



Università degli studi di Milano-Bicocca

Facoltà di Fisica

Microonde

Relazione di laboratorio

Gruppo T1 22

Lando Livio
Pievaioli Davide
Sandrelli Matteo

May 2025

1 Introduzione

In questa esperienza di laboratorio vengono esaminati diversi fenomeni ottici, quali la riflessione, la rifrazione e l'interferenza, utilizzando onde elettromagnetiche nella regione delle microonde, caratterizzate da una lunghezza d'onda di circa 3 cm (corrispondente a una frequenza di circa 10 GHz).

Sia l'emettitore che il ricevitore impiegano un diodo e una cavità risonante per generare, propagare e rilevare le onde elettromagnetiche. L'emettitore genera un'onda elettromagnetica coerente e polarizzata linearmente; l'emissione può essere considerata come proveniente da una sorgente puntiforme situata all'interno del cono dell'emettitore. Il ricevitore, anch'esso polarizzato, è dotato di un sistema che entra in oscillazione quando riceve il segnale a microonde, convertendo l'onda elettromagnetica incidente in un segnale di tensione (o corrente) misurabile. Crucialmente, il ricevitore registra solo la componente del segnale la cui polarizzazione è parallela all'asse del diodo ricevente.

Gli obiettivi principali dell'esperimento sono:

- Analizzare le caratteristiche del fascio emesso dalla sorgente e la risposta del ricevitore, con particolare attenzione all'osservazione del fenomeno delle onde stazionarie e allo studio della polarizzazione.
- Misurare l'angolo di Brewster.
- Studiare il fenomeno dell'interferenza.
- Investigare la diffrazione di Bragg utilizzando un reticolo cubico.

1.1 Strumenti a disposizione

Gli strumenti impiegati in questa esperienza sono:

- Emettitore di microonde: sorgente di onde elettromagnetiche coerenti e polarizzate linearmente (circa 10 GHz), dotato di horn (guida d'onda a forma di tronco di piramide) per indirizzare il fascio.
- Ricevitore di microonde: dispositivo polarizzato per la rilevazione delle microonde, anch'esso dotato di horn. Converte il segnale elettromagnetico ricevuto in un segnale elettrico (tensione o corrente) visualizzabile su un misuratore analogico integrato a sensibilità regolabile o mediante un multimetro esterno.
- Guida millimetrata e goniometro: per la misurazione precisa di distanze e angoli.
- Accessori vari:
 - Ostacoli riflettenti (lastre metalliche).
 - Ostacoli semiriflettenti.
 - Ostacoli rifrangenti (lastra di polietilene, cubo di Bragg).
 - Griglia metallica (per studi sulla polarizzazione).

1.2 Sistema di lettura e interpretazione dei dati

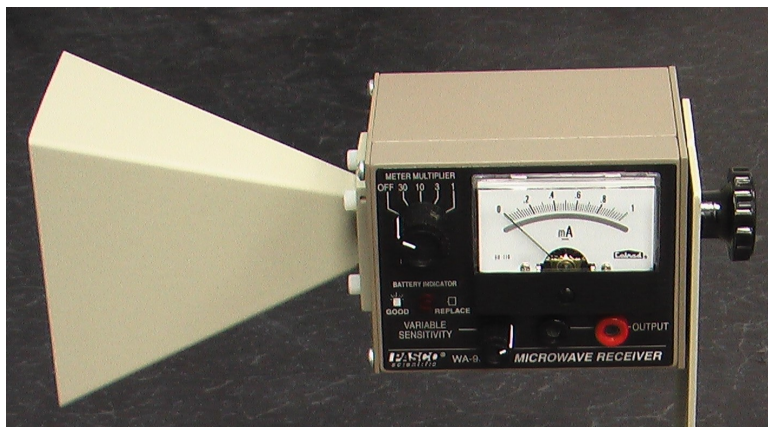


Figure 1: ricevitore e lettura del segnale

Il segnale rilevato dal ricevitore di microonde PASCO (modello WA-9801) viene convertito in una grandezza elettrica misurabile. Per questa esperienza, il sistema di lettura del segnale è stato configurato utilizzando:

Opzione A: il misuratore analogico integrato sul pannello del ricevitore stesso.

Opzione B: un multimetro digitale esterno, collegato all'uscita analogica del ricevitore e impostato per la misurazione di tensione

Indipendentemente dalla specifica catena di lettura scelta, il ricevitore WA-9801 è dotato di controlli che influenzano direttamente il segnale misurato:

- **Guadagno (Gain / Sensitivity):** Questo selettore permette di variare il fattore di amplificazione del segnale elettrico generato dal diodo ricevente. Impostazioni di guadagno più elevate aumentano la sensibilità a segnali deboli, ma possono portare a saturazione in presenza di segnali intensi. Durante l'acquisizione di una serie di dati correlati, si è cercato di mantenere costante l'impostazione del guadagno per garantire la comparabilità delle misure. Qualora una variazione del guadagno fosse stata inevitabile per coprire l'intero range dinamico del fenomeno osservato, si è proceduto a una calibrazione incrociata, misurando un segnale di riferimento con entrambe le impostazioni di guadagno per determinare il fattore di scala relativo.
- **Offset (Zero Adjust):** Questa manopola permette di aggiungere o sottrarre una componente continua (DC offset) al segnale. Ciò consente di traslare il livello di "zero" della misura, il che può essere utile per centrare le oscillazioni del segnale attorno allo zero dello strumento di lettura o per compensare eventuali segnali di fondo costanti. L'impostazione dell'offset è stata tipicamente regolata all'inizio di una serie di misure per ottimizzare la lettura all'interno della scala dello strumento.

1.2.1 Studio dell'offset e guadagno

Tuttavia l'evidenza sperimentale supporta la tesi che guadagno e offset non seguino un andamento lineare $y = Ax + B$, con A = guadagno e B = offset.

Il ricevitore infatti segue in lettura una legge più complessa. In seguito indagheremo tale osservazione.

A complicare ulteriormente la caratterizzazione precisa della risposta contribuisce la natura dei controlli: mentre la variazione del guadagno avviene tramite un selettore a scatti definiti, la regolazione dell'offset è affidata a una manopola continua e priva di graduazione, che non fornisce quindi un'indicazione quantitativa diretta della variazione apportata.

Fissando le condizioni sperimentali, come distanza, angolazione e intensità del segnale tra emettitore e ricevitore, possiamo variare l'offset e il guadagno. In seguito è riportato l'andamento della misurazione rispetto al guadagno. L'offset viene variato da 0, dove è nullo, ed alzato arbitrariamente (1 e 2 sono degli indici che associamo a diversi offset, dove $\text{offset } 1 < \text{offset } 2$).

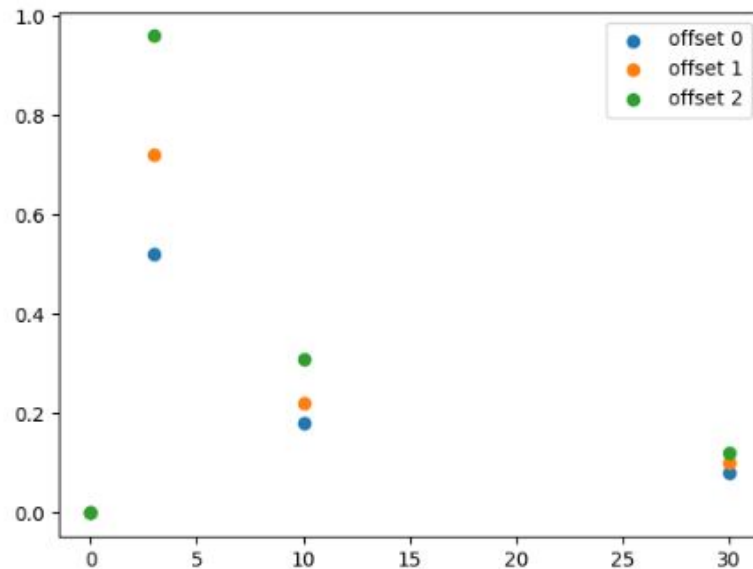


Figure 2: plot

L'analisi del grafico riportato in Figura 2 mette in luce alcune caratteristiche significative e una certa complessità intrinseca nel sistema di lettura del ricevitore. Contrariamente a un'aspettativa intuitiva, per cui il guadagno agirebbe come un semplice fattore moltiplicativo diretto sul segnale misurato, si osserva che un aumento dell'impostazione di "guadagno" corrisponde a una *diminuzione* del valore letto. Questo comportamento, inoltre, non sembra seguire una semplice proporzionalità lineare.

