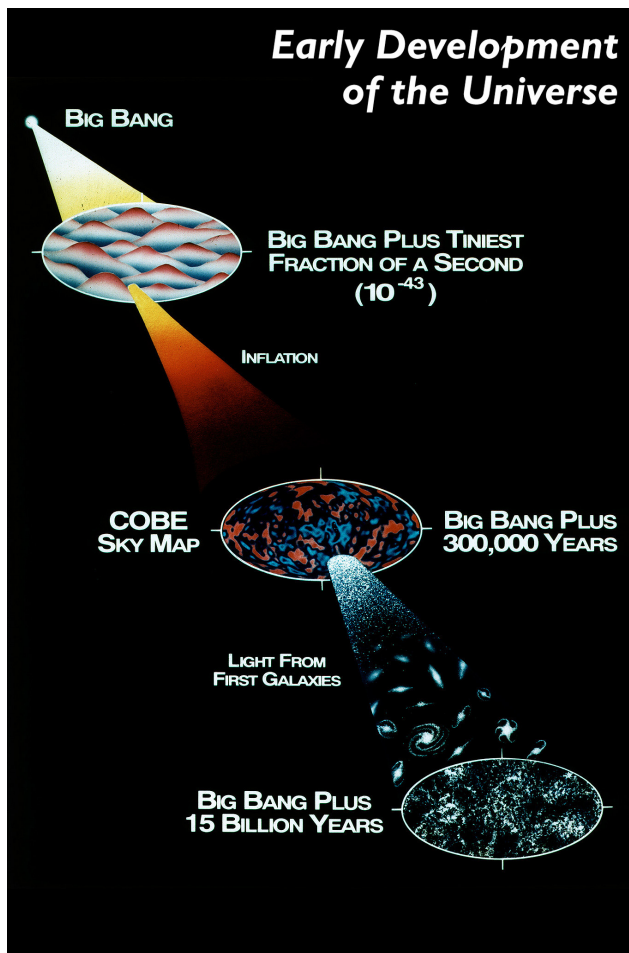


Figura 25: Teoria del Big Bang

Con l'espansione dell'universo anche le lunghezze d'onda della radiazione di fondo si "allungano" e la radiazione stessa perde energia (ricordiamo che l'energia trasportata da un fotone è inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda).

E' come se la radiazione fosse emessa da un corpo nero a temperatura inferiore. Si dice allora che la radiazione di fondo è andata "raffreddando" con l'espansione dell'universo, passando dalle centinaia di migliaia di miliardi di gradi dei primi istanti fino all'attuale infimo valore. Furono proprio queste considerazioni a portare Gamow alla previsione dell'esistenza di una radiazione cosmica di fondo con il caratteristico spettro di corpo nero.

La scoperta dell'esistenza della radiazione cosmica rappresenta di per sé un tassello fondamentale nello studio della cosmologia ed una prova incontrovertibile della reale esistenza di una grande esplosione iniziale.

Tuttavia, come abbiamo accennato, lo studio delle disomogeneità di questa radiazione è altrettanto importante perché ci permette di ottenere informazioni sulle origini delle galassie. Per capire questo punto dobbiamo accennare alle idee correnti riguardo la formazione delle strutture attualmente osservate nell'universo.

Se il gas in espansione del neonato Universo fosse stato perfettamente uniforme, ogni suo elemento sarebbe stato attratto gravitazionalmente in uguale misura in ogni direzione dagli altri elementi circostanti. L'effetto risultante sarebbe stato nullo e nessuna galassia avrebbe potuto formarsi.

Assumiamo invece che il gas, pur uniforme su larga scala, presenti "increspature" in cui la densità è un poco più alta o più bassa di quella media, analogamente alla superficie di un mare calmo che sia tuttavia percorso da onde di piccola ampiezza. In questo caso un generico elemento di gas verrà attratto con maggior vigore verso una vicina fluttuazione positiva (cioè con densità superiore alla media) ed andrà ad aggregarsi a questa. L'increspatura, aumentando di massa, attrae con maggiore intensità il fluido circostante incrementando ulteriormente la propria massa, e così via. Gli aggregati

così formati hanno poi dato luogo, nel corso di 15 miliardi di anni, a stelle, galassie ed ammassi di galassie.

Ogni traccia delle piccole disomogeneità da cui le attuali imponenti strutture si sono originate sembrerebbe ormai scomparsa. Ma in effetti non è così.

Abbiamo detto che inizialmente la materia era talmente densa da essere opaca alla radiazione. Col progredire dell'espansione e il diminuire della temperatura le particelle elementari hanno avuto modo di "coagularsi" in particelle ordinarie come protoni e neutroni; questi poi si sono aggregati formando i nuclei atomici. Infine, quando la temperatura è calata a 4000 gradi, l'attrazione elettrica tra nuclei atomici ed elettroni è riuscita a prevalere sull'agitazione termica delle particelle e i nuclei atomici sono stati in grado di catturare gli elettroni che fino a quel momento si erano mossi liberamente. A questo punto il gas, composto essenzialmente da atomi neutri che interagiscono scarsamente con la radiazione, è diventato trasparente e materia e radiazione si sono "disaccoppiate". Questo significa che il "gas" di fotoni non è stato più costretto a seguire il destino del gas di atomi: mentre quest'ultimo è condensato gravitazionalmente in frammenti che daranno luogo alle galassie, la radiazione ha continuato a riempire uniformemente tutto lo spazio, come è osservativamente confermato.

Tuttavia, al momento del disaccoppiamento, avvenuto circa 300.000 anni dopo il Big Bang, parte del gas di fotoni si trovava all'interno delle fluttuazioni positive di materia, occupandone e condividendo gli stessi volumi di spazio. Nel proseguire il loro viaggio attraverso l'universo questi fotoni fuoriuscirono dall'addensamento in cui si trovavano perdendo energia perché contrastati dalla gravità dell'addensamento stesso: una situazione analoga a quella di un sasso che, lanciato verticalmente in aria, rallenta progressivamente a causa della gravità terrestre. Abbiamo già visto che una radiazione di corpo nero che perde energia si può dire che raffredda. Ci si aspetta allora che tutti i fotoni che, al tempo del disaccoppiamento, si trovavano all'interno di fluttuazioni positive di densità, appaiano più "freddi" degli altri. Il meccanismo appena descritto va sotto il nome di "*Effetto Sachs-Wolfe*", ed è ritenuto responsabile della maggior parte delle fluttuazioni spaziali in temperatura della radiazione di fondo.

