

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO BICOCCA

TESI DI LAUREA TRIENNALE IN FISICA

Analisi delle antenne a tromba utilizzate nell'esperimento QUBIC

Candidato:

Edoardo Gervasoni

Matricola:

790544

Relatore: Prof. Mario Zannoni

Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali

Dipartimento di Fisica Giuseppe Occhialini

ANNO ACCADEMICO 2016/2017

Indice

1	La Radiazione Cosmica a Microonde e l'esperimento QUBIC	1
2	Setup Sperimentale	4
3	Scopo dello studio	7
4	Raccolta dei dati	11
5	Analisi dei dati	14
6	Conclusione	30
7	Codici	31

Capitolo 1

La Radiazione Cosmica a Microonde e l'esperimento QUBIC

La *Radiazione Cosmica a Microonde*, detta anche CMB dall'inglese Cosmic Microwave Background, è la sorgente più lontana che è possibile osservare. Essa non è altro che la luce creata pochi attimi dopo il Big Bang circa 14 miliardi di anni fa, e a causa dell'espansione dell'universo, la CMB oggi è un debole fondo di microonde che ci fornisce un'immagine del cosmo primordiale.

La scoperta del fondo cosmico a microonde, avvenuta in maniera casuale nel 1965, si deve a due fisici americani, Arno Penzias e Robert Wilson, nel tentativo di cercare l'origine di un disturbo che non riuscivano ad eliminare registrato dalla loro antenna che stavano usando come radiotelescopio. Solo in un secondo tempo i due scienziati si resero conto che il segnale misurato poteva essere spiegato con la radiazione fossile del Big Bang, predetta alcuni anni prima da Gamow e altri ricercatori.

Questa scoperta fu fondamentale: determinò il crollo della teoria dell'universo stazionario e costituisce ancora oggi una delle maggiori prove a conferma della teoria del Big Bang.

Nel particolare la CMB riflette le condizioni del sistema in cui fu liberata, cioè l'universo primordiale, un sistema in equilibrio termodinamico completo. Infatti la radiazione cosmica ha un tipico spettro di corpo nero, ovvero un corpo in grado di assorbire tutta la radiazione incidente; essa inoltre è isotropa, cioè è distribuita in maniera uniforme nello spazio.

Queste sue caratteristiche si sono mantenute inalterate nel corso di 14 miliardi di anni di evoluzione del cosmo. L'unico attributo che si è modificato è stata la lunghezza d'onda della radiazione, che nel corso del tempo ha subito un red-shift, transendo dalla banda ottica alle microonde per via dell'espansione dell'universo.

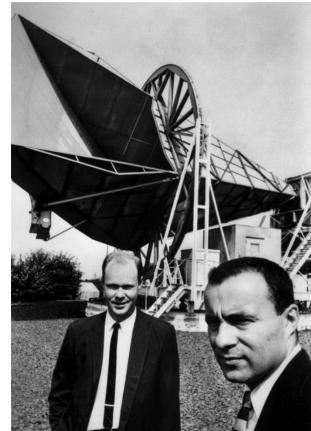


Figura 1.1: Wilson e Penzias

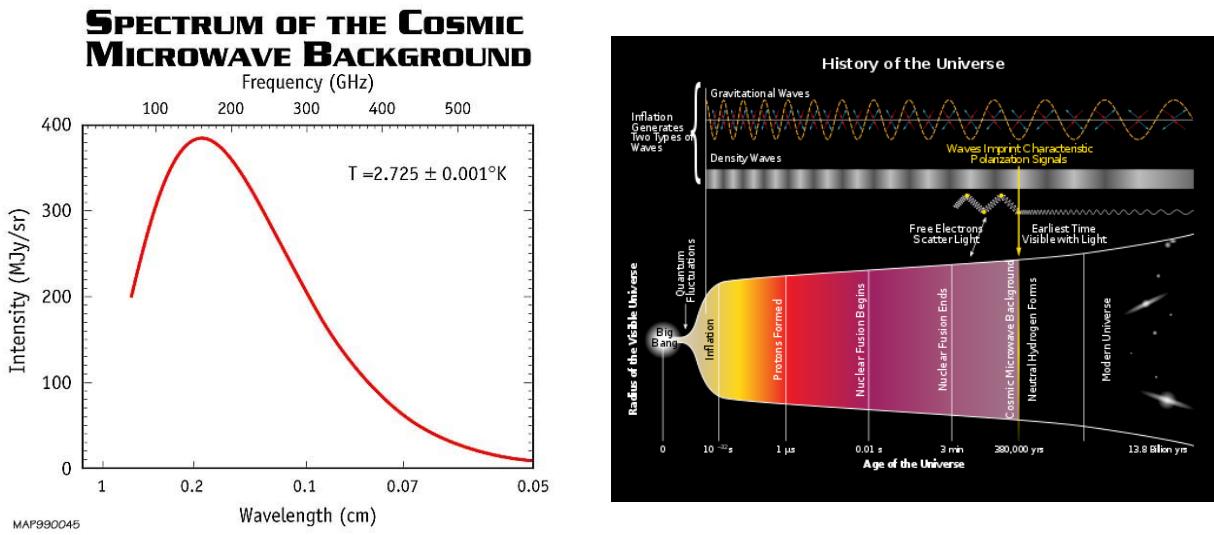


Figura 1.2: A sinistra: lo spettro del Fondo Cosmico a Microonde, la misurazione più precisa di corpo nero in natura. A destra: l’evoluzione dell’Universo, in cui si nota una prima parte a crescita esponenziale, l’inflazione.

Per quanto riguarda l’esperimento QUBIC, di interesse fondamentale è la polarizzazione della radiazione cosmica. Questa infatti mostra di avere un certo grado di polarizzazione, ovvero di differenze nell’ampiezza del campo elettrico, a seconda dell’orientazione nello spazio.

In particolare esistono due tipi di polarizzazione per quanto riguarda la CMB: i modi-E, già studiati in diversi esperimenti, e i modi-B, non ancora osservati, e che sono legati a processi avvenuti al momento dell’espansione esponenziale dell’universo, detta **inflazione**. L’osservazione dei modi-B di polarizzazione della radiazione cosmica di fondo ci potrebbe quindi fornire informazioni importantissime sull’inflazione e di conseguenza sull’universo durante gli attimi appena successivi al Big Bang.

Ora, l’esperimento QUBIC ha proprio come scopo l’osservazione dei modi-B di polarizzazione della CMB. Nello specifico QUBIC è un acronimo che sta per Q and U Bolometric Interferometer for Cosmology, ed è il nome dell’interferometro, sensibile alla polarizzazione lineare, che verrà utilizzato nell’esperimento. La radiazione cosmica, che ha lunghezza d’onda dell’ordine dei millimetri, sarà rilevata grazie a un insieme di antenne a tromba, poste vicine le une alle altre, che vanno a formare un array di 400 antenne.

Il segnale che verrà studiato sarà una combinazione lineare delle intensità totali osservate da ciascuna antenna, sfruttando quindi la tecnica dell’interferometria additiva.

QUBIC è il primo interferometro che utilizza sensori bolometrici per l’osservazione della CMB, rendendolo quindi uno strumento particolarmente preciso e adatto all’osservazione dei modi-B. L’interferometro lavorerà alle frequenze di 97, 150 e 220 GHz e sarà installato nella località di Alto Chorillo, in Argentina.

Per informazioni più dettagliate su QUBIC, vedi [1].

Il mio lavoro, di cui parlerò da qui in poi, ha riguardato lo studio delle proprietà fisiche di un piccolo array costituito da 8x8 antenne a tromba, un modello in scala che riproduce l'array che verrà impiegato nell'esperimento QUBIC, e attraverso cui quindi è possibile risalire alle caratteristiche delle antenne che verranno impiegate nell'osservazione della CMB.

Capitolo 2

Setup Sperimentale

Prima di tutto, consideriamo l'array di antenne a tromba che è stato analizzato.

L'array è costituito da un blocco di materiale metallico, che presenta un totale di 8x8 antenne a tromba corrugate, facenti parte del dimostratore tecnologico dell'esperimento QUBIC (per maggiori informazioni si veda [2]). In particolare la struttura è stata costruita a partire da sottili lastre di metallo, opportunamente forate, che vengono successivamente assemblate le une sulle altre in modo da formare la struttura a tromba. I fori sono ottenuti mediante una tecnica di incisione e fresatura fotochimica, in cui un agente chimico va a corrodere il materiale.

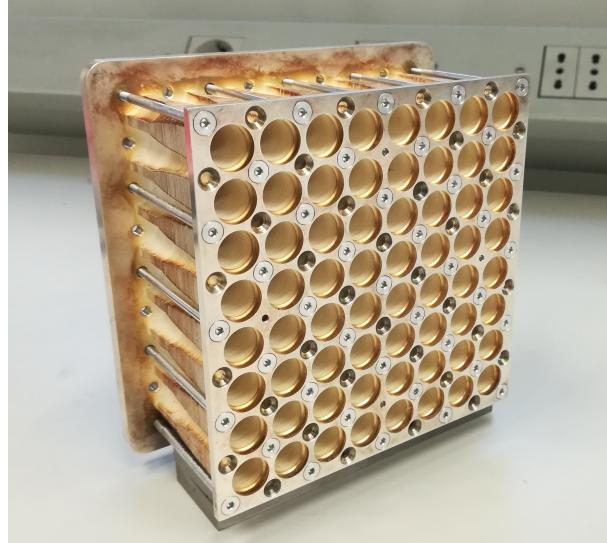


Figura 2.1: L'array di antenne.

L'indagine sulle proprietà fisiche delle antenne a tromba è avvenuta grazie ad un apparato sperimentale costituito da un banco ottico, da un emettitore e un ricevitore di microonde, e da un analizzatore di rete vettoriale, o VNA.

Soffermiamoci in particolare sul descrivere questo dispositivo (una trattazione più approfondita è ad esempio [3]). Un analizzatore di rete è una macchina che consta di due porte, che chiamiamo porta 1 e porta 2, in grado di misurare i parametri caratteristici di

una rete elettrica lavorando principalmente ad alte frequenze.

Nell'analisi di una rete sono fondamentali i concetti di onda incidente, onda riflessa e onda trasmessa, che viaggiano lungo delle linee di trasmissione.

In particolare è utile fare un'analogia con le onde luminose: possiamo infatti immaginare un fascio di luce che incide un campione costituito da una lente o da uno specchio; nel primo caso una piccola parte della luce iniziale verrà riflessa dalla superficie dell'oggetto, mentre la maggior parte sarà trasmessa oltre il campione. Nel caso di uno specchio invece avverrà il contrario, e il fascio luminoso sarà quasi del tutto riflesso. L'entità di questi effetti dipendono dal materiale dell'oggetto investito dalla radiazione e, studiandole, si può risalire a informazioni sulla sua struttura.

Questo concetto è valido anche per le onde che ci interessa studiare, con la differenza che nel nostro caso trattiamo di segnali ad alta frequenza, nella banda radio anziché nella banda ottica e inoltre, al posto di lenti o specchi, andiamo a studiare i comportamenti di dispositivi elettrici.

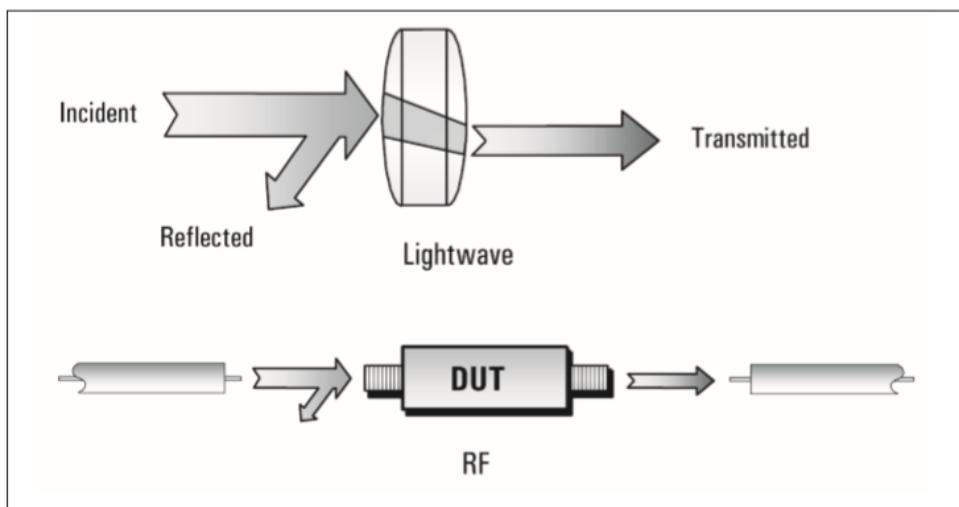


Figura 2.2: L'analogia tra segnali luminosi e segnali elettrici.

Ora, l'analisi di una rete riguarderà la misura dei rapporti del segnale riflesso e del segnale trasmesso rispetto al segnale incidente, e questi valori ci sono forniti dai parametri S, numeri complessi, detti parametri di scattering, di cui l'analizzatore restituisce l'ampiezza e la fase. Tali quantità ci permetteranno quindi di studiare le proprietà del DUT, o *device under test*, per noi costituito da un'antenna.

Nel nostro caso i parametri S saranno quattro e, per convenzione, il primo numero che segue la "S" è la porta del VNA che riceve il segnale uscente dalla porta individuata dal secondo numero. Nel setup sperimentale che ho utilizzato, la porta 1 dell'analizzatore è stata collegata al ricevitore, mentre la porta 2, all'emettitore di microonde.

