



Relazione di Esperimentazioni di Astrofisica

# Osservazione della regione del Cigno alla frequenza di 1.4 GHz

Simone Restuccia, Federico Ravelli, Leonardo toti

Anno Accademico 2022/2023

# Indice

<b>1 Introduzione</b>	<b>4</b>
1.1 Obiettivi . . . . .	4
1.2 Sorgente . . . . .	4
1.3 Riga idrogeno . . . . .	6
<b>2 Apparato Sperimentale</b>	<b>7</b>
2.1 Parabola . . . . .	7
2.2 Ricevitore digitale . . . . .	7
2.3 Organizzazione file . . . . .	7
2.4 Programma coordinate . . . . .	8
<b>3 Calibrazione</b>	<b>9</b>
3.1 Attenuazione cavo coassiale . . . . .	9
3.1.1 VNA e parametri di scattering . . . . .	10
3.1.2 Matrice di scattering con separatori termici . . . . .	10
3.1.3 Matrice di scattering con separatori termici e cavo di rame .	11
3.1.4 Matrice di scattering del cavo di rame . . . . .	12
3.1.5 Coefficiente di attenuazione . . . . .	13
3.1.6 Verifica andamento lineare . . . . .	14
3.1.7 Calcolo coefficiente a 1.4 GHz . . . . .	15
3.2 Calibrazione del ricevitore a 1.4 GHz . . . . .	16
3.2.1 Profilo di temperatura del cavo . . . . .	16
3.2.2 Temperatura del cavo cold load . . . . .	19
3.2.3 Temperatura del cavo warm load . . . . .	20
3.2.4 Guadagno del ricevitore . . . . .	20
3.2.5 Temperatura di rumore . . . . .	21
3.2.6 Conclusione . . . . .	21
<b>4 Analisi Dati e Velocità</b>	<b>23</b>
4.1 Lettura dati . . . . .	23
4.2 Temperatura di Brillanza . . . . .	25
4.3 Sottrazione rumore . . . . .	25
4.4 Fit del segnale . . . . .	28
4.5 Calcolo delle velocità dei tre picchi . . . . .	28
4.6 Correzione col moto di rivoluzione terrestre . . . . .	29
4.6.1 Correzione . . . . .	29
4.6.2 Dispersione delle velocità . . . . .	32

<b>5</b>	<b>Mappa</b>	<b>34</b>
5.1	Composizione della mappa . . . . .	34
5.2	Processo di smoothing della mappa . . . . .	35
<b>6</b>	<b>Conclusione</b>	<b>37</b>



# 1 Introduzione

## 1.1 Obiettivi

Lo scopo dell'esperienza è lo studio della regione del Cigno, con particolare attenzione all'analisi dello spettro di emissione dell'idrogeno neutro HI, andando a soffermarci sulla riga 21 cm. In ultima analisi verrà compiuta una mappa della regione di cielo osservata, per evidenziare la distribuzione spaziale dell'idrogeno.

Per condurre tale esperimento sarà utilizzata la strumentazione universitaria, parabola e ricevitore, opportunamente calibrata.

Di seguito verrà esposta una breve trattazione teorica, a cui seguirà una descrizione accurata dell'apparato strumentale. Passando poi a descrivere la calibrazione della parabola e del ricevitore, la quale è necessaria per l'effettiva analisi dati e mappatura della regione. Infine verranno riassunti i risultati ottenuti nella conclusione.

## 1.2 Sorgente

La sorgente galattica di interesse è il Cigno, individuabile attraverso le coordinate celesti, ascensione retta e declinazione, pari a RA  $\sim 308$  deg e Dec  $\sim 42$  deg. Studiando il flusso, ovvero radiazione di natura eletromagnetica, rilevato in funzione della frequenza, si ottiene lo spettro caratteristico della sorgente. Quest'ultimo è ascrivibile a tre componenti distinte:

- Spettro di emissione: spettro discreto con linee di emissione a determinate frequenze;
- Spettro d'assorbimento: spettro discreto con linee d'assorbimento a determinate frequenze;
- Spettro continuo: causato dall'emissione a tutte le frequenze, dovuto al comportamento della sorgente assimilabile a un corpo nero a una data temperatura.

### Spettro di emissione

L'origine dello spettro di emissione è il fenomeno dell'eccitamento e il conseguente diseccitamento degli elettroni negli atomi. La radiazione osservata è l'emissione di fotoni con un'energia prossima al salto energetico compiuto.

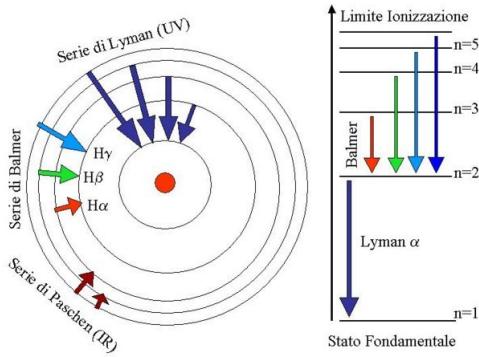


Figura 1: Rappresentazione schematica delle transizioni all'interno di un atomo di idrogeno

### Spettro di assorbimento

Lo spettro di assorbimento è imputabile a un mezzo, solitamente a temperatura minore della sorgente, interposto tra essa e l'osservatore. I fotoni emessi dalla sorgente primaria eccitano atomi nel mezzo, a loro volta disecxitandosi emettono fotoni casualmente in ogni direzione, dando luogo all'assenza di righe nello spettro.

### Spettro continuo

A generare lo spettro continuo concorrono due principali fenomeni:

- Radiazione termica: a sua volta distinguibile in bremsstrahlung, corpo nero e polvere interstellare;
- Radiazione non termica: emissione di sincrotone.

In particolar modo, il fenomeno del bremsstrahlung è dovuto al rallentamento di un elettrone libero all'interno dell'atomo, essendo una particella carica in decelerazione emette fotoni in modo continuo. Particolarmente diffuso in regione con HII, ovvero nubi di idrogeno ionizzato da raggi ultravioletti associati a stelle nascenti o morenti.

La nube di idrogeno è a una data temperatura, per tale motivo emette radiazione con uno spettro assimilabile a un copro nero, piccando a una sua temperatura caratteristica.

La polvere interstellare assorbe luce stellare in banda ottica, aumentando la propria temperatura. Tale aumento comporta emissione termica in banda infrarossa.

Per quanto concerne la radiazione di sincroton, essa è dovuta all'emissione di fotoni da parte di elettroni in moto variabile all'interno del campo magnetico galattico. Lo spettro è tipico di un corpo grigio[1].

### 1.3 Riga idrogeno

Il soggetto principale dello studio è la riga a 21 cm dell'idrogeno neutro. Prende tale nome dalla lunghezza d'onda a cui si manifesta 21,10611405413 cm, corrispondenti a 1420,405 MHz, nella banda delle microonde. La transizione avviene tra due stati iperfini, come riportato in figura 2, a causa di uno spin flipping, ovvero transizione da uno stato in cui  $e^-$  e  $p^+$  hanno spin parallelo ad uno stato in cui hanno spin antiparallelo. La struttura iperfine si ottiene considerando i termini di interazione tra: il momento magnetico del protone e il campo generato dall'elettrone, dipolo-dipolo magnetico tra  $e^-$  e  $p^+$ , e momento magnetico di  $e^-$  col campo magnetico interno al  $p^+$ [2]. Il decadimento è estremamente proibito e il tempo di vita medio per tale stato eccitato è dell'ordine di  $\tau \simeq 10^7$  anni[3]. Nonostante tale caratteristica è possibile osservare la transizione a causa dell'elevato numero di atomi di H nella regione di analisi, pur considerando una densità bassa pari a  $\simeq 100 \frac{\text{atomi}}{\text{cm}^3}$ .

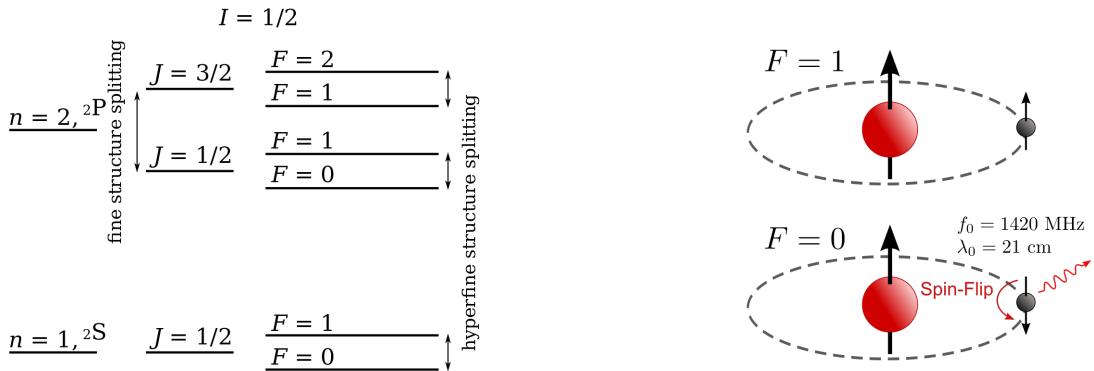


Figura 2: Rappresentazione della struttura iperfine, spin flipping della transizione che genera la riga 21

## 2 Apparato Sperimentale

### 2.1 Parabola

Lo strumento utilizzato per la ricezione del segnale è un telescopio riflettore, ovvero un'antenna radio di forma parabolica, il cui diametro è di 3 m. Nel punto focale sono situati i ricevitori, tre analogici e uno digitale. I ricevitori analogici lavorano a diverse frequenze, 1,4; 2,5; 10 GHz. A sua volta il ricevitore digitale presenta due porte di ingresso, una a 1,4 GHz e una a 2,5 GHz. In particolare, nella seguente analisi verrà utilizzato la porta a 1,4 GHz del ricevitore digitale.

Per muovere la parabola nella regione di cielo di interesse, vengono inseriti, sul software, i valori di azimuth, elevazione e orario di puntamento. Per quanto concerne l'azimuth, è da tener conto l'off-set dovuto alla posizione del ricevitore. Nel caso in esame l'off-set corrisponde ad un angolo di 21.0 gradi.



Figura 3: Parabola Bicocca

### 2.2 Ricevitore digitale

La larghezza di banda del ricevitore è di 160 MHz, permettendo così un'analisi in un range di  $\nu \in [1,30;1,46]$  GHz. Sono presenti 8192 canali, ciascuno con una larghezza di banda pari a  $\Delta\nu = 19531,25$  Hz [4].

La velocità di campionamento della radio è di 160 Msamples/s, la media temporale è eseguita su 320 Msamples spaziando un intervallo di circa 2 secondi. Tale media permette di ottenere un dato sufficientemente sensibile a variazioni dell'ordine del secondo, oltre a ridurre sensibilmente il rumore.

### 2.3 Organizzazione file

Le misure vengono salvate su un unico file dopo aver collezionato 150 record. Ogni file corrisponde a un tempo di presa dati di circa 5 minuti.

I file, restituiti dal ricevitore digitale, sono organizzati nella seguente modalità. In ciascun record, i primi tre valori corrispondono rispettivamente a:

- tempo: tempo trascorso dall'apertura del file espresso in millisecondi;

- frequenza: frequenza del canale a frequenza più bassa espressa in Hz;
- frequency step: step in frequenza tra due canali successivi, espresso in Hz.

Le entrate successive, espresse in dBmW, corrispondono al segnale registrato dal ricevitore, ripetuto per ognuno degli 8192 canali.

Nell'analisi sono anche utilizzati i file della parabola, TDA, da cui si ricavano i valori di temperatura del cavo che connette la parabola al ricevitore.