L'analisi dettagliata di queste fluttuazioni è assai più complicata di quanto la presente esposizione possa far supporre e necessita di un apparato matematico molto complesso. Questo è dovuto al fatto che vi è una serie di fenomeni "collaterali" che si sovrappongono e che vanno isolati ed analizzati. Ad esempio, i fotoni che giungono fino a noi hanno attraversato un certo numero di ammassi di galassie. Se l'ammasso nel suo insieme è stazionario (non varia le sue dimensioni) questo

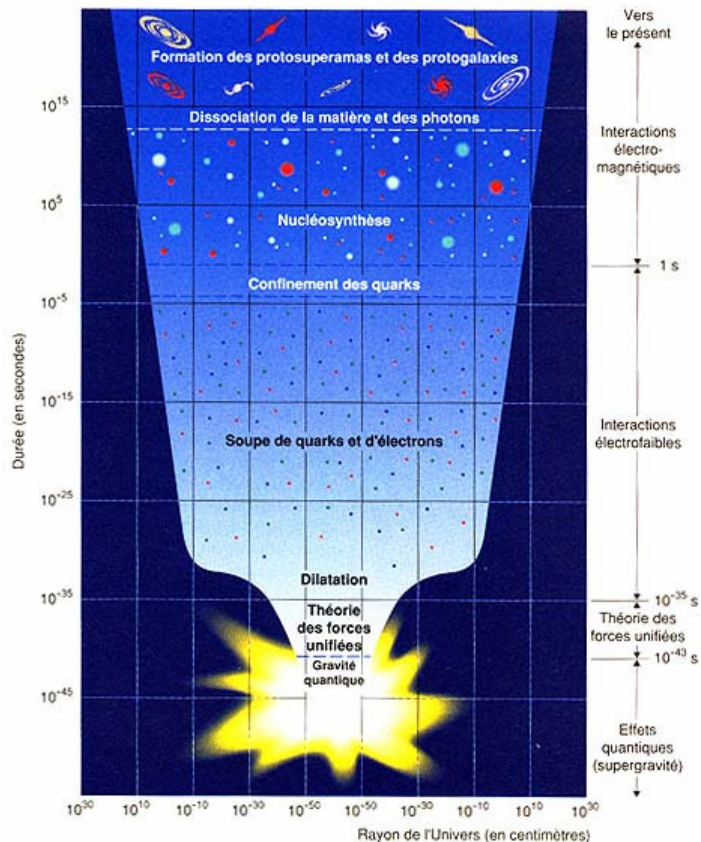
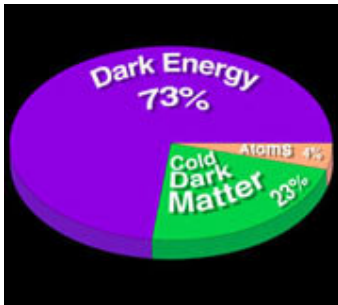


Figura 26: Nascita dell'Universo

attraversamento non altera l'energia, e dunque la temperatura, dei fotoni: infatti durante la prima metà dell'attraversamento la radiazione "cade" verso l'ammasso e la gravità ne aumenta l'energia. Nella seconda metà, tuttavia, la fuoriuscita dei fotoni è contrastata dalla gravità dell'ammasso e la radiazione perde l'energia che aveva guadagnato, ritornando alla temperatura iniziale.

Se però l'ammasso di galassie non si è ancora assestato e sta variando le sue dimensioni, la simmetria tra entrata e uscita si spezza e l'effetto netto è una variazione della temperatura della radiazione.

Un'altra complicazione è legata al fatto che non tutte le perturbazioni iniziali di densità hanno la stessa estensione, ma ve ne sono di tutte le dimensioni, proprio come le onde di diversa lunghezza presenti contemporaneamente ed in sovrapposizione sulla superficie del mare; perturbazioni di diversa ampiezza e dimensione si comportano diversamente.



**Figura 27: Composizione dell'Universo**

Queste ed altre difficoltà, come si è detto, rendono assai complicata l'analisi della radiazione cosmica. Ma è proprio questa complessità che rende la radiazione di fondo un potente strumento d'indagine. Le sue disomogeneità dipendono dalla densità e dall'età dell'universo, oltre che dalla **percentuale di Materia Oscura** (quella materia, cioè, che non è possibile osservare direttamente perché non emette radiazione, ma la cui presenza è dedotta in base ai suoi effetti gravitazionali ed è ritenuta essere dieci volte più abbondante della materia ordinaria).

Riuscire ad interpretare le caratteristiche della radiazione cosmica equivale ad ottenere informazioni su tutte queste quantità.

### 3.4. Da COBE a Planck

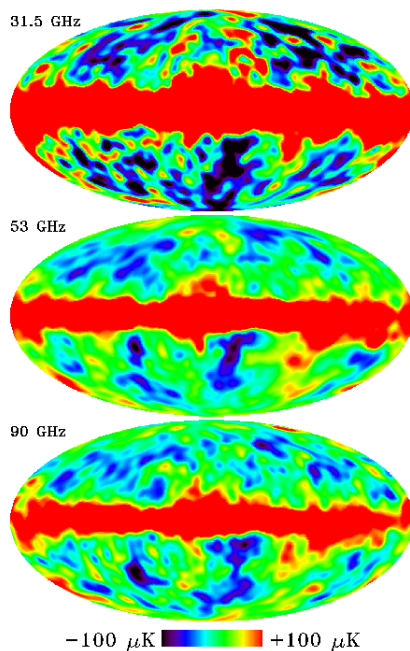
Il 1992 rappresenta una delle date storiche della cosmologia sperimentale: vengono resi pubblici i primi risultati del satellite Cosmic Background Explorer (COBE) della NASA sulla prima rivelazione dell'esistenza di disomogeneità spaziali nella temperatura della radiazione cosmica di background a microonde (CMB). Esse rappresentano la firma lasciata sul fondo cosmico a microonde dalle perturbazioni primordiali generate durante l'inflazione (entro 10-35 sec dopo il Big Bang). Tali irregolarità, osservate come anisotropie "T" della CMB (minime differenze di temperatura misurate in diverse direzioni di osservazione in cielo), sono stimate nell'ordine di 30  $\mu\text{K}$  e quindi circa:

$$\Delta T/T = 10^{-5}$$

dove:

$$T = 2.726^\circ \text{ K}$$

è la temperatura media della CMB.



**Figura 28:** Anisotropie misurate da COBE alle frequenze di 31.5, 53 e 90 GHz

Ancorché di capitale importanza, la **rivelazione di COBE**, fatta con una risoluzione angolare di  $7^\circ$  e scarsa sensibilità strumentale, è però insufficiente per una determinazione dei parametri cosmologici, cioè per la definizione di uno scenario complessivo e quantitativo sull'origine e l'evoluzione dell'Universo.