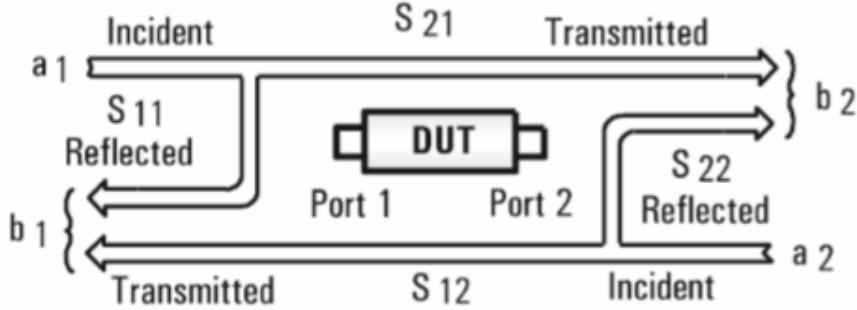


Figura 2.3: Schema che rappresenta i parametri di scattering.

S_{11} e S_{22} quindi sono i segnali riflessi rispettivamente al ricevitore e all'emettitore, mentre S_{12} è il segnale trasmesso dall'emettitore al ricevitore e S_{21} è il segnale trasmesso dal ricevitore all'emettitore.

Il parametro interessante ai fini della nostra trattazione è S_{12} , e le frequenze di riferimento nell'ambito dell'analisi dei dati sono state 145, 150, 155 GHz.

Il banco ottico, considerato perfettamente piano, è la "base" su cui è avvenuto l'esperimento. Ai due capi estremi del banco sono stati montati rispettivamente l'emettitore e il ricevitore delle onde millimetriche, di modo che questi risultassero inizialmente in asse. In particolare il ricevitore è stato installato su una base girevole dotata di un goniometro, di modo da permettere di campionare il segnale ricevuto ad angoli ben definiti rispetto all'asse dell'emettitore.

Alla bocca del ricevitore viene collegata, tramite una guida d'onda, una tromba dell'array alla volta, per la quale si andrà a costruire il grafico di radiazione grazie ai dati che vengono raccolti dall'analizzatore di rete vettoriale.

Quando avviene una misurazione per l'antenna ad un dato angolo, il VNA restituisce un file .csv, contenente i valori dei parametri S di scattering in decibel distribuiti lungo la banda di frequenze della radiazione emessa, che nel nostro caso andava da 120 GHz a 170 GHz.

In particolare i decibel, il cui simbolo è dB, sono delle unità di misura utilizzate per esprimere il rapporto tra valori di una stessa proprietà fisica su una scala logaritmica. Nel caso di S_{12} , il rapporto è tra due potenze e la relazione tra la misura espressa in scala logaritmica e in scala lineare è:

$$\left(\frac{W_{trasmessa}}{W_{incidente}} \right)_{dB} = (S_{12})_{dB} = 10 \ln_{10}(S_{12}) = 10 \ln_{10} \left(\frac{W_{trasmessa}}{W_{incidente}} \right). \quad (2.1)$$

Come ultimo appunto, si fa presente il fatto che tutte le superfici metalliche dell'apparato sperimentale sono state ricoperte da un materiale assorbente per le microonde, costituito da una schiuma di carbonio, di modo da evitare possibili riflessioni che avrebbero potuto alterare il segnale captato.

Capitolo 3

Scopo dello studio

Il fine del lavoro è quello di ottenere informazioni riguardo alle caratteristiche fisiche delle antenne dell'array, andando a studiarne in particolare i diagrammi di radiazione, che ci permetteranno di ricavare il Guadagno e la Direttività delle stesse.

Definiamo dunque i dispositivi che saranno oggetto del nostro studio e le grandezze che li caratterizzano.

Col termine **antenna**, intendiamo un dispositivo in grado di convertire un segnale elettrico in onde elettromagnetiche e di irridiarle nello spazio. Un'antenna è costituita da un conduttore, il quale, se è attraversato da un corrente variabile nel tempo, genera un campo elettromagnetico; inoltre, per il *principio di reciprocità* vale che se un campo elettromagnetico investe un conduttore, allora ciò indurrà su di esso tensioni e correnti variabili nel tempo.

Il principio di reciprocità garantisce quindi che l'antenna possa indifferentemente funzionare, in linea teorica, sia come antenna trasmittente che come antenna ricevente.

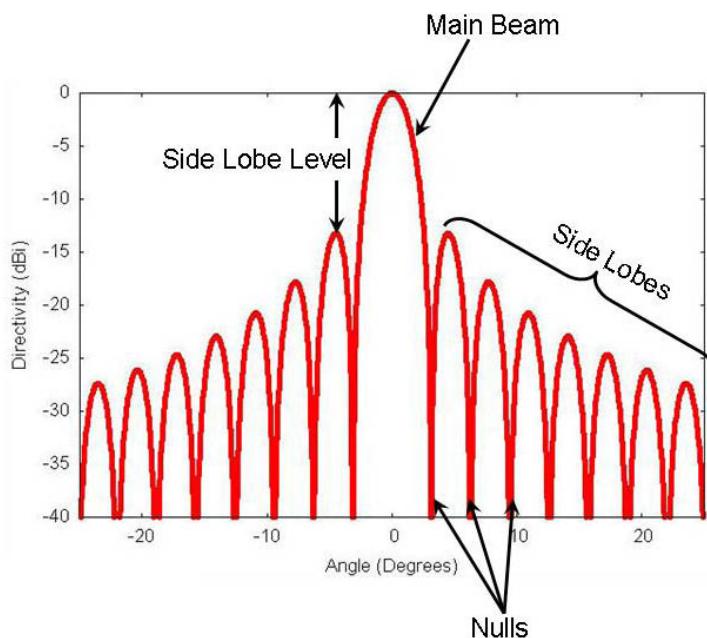


Figura 3.1: Un tipico diagramma di radiazione di un'antenna in coordinate cartesiane.

Il segnale restituito dall'antenna in funzione della direzione, espressa in termini angolari, è rappresentato dal diagramma d'antenna, o **diagramma di radiazione** che, per la

reciprocità, sarà lo stesso sia in ricezione, sia in emissione.

Il diagramma di radiazione può essere espresso in termini di diverse quantità, come dell'intensità del campo elettromagnetico, o, come nel nostro caso, del vettore di Poynting associato all'onda, cioè della potenza della radiazione.

Questi grafici in particolare rappresentano l'efficienza di ricezione del segnale dell'antenna, sotto forma del parametro S_{12} fornito dal VNA, in funzione dell'angolo di provenienza della radiazione rispetto all'asse dell'antenna in misura.

Inoltre, se il diagramma è misurato ad una distanza dall'antenna tale che un aumento della lontananza non determini un cambiamento nel grafico, si parlerà di diagramma di *campo lontano*; altrimenti staremo considerando un diagramma di *campo vicino*.

Il grafico in generale presenterà diversi lobi, come suggerito in figura 3.1.

Il lobo maggiore, cui corrisponde un picco più alto e quindi un segnale più intenso, è detto main beam, mentre i lobi più piccoli, corrispondenti a direzioni lungo le quali il segnale recepito è inferiore, sono detti lobi secondari.

Dei parametri importanti relativi al main beam sono l'*half-power beam width* o HPBW e il *beam width between first nulls* o BWFN, che esprimono la larghezza del lobo principale a metà del picco centrale e tra i due primi minimi. I grafici frutto dell'analisi dati, sono stati ottenuti sia in coordinate polari, sia in coordinate cartesiane.

Un modo significativo di descrivere un diagramma è attraverso il concetto di angolo solido.

Consideriamo un grafico della potenza in funzione delle coordinate polari sferiche, quindi degli angoli θ e ϕ :

$$P(\theta, \phi) = |E(\theta, \phi)|^2 \quad (3.1)$$

e consideriamo $P(\theta, \phi)_{max}$ il suo valore massimo.

Definiamo,

$$\Omega_A = \int \int_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (3.2)$$

l'*angolo solido dell'antenna*, con $P_n(\theta, \phi) = P(\theta, \phi)/P(\theta, \phi)_{max}$, potenza normalizzata rispetto al massimo e $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$, angolo solido infinitesimo. Notiamo che l'integrazione è effettuata sull'angolo solido pari a 4π ; se restringiamo l'integrale al lobo principale, otterremo l'*angolo solido di main beam*:

$$\Omega_M = \int \int_{mainlobe} P_n(\theta, \phi) d\Omega. \quad (3.3)$$

Un'altra quantità fondamentale per la nostra trattazione è data dal **Guadagno**, ovvero il rapporto tra la potenza irradiata in una data direzione dall'antenna considerata e la potenza irradiata da un'antenna isotropa nella stessa direzione e che irradia alla stessa potenza.

Un'antenna isotropa in particolare è un dispositivo in grado di irraggiare uniformemente in tutte le direzioni.

Equivalentemente, per il principio di reciprocità si può definire il Guadagno come rapporto tra potenza ricevuta dall'antenna rispetto alla potenza captata da un'antenna isotropa.

Simile al Guadagno è la **Direttività**, con la differenza che il primo tiene conto di eventuali perdite di segnale rispetto alla potenza totale in ingresso all'antenna.

Vediamo questi concetti da un punto di vista matematico.

Il Guadagno è definito come

$$G = E_{antenna} \cdot D \quad (3.4)$$

dove D è la Direttività dell'antenna, mentre E è l'Efficienza.. Questa grandezza tiene conto delle perdite di segnale dovute, ad esempio, all'effetto Joule, e ci permette di scrivere che la potenza restituita dall'antenna in trasmissione sarà uguale a

$$W = E_{antenna} \cdot W_{in} \quad \Leftrightarrow \quad E_{antenna} = \frac{W}{W_{in}} \quad (3.5)$$

con W_{in} potenza in ingresso.

La potenza in uscita W , può anche essere definita come funzione di θ e ϕ , in termini dell'intensità di radiazione $U(\theta, \phi)$ (nel Sistema Internazionale misurata in Watt per steradiani, $W \cdot sr^{-1}$) come:

$$W = \int \int_{4\pi} U(\theta, \phi) d\Omega = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi. \quad (3.6)$$

L'intensità media di radiazione \bar{U} è invece data da

$$\bar{U} = \frac{W}{4\pi} = \frac{E_{antenna} \cdot W_{in}}{4\pi} \quad (3.7)$$

dove il secondo passaggio è dato dalla 3.5.

La Direttività di un'antenna lungo una data direzione è quindi esprimibile come rapporto tra il valore massimo dell'intensità di radiazione $U(\theta, \phi)$ e l'intensità di radiazione media \bar{U} :

$$D(\theta, \phi) = \frac{U_{max}(\theta, \phi)}{\bar{U}} = \frac{U_{max}(\theta, \phi) \cdot 4\pi}{W} = \frac{4\pi}{\int \int_{4\pi} \frac{U(\theta, \phi)}{U_{max}(\theta, \phi)} d\Omega} \quad (3.8)$$

Dal momento che l'intensità di radiazione è proporzionale al vettore di Poynting, dalla 3.1 e dalla 3.8 possiamo scrivere che

$$D = \frac{4\pi}{\int \int_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_A}. \quad (3.9)$$

La Direttività di un'antenna è quindi uguale all'angolo solido di una sfera (4π) diviso per l'angolo solido dell'antenna.

Il Guadagno invece, dalla 3.5 e dalla 3.9 sarà

$$G(\theta, \phi) = E_{antenna} \cdot \frac{U_{max}(\theta, \phi)}{\bar{U}} = E_{antenna} \cdot \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{U_{max}(\theta, \phi) \cdot 4\pi}{W_{in}}. \quad (3.10)$$

Riassumendo, Guadagno e Direttività rappresentano dunque la capacità dell'antenna di concentrare il campo elettromagnetico in una certa direzione, e sono espressi come funzioni delle coordinate polari sferiche, con la differenza che il Guadagno tiene conto di eventuali perdite di segnale.

Importante è notare il fatto che, nel caso di un'antenna particolarmente direttiva, e quindi in grado di concentrare gran parte del segnale lungo una certa direzione, varrà:

$$\Omega_A - \Omega_M \approx 0 \quad \Rightarrow \quad D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \approx \frac{4\pi}{\Omega_M}. \quad (3.11)$$

Nell'analisi compiuta sui dati, l'Efficienza è stata approssimata a 1, pertanto abbiamo considerato

$$D(\theta, \phi) \equiv G(\theta, \phi). \quad (3.12)$$

Per una trattazione più esaustiva di questi argomenti, si consulti [4].