Un'ulteriore osservazione rilevante emerge analizzando l'interazione tra le impostazioni di offset e guadagno: all'aumentare del livello di offset impostato, l'effetto del selettore di guadagno sulla misura finale appare più marcato. Ciò suggerisce che i parametri di offset e guadagno non agiscono in modo indipendente l'uno dall'altro, ma presentano una forma di interdipendenza nel determinare la risposta complessiva dello strumento.

Il plot suggerisce che la legge sia di tipo esponenziale, indaghiamo quindi questa ipotesi:

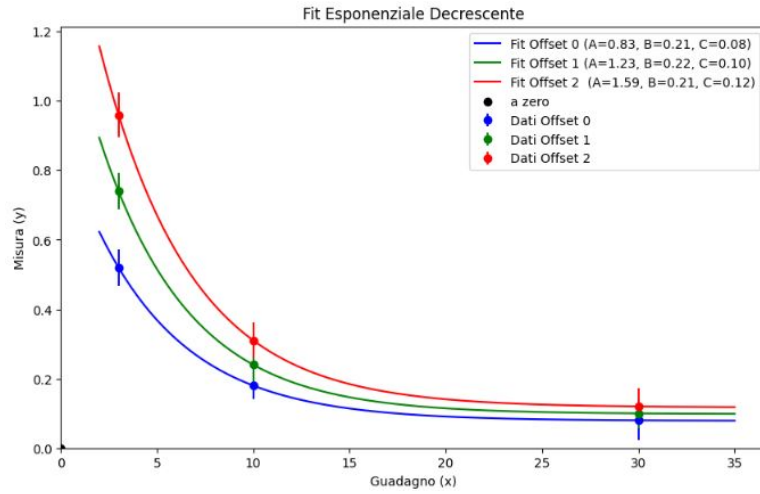


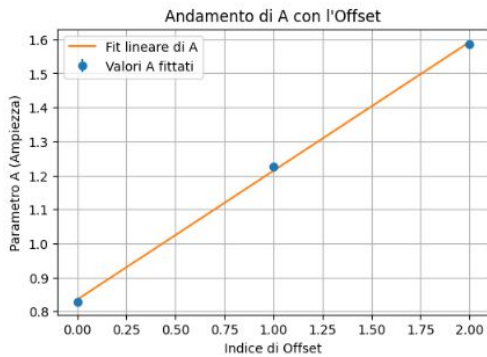
Figure 3: fit

Fittando i dati con una legge esponenziale, del tipo:

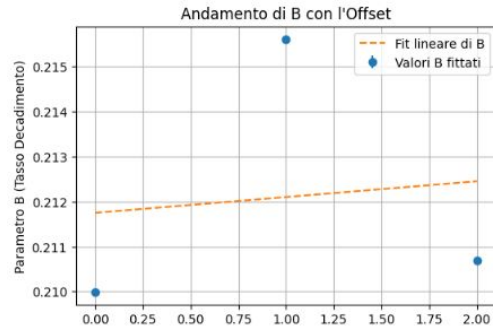
$$\text{exp_decay_func}(x; A, B, C) = C + A \cdot e^{-Bx}$$

Dal χ^2_{red} e P_{value} del fit si evince che il modello si adatta in modo più che soddisfacente ai dati sperimentali. La discussione sulla scelta degli errori è meglio discussa in sezione 1.3

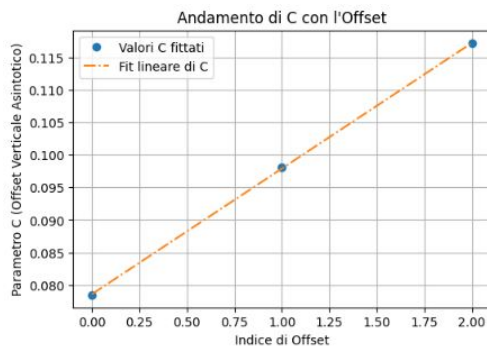
A partire dall'ipotesi di una legge esponenziale, siamo stati in grado di valutare il ruolo dei coefficienti A,B,C.



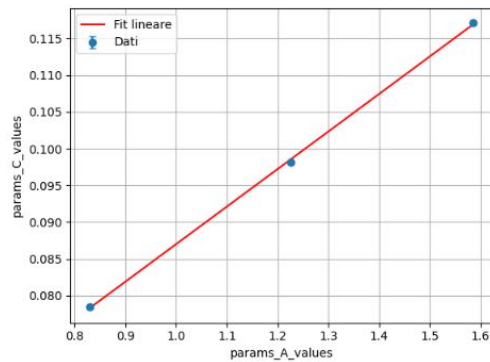
(a)



(b)



(c)



(d)

- (a) **A vs offset** : Il parametro A (che rappresenta l'ampiezza della parte esponenziale, cioè la differenza tra il valore iniziale approssimato e l'asintoto

C) mostra una chiara tendenza lineare crescente all'aumentare dell'Indice di Offset. Il fit lineare $A = m_A * offset_i + q_A$ sembra un'ottima descrizione di questo andamento. La pendenza è positiva.

- **(b) B vs offset** Il fit lineare pesato mostra una pendenza molto piccola (quasi orizzontale, leggermente negativa).
- **(c) C vs offset** Anche il parametro C (l'asintoto a cui tende la misura per x grande) mostra una chiara tendenza lineare crescente all'aumentare dell'Indice di Offset. Il fit lineare $C = m_C * offset_i + q_C$ descrive bene questo andamento. La pendenza è positiva.
- **(d) C vs A** Si osserva una forte correlazione lineare positiva tra A e C. Questo non è sorprendente, dato che sia A sia C aumentano linearmente con l'Indice di Offset. Se due quantità dipendono linearmente da una terza variabile comune, allora saranno anche linearmente correlate tra loro. $C = m_A C * A + q_A C$.

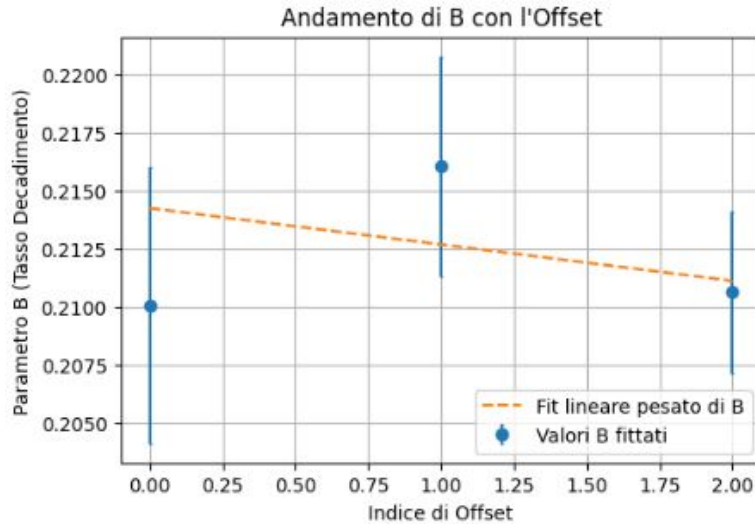


Figure 4: ricevitore e lettura del segnale

Considerando le barre d'errore, il parametro B può essere considerato approssimativamente costante al variare dell'offset. Le piccole fluttuazioni osservate sono probabilmente compatibili con le incertezze del fit, dato il numero limitato di punti dati per ciascuna curva esponenziale. Un fit lineare con pendenza vicina a zero o un modello costante per B sarebbero entrambi ragionevoli.