Si vuole migliorare la risoluzione spaziale dell'immagine, ovvero ci si prefigge di ottenere un'immagine più nitida e meno sfuocata; inoltre si vuole cercare di osservare il cielo in più di tre frequenze, in modo da poter "pulire" meglio il segnale della radiazione cosmica dai vari contributi (come la nostra Galassia, ad esempio).

Per raggiungere tali obiettivi l'ESA, l'Agenzia Spaziale Europea, sta lavorando, nell'ambito del suo programma scientifico "Orizzonte 2000", alla missione Planck (inizialmente chiamato COBRAS/SAMBA), progettata per rivelare l'immagine dettagliata delle anisotropie della CMB su tutto il cielo con una risoluzione angolare di 10 primi (50 volte migliore di COBE) e sensibilità  $\Delta T/T=10^{-5}$  (10 volte migliore di COBE).

Il lancio è previsto per il 2007 a bordo del lanciatore europeo Ariane 5. Il satellite orbiterà intorno al punto lagrangiano L2, distante 1,5 milioni di km dalla terra, rendendo pressoché trascurabile il disturbo alle misure da parte di terra e luna.

Le osservazioni saranno compiute da un telescopio da 1,5 metri di diametro in 9 bande di frequenza nella regione millimetrica comprese tra 30 GHz e 900 GHz, utilizzando 56 radiometri raffreddati a

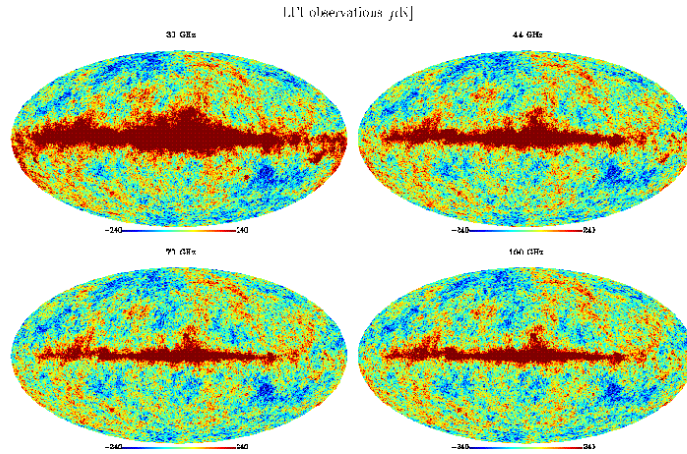
20 Kelvin (Low Frequency Instrument) e 56 bolometri operanti a 0,1 Kelvin (High Frequency Instrument).

L'ampio intervallo di frequenza è necessario per controllare con grande precisione il contributo di radiazione locale, e non cosmologica, di origine galattica ed extragalattica. Il progetto dell'esperimento e la strategia di osservazione sono ottimizzati per minimizzare potenziali effetti sistematici.

Le misure di altissima precisione di Planck praticamente avranno impatto in ogni settore dell'astronomia, dallo studio dell'Universo primordiale, alla determinazione della scala di distanze extragalattiche, all'età delle stelle fino all'origine delle galassie. Planck rivelerà oltre 100.000 nuove sorgenti radio ed infrarosse, fornendo una nuova immagine dettagliata

dell'emissione diffusa della nostra Galassia. La missione inoltre darà un contributo fondamentale dalla fisica delle particelle elementari, permettendo un'indagine sulle teorie fondamentali della fisica delle ultra-alte energie, che non sarà possibile studiare neanche con gli acceleratori di futura generazione.

Planck si pone come pietra miliare tra le missioni spaziali del XXI secolo, per la qualità e la quantità della informazioni cruciali che fornirà, in numerosi settori dell'astronomia e della fisica.



**Figura 29: Anisotropie che ci aspettiamo da Planck alle frequenze di 31, 44, 71, 100 GHz**

## 4. LFI: Low Frequency Instrument

### 4.1. Cosa è LFI

LFI (Low Frequency Instrument) è uno dei due strumenti a bordo del satellite Planck. Lo strumento osserverà le anisotropie del fondo cosmico a frequenze comprese tra 30 e 70 GHz con una risoluzione angolare tipica di  $0.17^\circ$  ed una sensibilità tale da distinguere differenze di temperatura di qualche milionesimo di grado Kelvin. La strumentazione, che opererà ad una temperatura di circa  $-250^\circ\text{C}$ , permetterà di costruire mappe dettagliate del cielo e di fornire così informazioni sull'origine dell'universo.

LFI, proposto dall'Istituto TESRE/CNR (Bologna) e selezionato dall'ESA (Agenzia Spaziale Europea), è posto nel piano focale del telescopio del satellite Planck.

La costruzione dello **strumento LFI** è affidata all'industria spaziale italiana (LABEN - Milano) mentre l'attività di programmazione scientifica ed operativa vede coinvolti numerosi Istituti del CNR, dell'Università italiana, Osservatori astronomici ed Istituzioni straniere.