Capitolo 4

Raccolta dei dati

I dati sono stati presi presso il laboratorio di Astrofisica dell'Università Bicocca, utilizzando il setup sperimentale precedentemente descritto. In laboratorio vi era la possibilità di analizzare due identici array di antenne del dimostratore tecnologico dell'esperimento QUBIC (si veda ancora [2]), chiamati array A e array B. I dati che ho raccolto si riferiscono per la maggior parte al primo, mentre per il secondo sono state campionate solo poche antenne, per verificare l'osservazione di una situazione simmetrica nei due casi. Consideriamo quindi l'array A, comprendente un totale di 64 antenne a tromba. Di queste, sono state analizzate 24 antenne, ritenute significative per la loro posizione:

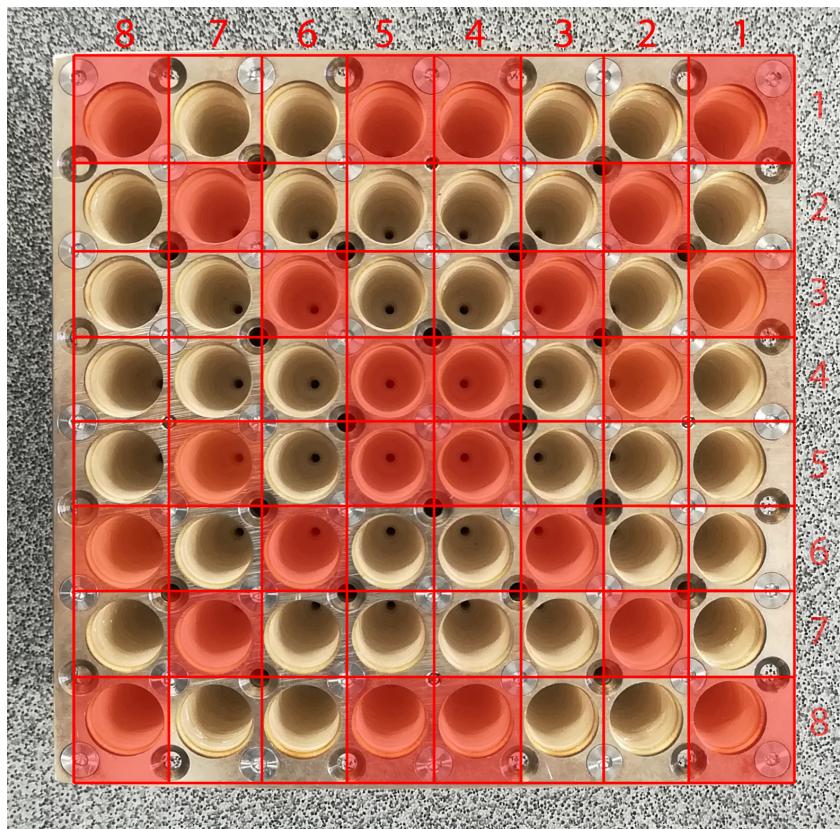


Figura 4.1: Le antenne colorate sono quelle che sono state prese in considerazione per la nostra trattazione. Ciascun'antenna è identificata da una coppia di numeri, di cui il primo indica la riga e il secondo la colonna dell'array.

Le antenne considerate sono state quindi: le quattro ai vertici, le quattro centrali, tutte le antenne sulle diagonali, più altre 8, distribuite in modo simmetrico all'interno dell'array.

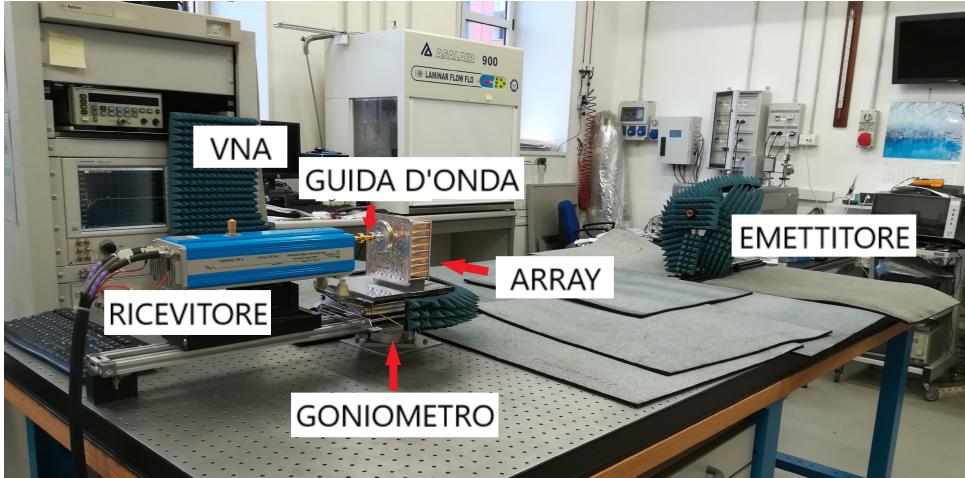


Figura 4.2: L'apparato sperimentale impiegato nell'esperienza.

Descriviamo di seguito in che modo sono stati ottenuti i dati sperimentali. Dopo aver scelto l'antenna da misurare, la si collega al ricevitore di microonde attraverso una guida d'onda. Questa è a sezione circolare all'estremità a contatto con la tromba, per poi stringersi progressivamente fino ad assumere una sezione rettangolare all'altro estremo, a contatto con il ricevitore. Una tale struttura permette alla guida di fungere da filtro passa alto: permetterà il passaggio di radiazione ad alte frequenze, quindi con una lunghezza d'onda piccola, mentre rifletterà radiazioni a basse frequenze, con una lunghezza d'onda maggiore.

Alla bocca dell'emettitore è stata collegata, sempre tramite una guida d'onda, un'antenna a tromba standard attraverso la quale viene lanciata la radiazione millimetrica verso l'array.

Soffermiamoci in particolare sulla polarizzazione della radiazione nel nostro esperimento. La guida d'onda a sezione rettangolare, con la base maggiore posta orizzontalmente, determina una polarizzazione lineare delle onde emesse, come in figura 4.3, con il campo elettrico che oscillerà verticalmente e il campo magnetico orizzontalmente.

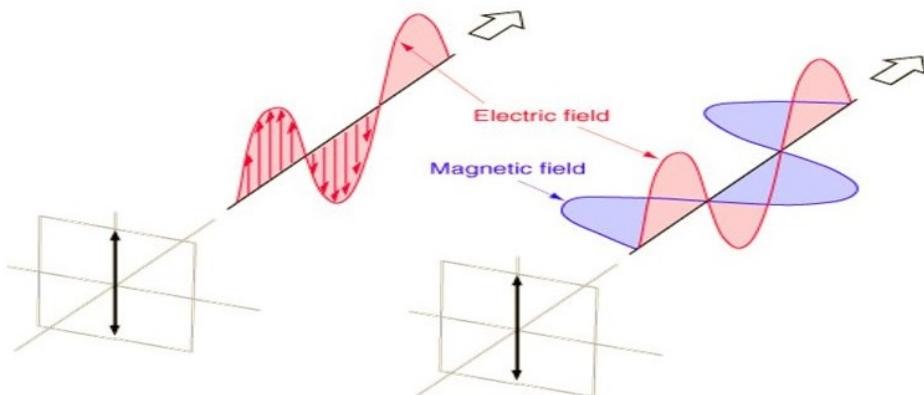


Figura 4.3: Un'onda polarizzata linearmente.

Quando sia emettitore che ricevitore presentano la guida d'onda disposta in questo modo, quindi quando entrambi emettono (per il principio di reciprocità) delle onde i cui campi elettrici oscillano parallelamente, si dice che si lavora in *copolarizzazione*; una situazione opposta è la *crosspolarizzazione*, in cui una delle due guide d'onda viene ruotata di 90 gradi, emettendo radiazione con un campo magnetico oscillante lungo l'asse verticale e quello elettrico lungo l'asse orizzontale. Le due onde emesse saranno quindi polarizzate ortogonalmente l'una rispetto all'altra.

La maggior parte dei dati sono stati raccolti in copolarizzazione, mentre per due antenne, la 27 e la 77, sono state anche ottenute delle misure in crosspolarizzazione. Per ottenere una polarizzazione ortogonale, l'antenna standard è stata collegata all'emettitore tramite un twist, una guida che transisce da una sezione rettangolare orizzontale ad una verticale. Quindi sono stati tracciati i dati, normalizzati rispetto alla misura effettuata all'angolo 0 in copolarizzazione.

Una volta che l'antenna è stata collegata al ricevitore, si posiziona quest'ultimo in maniera tale che l'angolo segnato dal goniometro sia 0, affinché emettitore e ricevitore risultino in asse.

Il VNA genererà un file .csv al termine di ogni scansione, ogni 15 secondi circa. Ruotando quindi il ricevitore di grado in grado e attendendo ad ogni angolo che l'analizzatore termini la misura, si riusciranno ad ottenere tanti file, ciascuno contenente i parametri S alle frequenze della radiazione incidente, quanti sono gli angoli considerati.

Per ciascun'antenna sono stati raccolti dati per un totale di 120 angoli, procedendo in tal modo: da -90 a -30 gradi rispetto all'asse dell'antenna in misura si è proceduto a scansionare con passo di 2 gradi, raccogliendo così dati per 30 angoli; nell'intorno del picco, tra -30 e 30 gradi, la misurazione è stata compiuta in modo più fitto, avanzando di un grado alla volta, in modo da avere una descrizione più dettagliata del main beam; tra 30 e 90 gradi, di nuovo si è proceduto con passo di 2 gradi. Per ogni antenna sono stati ottenuti in questo modo 120 file, grazie ai quali si è potuto in seguito tracciare i relativi diagrammi di radiazione.

Successivamente sono state ripetute tutte le misure per le stesse antenne, ruotando però l'array di 90 gradi. Questo è stato fatto per poter poi costruire il grafico di radiazione del piano ortogonale rispetto al primo, in modo tale da poter risalire ad una stima del Guadagno tridimensionale dell'antenna.

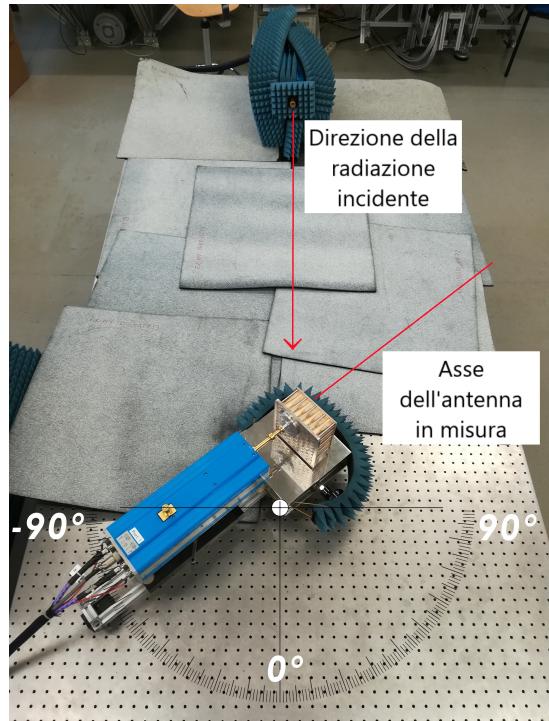


Figura 4.4

Capitolo 5

Analisi dei dati

L'analisi dei dati ha riguardato l'analisi dei files restituiti dal VNA ad ogni angolo per ciascun'antenna. Ogni file ha un aspetto di questo tipo:

```
1 !CSV A.01.01
2 !Agilent Technologies,N5245A,MY49151071,A.09.90.19
3 !Agilent N5245A: A.09.90.19
4 !Date: Monday, November 27, 2017 15:27:46
5 !Source: Standard
6
7 BEGIN CH1 DATA
8 Freq(Hz),S11(DB),S11(DEG),S21(DB),S21(DEG),S12(DB),S12(DEG),S12_Mem(DB),S12_Mem(DEG),S22(DB),S22(DEG)
9 120000000000, -2.8798788, -98.842514, -88.167419, 107.52871, -4.426064, 25.036787, -94.964828, -25.228855, -24.925795, 4.2760973
10 120125000000, -2.9813452, 172.77182, -87.508018, -159.74759, 15.12586, 20.25625, 99.568306, -16.533182, -25.651924, -55.268215
11 120250000000, -1.9961821, 79.956467, -89.573013, -112.37466, 7.6800942, 77.439705, -93.358482, -28.054544, -27.021027, -122.44412
12 120375000000, -1.9824847, -18.408724, -87.946465, -48.321255, 5.7120056, 69.254776, -90.364021, 43.996174, -28.693239, 164.9778
13 120500000000, -2.5093389, -113.21258, -84.730667, -6.51373, 11.509495, 27.44198, -96.594467, 120.59885, -29.522196, 85.814583
14 120625000000, -2.1344333, 154.42621, -85.786201, -4.4580145, 10.598891, -45.772701, -89.556137, -149.13832, -28.990746, 10.192177
15 120750000000, -1.1892251, 57.652248, -96.667114, 79.011597, -6.5978975, -61.655476, -81.600075, -52.973869, -28.300848, -55.340092
16 120875000000, -1.5798756, -39.052551, -94.845291, -172.72171, -7.092123, -66.621674, -80.411324, 38.969055, -28.225801, -117.42848
17 121000000000, -1.5761838, -131.58061, -91.564232, -167.46771, -8.527215, -92.270836, -76.132576, 132.35951, -28.619442, 177.04776
18 121125000000, -1.1694446, 131.05214, -88.961029, -149.61278, -10.471466, -110.72842, -74.417664, -150.40218, -29.894083, 107.49053
19 121250000000, -1.6019138, 35.696434, -98.266869, -91.599701, -16.753481, -129.59975, -75.414116, -76.234505, -32.289249, 27.956099
20 121375000000, -2.0706878, -49.099857, -89.333481, 10.525029, -16.920326, -117.09227, -72.789581, 34.863373, -33.043221, -67.745918
21 121500000000, -1.5034459, -127.48911, -82.875954, 17.702541, -11.728813, -169.62999, -69.793564, 121.12788, -30.374981, -154.01736
22 121625000000, -1.3183197, 142.43265, -88.604065, 46.750732, -15.310786, 137.49887, -68.257477, -168.79144, -27.820932, 131.44562
23 121750000000, -2.1156766, 55.993637, -96.495766, 5.2651882, -24.64015, 46.611183, -67.501465, -77.198486, -26.613174, 66.139503
```

Figura 5.1: File relativo all'antenna 85 all'angolo 24.

Sono presenti quindi 11 colonne, la prima relativa al range di frequenze della radiazione emessa (da 120 a 170 GHz), le altre si riferiscono ai quattro parametri di scattering espressi in decibel e in gradi. Questo perché, essendo i parametri S dei numeri complessi, le prime unità sono relative al modulo, le seconde alla fase dei valori considerati. Oltre a ciò sono presenti altre due colonne, relative al parametro S_{12} misurato in una prima scansione (S12_Mem), con emettitore e ricevitore in asse. Questa misura è stata utilizzata per normalizzare tutti gli altri valori di S_{12} .