1.2.2 Conclusione

L'analisi dei dati ha rivelato che i controlli di "guadagno" (x) e "offset" (rappresentato da `offset_idx`) dello strumento influenzano in modo specifico i parametri A , B , e C del modello di decadimento esponenziale $y(x) = C + Ae^{-Bx}$.

Il parametro "guadagno" x dello strumento agisce come un fattore di attenuazione della risposta, la cui influenza è descritta dal termine esponenziale e^{-Bx} . All'aumentare di x , il segnale decade verso un valore asintotico.

L'impostazione di "offset", invece, non si limita a una semplice traslazione della misura finale. Si è osservato che un incremento dell'indice di offset (`offset_idx`)

induce un aumento lineare sia dell'ampiezza A della componente esponenziale ($A \propto \text{offset_idx}$) sia del valore asintotico C della misura ($C \propto \text{offset_idx}$). È importante notare che il tasso di decadimento B rimane sostanzialmente invariato al variare dell'offset, indicando che la forma intrinseca del decadimento non viene alterata.

Questa interazione implica che l'effetto del “guadagno” x è modulato dall'impostazione di “offset”, poiché l'ampiezza A della risposta dipendente da x è essa stessa controllata dall'offset. Un modello globale che descrive la misura y può quindi essere formulato incorporando queste dipendenze lineari di A e C dall'indice di offset, e mantenendo B costante:

$$y(x, \text{offset_idx}) = (m_C \cdot \text{offset_idx} + q_C) + (m_A \cdot \text{offset_idx} + q_A)e^{-B_{\text{avg}}x} \quad (1)$$

In conclusione, il “guadagno” x governa l'attenuazione esponenziale, mentre l'“offset” scala linearmente sia l'ampiezza di questa attenuazione sia il livello di base della misura, senza modificarne la caratteristica temporale del decadimento.

La scelta di non adottare una legge lineare è probabilmente giustificata dal fatto che, una legge del tipo 1 permette una più ampia selezione di intervalli di dati, dunque sia per misure molto piccole, che molto grandi, il ricevitore è sempre in grado di restituire delle misure, senza che esse escano mai dall'intervallo di sensibilità. Il giusto utilizzo è dunque a discrezione della scelta individuale e specifica di offset e guadagno.

Attenzione: È fondamentale sottolineare che il segnale letto non rappresenta direttamente l'intensità assoluta I (in W/m^2) dell'onda elettromagnetica, né l'ampiezza del campo elettrico E in unità fisiche standard (V/m). Piuttosto, la lettura è una quantità (tensione V_{out} o corrente I_{out}) che è proporzionale all'ampiezza della componente del campo elettrico E_{\parallel} dell'onda incidente che è parallela alla direzione di polarizzazione intrinseca del diodo ricevente:

$$V_{\text{out}} \propto E_{\parallel} \quad \text{oppure} \quad I_{\text{out}} \propto E_{\parallel} \quad (2)$$

Di conseguenza, l'intensità dell'onda, essendo $I \propto E^2$, sarà proporzionale al quadrato della lettura (assumendo che il ricevitore sia allineato per massima ricezione e che tutta l'onda incidente abbia la polarizzazione corretta):

$$I \propto V_{\text{out}}^2 \quad \text{oppure} \quad I \propto I_{\text{out}}^2 \quad (3)$$

Questo argomento è meglio discusso in 2.1.

1.3 Analisi preliminare degli errori e delle principali fonti di incertezza

1.3.1 Analisi del metodo di lettura

Questa analisi si basa sulla ripetizione di misure sullo stesso setup sperimentale; le stesse considerazioni saranno poi applicate all'intera esperienza di laboratorio. Consideriamo, ad offset, guadagno e tutte le variabili che il setup permette, fissi, la lettura di voltaggio e amperaggio al variare dell'angolo relativo di trasmissione e ricezione del segnale. Il segnale microonde è infatti polarizzato, come descritto in 1.1, dunque, variando l'angolo relativo, cioè ruotando il trasmettitore attorno

all'asse di simmetria ortogonale al trasmettitore stesso, l'intensità cambia. Utilizziamo questo setup per valutare le due tipologie di lettura dei dati. Il fenomeno di polarizzazione sarà descritto più dettagliatamente nella sezione 2.1; qui basti sapere che i dati dipendono dall'angolo di polarizzazione secondo una relazione trigonometrica.

1.3.2 Misure di voltaggio e amperaggio al variare dell'angolo

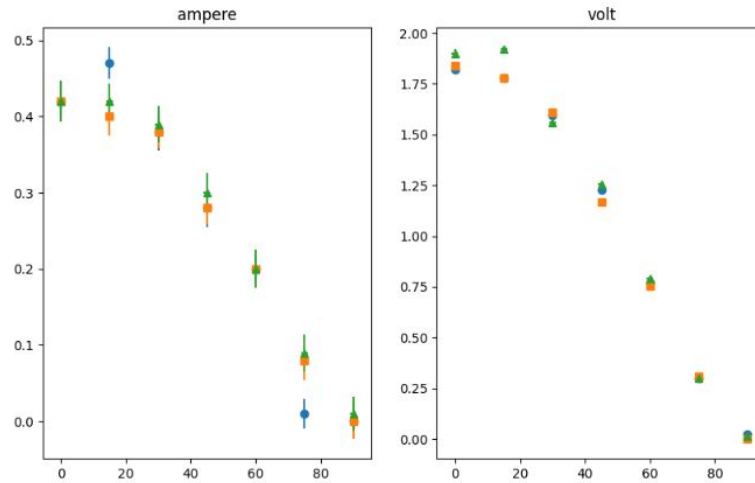


Figure 5: plot errori

Sono state prese più misurazioni, ottenendo, tramite un algoritmo, la media pesata associata alle misure ripetute. Gli errori di misura sono stati stimati in seguito a considerazioni su sensibilità dello strumento e fluttuazioni statistiche, discusse meglio in sezione 1.3.3.

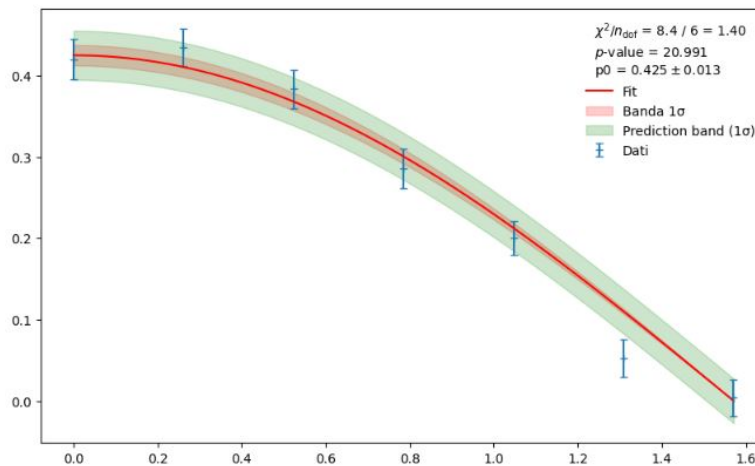
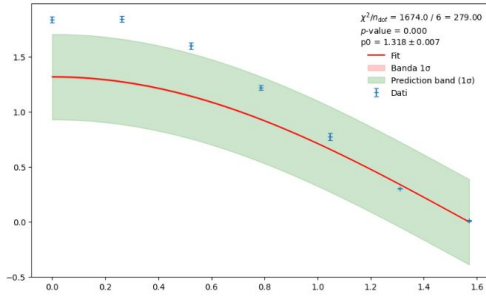
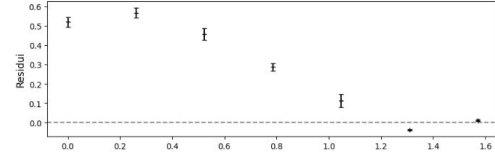


Figure 6: lettura analogica

Dal fit della lettura analogica, in particolare dai valori di χ^2_{red} e P_{value} si evince che il modello si adatta in modo soddisfacente ai dati sperimentali.



lettura digitale



Residui

Al contrario, la lettura digitale, per questa specifica misurazione, mostra un adattamento peggiore dei dati al modello. La tesi è supportata non solo da χ^2_{red} e P_{value} ma dai residui, evidentemente non distribuiti normalmente.