## 2.4 Programma coordinate

Dato un orario di osservazione, per determinare le coordinate a cui porre la parabola, viene utilizzata la libreria astropy. In particolare la funzione che implementa il cambio di coordinate da celesti ad azimuth ed elevazione è *transform to*. Necessario conoscere i valori di longitudine, latitudine ed elevazione rispetto al livello del mare del luogo in cui è situata la parabola, i.e. Milano. Inoltre bisogna tener conto della regione UTC, per settare correttamente l'offset.

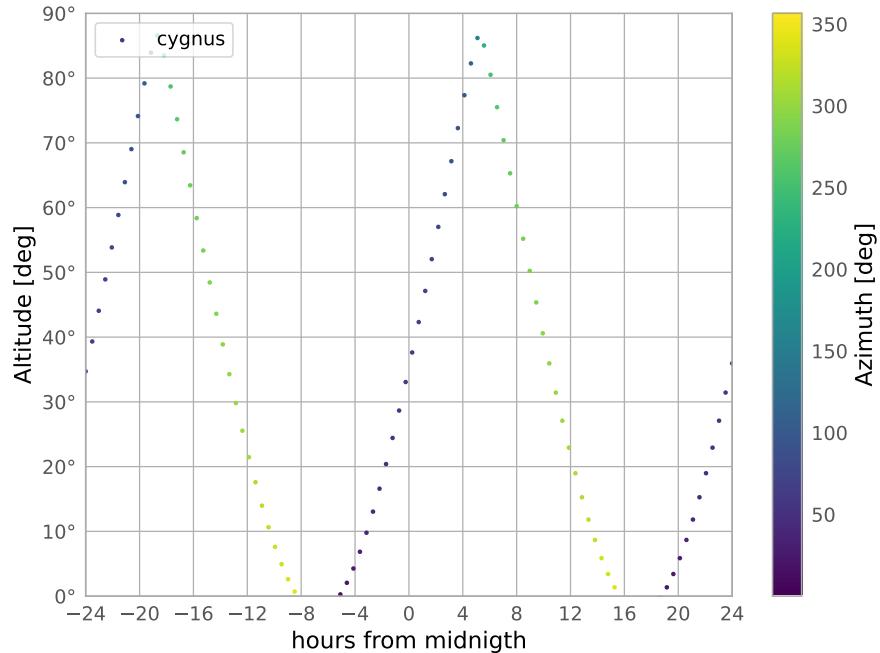


Figura 4: L'immagine mostra la traiettoria della sorgente in un arco di 48 ore.

### 3 Calibrazione

La calibrazione del ricevitore a 1.4 a GHz viene effettuata utilizzando due sorgenti di riferimento, che sono due carichi coassiali adattati, cioè due resistenze a  $50 \Omega$ . Questi lavorano a due temperature diverse: uno a temperatura ambiente (*warm load*) e l'altro alla temperatura di ebollizione dell'azoto liquido, ovvero 77,36 K (*cold load*).

Il carico a temperatura criogenica è connesso al ricevitore tramite un cavo coassiale il quale è immerso parzialmente nell'azoto liquido. Perciò, dato che la temperatura del cavo non è uniforme, ne vanno studiate le caratteristiche di attenuazione in laboratorio, su un cavo analogo, a temperatura ambiente ed a temperatura criogenica. Per farlo si utilizza un analizzatore vettoriale di reti (VNA) [5].

#### 3.1 Attenuazione cavo coassiale

Il cavo Cold Load che viene utilizzato nella calibrazione del ricevitore è solo parzialmente immerso nell'azoto liquido, la sua temperatura non è quindi costante. Perciò, il coefficiente di attenuazione del cavo viene misurato con il VNA sia a temperatura ambiente, sia a temperatura criogenica. Per farlo si utilizza un cavo di rame analogo di forma elicoidale, così da facilitarne l'immersione nell'azoto, e di lunghezza 203 cm.



Figura 5: Cavo di rame collegato alle porte del VNA

Il rame, però, ha una conducibilità termica molto elevata. Per questo motivo, al fine di proteggere il VNA ed evitare che i suoi cavi lavorino ad una temperatura di 77,36 K, si utilizzano dei separatori termici. Essi stessi tuttavia attenuano il segnale. Viene quindi effettuata una misura intermedia dell'attenuazione dei separatori, collegandoli tra loro. In questo modo è possibile togliere il loro contributo dal calcolo del coefficiente di attenuazione del cavo di rame.

### 3.1.1 VNA e parametri di scattering

Il VNA è una macchina che permette di misurare le proprietà di trasmissione di un cavo coassiale i cui estremi sono connessi ai terminali dello strumento. Il VNA presente il laboratorio è un Agilent PNA-X che è in grado di misurare in modo indipendente il segnale di trasmissione e riflessione dalle due porte presenti.

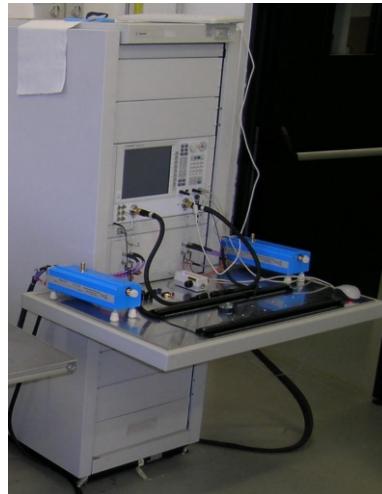


Figura 6: VNA presente in laboratorio. Il modello è un Agilent PNA-X.

Quindi ciò che la macchina restituisce è la cosiddetta matrice di scattering i cui parametri sono: i coefficienti di riflessione,  $s_{11}$  e  $s_{22}$ , ed i coefficienti di trasmissione,  $s_{12}$  e  $s_{21}$ . Dove vale che:

$$s_{11} = 10 \log_{10} \frac{\text{Potenza riflessa nella porta 1}}{\text{Potenza incidente dalla porta 1}}, \quad (1)$$

$$s_{12} = 10 \log_{10} \frac{\text{Potenza trasmessa dalla porta 1 alla porta 2}}{\text{Potenza incidente dalla porta 1}}, \quad (2)$$

$$s_{21} = 10 \log_{10} \frac{\text{Potenza trasmessa dalla porta 2 alla porta 1}}{\text{Potenza incidente dalla porta 2}}, \quad (3)$$

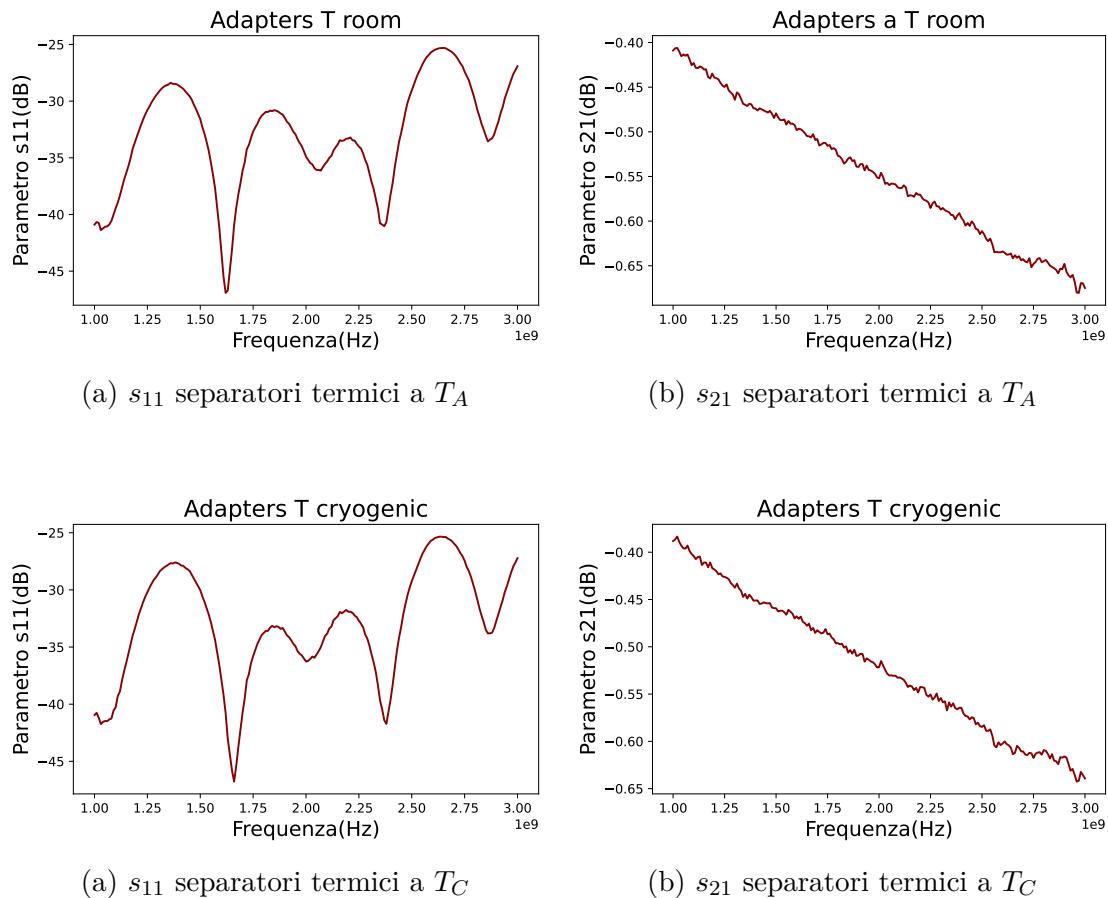
$$s_{22} = 10 \log_{10} \frac{\text{Potenza riflessa nella porta 2}}{\text{Potenza incidente dalla porta 2}}; \quad (4)$$

### 3.1.2 Matrice di scattering con separatori termici

I separatori termici vengono connessi tra loro tramite degli adattatori, attraverso tale processo è possibile ricavare i coefficienti  $s_{11}$  e  $s_{21}$ , a temperatura ambiente.

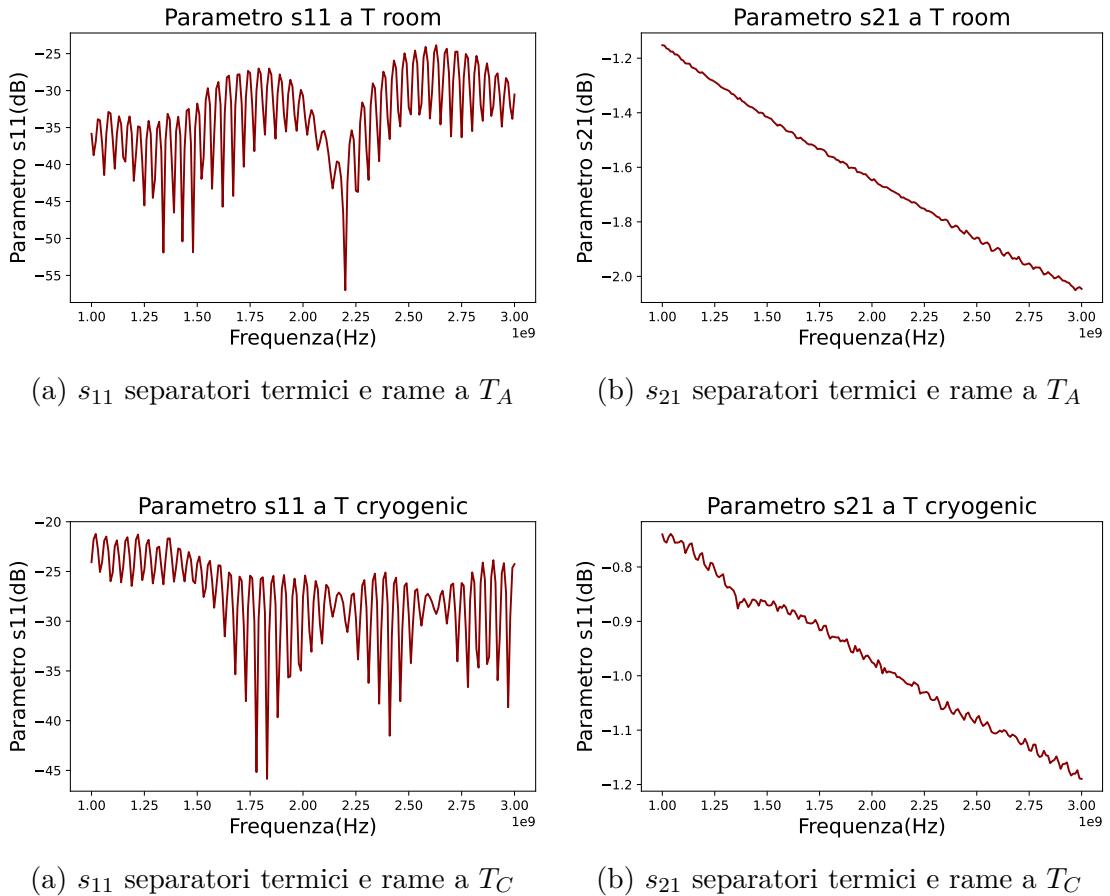
te e temperatura criogenica, rispettivamente  $T_A \sim 290K$  e  $T_C = 77.36K$ . Più dettagliatamente:

- $s_{11}$ : si instaurano onde stazionarie durante il percorso. Sono presenti dei minimi e dei massimi, quindi a determinare lunghezze d'onda il segnale avrà riflessione massima o minima, ma comunque inferiore all'1 % del segnale;
- $s_{21}$ : anche in questo caso sono presenti oscillazioni, con un'attenuazione di 0.4 dB.



### 3.1.3 Matrice di scattering con separatori termici e cavo di rame

Ora, i separatori termici vengono collegati al cavo di rame e ripetute le misure sia a temperatura ambiente, sia a temperatura criogenica immergendoli in azoto liquido.



È possibile notare un incremento delle oscillazioni, infatti l'aumento della lunghezza complessiva porta a un numero maggiore di onde stazionarie; la variazione complessiva tra massimo e minimo rimane comunque di 20 dB.

### 3.1.4 Matrice di scattering del cavo di rame

Ottenuti gli andamenti nelle due configurazioni, descritte in 3.1.3 e 3.1.2, si può sottrarre il contributo dei separatori e ottenere infine il coefficiente di trasmissione  $s_{21}$  per il solo cavo di rame. Viene riportato di seguito l'andamento di tale valore in funzione della frequenza, sia a  $T_A \sim 290K$ , sia a  $T_C = 77.36K$ .

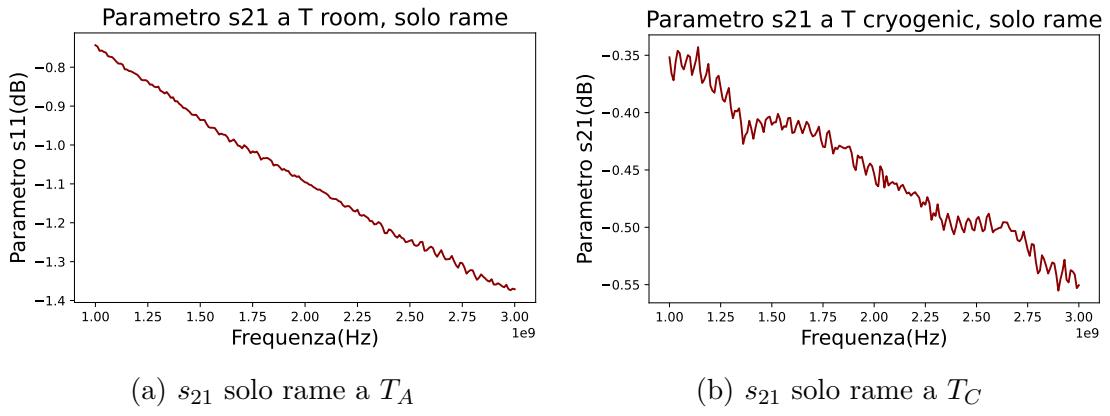


Figura 11: Parametri di trasmissione del solo cavo di rame

### 3.1.5 Coefficiente di attenuazione

Bisogna ora calcolare il coefficiente di attenuazione  $\tau$  del cavo alla frequenza della riga HI. Per farlo valutiamo il coefficiente di trasmissione  $\alpha = e^{-\tau}$ . Però, dato che la temperatura del cavo non è costante, è più opportuno ricavare il coefficiente di trasmissione per unità di lunghezza e in funzione della temperatura. Assumendo ora che le perdite ohmiche nel metallo siano dominanti rispetto alle perdite nel dielettrico del cavo (approssimazione ben valida), possiamo dire che il coefficiente di trasmissione espresso in potenza è direttamente proporzionale alla resistività  $\rho$  del metallo (il campo elettrico va come  $\sqrt{\rho}$ ). Questa, inoltre, è proporzionale alla temperatura secondo la seguente relazione:

$$\rho(T) = \rho_0 + \alpha[T - T_0]. \quad (5)$$

Ora, la potenza in uscita dal cavo è data da:

$$P_{out} = P_{in}(1 - R)\alpha, \quad (6)$$

dove  $R$  e  $\alpha$  sono rispettivamente i coefficienti di riflessione e trasmissione espressi in scala lineare. Il VNA, invece, restituisce un valore di  $\alpha_{eff}$ , dato da  $P_{out} = \alpha_{eff}P_{in}$  ed espresso in db:

$$\alpha_{eff} = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} = s_{21}. \quad (7)$$

Se teniamo in considerazione l'equazione (6) e che  $R[\text{db}] = s_{11}$ , allora si ottiene:

$$\alpha = \frac{10^{\frac{\alpha_{eff}[\text{db}]}{10}}}{1 - R} = \frac{10^{\frac{s_{21}[\text{db}]}{10}}}{1 - 10^{\frac{s_{11}[\text{db}]}{10}}} \simeq 10^{\frac{s_{21}[\text{db}]}{10}}, \quad (8)$$

dove è stato possibile compiere l'ultima approssimazione dato che il valore di  $s_{11}$  è minore di 20 db, cioè si ha una correzione al coefficiente di trasmissione minore dell'1%.

Infine, sapendo che  $\alpha = e^{-\tau x}$ , dove x è la lunghezza del cavo, possiamo ricavare  $\tau$  attraverso:

$$\tau = -\frac{\ln \alpha}{x}. \quad (9)$$

### 3.1.6 Verifica andamento lineare

Essendo noti i valori di  $s_{21}$  a  $T_A \sim 290K$  e  $T_C = 77.36K$ , e di conseguenza i corrispettivi valori del coefficiente di attenuazione a suddette temperature; per ricavare il valore di  $\tau$  ad ogni temperatura, viene eseguita un'interpolazione con una retta. Per verificare che l'andamento sia effettivamente lineare, ci si avvale di un valore teorico, ricavato dal grafico in figura 12 ,a  $T \sim 4,2K$ ,  $\tau \sim 4 \cdot 10^{-5} \text{ Neper/mm}$ .

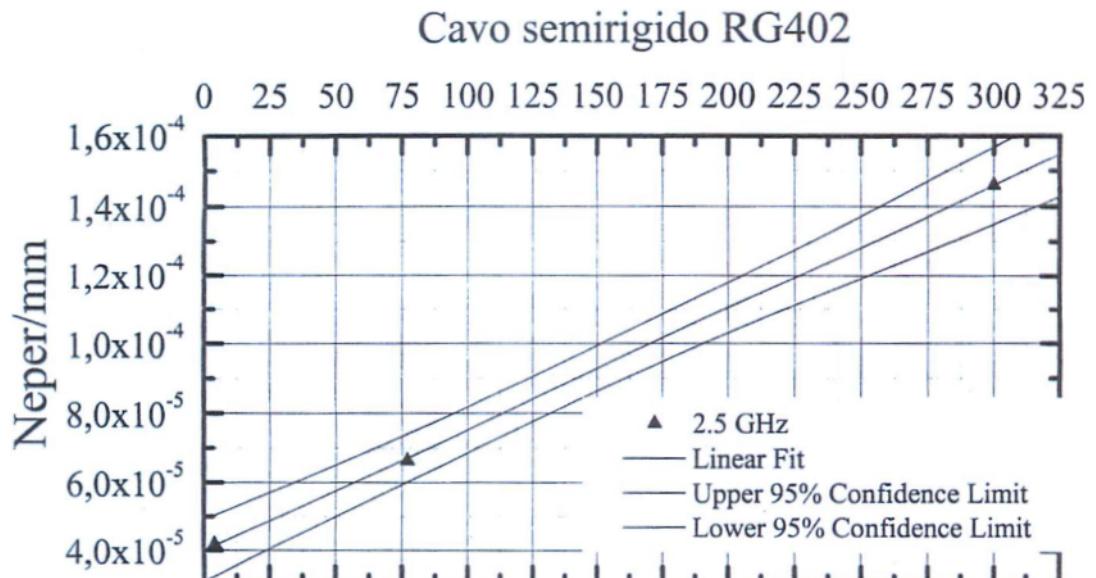


Figura 12: Tau vs Temperatura a 2.5 GHz

I valori di  $s_{21}$  alla frequenza di interesse sono ricavati dai plot in figura 11, tramite la funzione *interp* della libreria numpy di python. Tale funzione, assegnato un set discreto di dati come frequenze e  $s_{21}$ , restituisce il valore a un dato x-value richiesto, eseguendo un'interpolazione lineare. Tale procedura è necessaria in quanto il set di dati discreto non presenta il valore esattamente a 2,5 GHz. Vengono riportati in tabella i valori finali:

$\tau$ ricavati a 2.5 GHz	
Temperatura (K)	$\tau \cdot 10^{-5}$ (Neper/mm)
4,2	4,0
77,36	5,6
290	14,1

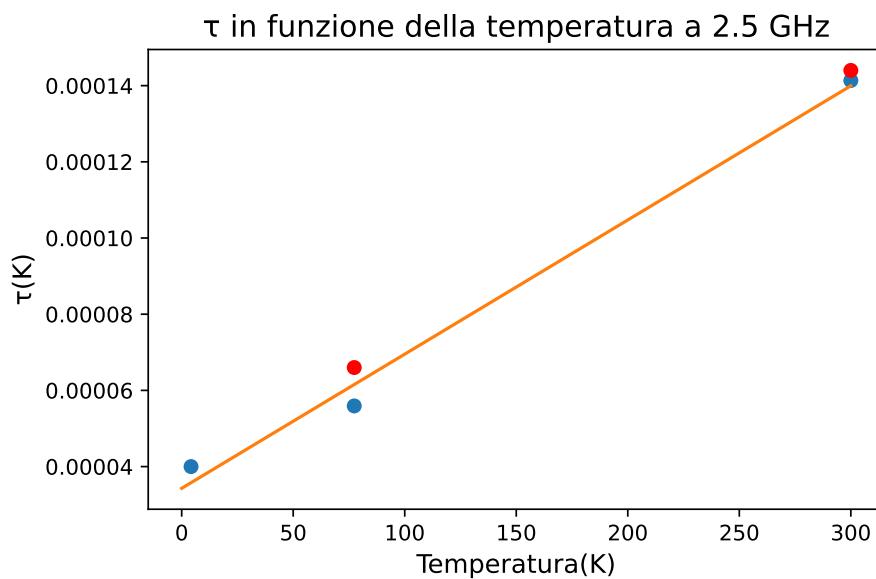


Figura 13: I punti in blu sono i valori riportati in tabella, i due punti rossi sono la rappresentazione dei restanti punti del grafico in figura 12, mostrati per vedere quanto si discostassero dai punti sperimentali

Dal grafico in figura 13, si evince chiaramente un andamento lineare che si può estendere al caso di 1,4 GHz.