Grazie ai dati così ottenuti, si è potuto ricavare i grafici di radiazione per ogni antenna, selezionando da ogni file i parametri S_{12} relativi a tre frequenze fondamentali: 145, 150 e 155 GHz.

Riportiamo di seguito alcuni esempi che sono stati realizzati in questo modo.

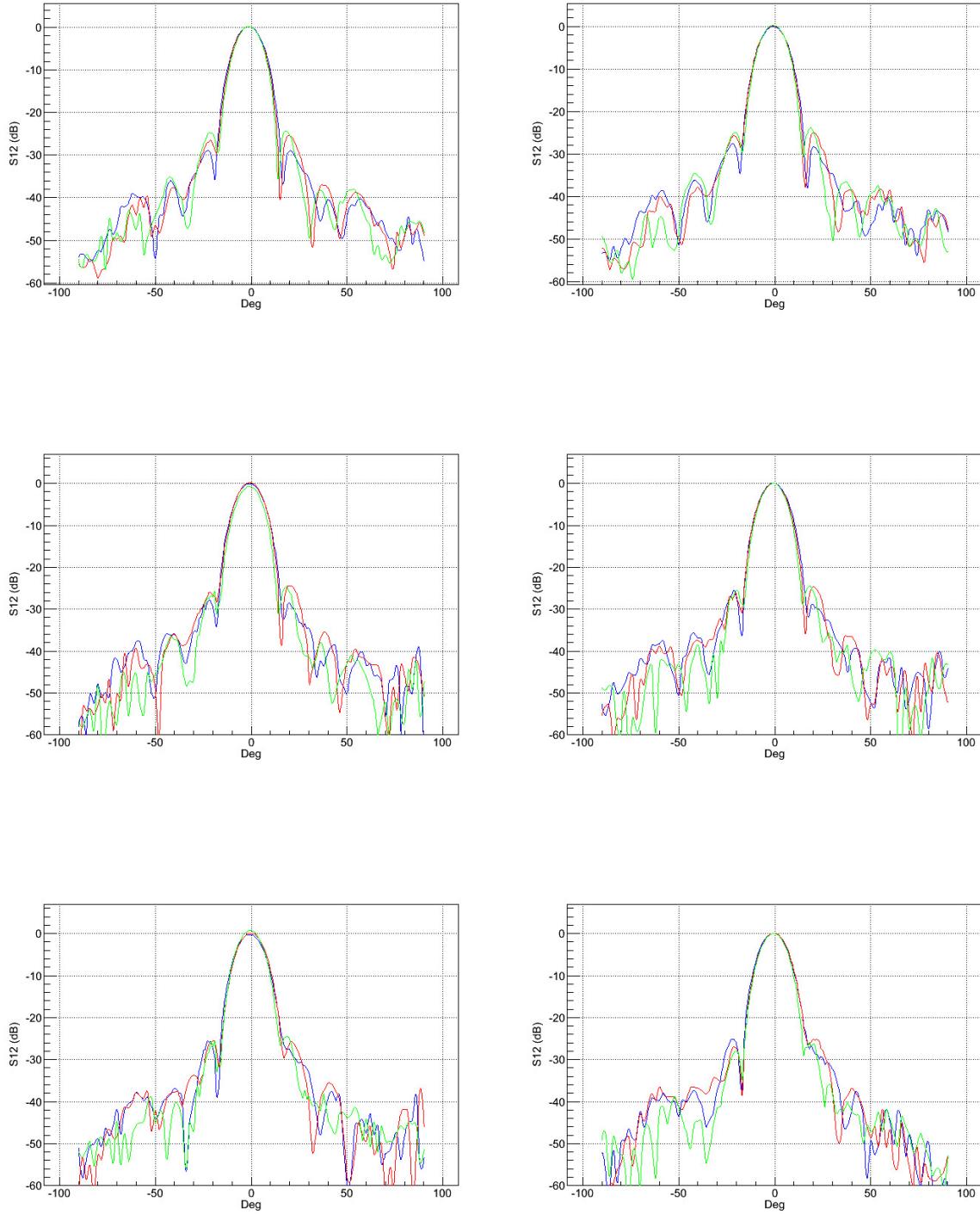


Figura 5.2: I grafici si riferiscono, da quello in alto a sinistra a quello in basso a destra, alle antenne 11, 15, 22, 44, 72, 85.

Nei diagrammi presentati, le curve blu si riferiscono ai dati relativi a 145 GHz, quelle rosse a 150 GHz, e quelle verdi a 155 GHz. In particolare si possono notare chiaramente i main beams delle varie antenne, tutti centrati in asse come ci si aspetta, a meno di un leggero offset ad angoli negativi; si nota anche come i primi due minimi siano posti tutti circa 30 dB al di sotto del massimo del grafico, a -30 e 30 gradi.

Inoltre si rilevano chiaramente i lobi secondari, molto più bassi rispetto a quello centrale. Ciò è indice di una progettazione accurata dell'array, e di una buona efficienza delle antenne nella ricezione in asse del segnale.

Guardando il main beam si rileva inoltre che le curve verdi, quindi corrispondenti a frequenze maggiori, sono leggermente più basse rispetto alle curve delle altre frequenze. Questo è dovuto al fatto che la larghezza a metà altezza dei grafici va come $\frac{\lambda}{d}$, dove λ è la lunghezza d'onda della radiazione incidente e d è il diametro della bocca della tromba analizzata. Per frequenze più elevate avremo quindi delle lunghezze d'onda inferiori e di conseguenza dei main beams più stretti.

Come già detto precedentemente, oltre a queste misure, relative a quello che è stato chiamato piano E, sono stati raccolti anche dati ruotando l'array di 90 gradi. Questo ha consentito di tracciare i diagrammi di radiazione del cosiddetto piano H. Mostriamo nella pagina seguente i diagrammi del piano H per le stesse antenne di cui abbiamo presentato i diagrammi del piano E.

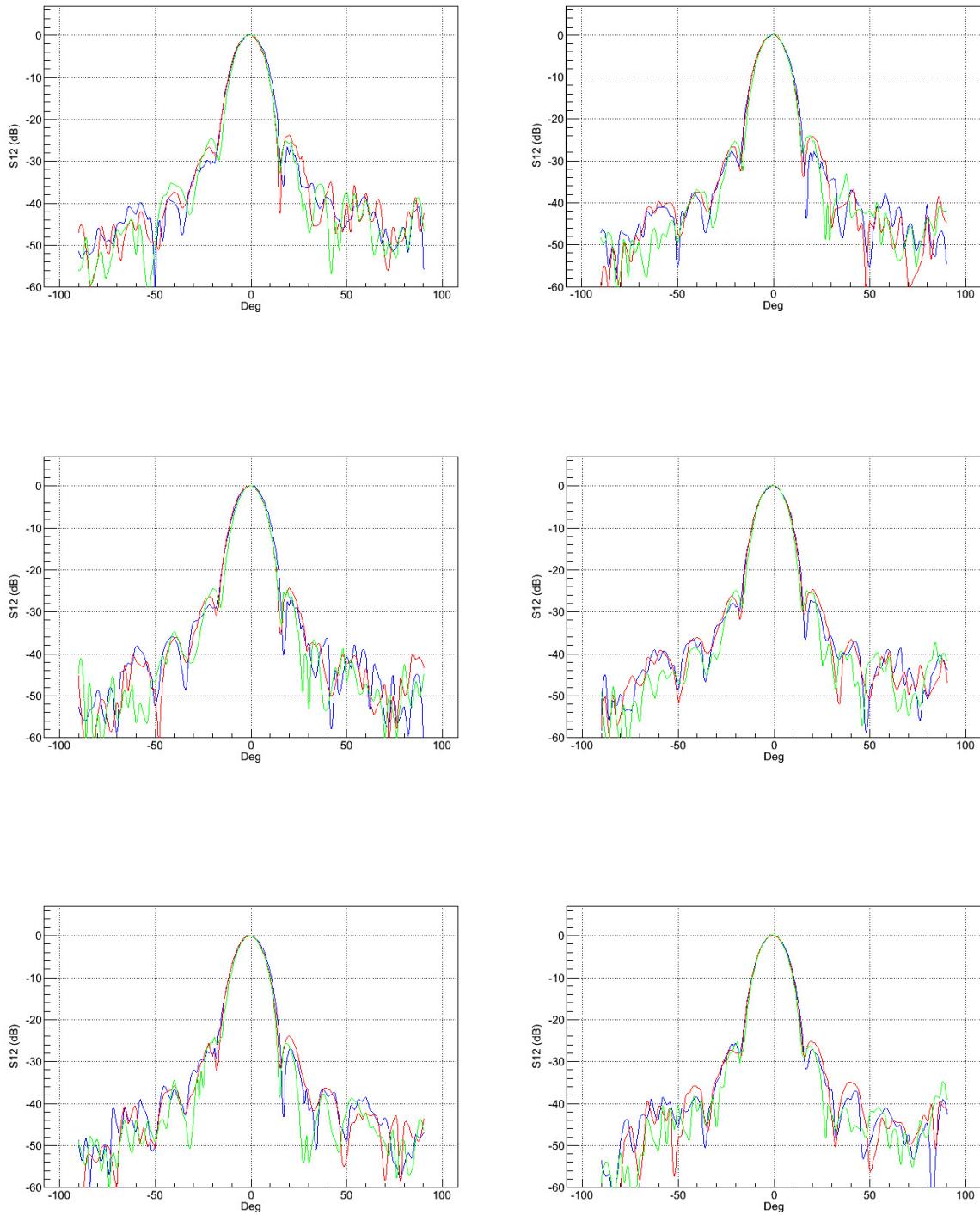


Figura 5.3: Come prima, i grafici sono riferiti, in ordine, alle antenne 11, 15, 22, 44, 72, 85.

Dalle immagini si può vedere che le osservazioni fatte precedentemente valgano anche per il piano H.

In particolare si nota un'insolita tendenza dei lobi secondari ad assumere valori più intensi ad angoli positivi rispetto agli angoli negativi. Questo fatto si registra sia per il piano E che per il piano H, e probabilmente è dovuto al fatto che l'ambiente in cui si è svolto l'esperimento, non fosse perfettamente *anechoico*, cioè in grado di assorbire le microonde senza rifletterle.

Successivamente sono state prese delle misure anche per l'array B, ruotando tutto l'apparato sperimentale di 180 gradi rispetto a prima. Dai diagrammi di radiazione presentati di seguito, si nota il ripresentarsi delle osservazioni compiute per l'array A, ma non sembra registrarsi nuovamente lo stesso effetto per i lobi secondari.

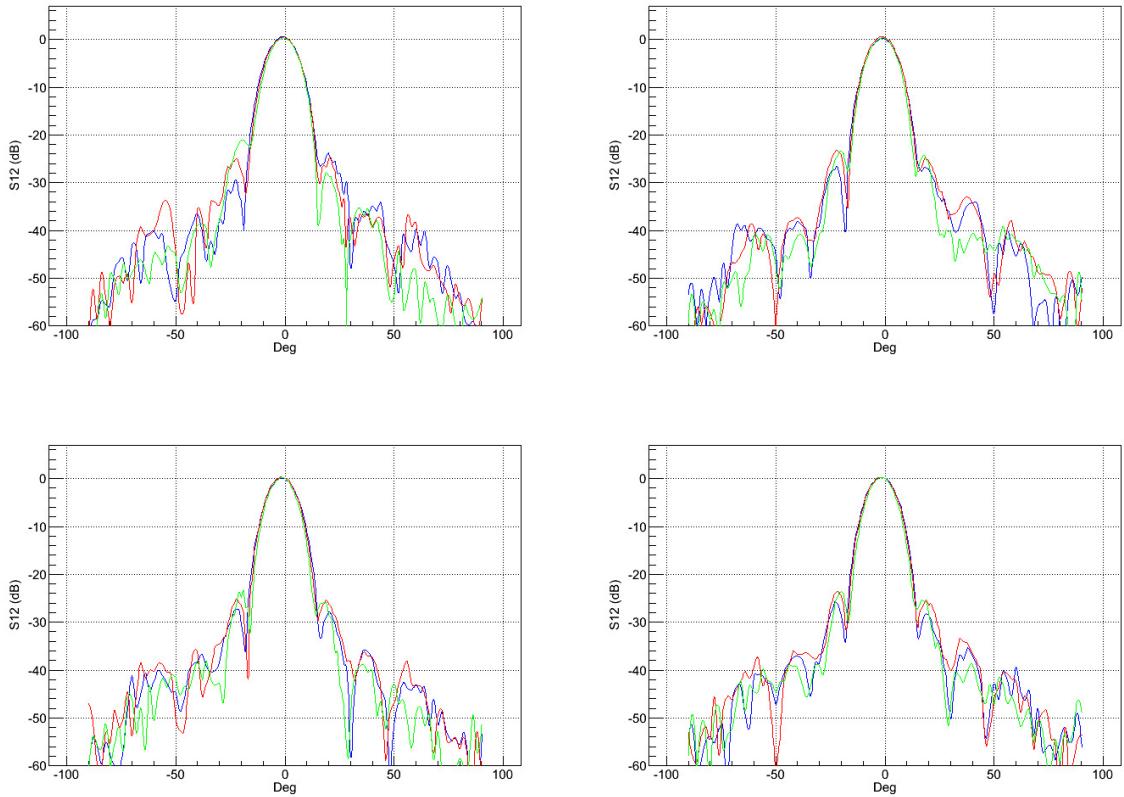


Figura 5.4: Diagrammi di radiazione delle antenne 15 e 54 dell'array B, per il piano E ed il piano H.