In generale, lungo tutto l'esperimento, sarà vero che:

- Lettura analogica: meno precisa, soggetta a maggiori fluttuazioni statistiche, sensibilità minore, lettura a discrezione dell'occhio umano (introduzione di un bias, conseguenza dell'arbitrarietà della lettura);
- Lettura digitale: più precisa, lo strumento restituisce un valore ben definito (non esatto, in quanto bisogna indagare errori sistematici di lettura).

1.3.3 Studio degli errori, della sensibilità e dell'intervallo dinamico

Una corretta valutazione delle incertezze sperimentali è fondamentale per l'interpretazione dei risultati. In questa esperienza, abbiamo considerato sia gli errori di sensibilità degli strumenti, sia gli errori casuali (statistici) e sistematici.

- **Errori di Sensibilità Strumentale:** L'incertezza associata alla lettura diretta dagli strumenti (e.g., guida millimetrata, goniometro, display analogico/digitale del ricevitore) è stata stimata come metà della minima divisione della scala o secondo le specifiche del costruttore.
 - **Incertezza sulla misura della tensione:** La tensione V misurata dal ricevitore viene letta con un'accuratezza nominale dell'8%, che abbiamo assunto come intervallo uniforme $\pm 8\% \cdot V$. Per ottenere l'equivalente incertezza gaussiana σ_V , si procede come segue:

$$\sigma_{\text{intervallo}} = 0.08 V \implies a = V - 0.08 V, \quad b = V + 0.08 V,$$

$$\sigma_V = \frac{b - a}{\sqrt{12}} = \frac{2 \times 0.08 V}{\sqrt{12}}.$$

- **Incertezza sulla misura dell'angolo:** L'angolo θ è stato letto con una risoluzione di 1° . Assumendo che l'errore sia uniformemente distribuito in un intervallo di ampiezza $\pm 1^\circ$, ne ricaviamo l'equivalente incertezza gaussiana:

$$\sigma_{\theta, \text{deg}} = \frac{2 \times 1^\circ}{\sqrt{12}}.$$

Convertito poi in radianti.

- **Incertezza sulla misura della distanza:** Le distanze r sono state misurate tramite una guida millimetrata, con una risoluzione minima di 1 mm. Assumendo che l'errore sia uniformemente distribuito in un intervallo di ampiezza ± 1 mm, otteniamo l'equivalente incertezza gaussiana:

$$\sigma_r = \frac{2 \times 1 \text{ mm}}{\sqrt{12}}.$$

- **Contributo degli Errori Casuali e Sistemati:** L'incertezza totale nelle misure di questa esperienza deriva sia da errori casuali (fluttuazioni) sia da errori sistematici. Mentre gli errori casuali sono stati stimati ripetendo le misure, è importante considerare che gli errori sistematici possono essere significativi. Questi ultimi, dovuti a imperfezioni strumentali, disallineamenti o semplificazioni del modello, possono influenzare notevolmente l'accuratezza dei risultati in un contesto di laboratorio didattico. Molte volte l'errore sistematico supera quello statistico.
- **Intervallo Dinamico del Ricevitore:** L'intervallo dinamico definisce l'ambito di segnali che il ricevitore può misurare in modo affidabile, compreso tra un limite inferiore (soglia di rumore, dove il segnale è indistinguibile dal fondo) e un limite superiore (saturazione, dove la risposta non è più proporzionale al segnale incidente). Questo intervallo è stato valutato qualitativamente variando l'intensità del segnale, ad esempio modificando la distanza emettitore-ricevitore, per diverse impostazioni di guadagno. Comprendere l'intervallo dinamico è stato essenziale per selezionare il guadagno ottimale per ogni misura, bilanciando sensibilità e prevenzione della saturazione. Come descritto in sezione 1.2.2, offset e guadagno si prestano efficacemente a coprire un ampio intervallo di misure.

1.3.4 Studio del rumore e delle interferenze

Durante l'esperienza, è stata dedicata attenzione all'identificazione di possibili sorgenti di rumore e interferenza che potessero alterare le misure del segnale a microonde ($\lambda \approx 3$ cm).

- **Sorgenti di Rumore e Assorbimento/Riflessione:** Considerata la lunghezza d'onda utilizzata, oggetti di dimensioni comparabili o maggiori possono interagire significativamente con il fascio. È stato osservato che:
 - Oggetti metallici di grosse dimensioni posti sul cammino del fascio possono causare un blocco quasi totale del segnale o generare riflessioni complesse.
 - Materiali dielettrici, come il corpo umano, possono assorbire e riflettere parzialmente le microonde. Ad esempio, posizionandosi lateralmente rispetto al fascio principale emettitore-ricevitore, si è notato che il corpo dello sperimentatore poteva riflettere una frazione del segnale verso il ricevitore, causando una lettura non nulla anche quando il ricevitore non era direttamente nel fascio primario. Questa lettura spuria, in una configurazione di test, poteva raggiungere valori dell'ordine di [Es. 0.05–0.1 V] con un'impostazione di guadagno medio-alta, a fronte di segnali diretti tipici di [Es. 0.5 – 2 V] nella stessa scala.

- Dispositivi elettronici attivi (e.g., telefoni cellulari in trasmissione, computer portatili) nelle immediate vicinanze del setup non hanno mostrato un impatto chiaramente distinguibile o sistematico sul rumore di fondo.
- **Gestione e Impatto sulle Misure:** Per minimizzare tali effetti, si è cercato di mantenere l'area sperimentale sgombra da oggetti non necessari e di evitare movimenti degli sperimentatori vicino al percorso del fascio durante le acquisizioni.

2 Caratteristiche del fascio

2.1 Polarizzazione

2.1.1 Verifica della Legge di Malus con rotazione del ricevitore

La Legge di Malus è un principio fondamentale dell'ottica che descrive come l'intensità di un fascio di luce linearmente polarizzata cambi quando esso attraversa un secondo filtro polarizzatore, detto analizzatore.

L'ampiezza del campo elettrico trasmesso, E_t , è data dalla proiezione di \vec{E}_0 sull'asse di trasmissione dell'analizzatore:

$$E_t = E_0 \cos(\alpha) \quad (4)$$

L'intensità I di un'onda elettromagnetica è proporzionale al quadrato dell'ampiezza del suo campo elettrico ($I \propto E^2$).

$$I_t = I_0 \cos^2(\alpha) \quad (5)$$

Questa è la formulazione classica della Legge di Malus. Essa implica che:

- Quando l'asse di trasmissione dell'analizzatore è parallelo alla direzione di polarizzazione dell'onda incidente ($\alpha = 0^\circ$ o 180°), $\cos^2(\alpha) = 1$, e l'intensità trasmessa è massima ($I_t = I_0$).
- Quando l'asse di trasmissione dell'analizzatore è perpendicolare alla direzione di polarizzazione dell'onda incidente ($\alpha = 90^\circ$ o 270°), $\cos^2(\alpha) = 0$, e l'intensità trasmessa è nulla ($I_t = 0$).
- Per angoli intermedi, l'intensità trasmessa varia secondo il fattore $\cos^2(\alpha)$.

Per verificare la Legge di Malus, l'emettitore e il ricevitore sono stati allineati per massima trasmissione. Successivamente, il ricevitore è stato ruotato attorno al proprio asse (coincidente con la direzione di propagazione dell'onda) e il segnale è stato misurato a diversi angoli α rispetto all'allineamento iniziale. Ci si aspetta che il segnale V misurato dal ricevitore, essendo proporzionale all'ampiezza del campo elettrico E , segua la relazione $V(\alpha) = V_0 |\cos(\alpha)|$, dove V_0 è l'ampiezza massima del segnale quando la polarizzazione del ricevitore è allineata con quella dell'onda incidente. L'intensità I , proporzionale a V^2 , seguirebbe $I(\alpha) = I_0 \cos^2(\alpha)$. I dati raccolti (Figura 7 e 8) mostrano l'andamento del segnale in funzione dell'angolo di rotazione.