### 3.1.7 Calcolo coefficiente a 1.4 GHz

Viene rieseguita la procedura descritta in 3.1.6, applicata al caso 1.4 GHz. Si ottengono i seguenti risultati:

$\tau$ ricavati a 1.4 GHz	
Temperatura (K)	$\tau \cdot 10^{-5}$ (Neper/mm)
77,36	4,7
290	10,3

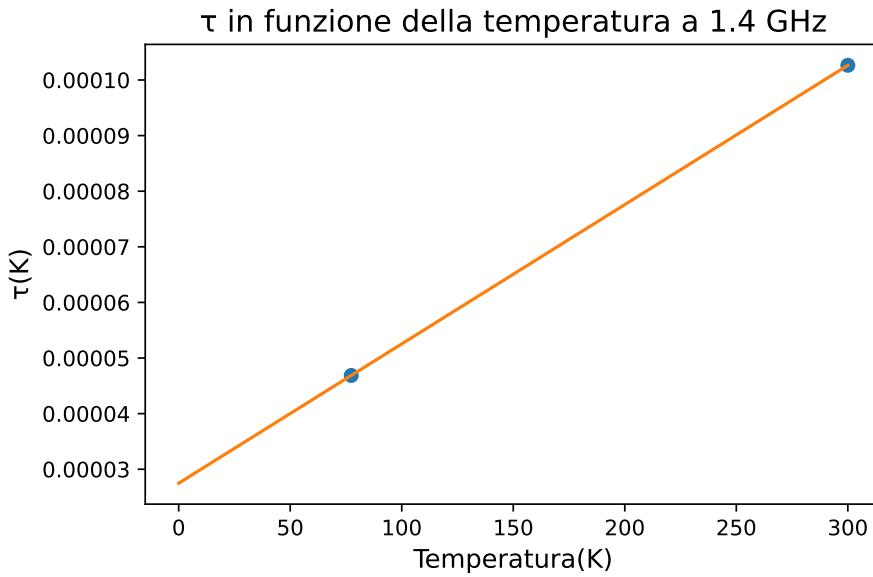


Figura 14: Interpolazione lineare dei  $\tau$  a 1,4 GHz

### 3.2 Calibrazione del ricevitore a 1.4 GHz

La conoscenza del profilo del coefficiente di attenuazione in funzione della temperatura permette di attuare la calibrazione del ricevitore a 1,4 GHz. Si consideri come warm load e cold load, un cavo rispettivamente di lunghezza 12 m e 120 cm. Il cold load è immerso parzialmente nell'azoto liquido portando ad un'attenuazione del segnale.

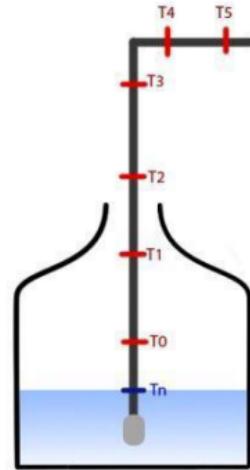
Per ottenere il segnale effettivo letto dal ricevitore è quindi necessario considerare la variazione della temperatura all'interno del cavo.

#### 3.2.1 Profilo di temperatura del cavo

La stima del profilo di temperatura è resa possibile grazie a 4 sensori criogenici e 2 sensori a temperatura ambiente posizionati sul cavo, come mostrato in figura 15.



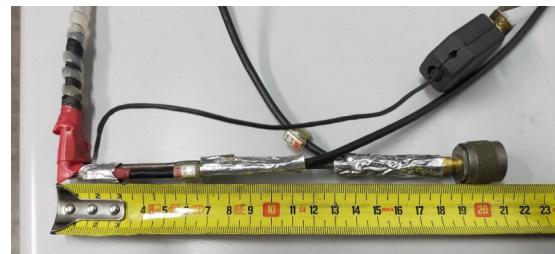
(a) Uno dei sensori connesso al cavo warm load



(b) Schema della posizione dei cavo durante l'immersione nell'azoto



(c) Uno dei sensori connesso al cavo warm load



(d) Schema della posizione dei cavo durante l'immersione nell'azoto

Figura 15: Visualizzazione grafica dei rilevatori sul cavo

I primi 4 sensori restituiscono il valore in Kelvin, mentre gli ultimi due attuano la loro misurazione in gradi Celsius.

Successivamente all' immersione completa del cold load nel criostato, che contiene azoto liquido a pressione ambiente, dai valori ottenuti dai sensori è quindi possibile determinare l'andamento della temperatura in funzione della posizione:

Valori di temperatura registrati nella posizione del sensore	
Posizione (mm)	Temperatura (K)
295	77,36
380	110,2
480	197,3
610	264,3
910	296,0
1030	295,8
1110	296,2

Infine, vengono fittati i seguenti valori con una funzione sigmoidale:

$$T = \frac{a}{1 + e^{-k(x-x_0)}}, \quad (10)$$

Il grafico che si ottiene è il seguente:

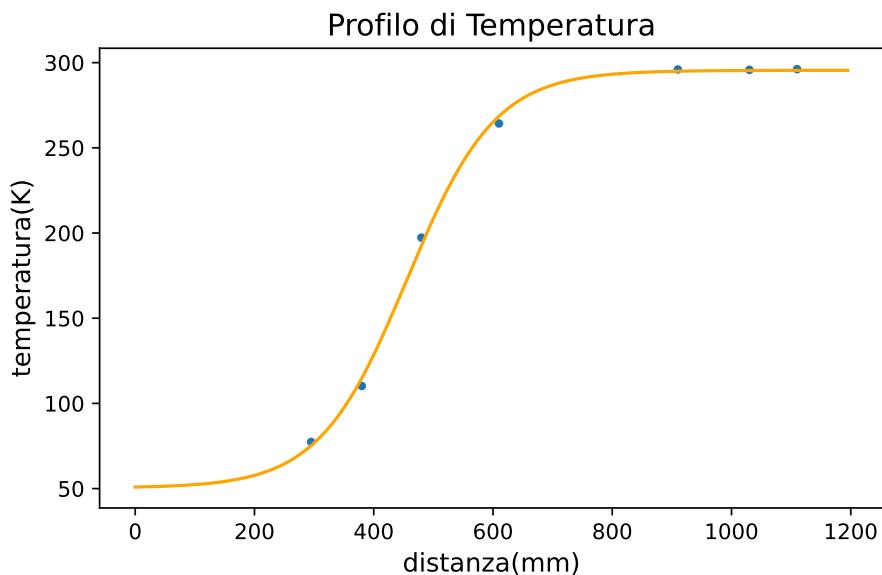


Figura 16: Fit del profilo di temperatura

Successivamente, si ricava dal profilo di temperatura e dall’andamento del coefficiente di attenuazione in funzione della temperatura il valore di temperatura del cavo cold load e warm load.

### 3.2.2 Temperatura del cavo cold load

L'immersione parziale del cavo cold load all'interno del criostato comporta che la temperatura del carico criogenico deve essere corretta. La propagazione della temperatura nel cavo segue il seguente andamento:

$$T_{cold} = T_s e^{-\tau} + T_c(1 - e^{-\tau}), \quad (11)$$

dove  $T_s$  è pari a 77,36 K, ovvero la temperatura di ebollizione dell'azoto liquido,  $T_c$  è il valore della temperatura studiata nel paragrafo 3.2.1 e  $\tau$  è il coefficiente di attenuazione studiato nel paragrafo 3.1.7. Si applichi tale relazione iterativamente a dei tratti di lunghezza  $\Delta x$ . Lo step di lunghezza viene scelto in modo tale da poter considerare il tratto di cavo preso in considerazione isotermo. Si scelga quindi un valore di  $\Delta x = 1$  mm. L'iterazione dell'equazione (11) è dovuta al fatto che il sistema risulta essere in equilibrio per tutto il tratto di cavo immerso nell'azoto liquido. È quindi possibile considerare valida la relazione  $T_{cold} = T_s = 77,36K$ . Nel tratto di cavo scoperto il sistema non è più all'equilibrio, la temperatura del cavo varia ed è quindi necessario determinare il coefficiente di attenuazione  $\tau$  del cavo.

Risultante a tali considerazioni si ricava un valore di  $T_{cold} = 91,95$  K.

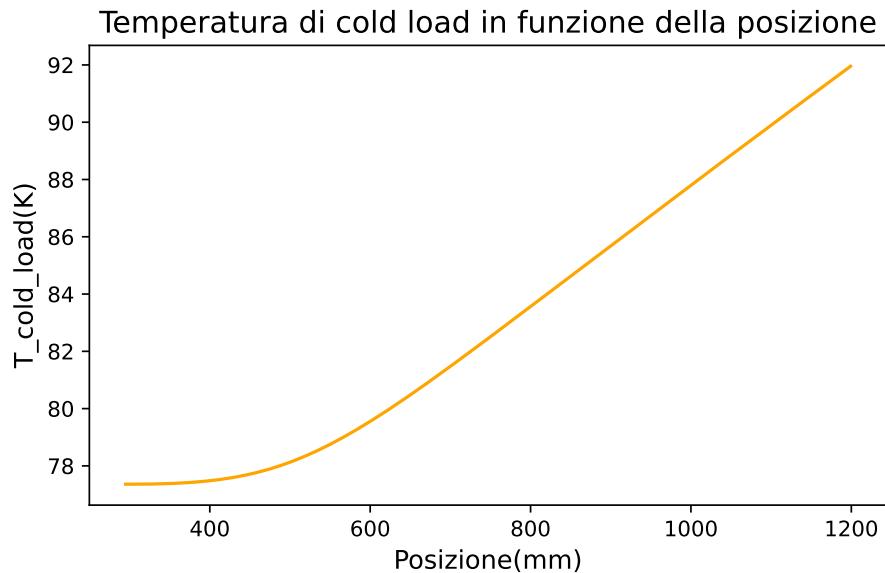


Figura 17: Andamento della temperatura di cold load in funzione della posizione

### 3.2.3 Temperatura del cavo warm load

Per determinare la temperatura del cavo warm load il procedimento è simile a quello utilizzato nel paragrafo 3.2.2 con la differenza che la totalità del cavo è a temperatura ambiente. Quindi la sorgente e il cavo hanno circa la stessa temperatura  $T_s \sim T_c \sim 294,55$  K.

Di conseguenza risulta possibile semplificare l'equazione (11), ottenendo come risultato per  $T_{warm}$  proprio 294,55 K.

### 3.2.4 Guadagno del ricevitore

I valori della temperatura determinati nei paragrafi 3.2.2 e 3.2.3 vengono utilizzati per ricavare il guadagno del ricevitore, G, e la Temperatura di rumore,  $T_R$ .

Il guadagno, o gain, è possibile determinarlo attraverso la relazione:

$$G = \frac{W_{warm} - W_{cold}}{T_{warm} - T_{cold}}, \quad (12)$$

$W_{warm}$  e  $W_{cold}$  sono rispettivamente i segnali misurati dal ricevitore quando è collegato al cavo warm load e cold load.  $T_{warm}$  e  $T_{cold}$  sono, invece, le temperature determinate nei paragrafi 3.2.2 e 3.2.3.

Si determina il gain nella regione di interesse, un intervallo di frequenze centrato in  $\nu = 1,420405 \cdot 10^9$  Hz corrispondente al valore teorico relativo alla riga 21 cm dell'idrogeno neutro.