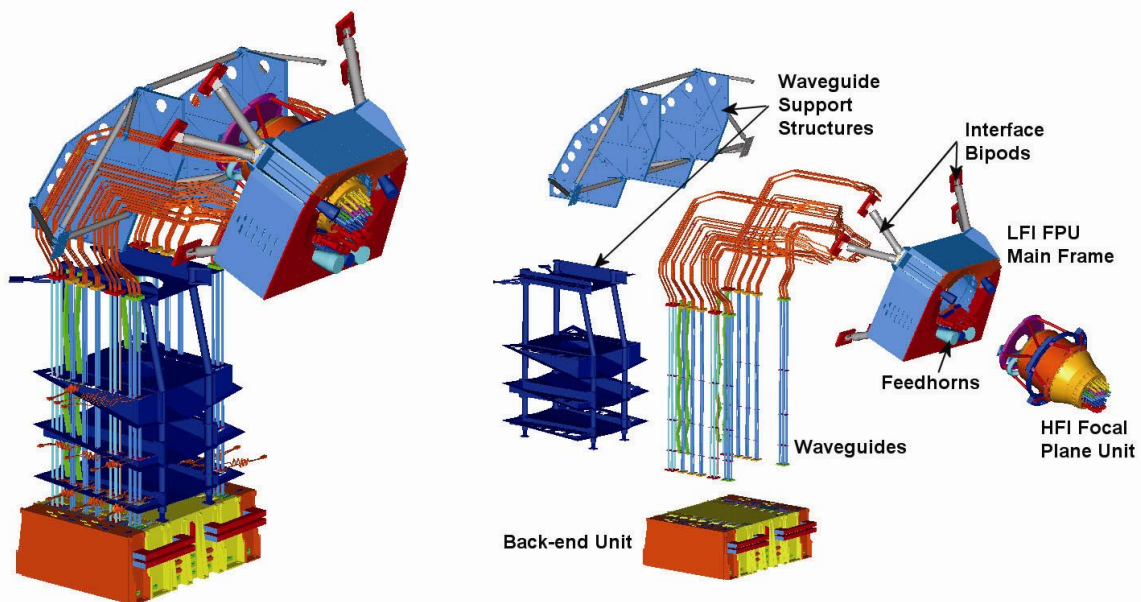


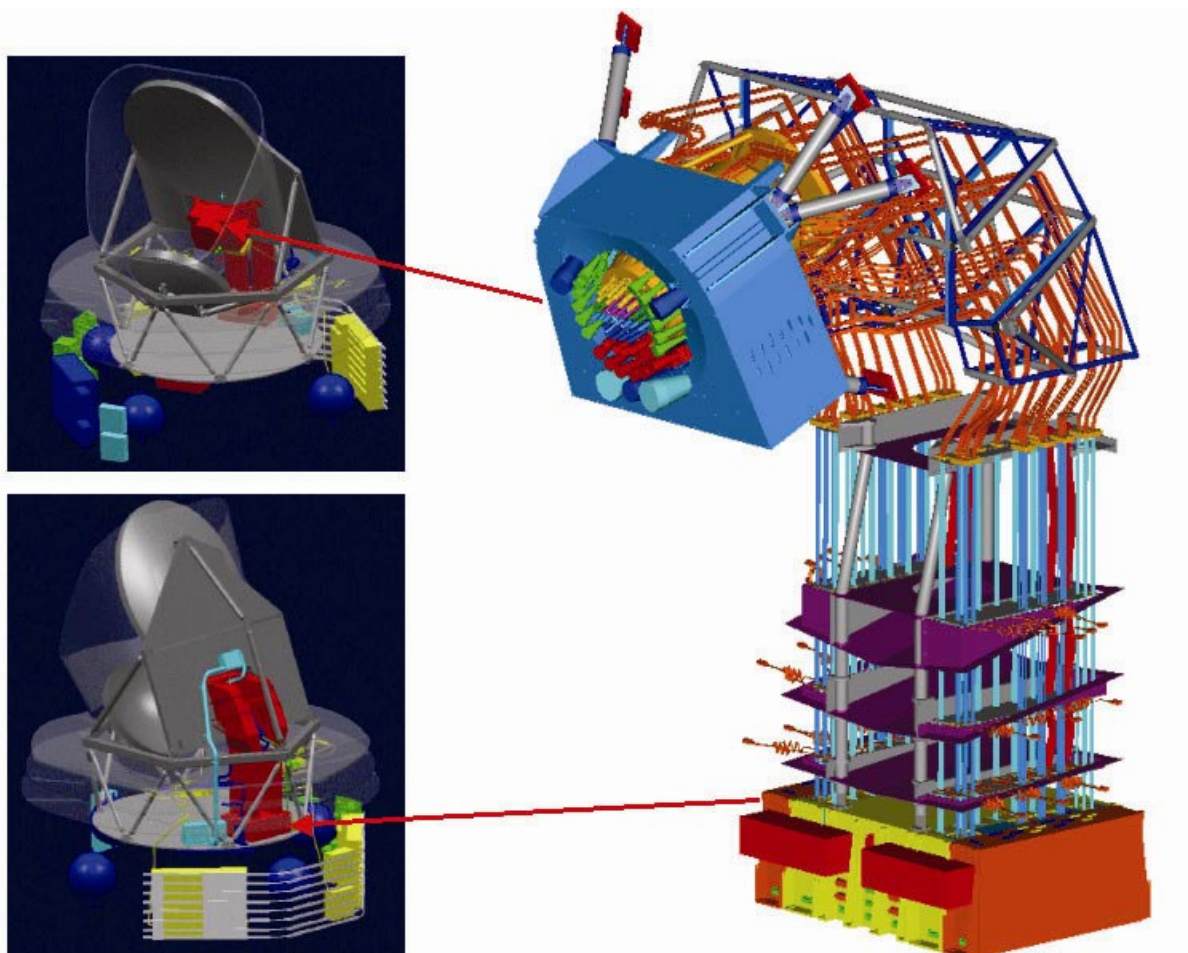
Figura 30: Struttura degli strumenti di Planck

Il sistema di rivelazione di LFI è basato su una schiera di 11 antenne che hanno il compito di prelevare la radiazione incidente sul telescopio, di convertirla in un segnale elettrico che viene diretto verso i primi stadi (22) di amplificazione che costituiscono il cuore dello strumento. Le antenne ed i primi stadi di amplificazioni costituiscono l'Unità di Piano Focale (FPU).

Il segnale elettrico viene poi convogliato tramite 44 guide d'onda, raggruppate in fasci, verso gli stadi di amplificazione finale e l'Unità di Processo Centrale che codifica l'informazione estratta e gestisce la trasmissione dei dati a terra.

Le antenne di LFI sono progettate in modo da ottimizzare l'accoppiamento con il telescopio. La forma è un cono metallico cavo all'interno del quale sono ricavate delle scanalature. Il cono più piccolo è lungo circa 15 cm e contiene 90 minuscole scanalature (corrugazioni).

Alla terminazione della sezione inferiore dell'antenna corrugata viene collegato il primo stadio di amplificazione al cui interno sono presenti anche due antenne piramidali che sono utilizzate per calibrazioni ed osservano un ambiente di riferimento alla temperatura stabile di  $-269^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 31: Payload**

La configurazione dell'**apparato di rivelazione di LFI** a bordo del satellite Planck è costituita da una schiera di 11 "ricettori" (antenne corrugate) che permettono di osservare il cielo in 11 direzioni leggermente differenti in prossimità della direzione di puntamento assunta dal satellite durante il suo moto orbitale. Il vantaggio di questa configurazione è di ottenere, per mezzo di un'attenta ricostruzione dei dati raccolti e della posizione (coordinate) del satellite, una migliore sensibilità alle regioni di cielo osservate ed una visione (MAPPA) dell'Universo a lunghezze d'onda millimetriche.

Lo strumento LFI è basato su radiometri differenziali a pseudo-correlazione, operanti nel range 30-70 GHz, raffreddati a  $20^{\circ}\text{K}$  e accoppiati a un telescopio off-axis di 1.5 m di apertura. Attraverso l'analisi dei risultati delle misure di calibrazione sui modelli di qualifica e di volo e con l'utilizzo di codici avanzati di accoppiamento elettromagnetico in radiofrequenza dobbiamo ottimizzare e mantenere un modello radiometrico avanzato del Low Frequency Instrument. Ciò è di estremo interesse per verificare in dettaglio le performances scientifiche nella fase di integrazione e testing,

nonché come supporto alla fase di osservazione e analisi dei dati durante la survey di Planck dopo il 2007.