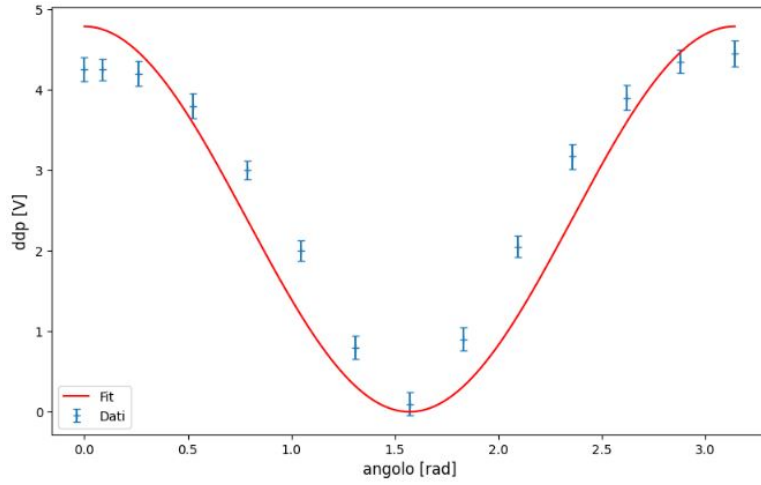


Figure 7: Intensità

Inizialmente, è stato tentato un fit con il modello $V_0 \cos^2(\alpha)$ (Figura 7), che si è rivelato inadeguato, come evidenziato dal valore elevato del $\chi^2/n_{dof} \approx 15.66$ e un p-value nullo.

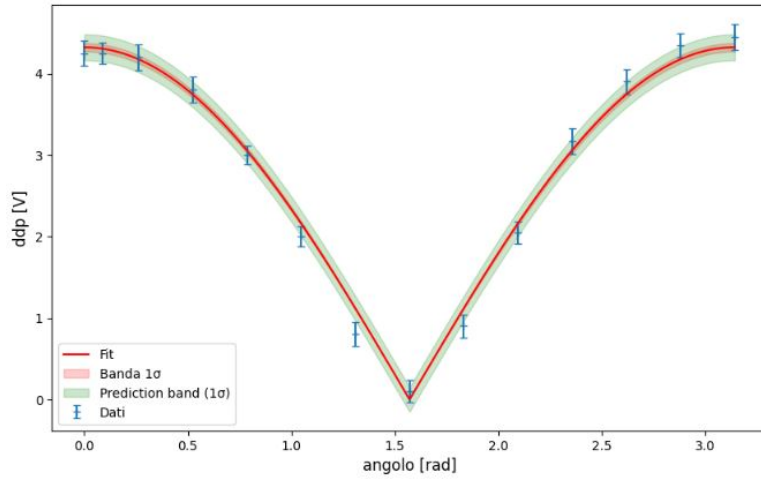


Figure 8: Campo elettrico

Un fit successivo con il modello $V(\alpha) = V_0 |\cos(\alpha)|$ (Figura 8) ha fornito una descrizione significativamente migliore dei dati sperimentali, con un $\chi^2/n_{dof} \approx 1.10$ e un p-value del 34.9%. Il valore del parametro fittato per l'ampiezza massima è risultato $V_0 = (4.323 \pm 0.051)$ unità arbitrarie. Questi risultati confermano che il ricevitore risponde linearmente all'ampiezza del campo elettrico incidente, in accordo con la Legge di Malus espressa per il campo.

2.2 Studio della geometria del fascio

In questa parte dell'esperimento è stata analizzata la distribuzione angolare dell'intensità del fascio irradiato dall'emettitore e rilevato dal ricevitore, entrambi equipaggiati con horn (guide d'onda a tromba), in modo da migliorare la direttività e ridurre le riflessioni spurie.

2.2.1 Configurazione sperimentale

Il sistema è stato disposto in modo che l'emettitore irradiasse un'onda elettromagnetica lungo una direzione iniziale $\theta = 0^\circ$, e il ricevitore potesse essere ruotato attorno a questo asse per misurare l'intensità della radiazione (proporzionale alla tensione rilevata) in funzione dell'angolo θ . La distanza tra emettitore e ricevitore era di circa 41 cm.

2.2.2 Analisi dei risultati

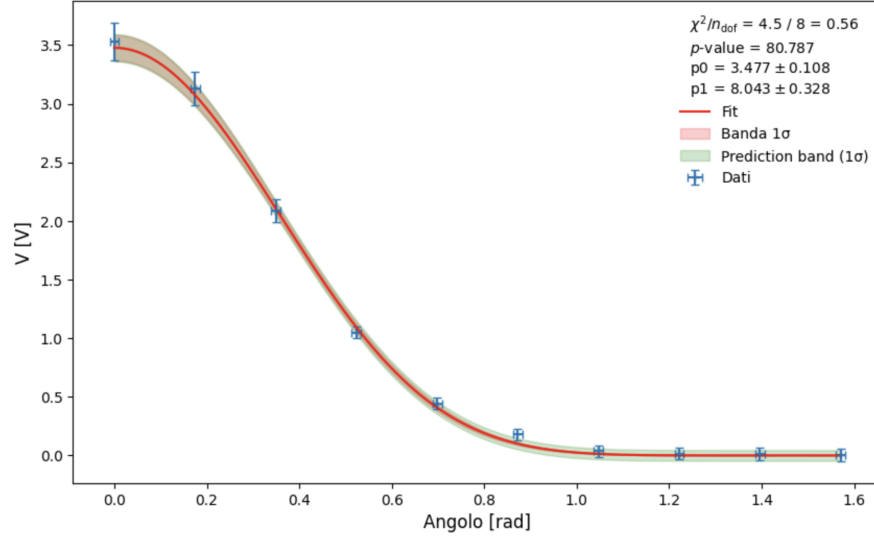


Figure 9: Fit parabolico dei dati di tensione $V(\theta)$ vs θ nell'intorno del massimo, per la determinazione della geometria del fascio (l'andamento segue un $y = \cos^8 x$)

La tensione misurata al variare dell'angolo θ mostra un picco netto in corrispondenza di $\theta = 0^\circ$, con un rapido decadimento ai lati. Sono stati testati diversi modelli per descrivere l'andamento osservato:

- **Onda piana:** $V(\theta) = A \cos(\theta)$
- **Modello empirico misto:** $V(\theta) = A \cos^2(\theta) + B |\cos(\theta)|$
- **Funzione gaussiana:** $V(\theta) = A \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right)$
- **Modello \cos^n :** $V(\theta) = V_0 \cos^n(\theta)$

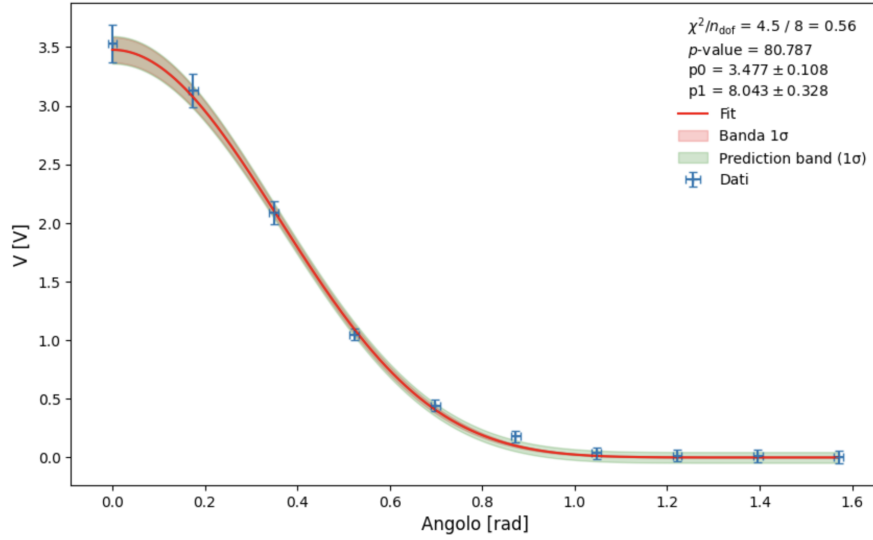


Figure 10: Fit parabolico dei dati di tensione $V(\theta)$ vs θ nell'intorno del massimo, per la determinazione della geometria del fascio (l'andamento segue un $y = \cos^8 x$)

Tra tutti, l'unico modello che riesce a descrivere accuratamente i dati sperimentali, come si vede in figura 10, è il modello a $\cos^n(\theta)$, con un valore di $n \approx 8$. Questo indica che il fascio presenta una collimazione molto elevata, concentrando l'intensità in un intervallo angolare molto stretto attorno allo zero.