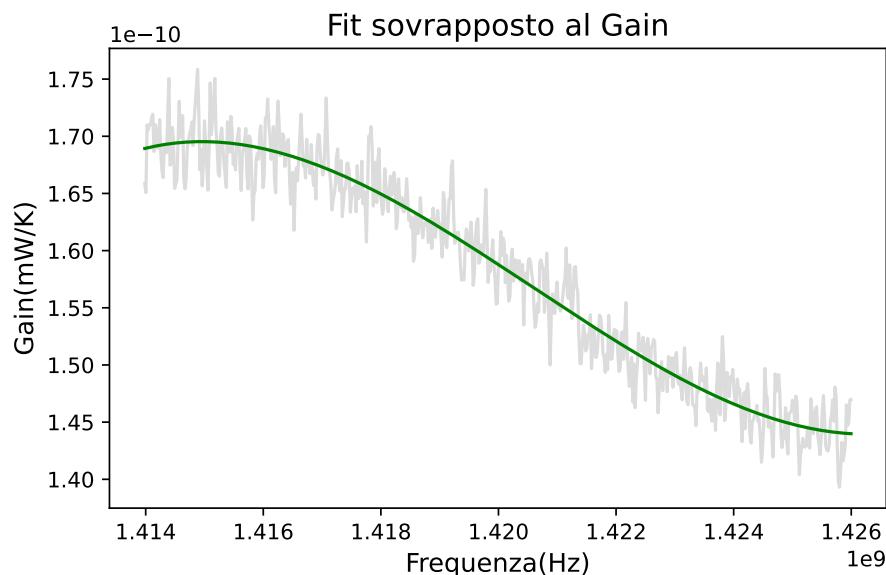


Figura 18: Sovrapposizione del fit rispetto al gain

Ottenuto il grafico del gain in funzione della frequenza, si nota una notevole oscillazione del valore, per tale motivo viene eseguito un fit con un polinomio di terzo grado, come riportato in figura 18.

### 3.2.5 Temperatura di rumore

Si determina, ora, la temperatura di rumore,  $T_R$ , sia per il cavo warm load sia per il cold load utilizzando i valori del gain ottenuti dal fit in figura 18 e i valori di  $W_{warm}$  e  $W_{cold}$  definiti in 3.2.4:

$$T_R = \frac{W_{cold}}{G_{plot}} - T_{cold}, \quad (13)$$

$$T_R = \frac{W_{warm}}{G_{plot}} - T_{warm}, \quad (14)$$

Dove (13) e (14) si riferiscono, rispettivamente, alla temperatura di rumore relativa al cavo cold load e al cavo warm load. Si osserva che il segnale ricavato da (13) risulta essere meno oscillante rispetto al segnale determinato da (14). Si sceglie, di conseguenza, di considerare esclusivamente la temperatura di rumore relativa al cavo cold load.

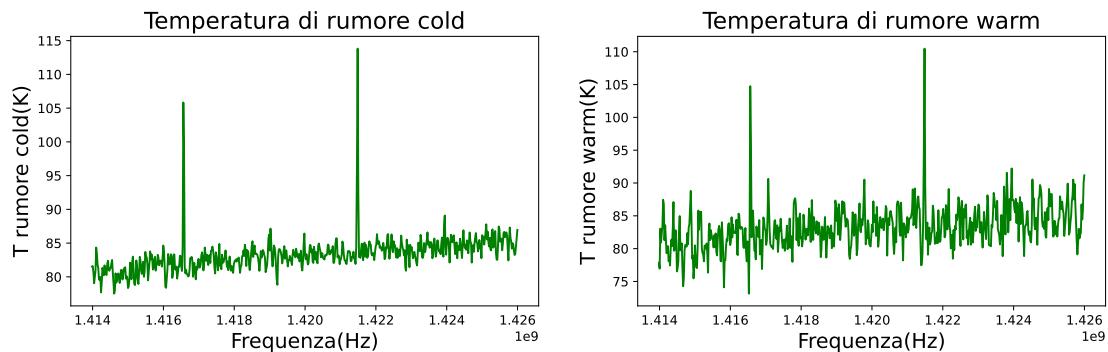


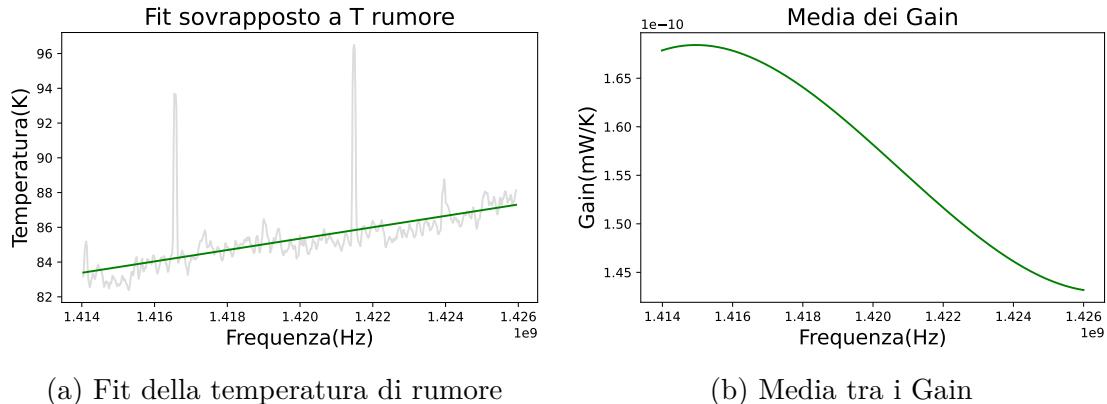
Figura 19: Temperature di rumore in funzione della frequenza

### 3.2.6 Conclusione

Il procedimento della calibrazione descritto nel suddetto capitolo viene eseguito, sia per quanto riguarda il gain che la temperatura di rumore, per tre set di dati differenti, campionati a 5 minuti di distanza l'uno dall'altro. Per ogni set di dati si è scelto di considerare solamente i dati ricavati da (3.2.2).

I tre set di dati vengono prima mediati tra loro, successivamente viene attuata una

media mobile ed infine viene eseguito un fit con un polinomio di primo grado. Per quanto concerne i tre valori dei gain, essi vengono semplicemente mediati.



I valori finali ottenuti per il guadagno e per  $T_R$  saranno utilizzati nel calcolo della temperatura di brillanza.

## 4 Analisi Dati e Velocità

### 4.1 Lettura dati

Si considera il segnale osservato dal ricevitore a 1,4 GHz e lo si grafica in funzione della frequenza:

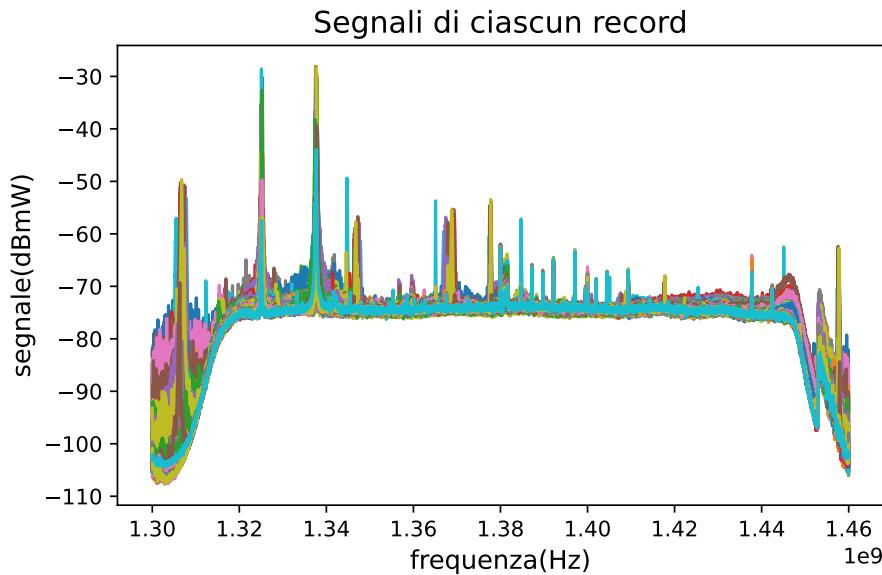


Figura 21: Segnale misurato, ogni colore rappresenta uno dei 150 record. L’immagine ivi presente, come le successive, sono riferite a un campionamento svolto in data 05/03/2023

Ogni colore rappresenta i dati di un particolare record. Di conseguenza, il grafico ottenuto è costituito da 150 colori differenti. Le intensità dei record sono molto simili l’una con l’altra. Il segnale graficato è espresso in scala logaritmica, si passa quindi alla scala lineare convertendo i valori da dBmW a mW. Viene fatta, poi, una media del segnale lineare sui 150 record.

Successivamente, si restringe lo studio del segnale nell’intorno della regione della riga H 21 e si osserva che si hanno tre picchi relativi a quest’ultima. Questo è dovuto alla presenza di tre regioni di idrogeno distinte che si muovono a velocità differenti.

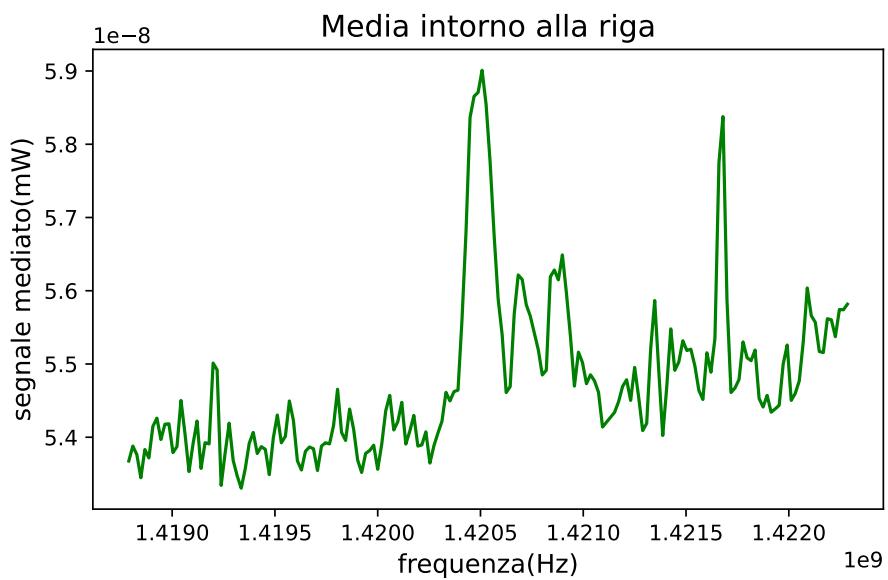


Figura 22: Segnale dopo aver eseguito la media mobile

Si nota che il segnale risulta essere disturbato. Viene quindi eseguita una media mobile, mediando ciascun dato col precedente e col successivo.