Il passo successivo è consistito in un'analisi più dettagliata delle proprietà del main beam di ciascuna antenna. Per far ciò, è stato isolato il lobo centrale di ciascun grafico, scegliendo come frequenza di riferimento 150 GHz.

Più specificatamente, per ogni antenna sono state considerate solo le misure di S_{12} comprese tra -30 e 30 gradi, in modo da tener conto dei dati relativi al lobo centrale. Questi valori sono poi stati convertiti da decibel a lineari invertendo la relazione 2.1:

$$S_{12} = 10^{\frac{(S_{12})_{dB}}{10}}. \quad (5.1)$$

Quindi il grafico è stato fissato con una funzione gaussiana sommata ad una costante B:

$$f(x) = Ae^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} + B, \quad (5.2)$$

dove A è l'ampiezza della funzione, x_0 è l'offset, cioè l'ascissa corrispondente al massimo, e σ^2 è il parametro che ci permette di risalire alla larghezza a metà altezza della gaussiana.

Riportiamo dunque i grafici che sono stati ricavati in tal modo.

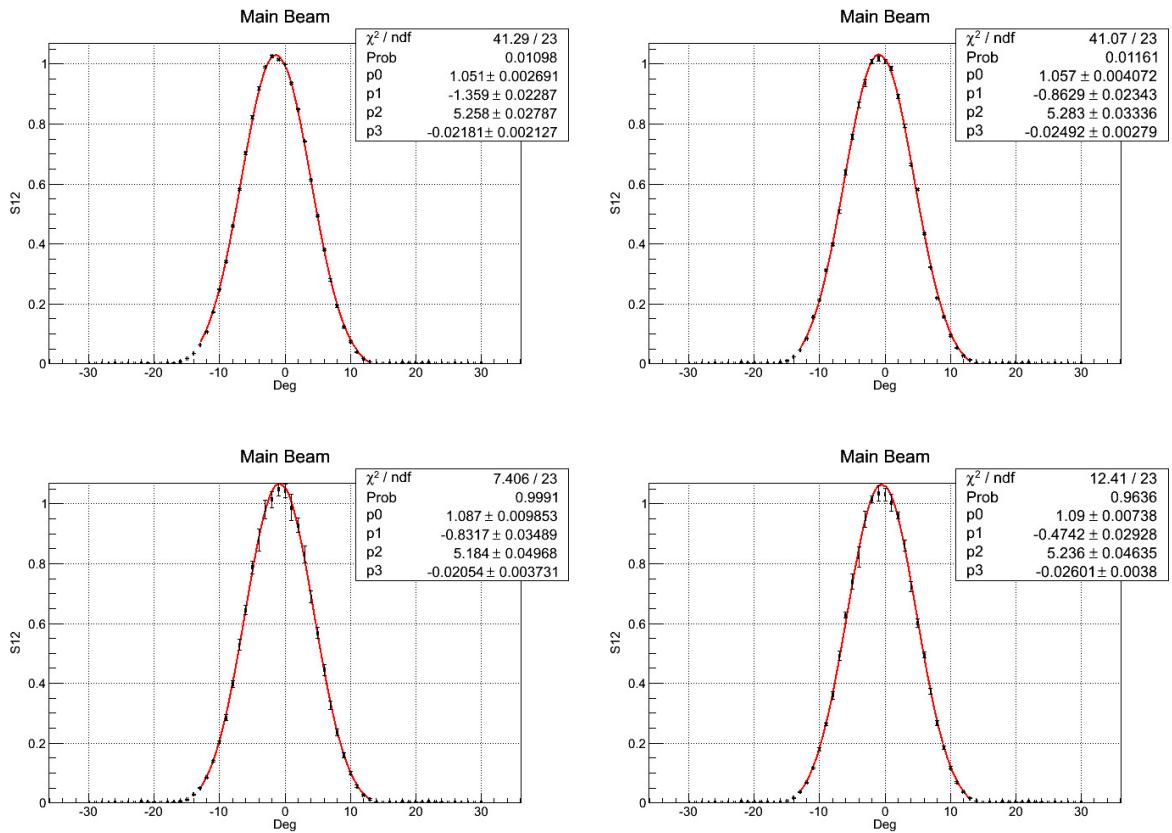


Figura 5.5: Diagrammi di radiazione dei main beams delle antenne 11, 15, 22 e 42. Nelle tabelle di fit in alto a destra in ogni grafico, sono indicati con p0 il parametro A della gaussiana, con p1 x_0 , con p2 σ e con p3 B.

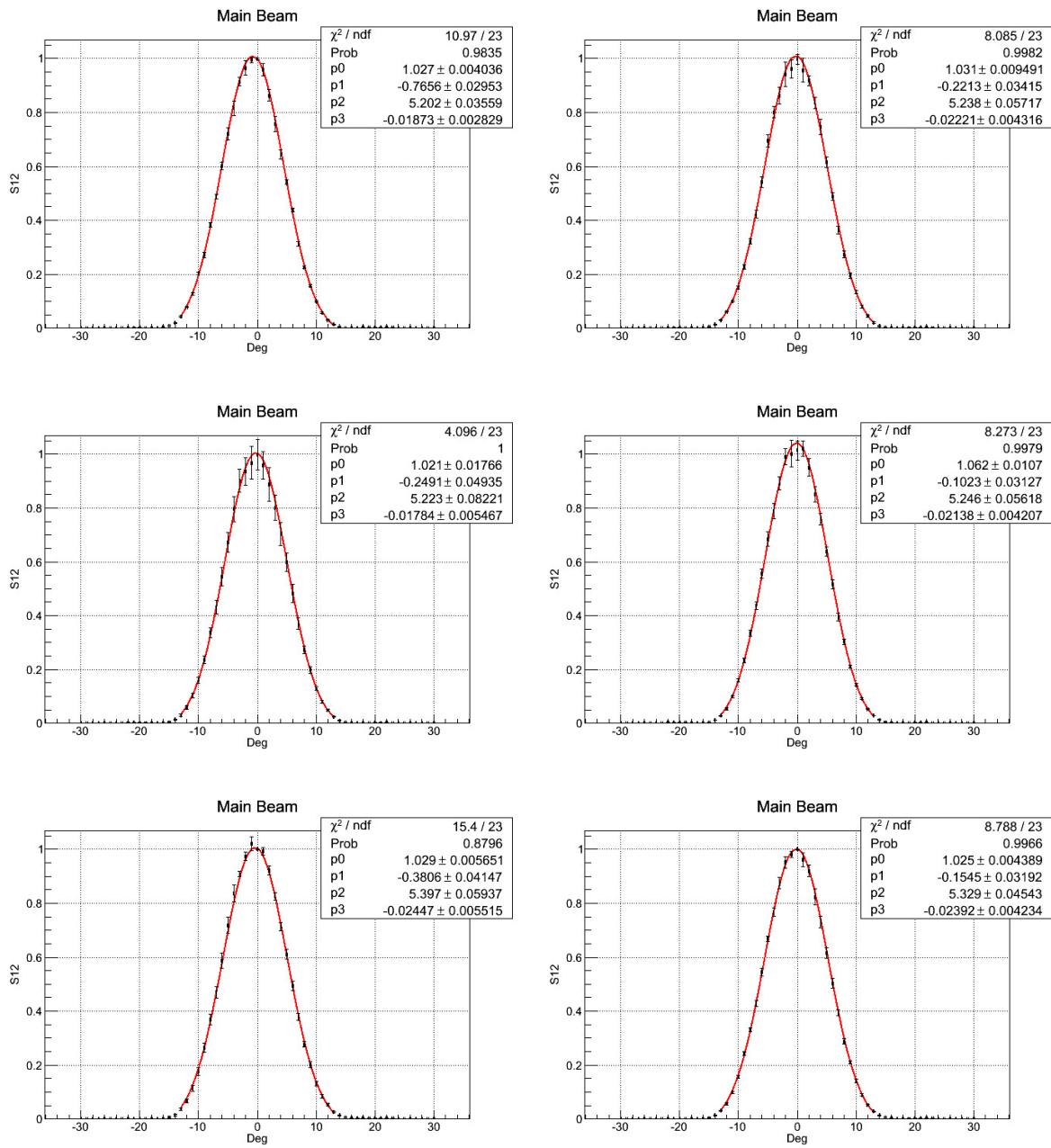


Figura 5.6: Diagrammi di radiazione dei main beams delle antenne 44 e 55, 68, 72, 85, 88.

Di seguito invece abbiamo i grafici relativo al piano H.

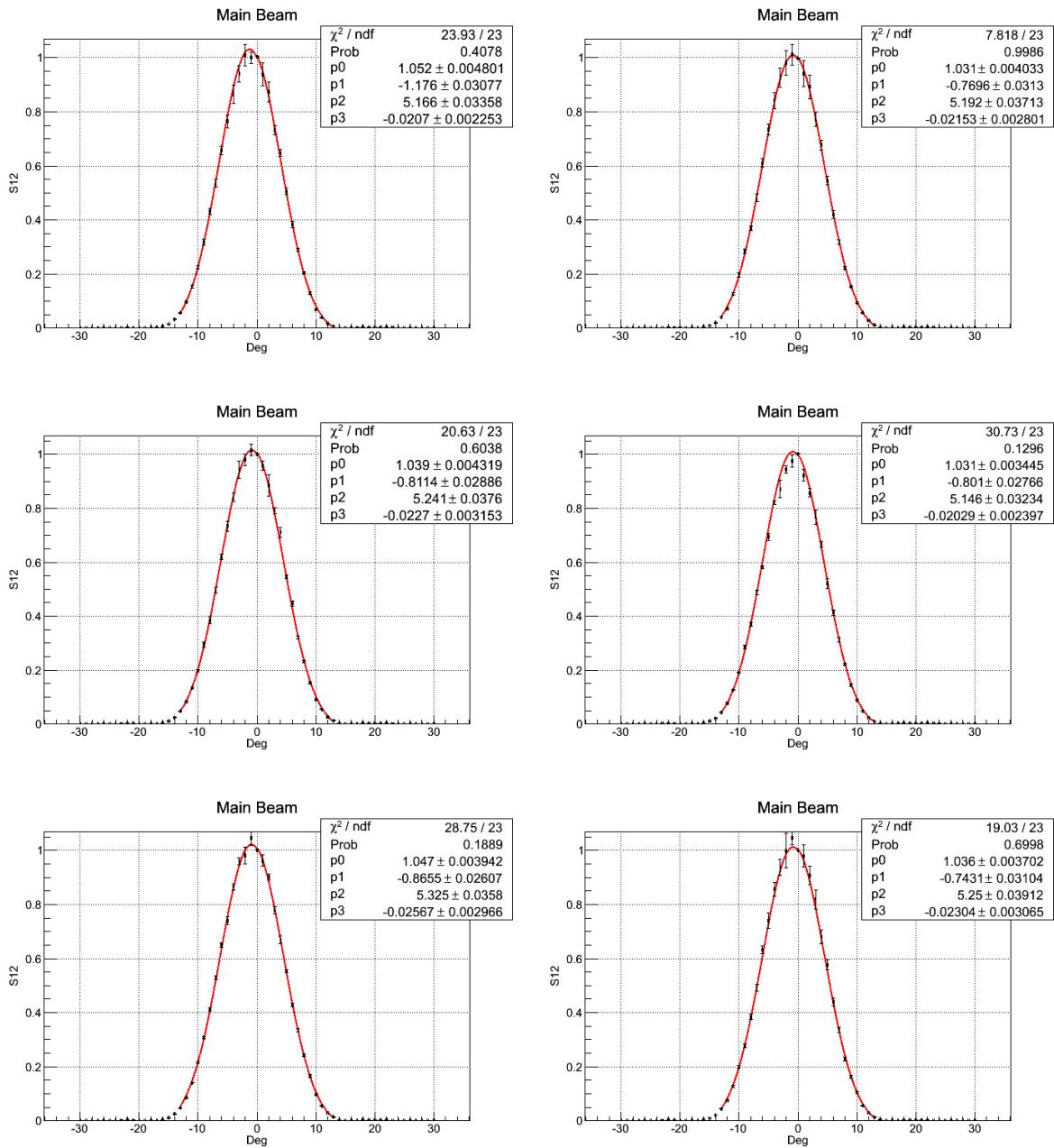


Figura 5.7: Main beams sul piano H delle antenne 11, 15, 22, 42, 44, 55.