2.2.3 Interpretazione

Il comportamento osservato diventa ancora più piccato al diminuire della distanza tra ricevitore ed emettitore. Infatti con distanza = 24.5 cm abbiamo notato che il plot dei dati ottenuti se prima seguiva un $y = \cos^8 x$, adesso segue un $y = \cos^{11} x$. Inoltre il profilo a $\cos^n(\theta)$ con n grande tende a una funzione gaussiana centrata in $\theta = 0^\circ$

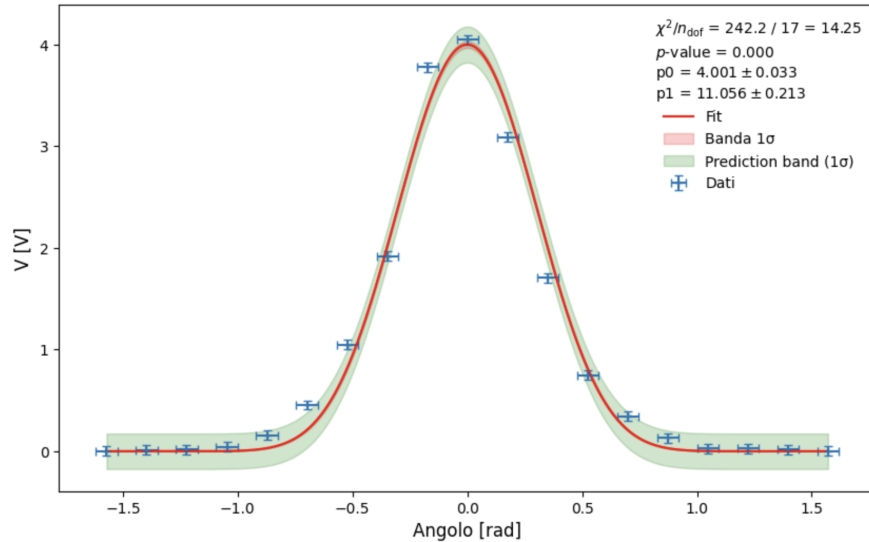


Figure 11: Fit parabolico dei dati di tensione $V(\theta)$ vs θ nell'intorno del massimo con $d=24.5$ cm, per la determinazione della geometria del fascio (l'andamento segue un $y = \cos^{11} x$)

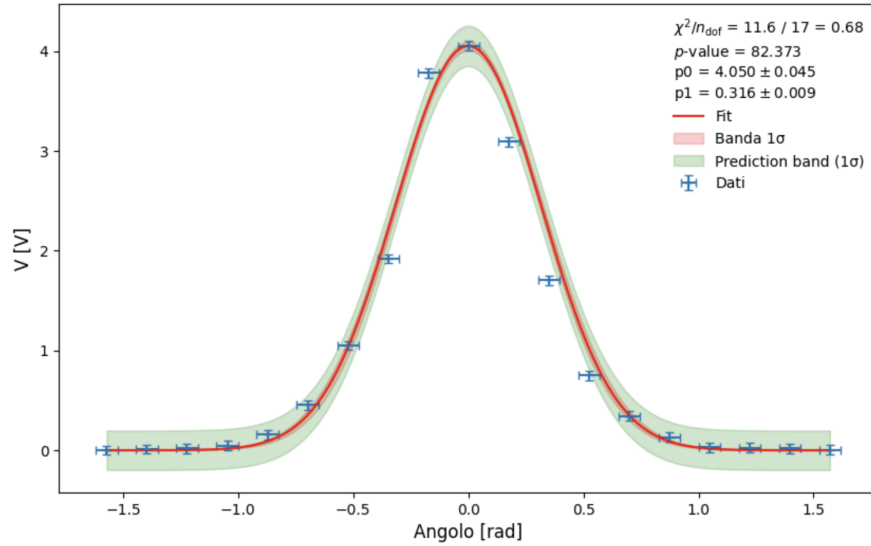


Figure 12: Fit parabolico dei dati di tensione $V(\theta)$ vs θ nell'intorno del massimo, per la determinazione della geometria del fascio (l'andamento segue una gaussiana)

Tale osservazione giustifica l'efficacia del fit gaussiano sperimentale, che si sovrappone bene al modello $\cos^n(\theta)$ nel dominio angolare considerato. Questo suggerisce che, nonostante la distanza non molto elevata tra sorgente e ricevitore, la forma spaziale del fascio sia effettivamente assimilabile a una distribuzione gaussiana, compatibile con l'utilizzo di horn direttivi.

2.3 Studio dell'andamento della tensione in funzione della distanza

Quando un'onda elettromagnetica si propaga in uno spazio libero, la sua intensità (o il campo elettrico, proporzionale alla tensione misurata) può decadere con la distanza a seconda della geometria della sorgente. Nel caso di un'onda piana perfettamente collimata, l'intensità non dipende dalla distanza. Al contrario, per un'onda sferica l'intensità decresce come $1/r^2$ e il campo (o la tensione) come $1/r$.

Nel nostro caso, il fascio era emesso da una sorgente dotata di horn, quindi ci si aspetta una propagazione con profilo sferico. Tuttavia, la distanza relativamente breve tra emettitore e ricevitore può introdurre effetti di divergenza, suggerendo una propagazione non completamente sferica. Inoltre, la presenza di riflessioni (per esempio tra sorgente e ricevitore) può causare interferenze costruttive e distruttive, generando un'onda stazionaria e quindi un'oscillazione periodica della tensione al variare della distanza.

2.3.1 Analisi dei dati

Abbiamo ottenuto i seguenti dati:

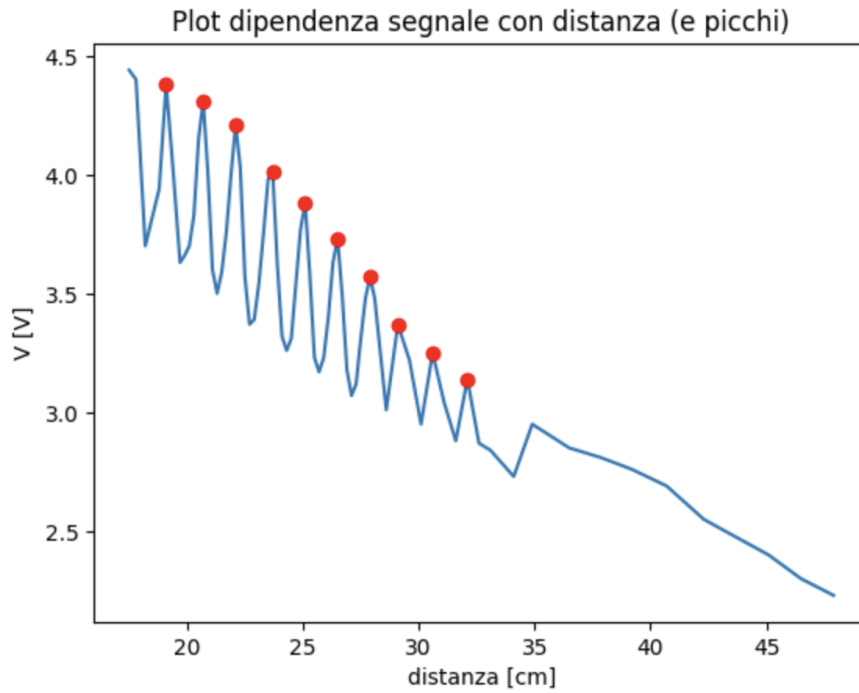


Figure 13: Dati ottenuti per andamento della tensione in funzione della distanza. In rosso i picchi per l'instaurazione delle onde stazionarie

Abbiamo misurato la tensione ricevuta V al variare della distanza r tra l'emettitore e il ricevitore, mantenendo fisso l'angolo $\theta = 30^\circ$. Come si può vedere in figura 14 la prima parte dei dati l'abbiamo ottenuta in maniera completa riportando tutte le oscillazioni a causa delle onde stazionarie. Successivamente per comodità abbiamo preso soltanto i picchi senza tenere conto delle oscillazioni.