Il raggiungimento degli obiettivi scientifici della missione spaziale Planck richiede lo sviluppo di una catena criogenica complessa, caratterizzata da una elevata stabilità termica. Lo studio della propagazione di fluttuazioni di temperatura nella struttura meccanica del satellite, in particolare, riveste un'importanza fondamentale per l'individuazione di effetti termici indesiderati propagati nel segnale misurato.

## 4.2. Albero di prodotto di LFI

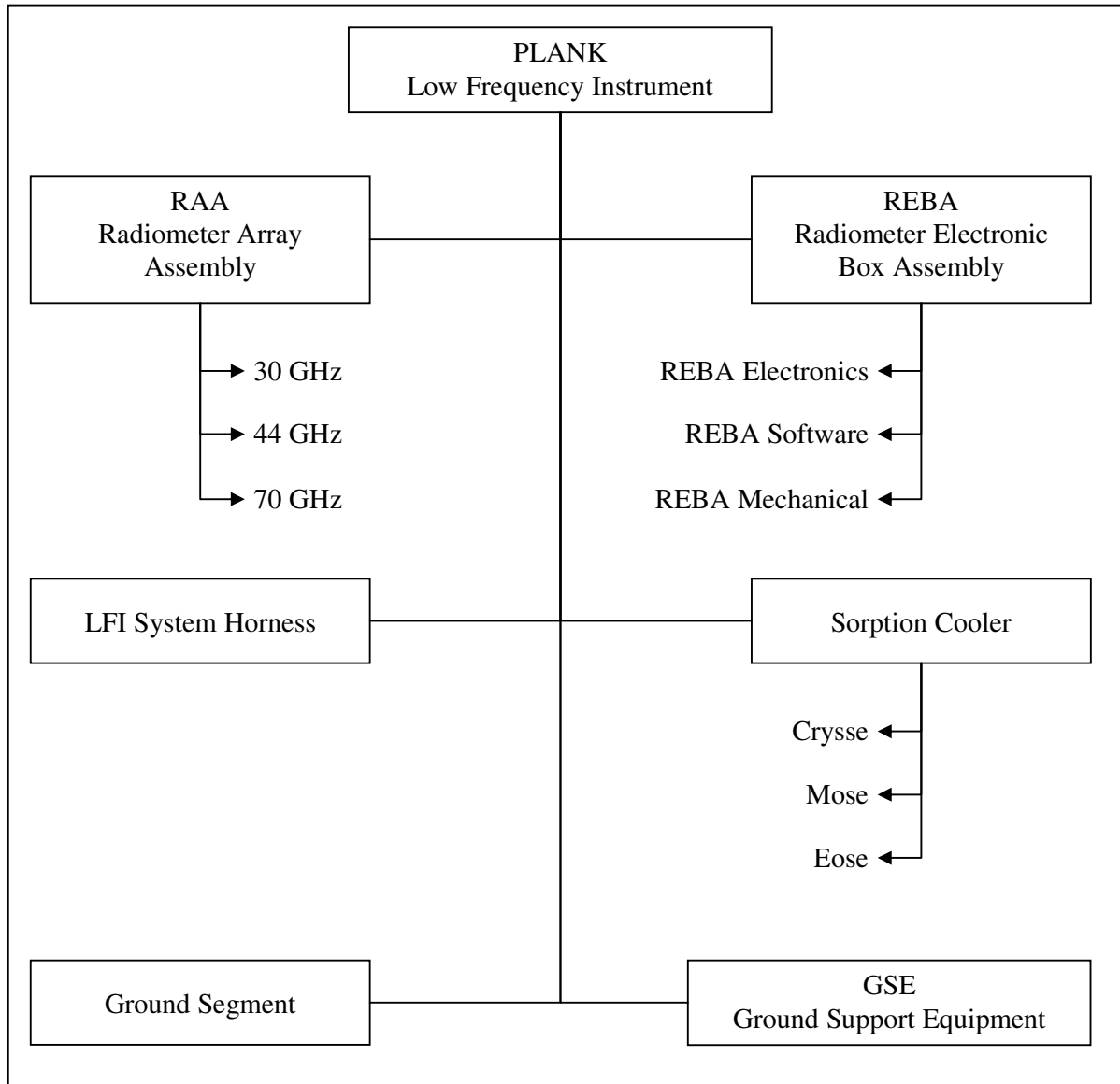
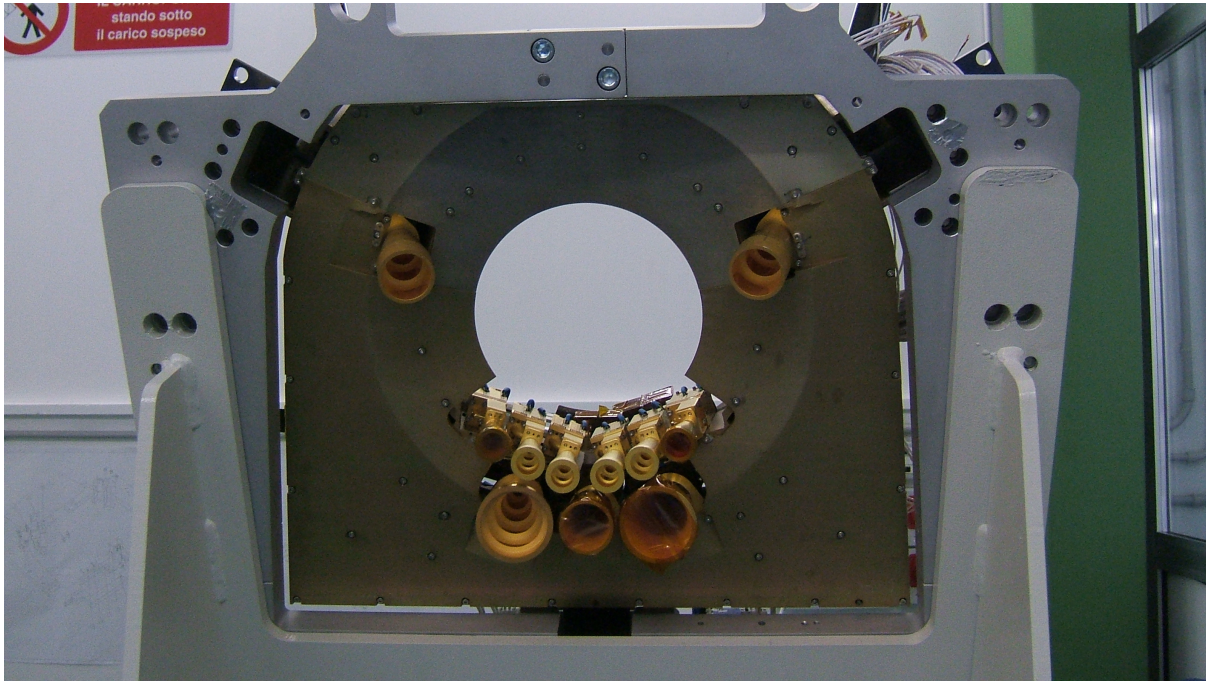


Figura 32: Albero di prodotto di LFI

Da questo **schema** notiamo che il cuore dello strumento è costituito dal “Radiometer Array Assembly”, cioè le catene radiometriche che guardano il fondo cosmico.