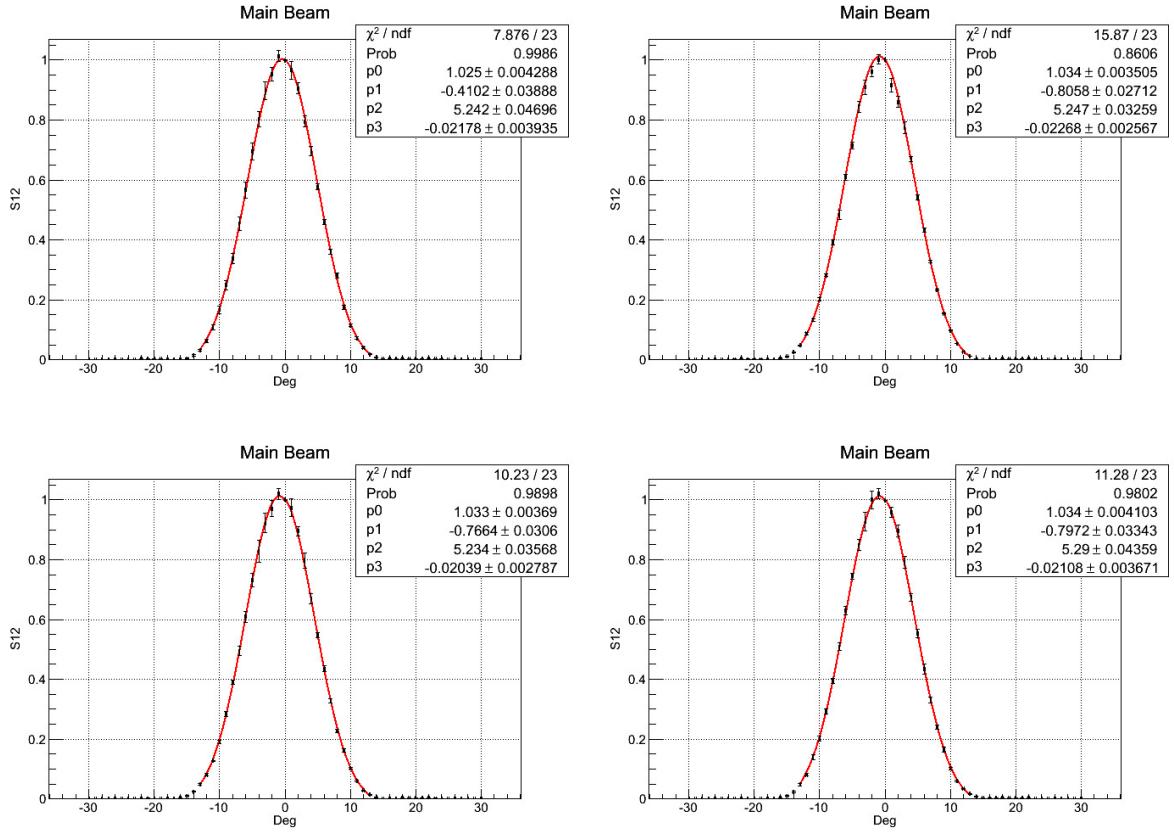


Figura 5.8: Main beams sul piano H delle antenne 68, 72, 85 e 88.

Gli errori dei punti sono stati stimati in questo modo: sugli angoli si è considerata un'incertezza di 0.1 gradi, corrispondente alla sensibilità del goniometro, mentre per i valori di S_{12} è stata calcolata la deviazione standard tra i dati relativi a frequenze adiacenti rispetto a quella di riferimento, cioè 150 GHz.

In particolare, dai diagrammi possiamo notare che, per i punti posti nell'intorno del picco, gli errori sono molto più grandi rispetto a quelli dei punti dei lobi laterali.

Il fatto che ciò si osservi più marcatamente in alcune antenne (ad esempio la 68 o la 55) piuttosto che in altre, suggerisce che il motivo risieda nella struttura della singola antenna. Probabilmente il fenomeno è dovuto al non ideale impacchettamento delle lame metalliche al momento della costruzione dell'array, a cui si deve la formazione di piccole rientranze. Una volta che la radiazione incidente penetra nella tromba, queste cavità generano dei modi di oscillazione che dissipano il segnale, causando delle variazioni nel segnale ricevuto dall'antenna. Questo effetto è particolarmente evidente attorno al main beam, perché in questa direzione l'antenna ha la massima efficienza di raccolta del segnale e di conseguenza tutte le variazioni delle proprietà di trasmissione dei segnali che si osservano a frequenze vicine, e che in questo caso determinano la dispersione associata al punto, sono reali e stimate con un elevatissimo rapporto segnale-rumore.

Dal fit dei diagrammi di radiazione, è stato possibile ricavare delle informazioni significative riguardo le antenne prese in esame.

Grazie al parametro x_o , si è potuto risalire all'entità dell'offset per ogni tromba.

Rappresentiamo nelle due tabelle seguenti quanto trovato:

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1.35	-	-	-0.87	-0.87	-	-	-0.82
2	-	-0.83	-	-	-	-	-0.95	-
3	-0.69	-	-0.89	-	-	-0.84	-	-
4	-	-0.47	-	-0.76	-0.71	-	-	-
5	-	-	-	-0.16	-0.22	-	-0.53	-
6	-	-	-0.44	-	-	-0.41	-	-0.24
7	-	-0.11	-	-	-	-	-0.11	-
8	-0.40	-	-	-0.35	-0.38	-	-	-0.19

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1.17	-	-	-0.85	-0.76	-	-	-0.44
2	-	-0.81	-	-	-	-	-0.36	-
3	-0.99	-	-0.64	-	-	-0.42	-	-
4	-	-0.80	-	-0.86	-0.58	-	-	-
5	-	-	-	-0.16	-0.74	-	-0.41	-
6	-	-	-0.53	-	-	-0.49	-	-0.41
7	-	-0.80	-	-	-	-	-0.43	-
8	-0.85	-	-	-0.93	-0.76	-	-	-0.79

La prima tabella si riferisce agli offset delle antenne sul piano E, mentre la seconda agli offset sul piano H. Le trombe sono disposte in maniera opposta rispetto a come è mostrato in figura 4.1 perché qui le antenne sono viste "da dietro", dalla parte dell'array che nell'esperimento viene collegata alla guida d'onda.

Calcolando una media tra questi valori, si può ottenere una stima dell'offset del sistema di lettura dell'apparato sperimentale, che è pari a -0.61 ± 0.285 . Andiamo quindi a rappresentare la tabella contenente gli offset intrinseci delle antenne, ottenuti come differenza tra i valori delle precedenti tabelle e l'offset del sistema di lettura. Tra parentesi è inoltre indicata la stessa quantità espressa in unità di deviazione standard.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0.74 (2.6 σ)	-	-	-0.26 (0.91 σ)	-0.26 (0.91 σ)	-	-	-0.21 (0.74 σ)
2	-	-0.22 (0.77 σ)	-	-	-	-	-0.34 (1.19 σ)	-
3	-0.08 (0.28 σ)	-	-0.28 (0.98 σ)	-	-	-0.23 (0.81 σ)	-	-
4	-	+0.14 (0.49 σ)	-	-0.15 (0.52 σ)	-0.1 (0.35 σ)	-	-	-
5	-	-	-	+0.45 (1.57 σ)	+0.39 (1.35 σ)	-	+0.08 (0.28 σ)	-
6	-	-	+0.17 (0.59 σ)	-	-	+0.2 (0.7 σ)	-	+0.37 (1.29 σ)
7	-	+0.5 (1.75 σ)	-	-	-	-	+0.5 (1.75 σ)	-
8	+0.21 (0.73 σ)	-	-	+0.26 (0.91 σ)	+0.23 (0.8 σ)	-	-	+0.42 (1.47 σ)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0.56 (1.96 σ)	-	-	-0.24 (0.84 σ)	-0.15 (0.53 σ)	-	-	+0.17 (0.59 σ)
2	-	-0.2 (0.7 σ)	-	-	-	-	+0.25 (0.88 σ)	-
3	-0.38 (1.33 σ)	-	-0.03 (0.1 σ)	-	-	+0.19 (0.66 σ)	-	-
4	-	-0.19 (0.66 σ)	-	-0.25 (0.88 σ)	+0.03 (0.1 σ)	-	-	-
5	-	-	-	+0.45 (1.58 σ)	-0.13 (0.45 σ)	-	+0.2 (0.7 σ)	-
6	-	-	-0.08 (0.28 σ)	-	-	+0.12 (0.42 σ)	-	+0.2 (0.7 σ)
7	-	-0.19 (0.66 σ)	-	-	-	-	+0.18 (0.63 σ)	-
8	-0.24 (0.84 σ)	-	-	-0.32 (1.12 σ)	-0.15 (0.52 σ)	-	-	-0.18 (0.63 σ)

Nelle due tabelle sono state colorate con un verde intenso le antenne che presentano un offset maggiore di 2σ , con uno intermedio quelle con valori compresi tra 1.5σ e 2σ e con uno meno intenso quelle cui corrispondono valori compresi tra 1σ e 1.5σ .

Dalla funzione di fit sono anche stati ottenuti i valori di $HPBW$, le larghezze a metà altezza dei main beams, ricavate dal parametro σ grazie alla relazione:

$$HPBW = \Gamma = 2 \sqrt{2 \ln(2)} \cdot \sigma , \quad (5.3)$$

in cui Γ è la larghezza a metà altezza della gaussiana.

In particolare questi valori hanno permesso di risalire ad una stima della forma dei main beams nello spazio tridimensionale, grazie all'*Ellitticità*. Questa grandezza misura lo "schiacciamento" dei poli di uno sferoide ed è definita come

$$E = \frac{HPBW_{pianoE}}{HPBW_{pianoH}} . \quad (5.4)$$

Per una sfera perfetta, abbiamo $E = 1$. Nelle seguenti tabelle riportiamo i valori delle larghezze dei lobi centrali sui due piani ortogonali e le Ellitticità per ogni antenna.

Antenna	$HPBW_{pianoE}$ (gradi)	$HPBW_{pianoH}$ (gradi)
11	12.3 ± 0.1	12.2 ± 0.1
14	12.4 ± 0.1	12.3 ± 0.1
15	12.4 ± 0.1	12.2 ± 0.1
18	12.7 ± 0.1	12.3 ± 0.1
22	12.2 ± 0.1	12.3 ± 0.1
27	12.4 ± 0.1	12.9 ± 0.1
31	12.1 ± 0.1	12.1 ± 0.1
33	12.3 ± 0.1	12.6 ± 0.1
36	12.5 ± 0.1	12.3 ± 0.1
42	12.3 ± 0.1	12.1 ± 0.1
44	12.2 ± 0.1	12.5 ± 0.1
45	12.1 ± 0.1	12.3 ± 0.1
54	12.4 ± 0.1	12.4 ± 0.1
55	12.3 ± 0.1	12.4 ± 0.1
57	12.3 ± 0.1	12.4 ± 0.1
63	12.4 ± 0.1	12.6 ± 0.1
66	12.5 ± 0.1	12.4 ± 0.1

Antenna	$HPBW_{pianoE}(\text{gradi})$	$HPBW_{pianoH}(\text{gradi})$
68	12.3 ± 0.1	12.3 ± 0.1
72	12.3 ± 0.1	12.4 ± 0.1
77	12.6 ± 0.1	12.4 ± 0.1
81	12.8 ± 0.1	12.6 ± 0.1
84	12.6 ± 0.1	12.6 ± 0.1
85	12.7 ± 0.1	12.3 ± 0.1
88	12.6 ± 0.1	12.5 ± 0.1

Ellitticità:

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.01 ± 0.01	-	-	1.00 ± 0.01	1.02 ± 0.01	-	-	1.03 ± 0.01
2	-	0.98 ± 0.01	-	-	-	-	0.96 ± 0.01	-
3	1.00 ± 0.01	-	0.98 ± 0.01	-	-	1.01 ± 0.01	-	-
4	-	1.01 ± 0.01	-	0.97 ± 0.01	0.99 ± 0.01	-	-	-
5	-	-	-	0.99 ± 0.01	0.99 ± 0.01	-	0.99 ± 0.01	-
6	-	-	0.98 ± 0.01	-	-	1.00 ± 0.01	-	1.00 ± 0.01
7	-	1.00 ± 0.01	-	-	-	-	1.02 ± 0.01	-
8	1.01 ± 0.01	-	-	1.01 ± 0.01	1.03 ± 0.01	-	-	1.00 ± 0.01

Notiamo quindi, dai valori dell'Ellitticità, come i main beams delle antenne nello spazio tridimensionale possano essere tutti considerati, con buona approssimazione, a sezione circolare. Ciò garantisce il fatto che

$$\Omega_M = \int \int_{\text{mainlobe}} P_n(\theta, \phi) d\Omega \approx \pi r^2 = \pi \left(\frac{\overline{HPBW}}{2} \right)^2, \quad (5.5)$$

possiamo quindi considerare l'angolo solido dell'antenna come l'area del cerchio avente come raggio la metà della media tra le larghezze dei main beams del piano E e del piano H. Ricorrendo poi alle formule 3.11 e 3.12, con questa approssimazione riusciamo a risalire ad una stima del Guadagno per ogni antenna:

$$G = \frac{4\pi}{\Omega_M} = \frac{4\pi}{\pi \left(\frac{r \cdot \pi}{180} \right)^2}, \quad (5.6)$$

in cui la misura del raggio r è stata convertita da gradi a radianti. Mostriamo quindi quanto ottenuto.

Guadagno delle antenne in dB:

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	25.3 ± 0.1	-	-	25.4 ± 0.1	25.3 ± 0.1	-	-	25.2 ± 0.1
2	-	25.3 ± 0.1	-	-	-	-	25.1 ± 0.1	-
3	25.5 ± 0.1	-	25.3 ± 0.1	-	-	25.3 ± 0.1	-	-
4	-	25.4 ± 0.1	-	25.2 ± 0.1	25.5 ± 0.1	-	-	-
5	-	-	-	25.3 ± 0.1	25.3 ± 0.1	-	25.4 ± 0.1	-
6	-	-	25.2 ± 0.1	-	-	25.3 ± 0.1	-	25.3 ± 0.1
7	-	25.3 ± 0.1	-	-	-	-	25.3 ± 0.1	-
8	25.1 ± 0.1	-	-	25.2 ± 0.1	25.2 ± 0.1	-	-	25.2 ± 0.1

Aggiungiamo di seguito alcuni dei diagrammi di radiazione delle antenne in coordinate polari, ottenuti operando la conversione da gradi a radianti.