I dati ottenuti mostrano un andamento globalmente decrescente, sovrapposto a un'oscillazione che suggerisce la presenza di onde stazionarie.

Per modellare il decadimento medio, abbiamo utilizzato un fit con il seguente modello:

$$V(r) = \frac{A}{r} + B$$

ottenendo un andamento compatibile con la propagazione sferica del segnale. Tuttavia, il valore del χ^2 ridotto risulta elevato, indice della presenza di strutture non descritte dal semplice modello $1/r$.

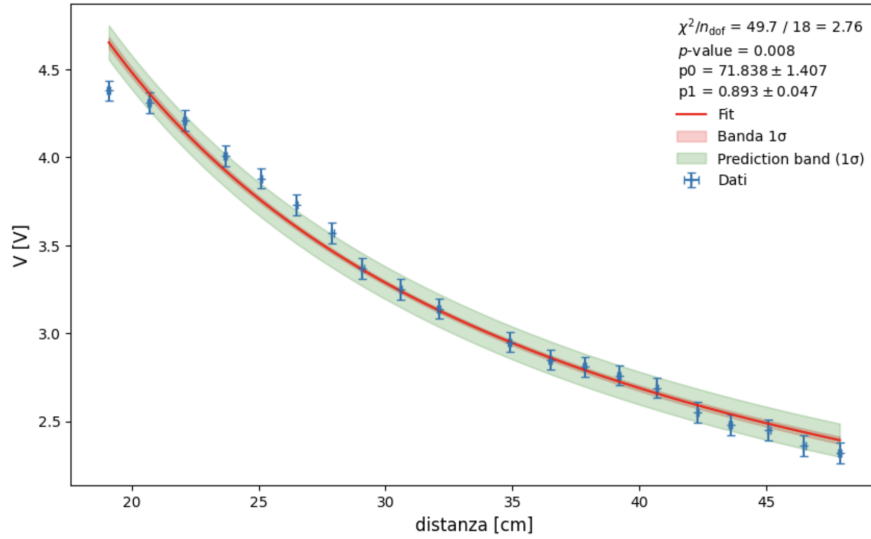


Figure 14: Fit andamento tensione in funzione della distanza seguendo il modello a profilo sferico

Per analizzare l'oscillazione, abbiamo applicato un algoritmo di ricerca dei massimi locali alla curva $V(r)$ e identificato i picchi principali. Calcolando la distanza media tra i picchi $\langle \Delta r \rangle$, abbiamo stimato sperimentalmente la lunghezza d'onda come:

$$\lambda = 2 \cdot \langle \Delta r \rangle = 2.89 \text{ cm}$$

Questa stima risulta ragionevole e conferma l'ipotesi di un'interferenza tra onda incidente e riflessa.

2.3.2 Osservazioni

L'analisi dell'andamento della tensione in funzione della distanza ha mostrato che:

- Il decadimento medio del segnale segue un andamento compatibile con una propagazione sferica del tipo $1/r$.
- La presenza di oscillazioni regolari nei dati suggerisce la formazione di onde stazionarie dovute a riflessioni tra sorgente e ricevitore.
- L'analisi delle posizioni dei picchi ha permesso una stima sperimentale della lunghezza d'onda pari a circa 2.89 cm.
- I fit sui massimi locali forniscono una migliore descrizione dell'andamento medio e confermano la coerenza del modello con la fisica del problema.

Questi risultati indicano che, pur in presenza di una sorgente con horn che tende a collimare il fascio, l'onda si comporta in modo non perfettamente piana e mostra effetti tipici della propagazione sferica e della formazione di onde stazionarie.

3 Angolo di Brewster

Quando un'onda elettromagnetica incide sull'interfaccia tra due mezzi dielettrici con indici di rifrazione n_1 e n_2 , l'energia dell'onda incidente si ripartisce tra

un'onda riflessa e un'onda trasmessa (o rifratta). L'intensità di queste due componenti dipende dall'angolo di incidenza e dalla polarizzazione dell'onda incidente rispetto al piano di incidenza.

Per un'onda incidente polarizzata parallelamente al piano di incidenza, esiste un angolo particolare, detto angolo di Brewster (θ_B), per il quale l'onda riflessa ha intensità nulla (o minima), e di conseguenza l'onda trasmessa ha intensità massima. L'angolo di Brewster è definito dalla relazione:

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1} \quad (6)$$

Nell'esperimento, si utilizza una lastra di polietilene e si misura l'intensità dell'onda trasmessa (proporzionale alla tensione V letta al ricevitore) in funzione dell'angolo di incidenza θ . Ci si attende quindi di osservare un massimo della tensione trasmessa quando l'angolo di incidenza corrisponde all'angolo di Brewster.

3.1 Raccolta dati

Abbiamo posizionato l'emettitore e il ricevitore di microonde uno di fronte all'altro, e messo una lastra di polietilene tra i due, montata su un supporto goniometrico che permetteva di ruotarla e quindi di variare l'angolo di incidenza θ delle microonde sulla lastra (Figura 15). L'angolo $\theta = 0^\circ$ corrisponde all'incidenza normale.

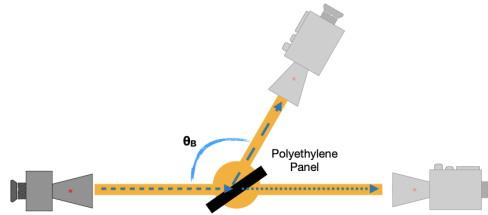


Figure 15: Configurazione sperimentale per la misura dell'angolo di Brewster.

Abbiamo quindi misurato i valori della tensione V al ricevitore per diversi angoli di incidenza θ , partendo da 0° fino a 65° .

L'andamento della tensione V in funzione dell'angolo di incidenza θ mostra un massimo, come atteso dalla teoria per l'onda trasmessa all'angolo di Brewster. Per determinare la posizione di tale massimo, abbiamo effettuato un fit parabolico sui dati sperimentali nell'intorno del picco osservato.

La funzione utilizzata per il fit è una parabola della forma:

$$V(\theta) = A\theta^2 + B\theta + C$$

Il risultato del fit è mostrato in Figura 16.

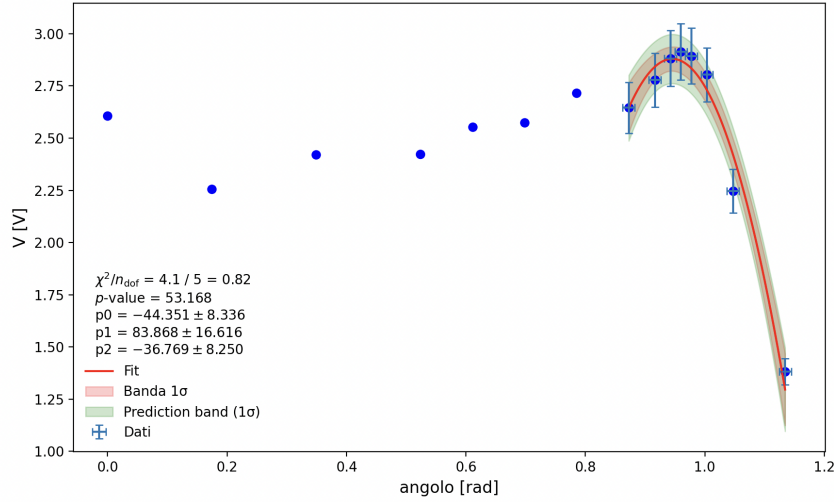


Figure 16: Fit parabolico dei dati di tensione $V(\theta)$ vs θ nell'intorno del massimo, per la determinazione dell'angolo di Brewster. I punti blu rappresentano tutti i dati raccolti, mentre il fit è stato eseguito sulla porzione di dati con $\theta \geq 50^\circ$.