In totale ci sono **11 radiometri**: 2 catene che lavorano a 30 GHz, 3 catene a 44 GHz e 6 catene a 70 GHz.



**Figura 33: Catene radiometriche**

Questi radiometri necessitano di un'elettronica che fornisca la potenza ed un'elettronica per acquisire il segnale, in modo da avere in uscita una catena radiometrica che produca un segnale in continua.

L'elettronica di acquisizione, oltre ad acquisire il segnale, lo converte da analogico a digitale, questo segnale verrà analizzato successivamente da una seconda unità elettronica, che processa i dati scientifici, li comprime e infine li manda al "Data Ending" del satellite (parte costruita dalla Spagna).

Nel Data Ending i dati vengono acquisiti e salvati per un periodo di alcune ore, quando poi il segnale risulta visibile da Terra (avviene per 2 ore consecutive ogni 48), vengono trasferiti alla stazione di Terra, ovvero convogliati verso il "Data Processing Center" a Trieste e vengono messi a disposizione di una Commissione Scientifica, si inizia così a fare scienza.

Un altro aspetto fondamentale dell'LFI è l'elettronica di Processing, chiamata REBA (Radiometer Electronic Box Assembly), non meno importanti sono i cavi e l'apparato per il supporto a Terra, utile per i test elettrici e in criogenia.

Le catene radiometriche acquisiscono il segnale attraverso le antenne, che viene poi amplificato e mandato attraverso le guide d'onda ad un "Back End" elettronico, che lavora quasi a temperatura ambiente.

Notiamo inoltre, attraverso l'architettura del radiometro, che una catena radiometrica è fatta da un'antenna corrugata, che riceve il segnale a microonde e lo separa in due componenti di polarizzazione, mediante un dispositivo chiamato OMT. Ho dunque due canali per ogni antenna (Feed Horn) in ingresso al "Front End Module", cioè il primo stadio dell'elettronica attiva.

### 4.3. LFI Radiometer

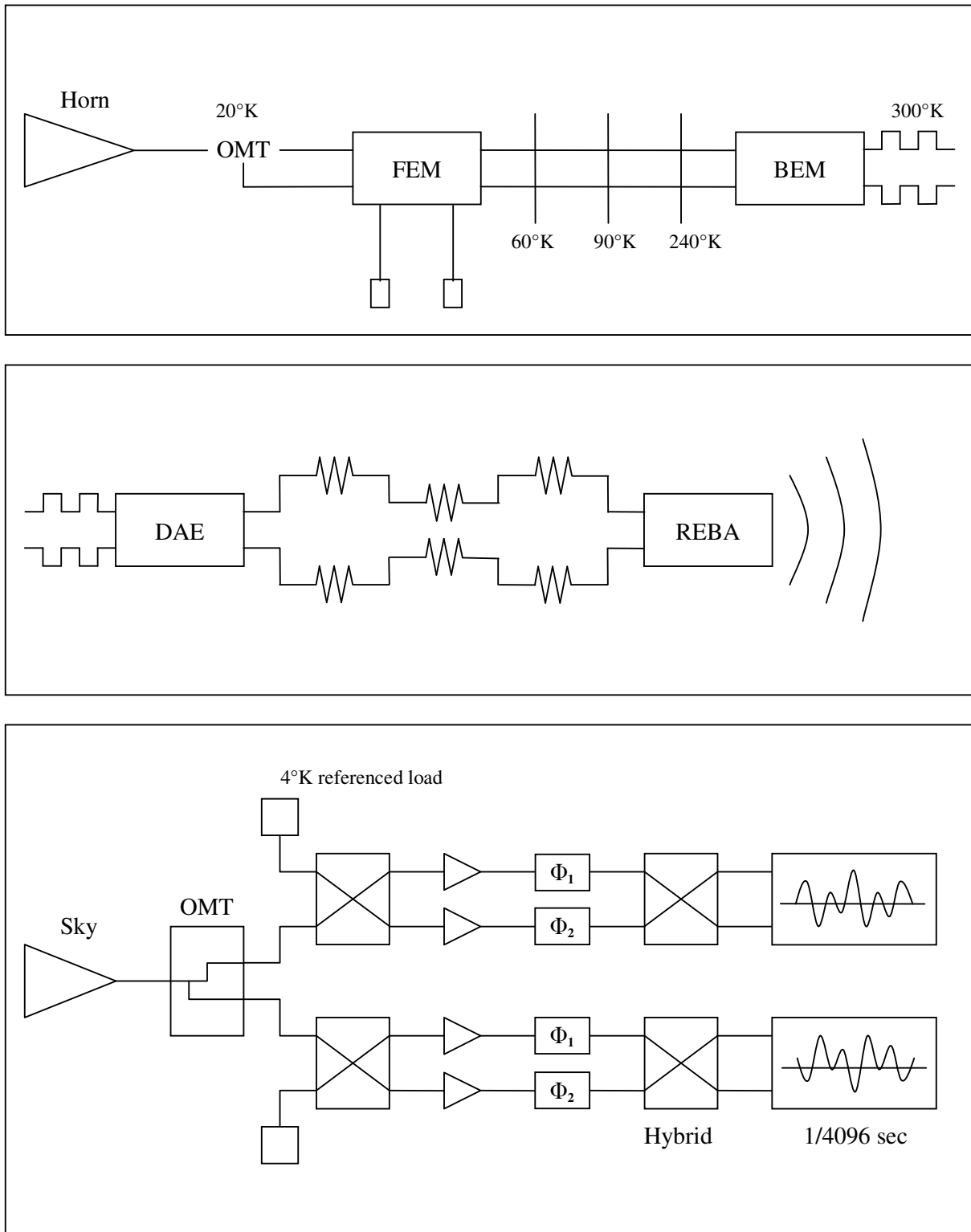


Figura 34: Schemi circuitali di LFI

Questo oggetto lavora a 20° Kelvin, insieme ai Feed Horn e all'OMT, infatti il segnale viene confrontato con un segnale a temperatura ultrastabile a 4° Kelvin e mandato tramite guida d'onda al BEM (Back End Module).