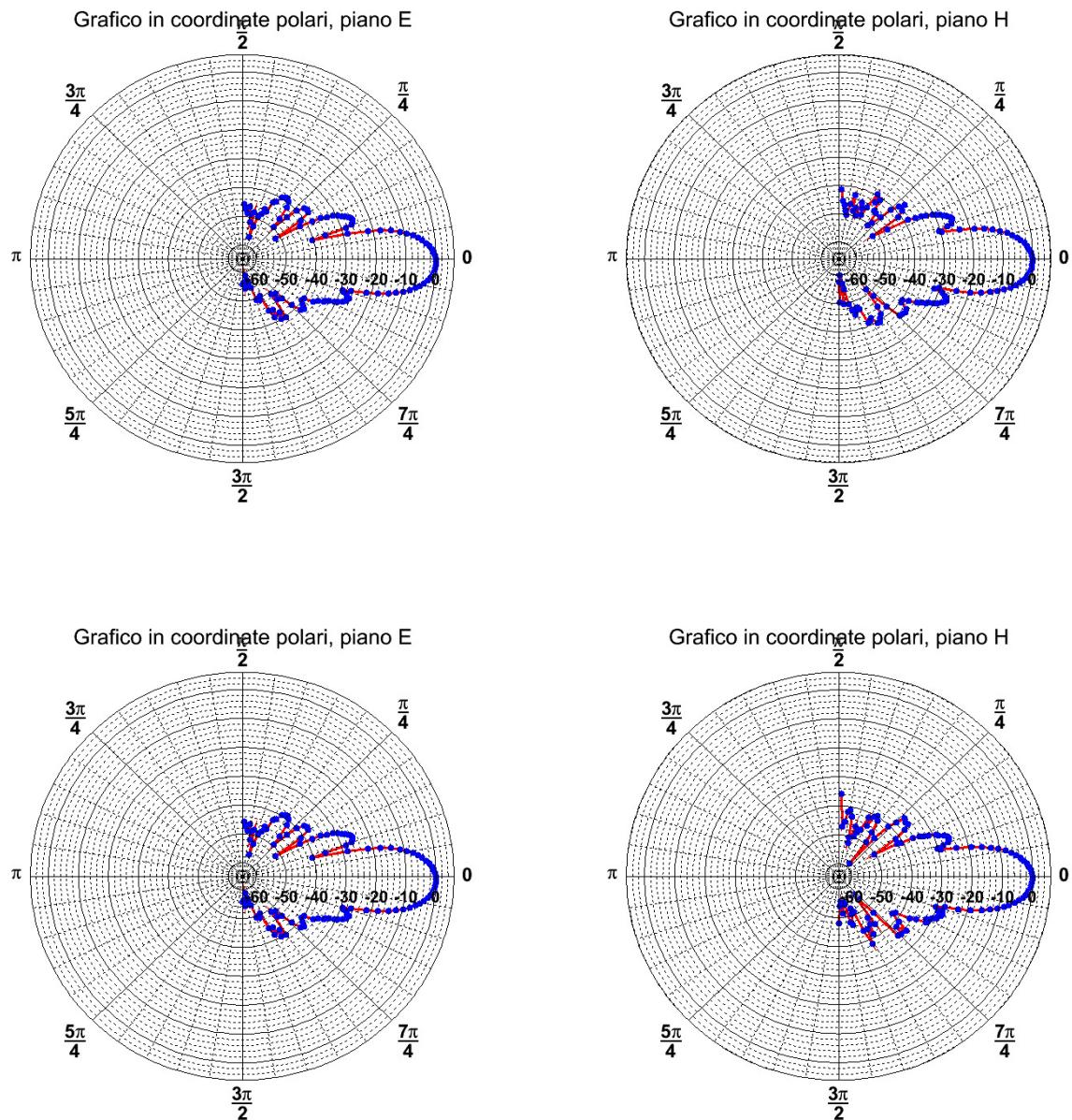


Figura 5.9: Alcuni esempi di diagrammi polari alla frequenza di 150 GHz in decibel delle antenne 44 e 85, per il piano E e il piano H.

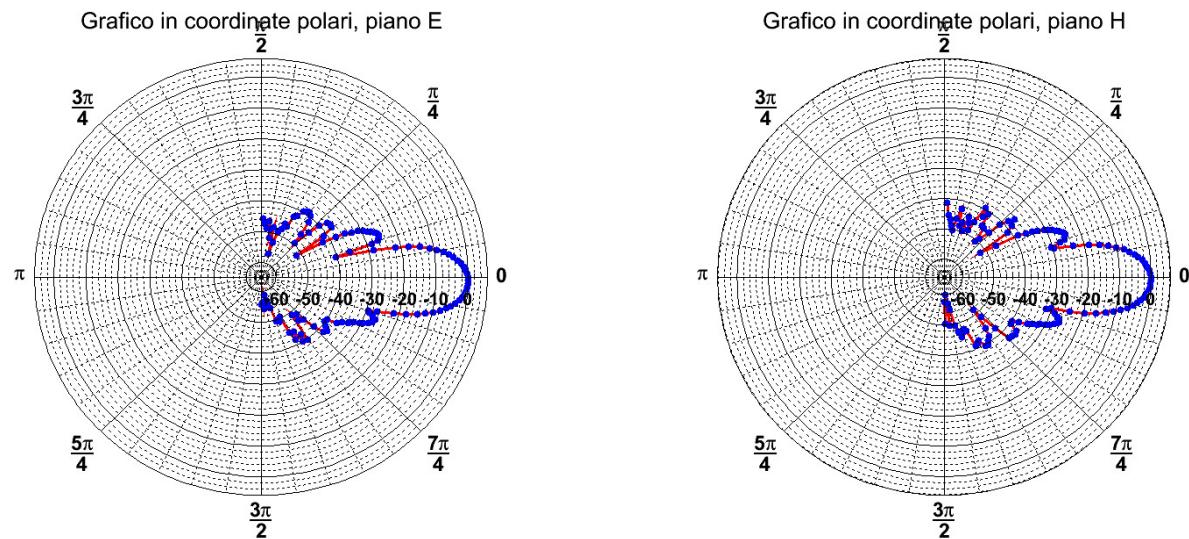


Figura 5.10: Altri due esempi, sempre in decibel, relativi all'antenna 55.

Riportiamo inoltre alcuni diagrammi polari con i dati convertiti in scala lineare, e in cui è stato isolato il main beam.

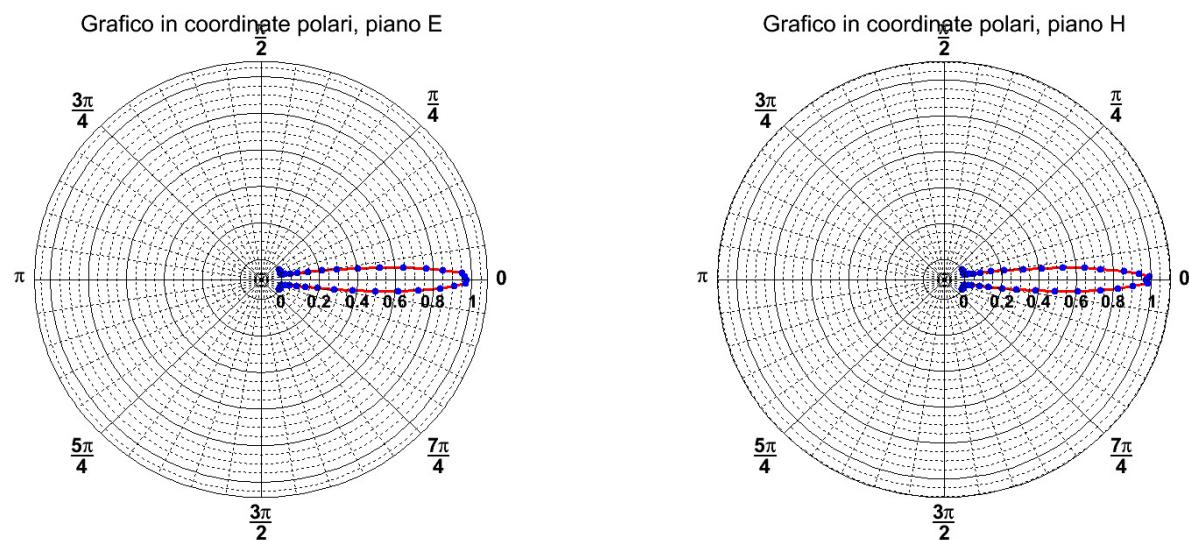


Figura 5.11: Diagrammi polari in scala lineare della tromba 14, per il piano E e il piano H.

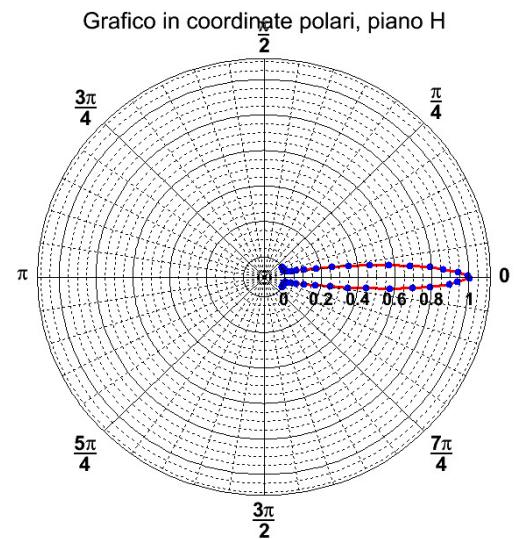
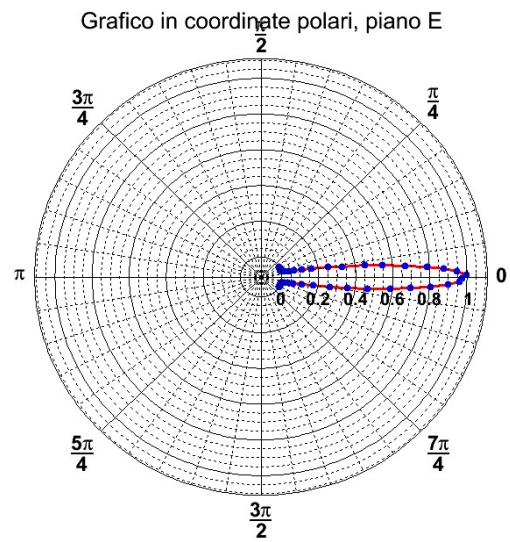


Figura 5.12: Diagrammi polari in scala lineare della tromba 57, per il piano E e il piano H.

Concludiamo infine il capitolo mostrando i grafici che sono stati ottenuti da due misure di crosspolarizzazione, relative alle antenne 27 e 77 dell'array A.

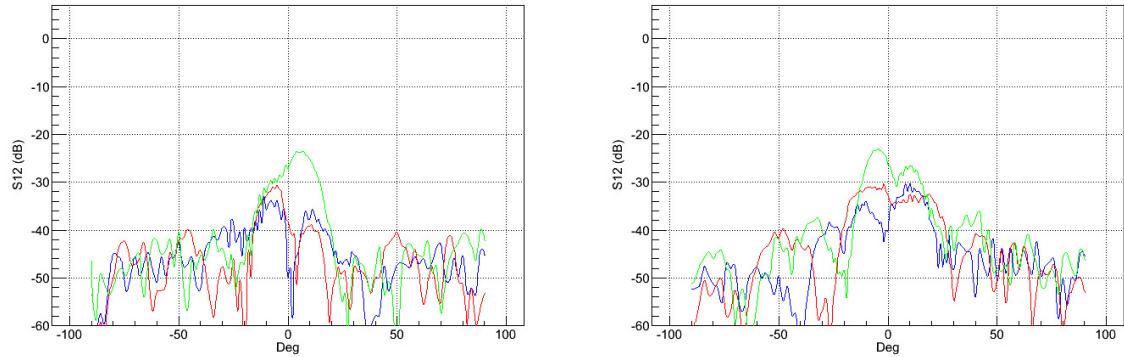


Figura 5.13

I grafici in crosspolarizzazione in particolare ci danno ulteriori informazioni sulle nostre antenne. Sono infatti una misura della capacità che ha l'antenna di non alterare lo stato di polarizzazione della radiazione che sta raccogliendo. Perciò idealmente, quando la tromba è investita da un'onda elettromagnetica con il campo elettrico ortogonale al piano E dell'antenna, il segnale raccolto dovrebbe essere nullo. In un'antenna reale, questo succede con buona approssimazione in asse, ma per angoli di incidenza diversi da 0, gli effetti di rotazione del piano di polarizzazione dell'onda elettromagnetica che propaga all'interno della tromba, possono diventare importanti. Il diagramma crosspolare misura proprio questo comportamento. Per un'antenna ideale quindi il grafico in crosspolarizzazione presenta un minimo all'angolo 0. Questo fatto si nota anche nei nostri diagrammi, soprattutto per le frequenze di 145 e 150 GHz, e nell'intorno dell'angolo 0 il parametro S_{12} assume valori estremamente bassi, paragonabili all'errore di misura.