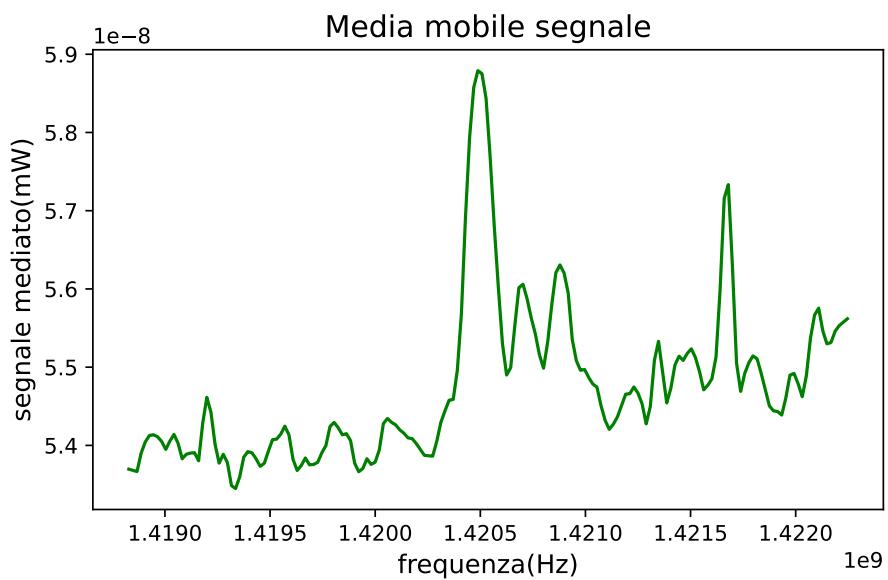


Figura 23: Segnale dopo aver eseguito la media mobile

## 4.2 Temperatura di Brillanza

Ora, si vuole calcolare la temperatura di brillanza  $T_B$ . Quest'ultima è una grandezza fondamentale nello studio di una sorgente astrofisica. Per ricavarla, possiamo utilizzare l'approssimazione  $T_B \simeq T_A$ , dove  $T_A$  è la temperatura di antenna, poiché ci troviamo nel caso di sorgente estesa,  $\Omega_A \ll \Omega_B$  [6].

Per determinare  $T_A$  utilizziamo la relazione:

$$W_{out} = GT_{sys} = G[T_A + T_R], \quad (15)$$

dove  $G$ ,  $T_{sys}$  e  $T_R$  sono rispettivamente il Gain, la temperatura del sistema e la temperatura di rumore, ricavata in 3.2.6. Da qui appunto si ottiene che:

$$T_A = T_{sys} - T_R = \frac{W_{out}}{G} - T_R. \quad (16)$$

Nella temperatura ottenuta va considerato anche il termine dovuto all'attenuazione del cavo, secondo la relazione:

$$T_A = T_s e^{-\tau} + T_c(1 - e^{-\tau}), \quad (17)$$

dove  $T_s$  e  $T_c$  sono rispettivamente la temperatura della sorgente e la temperatura del cavo, ricavata dai file TDA.

Perciò, la temperatura di brillanza della sola sorgente è data da:

$$T_s = [T_A - T_c(1 - e^{-\tau})]e^{\tau}. \quad (18)$$

## 4.3 Sottrazione rumore

Quindi, per prima cosa si converte il segnale in temperatura d'antenna utilizzando la relazione (16).

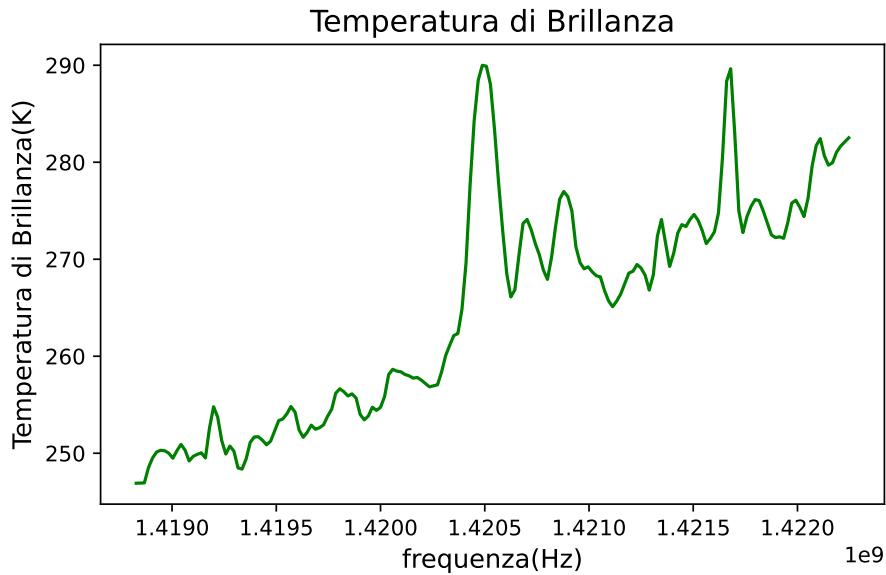


Figura 24: Grafico della temperatura complessiva di brillanza (sorgente + contributo cavo + fondo del cielo)

Successivamente si procede alla rimozione del segnale di fondo e all'attenuazione del cavo.

Per la rimozione del fondo si utilizza la libreria *Specutils* di Python. Questa permette, tramite la funzione *fit\_continuum*, di fare un fit polinomiale del segnale escludendo determinate regioni. Nel nostro caso abbiamo escluso le regioni dei picchi che sovrastano il fondo. La funzione *fit\_continuum*, in particolare, per eseguire il fit, utilizza il Polinomio di Čebyšëv, la cui definizione in forma esplicita è data da:

$$T_n(x) = \sum_{h=0}^{[n/2]} (-1)^h \binom{n}{2h} x^{n-2h} (1-x^2)^h \quad (19)$$

dove con  $[n/2]$  si intende la parte intera di  $n/2$  [7].

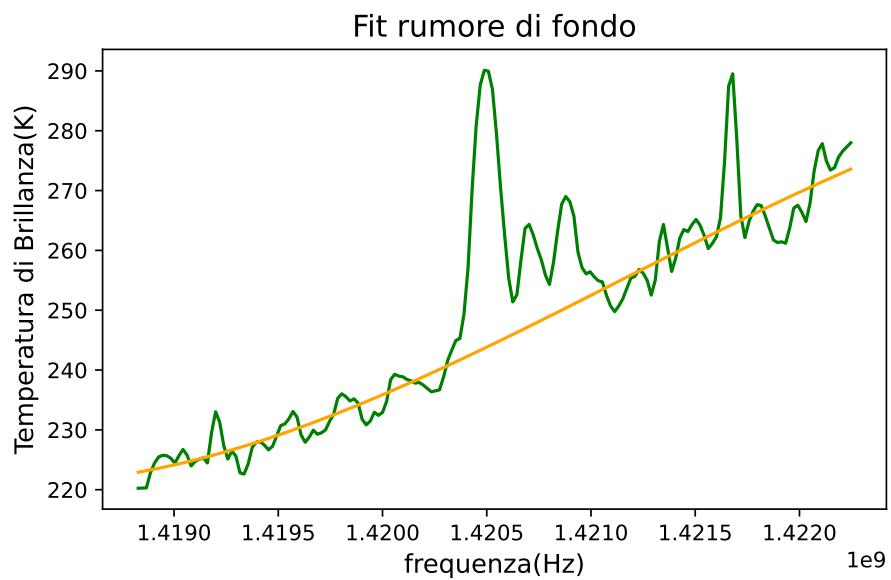


Figura 25: Sovrapposizione tra la temperatura di brillanza e il fit del solo fondo

Viene eseguita una sottrazione tra il segnale e il risultato del fit.

Infine, per rimuovere la temperatura di rumore del cavo e ottenere quindi la temperatura di brillanza della sorgente si utilizza l'equazione (18).

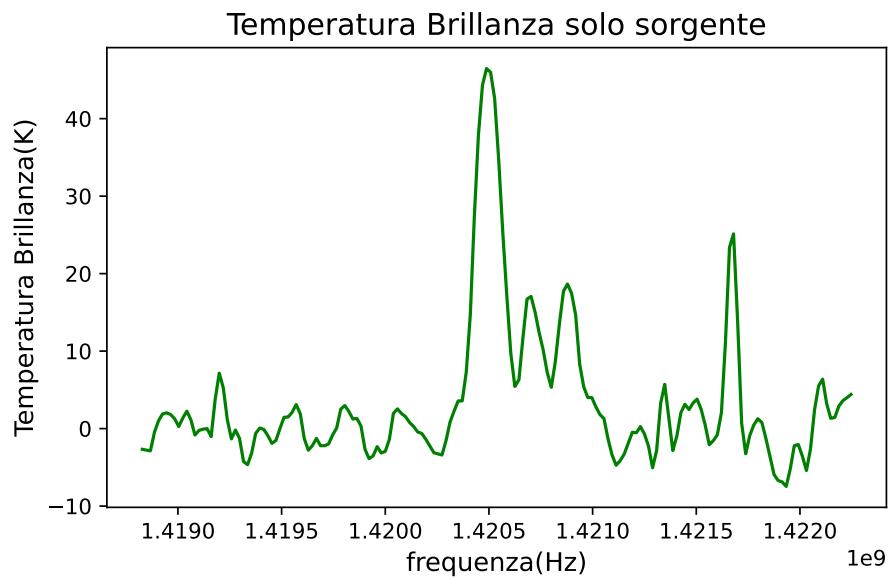


Figura 26: Temperatura di brillanza della sola sorgente

## 4.4 Fit del segnale

I picchi che osserviamo non sono delle Delta di Dirac, bensì presentano un allargamento dovuto a diversi fenomeni fisici. Innanzitutto, vi è l'allargamento naturale, dovuto al principio di indeterminazione di Heisemberg, per il quale  $\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$ . Inoltre, è anche presente l'allargamento per collisioni, il quale si verifica quando atomi e molecole vengono in contatto, con conseguente perturbazione dei loro livelli energetici. Questo dipende dalla loro configurazione elettronica e dalla velocità dell'urto. Infine, un altro tipo di fenomeno tipico è l'allargamento Doppler termico, causato da una distribuzione di velocità di atomi e molecole. Le diverse velocità delle particelle generano diversi Doppler shift, che sono la causa dell'allargamento della riga.

Si effettua quindi un fit gaussiano di ciascun picco singolo e, in seguito, un fit multigaussiano dei tre picchi insieme.

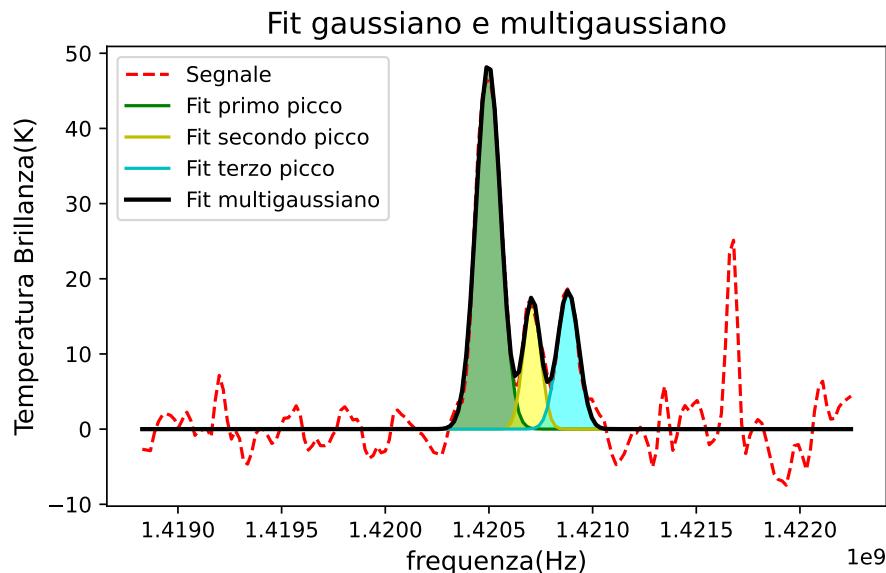


Figura 27: Fit gaussiano e multigaussiano dei picchi

I singoli fit vengono eseguiti per stimare in modo opportuno i parametri, i.e. ampiezza, centro e larghezza; quindi permettere al fit multigaussiano di convergere opportunamente.