Il BEM converte un segnale a microonde in un segnale in tensione, questa operazione viene fatta da un diodo che ha in uscita un segnale in tensione proporzionale al segnale a microonde al suo ingresso, che è stato misurato precedentemente dalle catene radiometriche di acquisizione. Il segnale viene anche convertito in digitale e compresso per essere poi mandato al Data Ending del satellite.

Questo tipo di architettura è detta a "Pseudo-correlazione" e consente al segnale di vedere nello stesso modo entrambi i rami del radiometro, con questo procedimento non è soggetto all'errore sistematico del Front End. E' come uno sfasatore che fa vedere i segnali alternando l'uscita ogni 122 µsec.



**Figura 35: Antenna corrugata**

Analizzando nel dettaglio i **Feed Horn e gli OMT**, come componenti passivi, si devono considerare dei requisiti scientifici che impongano dei livelli di performance ottimi, per esempio l'antenna deve avere particolari caratteristiche di guadagno e di perdita d'inserzione.

Gli ottimi livelli di performance obbligano ad avere un preciso design meccanico, oltre ad un determinato design elettromagnetico. Il design meccanico serve per garantire un'alta resistenza meccanica e di allineamento di lancio.

Il problema importante per il progetto meccanico dello strumento, è che bisogna garantire il raffreddamento del piano focale a 20 K, mentre il modulo di servizio è a 300 K. Questo non è semplice dato che vi sono 44 guide d'onda, 312 connessioni elettriche, cavi, schermi e sistemi di supporto. Questo problema viene eliminato inserendo dei pannelli termici, il primo a temperatura di 240° K e l'ultimo a 60° K. Questo comporta che devo scegliere accuratamente i materiali con i quali devo andare a costruire lo strumento, in quanto le varie parti dello strumento sono caratterizzate da un'alta differenza di temperatura (titanio e carbonio).

Per costruire i Feed Horn a 70 GHz, gli OMT e le guide d'onda, si è scelto di utilizzare la tecnica dell'elettroformatura, consentendo così di realizzare degli elementi meccanici molto precisi.

Per esempio, per ottenere le antenne con corrugazioni precise si costruisce un mandrino che fa da negativo dell'oggetto che si vuole realizzare, con questo mandrino posso garantire delle tolleranze

Lo strumento LFI è caratterizzato da componenti a radiofrequenza passivi, è contraddistinto da 11 **antenne corrugate** a 30, 44, 70 GHz, quindi da 11 OMT necessari per dividere la polarizzazione dei segnali a microonde e 11 set composti da 4 guide d'onda per portare il segnale al BEM.

Vi sono due strutture di supporto, caratterizzate da un elevato potere di isolamento termico, che servono per tener rigido tutto il sistema durante le vibrazioni del lancio.



**Figura 36: Feed Horn e OMT**

meccaniche dell'ordine del decimo-centesimo. Questa tecnica consiste nel porre il materiale sul mandrino, ottenendo il negativo con a bordo l'oggetto di volo, si scioglie poi il mandrino, fatto tipicamente di alluminio, con la soda caustica. Ottengo così il negativo che è l'antenna corrugata che avevo progettato, ma con delle caratteristiche meccaniche precise che avevo sul mandrino stesso.

Molto importante è la scelta della finitura superficiale, in quanto da qui derivano le caratteristiche di emissione elettromagnetica dell'oggetto, per i Feed Horn e gli OMT è stata scelta una doratura superficiale per avere bassa emissività termica.

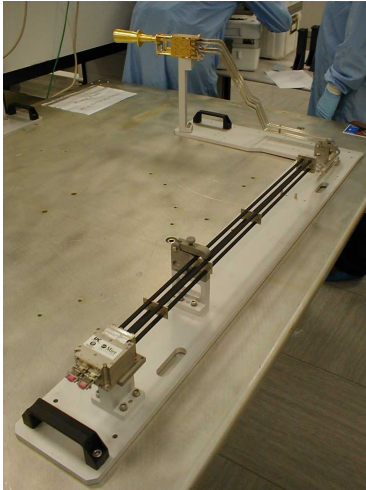


Figura 37: Guide d'onda

Altrettanto basilare nella costruzione del satellite sono le guide d'onda, che come requisito fondamentale hanno basse perdite e bassa riflessione. Le **guide d'onda** di Planck sono composte da 2 parti: una dritta in acciaio (per l'alta resistenza termica e l'alto potere di isolamento termico) e l'altra curva in rame (che pur essendo un ottimo conduttore termico, sul piano focale ha temperatura trascurabile, consentendo basse perdite). Inoltre queste guide devono avere un "Routing" particolare, per permettere l'integrazione con lo strumento HFI con bassa riflessione.

Un altro passo per la realizzazione di Planck è il progetto di cavi criogenici, in quanto vi sono 312 connessioni elettriche, per polarizzare i radiometri tra i 20° K e i 300° K e non devono essere sporcate dal rumore. Queste connessioni possono arrivare al piano focale con una potenza massima di 9 mW, si hanno quindi fili altamente resistivi, caratterizzati da una resistenza di 200  $\Omega$ , per polarizzare i transistor del Front End (mentre per i Drain devo avere fili con resistenze molto basse, in base al budget di potenza che possiedo).

Per garantire una buona immunità elettromagnetica si sono realizzati cavi dalla doppia schermatura, una interna in oro da 400 nm e un rivestimento esterno in coupton leggermente induttivo, che consente di dissipare lentamente la carica elettrostatica accumulata a bordo del satellite, per effetto dei raggi cosmici.

Un'operazione necessaria è la verifica del modello di qualifica, cioè devo utilizzare un radiometro che lavori a 20° K, un Back End a 300° K e le temperature alle interfacce devono essere definite, quindi devo controllare che tutto funzioni correttamente in queste condizioni.

A questo scopo viene realizzata una **camera criogenica** che ospita tutte le catene radiometriche, caratterizzate da una elevata stabilità di temperatura (4-400 ° K). Ho però bisogno di appositi oggetti che simulino i corpi neri e che garantiscano sul Front End delle temperature nell'ordine dei 4-20 ° K.