Capitolo 6

Conclusione

Il lavoro che ho svolto sull'analisi delle proprietà fisiche delle antenne a tromba, ha portato ai seguenti risultati:

- Innanzitutto il sistema di lettura utilizzato nell'esperimento presenta un offset che trasla il picco dei diagrammi di radiazione delle antenne di circa 0.6 gradi ad angoli negativi. Questo probabilmente è dovuto a dei difetti nell'apparato impiegato, al livello del goniometro o del ricevitore i microonde.
- Sottraendo il contributo dato dall'offset del sistema di lettura, è stato possibile stimare gli offset intrinseci delle antenne, che risultano essere affette da un leggero "strabismo". Tuttavia, guardando le due tabelle relative ai piani E e H, possiamo dire che non si presenta una particolare regolarità nell'offset; infatti sono poche le antenne per cui si ha una traslazione dal massimo maggiore di una deviazione standard e confrontando i due piani, nella maggior parte dei casi, le antenne non sono le stesse. Questo prova quindi l'assenza di un effetto sistematico da tenere in considerazione in fase di allineamento dello strumento.
- Per alcune antenne è stata riscontrata un'elevata variabilità nell'efficienza di raccolta del segnale per frequenze vicine, come evidenziato dagli errori associati ai fit dei main beams. Questo è stato interpretato come segno della presenza di piccole imperfezioni nella struttura a lamelle delle trombe prese in esame.
- Dallo studio dei grafici di radiazione per i due piani ortogonali E ed H, si è riusciti ad ottenere una stima della forma dei main beams tridimensionali delle antenne, che risultano essere tutti pressoché a simmetria circolare.
- Il valore del Guadagno delle antenne risulta essere di circa 25 dB, in accordo con le caratteristiche di progetto. Le antenne hanno quindi un'ottima direttività e dei contributi dei lobi laterali trascurabili.
- Infine, il livello estremamente basso di crosspolarizzazione misurato, conferma l'imperabilità delle antenne in esperimenti dedicati all'osservazione della componente polarizzata della Radiazione Cosmica a Microonde.

Capitolo 7

Codici

In questa sezione sono riportati due dei codici che ho scritto che sono stati utilizzati per analizzare i dati delle antenne. Di seguito è mostrato il codice che ha permesso di ricavare i diagrammi di radiazione in decibel, in coordinate cartesiane. Il programma è stato scritto nel linguaggio c++, utilizzando le librerie di ROOT. In input riceve direttamente i files .csv forniti dal VNA.

```
#include <iostream>
#include <iomanip>
#include <vector>
#include <string>
#include <sstream>
#include <fstream>
#include <cstdlib>
#include <stdlib.h>
#include <cstdio>
#include <cmath>
#include <TApplication.h>
#include <TCanvas.h>
#include <TGraph.h>
#include <TStyle.h>
#include <stdio.h>
#include <sys/types.h>
#include <dirent.h>

using namespace std;

//Programma che traccia i grafici di radiazione
int main(int argc, char **argv)
{
    TApplication *myApp = new TApplication ("myApp", 0, 0);
    gStyle -> SetOptFit(1111);

    string s;
```

```

TGraph *gr1 = new TGraph();
TGraph *gr2 = new TGraph();
TGraph *gr3 = new TGraph();

string array, feed;
cout << endl;
cout << "Quale Array ti interessa? (se vuoi il piano ortogonale aggiungi '_Ortog'):";
getline(cin, array);
cout << "Quale Feed ti interessa? Scrivilo nel formato 'mn': ";
getline(cin, feed);

s = "QUBIC/grafico" + feed + "ORTO.gif";

vector < vector <double> > data;
int j = -90;
int count = 0;

while(j<=90)
{
    stringstream ss ;
    if ( j<0)
    {
        int neg = -j;
        ss << "QUBIC/Array_"<< array <<"/Feed"<< feed << "/m"<<neg<<".csv";
        string filename= ss.str();

        ifstream file;
        file.open(filename.c_str() , ios::in);

        if(file.is_open()){

            string Freq, IS11, degS11, IS21, degS21,
IS12, degS12, IMemS12, degMemS12, IS22, degS22;

            while(file.good()){

                getline(file,Freq,',');
                getline(file,IS11,',');
                getline(file,degS11,',');
                getline(file,IS21,',');
                getline(file,degS21,',');
                getline(file,IS12,',');
                getline(file,degS12,',');
                getline(file,IMemS12,',');
                getline(file,degMemS12,',');
                getline(file,IS22,',');
                getline(file,degS22,'\n');
            }
        }
    }
}

```

```

double F, S12, dS12, MS12, dMS12;

F = atof( Freq.c_str() );
S12 = atof( IS12.c_str() );
dS12 = atof( degS12.c_str() );
MS12 = atof( IMemS12.c_str() );
dMS12 = atof( degMemS12.c_str() );

vector <double> temp;

temp.push_back(F);
temp.push_back(S12);
temp.push_back(dS12);
temp.push_back(MS12);
temp.push_back(dMS12);

data.push_back(temp);

}

file.close();
ss.clear();

}

} else {

ss << "QUBIC/Array_"<< array << "/Feed"<< feed << "/"<<j<<.csv";

string filename= ss.str();

ifstream file;
file.open(filename.c_str() , ios::in);

if(file.is_open()){

string Freq, IS11, degS11, IS21, degS21, IS12,
degS12, IMemS12, degMemS12, IS22, degS22;

while(file.good()){

getline(file,Freq,',');
getline(file,IS11,',');
getline(file,degS11,',');
getline(file,IS21,',');
getline(file,degS21,',');
getline(file,IS12,',');

```

```

getline(file,degS12,',');
getline(file,IMemS12,',');
getline(file,degMemS12,',');
getline(file,IS22,',');
getline(file,degS22,'\n');

double F, S12, dS12, MS12, dMS12;

F = atof( Freq.c_str() );
S12 = atof( IS12.c_str() );
dS12 = atof( degS12.c_str() );
MS12 = atof( IMemS12.c_str() );
dMS12 = atof( degMemS12.c_str() );

vector <double> temp;

temp.push_back(F);
temp.push_back(S12);
temp.push_back(dS12);
temp.push_back(MS12);
temp.push_back(dMS12);

data.push_back(temp);

}

file.close();
ss.clear();

}

}

gr1 -> SetPoint(count, j, data[201][1]); //SetPoint mi permette di fissare i punti
gr2 -> SetPoint(count, j, data[241][1]);
gr3 -> SetPoint(count, j, data[281][1]);

if (j< 30 && j > -30){ //tra 30 & < -30 ho un passo di misurazione di 2 gradi
j++;
} else j = j +2;

count++;
data.clear();
}

TCanvas *c1 = new TCanvas();
c1 -> SetGrid();

```

```

gr1 -> SetMarkerColor(kBlue);
gr1 -> SetLineColor(kBlue);
gr1 -> GetXaxis() -> SetTitle("Deg");
gr1 -> GetYaxis() -> SetTitle("S12 (dB)");
gr1 -> GetXaxis() -> CenterTitle();
gr1 -> GetYaxis() -> CenterTitle();
gr1 -> GetYaxis() -> SetRangeUser(-60,7);
gr1 -> Draw("APC");

gr2 -> SetMarkerColor(kRed);
gr2 -> SetLineColor(kRed);
gr2 -> Draw("PC,same");
gr3 -> SetMarkerColor(kGreen);
gr3 -> SetLineColor(kGreen);
gr3 -> Draw("PC,same");

c1 -> Print("grafico.gif","gif");

//Salvataggio dinamico dei files
int result;
char oldname[] = "grafico.gif";
result = rename( oldname , s.c_str());

myApp -> Run();
return 0;

}

```

Presentiamo ora un secondo codice, utilizzato per produrre i grafici dei soli main beams in scala lineare. Il programma prende in input i files della cartella DatiAngoli, forniti da un altro codice che ho scritto. Questi files contengono i dati, con gli errori associati, corrispondenti agli angoli che vanno da -30 a 30 gradi, e relativi alla frequenza di 150 GHz, per ogni antenna.

```
#include <iostream>
#include <iomanip>
#include <vector>
#include <string>
#include <sstream>
#include <fstream>
#include <cstdlib>
#include <stdlib.h>
#include <cstdio>
#include <cmath>
#include <TApplication.h>
#include <TCanvas.h>
#include <TGraph.h>
#include <TStyle.h>
#include <TGraphErrors.h>
#include <TF1.h>
#include <stdio.h>
#include <sys/types.h>
#include <dirent.h>
#include <TFitResult.h>
#include <TView.h>
#include <TMath.h>
#include <TStyle.h>
#include <TCanvas.h>

//Programma che mi permette di plottare i dati dei main beams per i piani E e H.

using namespace std;

int main(int argc, char **argv)
{
TApplication *myApp = new TApplication("App", 0, 0);
gStyle -> SetOptFit(1111);

vector < vector <double> > data;
double S12,deg,m,max,eS12;

string feed,s,l,s2,l2;
cout << endl;
cout << "\nQuale Feed ti interessa? Scrivilo nel formato 'mn': ";
getline(cin, feed);
```

```

//Per salvare dinamicamente i files
s = "QUBIC/GraficiMain/grafico" + feed + ".gif";
l = "QUBIC/GraficiMain/graficoff" + feed + ".gif";
s2 = "QUBIC/GraficiMain/grafico" + feed + "ortog.gif";
l2 = "QUBIC/GraficiMain/graficoff" + feed + "ortog.gif";

///////////////////////////////



//Prima parte: piano E

stringstream ss;
ss << "QUBIC/Array_A/DatiAngoli/" << feed << ".txt";
string filename = ss.str();
ifstream inFile;
inFile.open(filename.c_str(), ios::in);
if(ss == NULL){
cout << "err\n";
return 0;
}
while(1)
{

//creo un vettore di 120 righe e 2 colonne
inFile >> deg >> S12 >> eS12;
vector <double> temp;
temp.push_back(deg);
temp.push_back(S12);
temp.push_back(eS12);
data.push_back(temp);

if(inFile.eof()) break;
}

//riscrivo i dati da logaritmici (decibel) a lineari (Watt)
//in un file chiamato datioff.txt

fstream file("datioff.txt",ios::out);
if (file.is_open()){

int j = -30;
for(int i = 30; i < 91;i++){

double I = pow(10,(data[i][1])/10);
file << j << " " << I << " 0.1 " << data[i][2] << endl;
j++;
}

}
}

```

```

inFile.close();
ss.clear();

TGraphErrors *grafico = new TGraphErrors("datioff.txt");

grafico -> SetTitle("Main Beam");
grafico -> GetXaxis() -> SetTitle("Deg");
grafico -> GetYaxis() -> SetTitle("S12");
grafico -> GetXaxis() -> CenterTitle();
grafico -> GetYaxis() -> CenterTitle();
grafico -> GetYaxis() -> SetRangeUser(0,1.07);

TCanvas *c1 = new TCanvas();
c1 -> SetGrid();
grafico -> Draw("AP");

TF1 *fit = new TF1("fit","gaus(0)+pol0(3)",-13,13);

fit -> SetLineColor(kRed);
fit -> SetLineWidth(2);

fit -> SetParameter(0,1);
fit -> SetParameter(1,-1);
fit -> SetParameter(2,5);

grafico -> Fit("fit","RS");

c1 -> Print("grafico.gif","gif");

int result;
char oldname[] = "grafico.gif";
result = rename( oldname , s.c_str());

//il parametro 1 mi da la x a cui corrisponde il massimo della gaussiana
double off = fit -> GetParameter(1);
cout << "\n\noffset: "<< off << endl;

//il parametro 2 mi da la sigma della gaussiana
double sigma = fit -> GetParameter(2);
cout << "\n\nsigma: "<< sigma << endl;

///////////////////////////////
//Seconda parte: piano H

vector < vector < double > > data2;

```

```

stringstream ss2;
ss2 << "QUBIC/Array_A_Ortog/DatiAngoli/" << feed << ".txt";
string filename2 = ss2.str();
ifstream inFile2;
inFile2.open(filename2.c_str(), ios::in);
if(ss2 == NULL){
cout << "err\n";
return 0;
}
while(1)
{
inFile2 >> deg >> S12 >> eS12;
vector <double> temp;
temp.push_back(deg);
temp.push_back(S12);
temp.push_back(eS12);
data2.push_back(temp);

if(inFile2.eof()) break;
}

//riscrivo i dati da logaritmici a lineari in un file chiamato datioff2.txt

fstream file4("datioff2.txt",ios::out);
if (file4.is_open()){

int j = -30;
for(int i = 30; i < 91;i++){

double I = pow(10,(data2[i][1])/10);
file4 << j << " " << I << " 0.1 " << data2[i][2]<< endl;
j++;
}

inFile2.close();
ss2.clear();

TGraphErrors *grafico4 = new TGraphErrors("datioff2.txt");

grafico4 -> SetTitle("Main Beam");
grafico4 ->GetXaxis() -> SetTitle("Deg");
grafico4 ->GetYaxis() -> SetTitle("S12");
grafico4 ->GetXaxis() -> CenterTitle();
grafico4 ->GetYaxis() -> CenterTitle();
grafico4 ->GetYaxis() -> SetRangeUser(0,1.07);

```

```

TCanvas *c4 = new TCanvas();
c4 -> SetGrid();
grafico4 -> Draw("AP");

TF1 *fit4 = new TF1("fit4","gaus(0)+pol0(3)",-13,13);

fit4 -> SetLineColor(kRed);
fit4 -> SetLineWidth(2);

fit4 -> SetParameter(0,1);
fit4 -> SetParameter(1,-1);
fit4 -> SetParameter(2,5);
grafico4 -> Fit("fit4","RS");

c4 -> Print("grafico.gif","gif");

int result3;
char oldname3[] = "grafico.gif";
result3 = rename( oldname3 , s2.c_str());

double off2 = fit4 -> GetParameter(1);
cout << "\n\noffset2: "<< off2 << endl;

double sigma2 = fit -> GetParameter(2);
cout << "\n\nsigma2: "<< sigma2 << endl;

myApp -> Run();
return 0;
}

```

Bibliografia

- [1] A. Atari, J. Aumont, S.Banfi, P. Battaglia et al. Qubic: a fizeau interferometer targeting primordial b-modes. *Journal of Low Temperature Physics*, 2016.
- [2] A. Atari, J. Aumont, S.Banfi, P. Battaglia et al. Qubic Technological Design Report. *arXiv preprint arXiv:1609.04372*, 2016.
- [3] Network Analyzer Basics. Keyseight Technologies, 2014.
- [4] Jhon D. Kraus. *Radio Astronomy*. Cygnus-Quasar Books, 1986.