## 4.5 Calcolo delle velocità dei tre picchi

Tramite l'effetto Doppler è possibile ricavare la velocità delle tre regioni di emissione. In particolare, l'effetto Doppler consiste nella variazione apparente della fre-

quenza percepita da un osservatore, rispetto al valore vero della frequenza emessa da una sorgente, in moto rispetto all'osservatore stesso. Vale quindi:

$$f = \frac{c}{c \pm v} f_0 \quad (20)$$

Dove  $f$  è la frequenza percepita dall'osservatore,  $f_0$  è la frequenza della sorgente e  $v$  è la velocità della sorgente. Al denominatore si usa il più quando la sorgente si allontana dall'osservatore, mentre si usa il meno quando si avvicina. Quest'ultimo è il nostro caso. Perciò la velocità delle tre regioni di emissione si ricava dalla legge:

$$v = c(1 - \frac{f_0}{f}) \quad (21)$$

Tramite il fit, in particolare dal centro della gaussiana, si ricava la frequenza dei tre picchi e quindi le velocità. La procedura viene ripetuta su più file di dati giornalmente e su più giorni, ottenendo un adeguato numero di dati.

## 4.6 Correzione col moto di rivoluzione terrestre

### 4.6.1 Correzione

Prima di procedere con la misura della dispersione, è necessario applicare delle correzioni alle velocità ricavate. Viene presentata la descrizione della procedura generale, da effettuare per i set di velocità di ciascuno dei tre picchi.

La necessità di applicare delle correzioni è intuitibile dallo studio dell'andamento delle velocità in funzione del tempo, infatti i valori risultano aumentare al variare del giorno di osservazione.

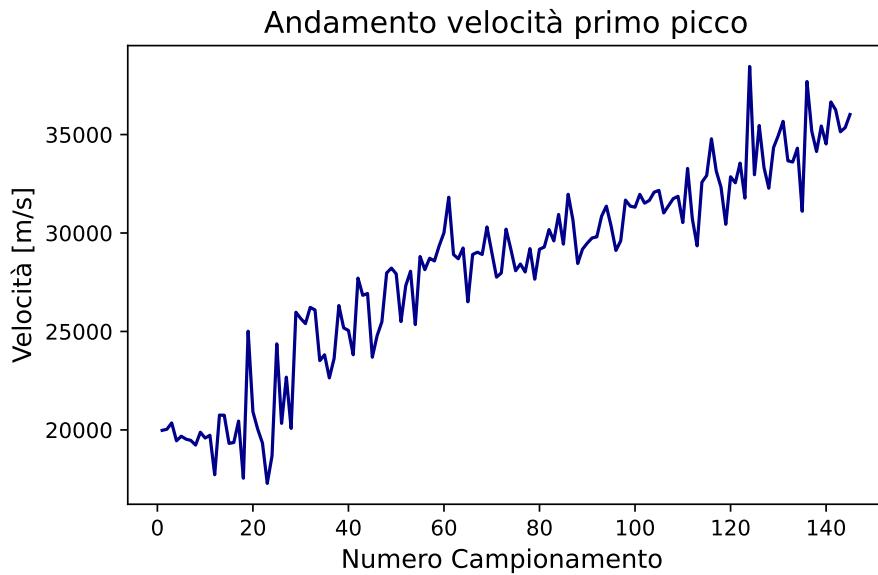


Figura 28: Andamento crescente della velocità, del primo picco, all'aumentare del giorno di osservazione

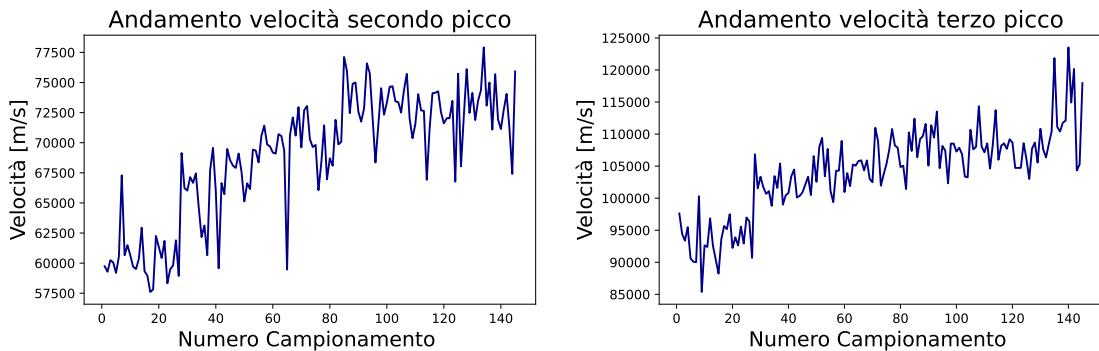


Figura 29: Andamenti riferiti rispettivamente al secondo e al terzo picco

La correzione è effettuata tenendo conto del moto terrestre. Le velocità ricavate in 4.5, sono dirette lungo la congiungente Terra-Sorgente. Per proiettare la velocità di rivoluzione, della Terra rispetto al Sole, bisogna porsi nello stesso sistema di riferimento. Il sistema scelto è l'HEE, *HeliocentricEarthEcliptic*, avente come centro il Sole e come asse x la congiungente Terra-Sole. Partendo dalle coordinate, ascensione retta e declinazione, della regione del cigno, e dalla sua distanza  $\sim 165435.17au$ (astronomic units), valore scelto tra il Sole e Deneb, stella più brillante della costellazione; vengono ricavati i valori di latitudine e longitudine, relativi ad

ogni giorno di osservazione. Il valore della latitudine è costante, quello della longitudine varia di 30 deg nell'arco di un mese. Tale cambio di coordinate è eseguito ricorrendo alla funzione `coord_celestial.transform_to(HeliocentricEarthEcliptic)`, presente nella libreria `sunpy` [8].

La velocità finale è calcolata nel modo seguente:

$$v_{finale} = v_{picco} - v_{Terra} \cos(\alpha) \cos(\beta) \quad (22)$$

con la seguente notazione,  $v_{finale}$  velocità a cui è stata applicata la correzione,  $v_{picco}$  velocità del picco senza correzione,  $v_{Terra}$  = velocità di rivoluzione della Terra pari a 29780.5556 m/s,  $\alpha$  angolo di latitudine,  $\beta$  angolo di longitudine.

Vengono graficati nuovamente i valori delle velocità in funzione del momento di osservazione, si può notare un andamento oscillante intorno a un valore medio, senza una crescita considerevole lungo i mesi di osservazione.

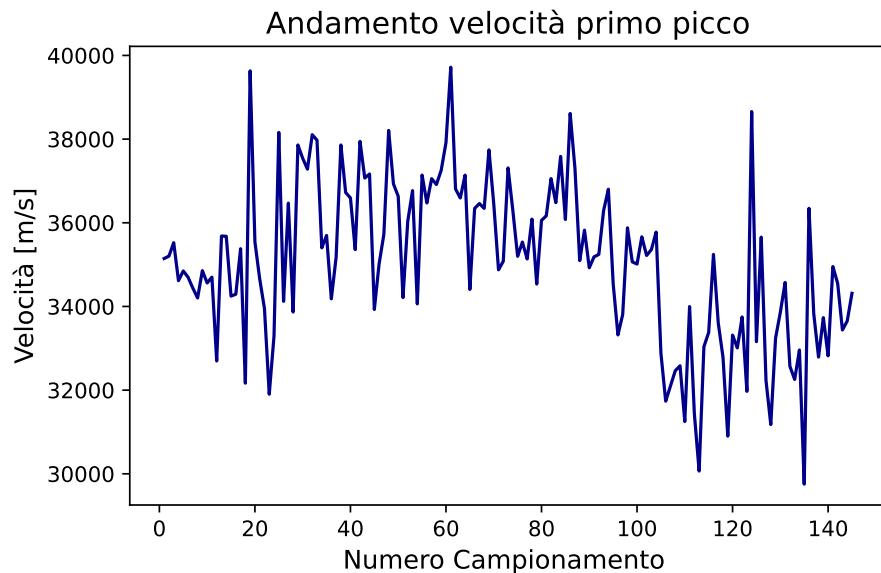


Figura 30: Andamento costante della velocità, del primo picco, al variare del giorno di osservazione

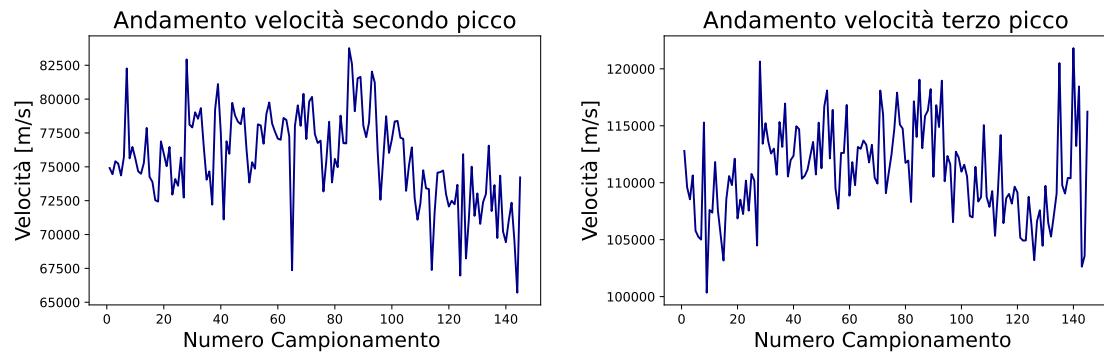


Figura 31: Andamenti riferiti rispettivamente al secondo e al terzo picco

#### 4.6.2 Dispersione delle velocità

Per ottenere il valore di velocità media e relativa dispersione, per ogni picco, i set di valori vengono posti in un istogramma e successivamente fittati gaussianamente. Vengono riportati i risultati finali con i rispettivi grafici:

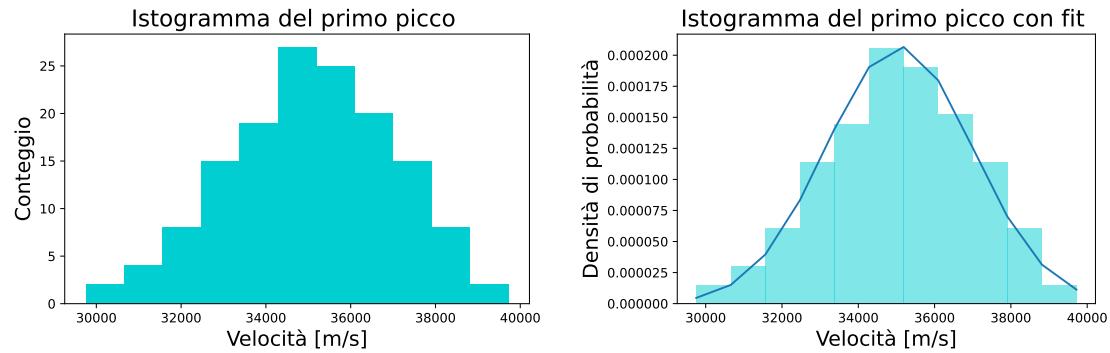


Figura 32: Istogramma e fit primo picco

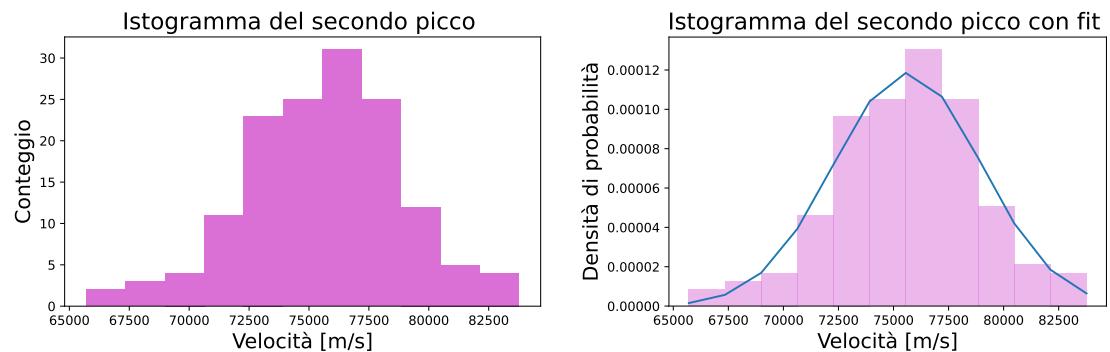


Figura 33: Istogramma e fit secondo picco

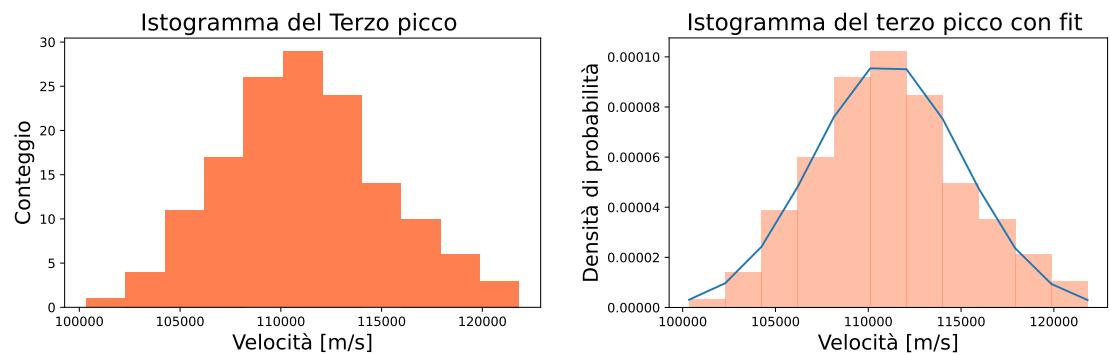


Figura 34: Istogramma e fit terzo picco

Velocità media e deviazione standard		
Picco	Vel(m/s)	Dev-std (m/s)
Primo	35070,43	1926,926
Secondo	75635,85	3365,42
Terzo	111050,92	4069,42

Si osserva, come ci si aspetterebbe, la presenza di tre regioni con velocità diverse, determinando in tal modo tre differenti righe di H 21, discostate ciascuna dal valore teorico per effetto Doppler.

## 5 Mappa

Viene discussa ora la realizzazione della mappa di una regione di cielo, in corrispondenza del cigno. L'attenzione è posta nell'intervallo di valori tra 38 e 47 deg di declinazione (Dec), e 290 e 320 deg di ascensione retta (RA).

Per ottenere i dati di interesse, ad ogni puntamento della parabola si sceglie di lasciare fisso il valore di declinazione lasciando variare l'ascensione retta. Di conseguenza ciascuna osservazione fornirà una riga orizzontale della mappa. Ripetendo i campionamenti su vari giorni è possibile costruire la mappa completa.

Le coordinate, in azimuth ed elevazione, da fornire alla parabola vengono ricavate utilizzando lo stesso programma descritto in 2.4; scegliendo il valore di declinazione giornalmente, ponendo l' RA a  $308^\circ$ , valore di coordinata celeste del cigno. Osservazioni della durata di 3:00 h permettono di spaziare sul range di  $30^\circ$  di RA citato precedentemente.

### 5.1 Composizione della mappa

Per ogni osservazione vengono in totale utilizzati 32 file, le rispettive coordinate azimuth ed elevazione sono sempre ricavabili sfruttando la funzione *transform\_to*. Per ogni file viene eseguita l'analisi delle velocità descritta nella sezione 4. D'interesse è il valore della temperatura di brillanza in corrispondenza del primo picco osservato.

Analizzando ognuno dei set di dati, si possono comporre le varie righe, corrispondenti a declinazioni diverse, attraverso la funzione di stampa *imshow*, presenta nella libreria *matplotlib* di python. Nel dettaglio, è possibile passare, come argomento della funzione, la variabile *extent*, ovvero le coordinate che compongono la griglia, nel nostro caso [290-320; 38-47].

Il risultato finale è qui riportato:

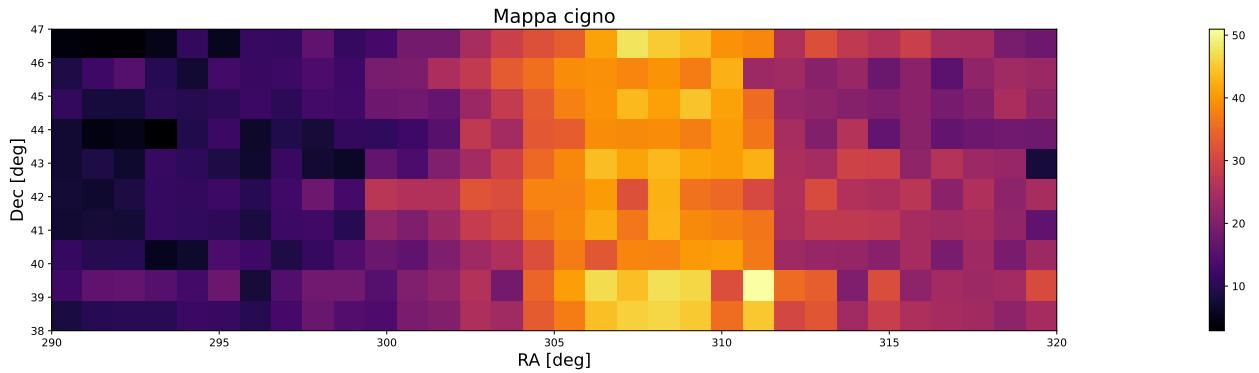


Figura 35: Mappa del cigno, le intensità dei colori corrispondono ai valori della temperatura di brillanza come indicato nella barra a lato espressa in Kelvin

## 5.2 Processo di smoothing della mappa

Il risultato ottenuto, mostrato in figura 35, è notevolmente grezzo e irregolare. Per tale motivazione, viene attuata una procedura di smoothing della mappa, al fine di ottenere un risultato continuo ed uniforme.

La procedura si dipana in due passaggi. Il primo step consiste nell'applicare una convoluzione tra il set di dati e un kernel gaussiano bidimensionale. Ci si avvale direttamente della funzione *convolve* ottenendo la seguente mappa:

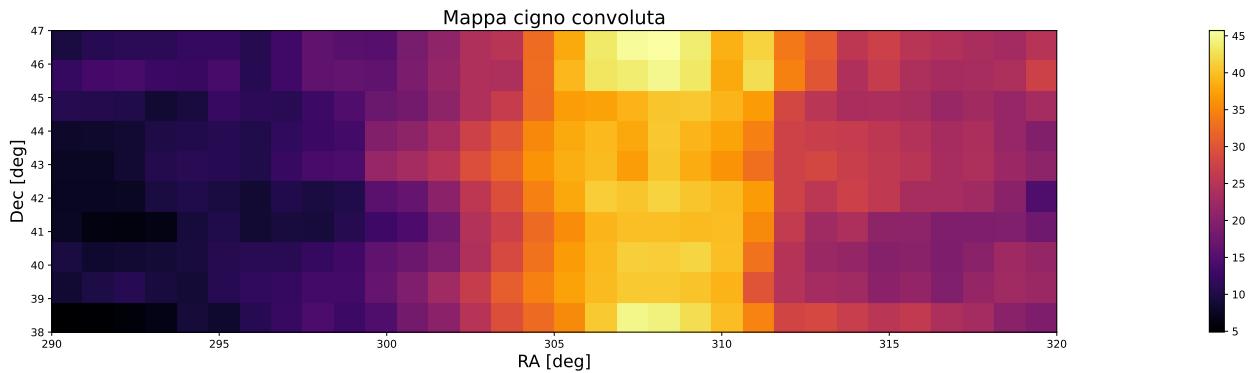


Figura 36: Mappa del cigno convoluta con un kernel gaussiano

Si può notare un minor distacco tra i colori, i.e. temperatura, associati ai diversi pixel.

Il secondo step ha il fine di rimuovere il distacco dato dalla griglia dei pixel passando a un andamento maggiormente omogeneo. La già utilizzata funzione *imshow*

permette di eseguire un'interpolazione tra un pixel e i suoi adiacenti. Viene qui riportato la mappa finale, ottenibile interpolando le funzioni di Bessel;

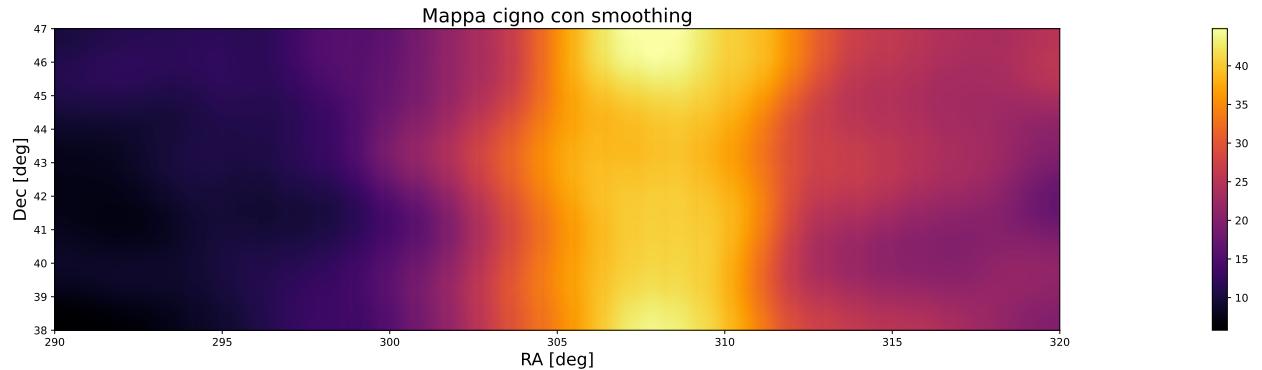


Figura 37: Mappa del cigno a cui è stato applicato il processo di smoothing

Si noti la corrispondenza tra i punti in cui sono presenti i valori maggiori di temperatura di brillanza e le coordinate galattiche della regione del cigno, fulcro dello studio eseguito.

## 6 Conclusionе

Gli obiettivi prefissati all'inizio dell'esperienza sono stati raggiunti con successo. Lo studio della calibrazione ha permesso di valutare quantitativamente il contributo della strumentazione utilizzata durante la presa dei set di dati, nel corso dell'esperienza.

Un corretto svolgimento di essa ha portato a una soddisfacente analisi riguardante la regione dell'idrogeno, in particolare l'emissione della riga H21. I risultati finali sono stati ottenuti tenendo conto delle considerazioni sull'effetto Doppler e sul moto di rivoluzione terrestre.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Massimo Gervasi. “Sorgenti Astronomiche”. In: (2022).
- [2] Franck Laloë Claude Cohen-Tannoudji Bernard Diu. “Quantum Mechanics, Volume 1: Basic Concepts, Tools, and Applications”. In: (2020).
- [3] Ashish A. Mhaske. “A Bose Horn Antenna Radio Telescope (BHARAT) design for 21 cm hydrogen line experiments for radio astronomy teaching”. In: (2022).
- [4] Massimo Gervasi. “Ricevitori e canali in frequenza”. In: (2022).
- [5] Massimo Gervasi. “Calibrazione ricevitori”. In: (2022).
- [6] Massimo Gervasi. “Osservabili e grandezze astrofisiche”. In: (2022).
- [7] Wikipedia. *Polinomio di Čebyšëv — Wikipedia, L'enciclopedia libera.* 2018. URL: [http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Polinomio\\_di\\_%C4%8Ceby%C5%A1%C3%ABv&oldid=100274075](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Polinomio_di_%C4%8Ceby%C5%A1%C3%ABv&oldid=100274075).
- [8] The SunPy Community et al. “The SunPy Project: Open Source Development and Status of the Version 1.0 Core Package”. In: (2020).