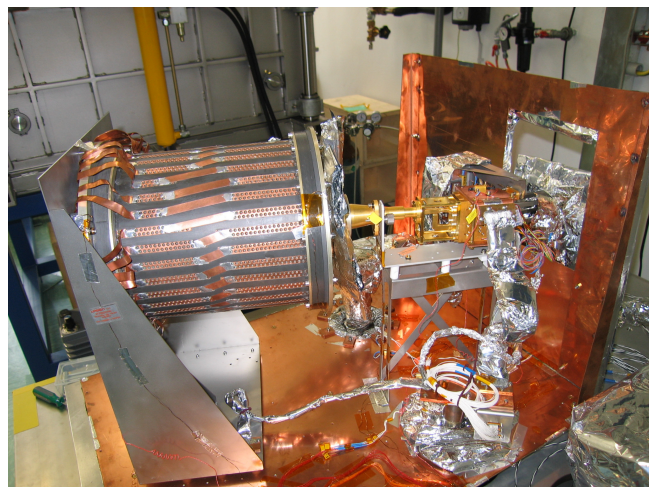


Figura 38: Prima camera criogenica

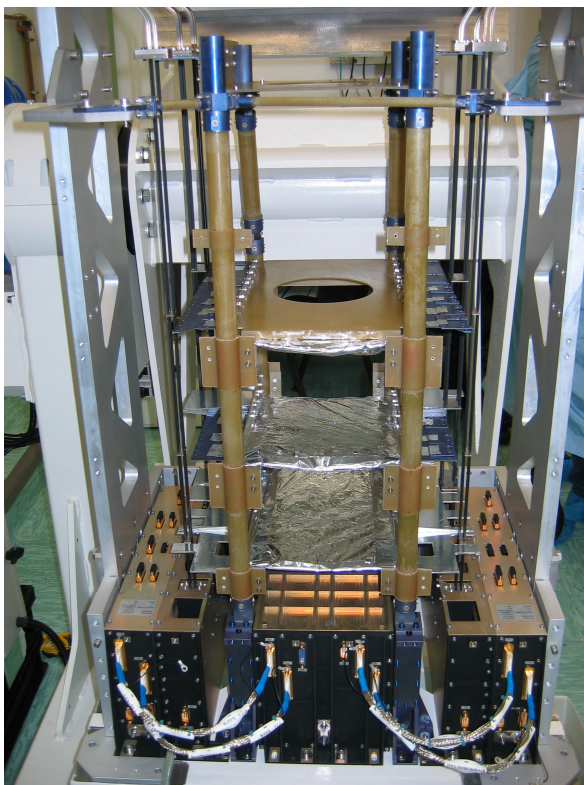


Figura 39: Schermi termici e BEM

In base alla misura, si racchiude il Front End in più gusci, ognuno a temperatura sempre più alta, in modo da disaccoppiarlo rispetto alla temperatura ambiente.

Infine, lo strumento è composto da 4 parti meccanicamente indipendenti tra di loro, tranne la connessione tramite guide d'onda, quindi devo avere una **struttura meccanica** in grado di sostenere il tutto. Questa struttura è un oggetto fatto in alluminio, con alcune parti in acciaio, che ha il compito di allineare il piano focale rispetto al **BEM**, tenendo conto del Routing ideale per integrare successivamente il radiometro.

Però non è possibile svolgere dei test sulla struttura in alluminio, bisogna quindi posizionare lo strumento in un'altra camera criogenica, con temperatura di riferimento a 20° K. Avendo una potenza irradiata che si comporta come la quarta potenza della temperatura, bisogna rivestire questa camera di Mylar un materiale composto da strati di Mylar alluminizzato, per abbassare le permissività di una data superficie.

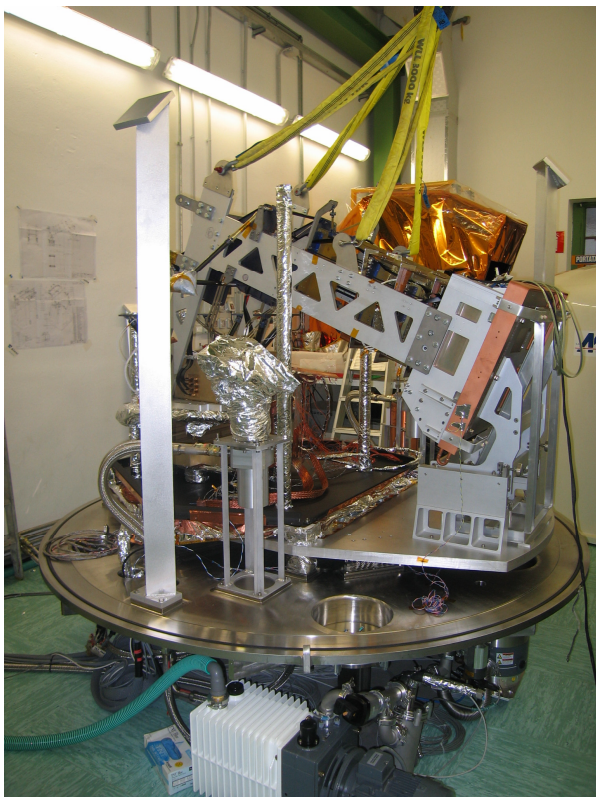


Figura 40: Seconda camera criogenica

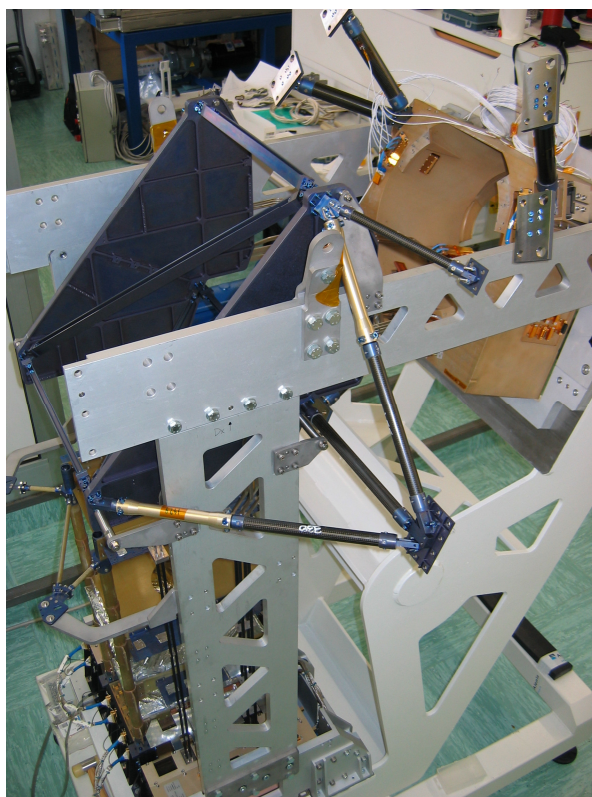


Figura 41: Struttura LFI