L'angolo corrispondente al vertice della parabola, che stimiamo come angolo di Brewster θ_B , si calcola come:

$$\theta_B = -\frac{B}{2A}$$

Utilizzando i valori dei parametri fittati e propagando le incertezze, si ottiene:

$$\theta_B = (54.2 \pm 0.7)^\circ$$

3.2 Commento sul risultato

Dal fit parabolico abbiamo ricavato:

$$\tan(\theta_B) = 1.385 \pm 0.036.$$

Il valore di riferimento per l'indice di rifrazione del polietilene è

$$n_{\text{polietilene}} = 1.55$$

e, assumendo $n_{\text{aria}} = 1$, si ottiene la tangente teorica dell'angolo di Brewster:

$$\tan(\theta_{B,\text{teorico}}) = 1.55.$$

Un t -test tra valore sperimentale e teorico restituisce una compatibilità del 0.26%, indicativa di una discrepanza significativa. Tuttavia, il risultato sperimentale si avvicina ragionevolmente al valore atteso, suggerendo che, nonostante possibili errori sistematici (allineamento dell'apparato, scelta di limitare il fit a un intervallo ristretto intorno al picco, variazioni locali dell'indice), i dati siano complessivamente coerenti con la teoria.

4 Interferenza: Fabry-Perot

4.1 Cenni teorici

L'interferometro di Fabry-Perot è un sistema ottico (o, in questo caso, radiofrequenza) composto da due specchi piani e parzialmente riflettenti disposti parallelamente tra loro, che creano una cavità risonante. Nel nostro esperimento,

i due specchi sono stati realizzati utilizzando lastre semiriflettenti posizionate parallelamente. Un emettitore e un ricevitore dotati di horn sono stati disposti rispettivamente ai due estremi della cavità, agendo come sorgenti e rivelatori puntiformi.

Quando un'onda entra nella cavità, essa subisce molteplici riflessioni tra le due lastre: le onde riflesse possono interferire in modo costruttivo o distruttivo a seconda della lunghezza della cavità. In particolare, si osserva interferenza costruttiva (ovvero massimi di intensità) ogni volta che la lunghezza della cavità è pari a un multiplo semintero della lunghezza d'onda, secondo la condizione di risonanza:

$$2d = m\lambda \quad \text{con} \quad m \in \mathbb{N}$$

Dove d è la distanza tra le lastre e λ è la lunghezza d'onda della radiazione. Variando d , la figura d'interferenza registrata dal ricevitore mostra un'alternanza di massimi e minimi, da cui è possibile ricavare il valore di λ .

4.2 Analisi dei dati

Nel nostro caso, la distanza tra le lastre è stata variata sistematicamente, registrando per ciascuna configurazione il valore di tensione V rilevato dal ricevitore. Il grafico risultante mostra l'andamento della tensione in funzione della distanza tra le lastre.

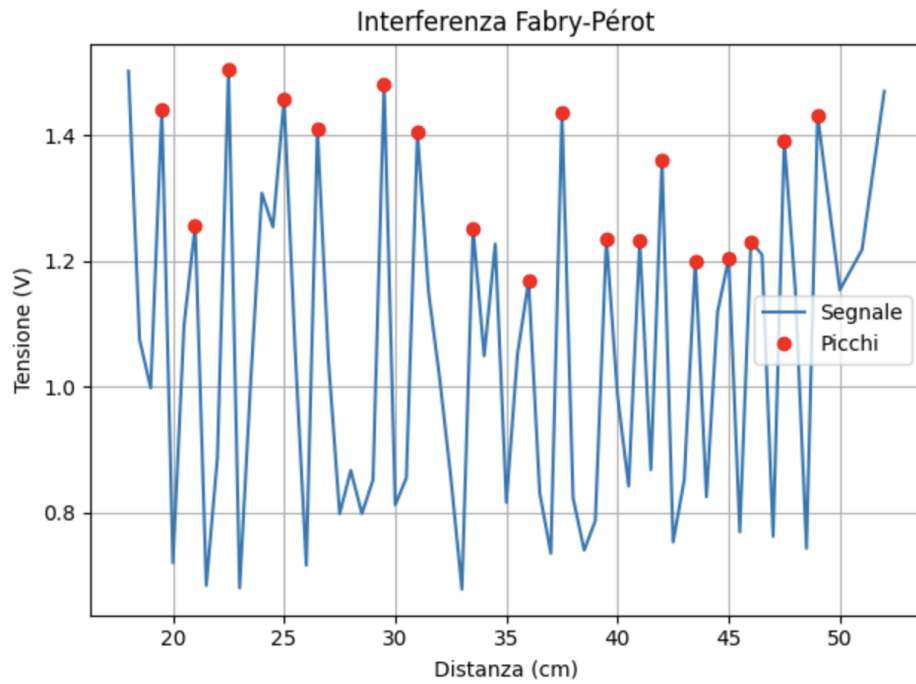


Figure 17: Andamento della tensione registrata in funzione della distanza tra le lastre dell'interferometro di Fabry-Perot. I picchi di interferenza sono stati identificati tramite la funzione `find_peaks` della libreria `scipy.signal`.

Come già fatto per lo studio dell'onda stazionaria tra emettitore e ricevitore (senza le lastre), i picchi di interferenza sono stati identificati tramite la libreria `scipy.signals` su python e successivamente analizzati.

La distanza media tra i massimi consecutivi Δd è stata calcolata e la lunghezza d'onda ricavata utilizzando:

$$\lambda = 2 \cdot \Delta d = 3.47 \text{ cm}$$

Questa relazione deriva dalla condizione di interferenza costruttiva tra i fronti d'onda riflessi nella cavità.

4.3 Conclusioni

L'esperimento ha permesso di osservare chiaramente la modulazione della figura di interferenza al variare della distanza tra le due lastre semiriflettenti. La presenza di picchi regolari nella tensione misurata dal ricevitore conferma la natura stazionaria dell'onda all'interno della cavità.

L'analisi dei picchi ha consentito di ricavare una stima della lunghezza d'onda pari a $\lambda = 3.4$ cm. Questo valore risulta significativamente diverso a quello misurato in precedenza.

Questa discrepanza può essere motivata da diversi fattori. In primo luogo, il set-up sperimentale era completamente differente: mentre l'esperimento iniziale prevedeva un'emissione diretta tra sorgente e ricevitore, in questo caso l'onda attraversa una cavità delimitata da due superfici parzialmente riflettenti, il che altera le condizioni di propagazione. Inoltre, l'uso di lastre semiriflettenti introduce riflessioni multiple e possibili disallineamenti che possono modificare l'effettiva lunghezza ottica del percorso. Anche la risposta in frequenza dell'apparato (horn, ricevitore, cavità) può influenzare il risultato, privilegiando la trasmissione di componenti a frequenze leggermente differenti.

In definitiva, sebbene l'ordine di grandezza sia compatibile, la differenza tra i due valori di λ è un'indicazione chiara del ruolo cruciale giocato dalle condizioni sperimentali sulla misura della lunghezza d'onda, rendendo anche inutile un t-test in quanto si otterrebbe un p-value di 0.

5 Interferenza: Doppia fenditura di Young

Nell'esperimento di Young, ciascuna delle due fenditure distanti d agisce come sorgente secondaria di onde coerenti. Un ricevitore posto a distanza R dal piano delle fenditure misura la tensione $V(\theta)$ in funzione dell'angolo θ rispetto alla normale al piano, centrata tra le fenditure (Figura 18). Le distanze dai centri delle fenditure al punto di osservazione sono

$$r_1 = \sqrt{\left(R \sin \theta - \frac{d}{2}\right)^2 + \left(R \cos \theta\right)^2}, \quad r_2 = \sqrt{\left(R \sin \theta + \frac{d}{2}\right)^2 + \left(R \cos \theta\right)^2}.$$

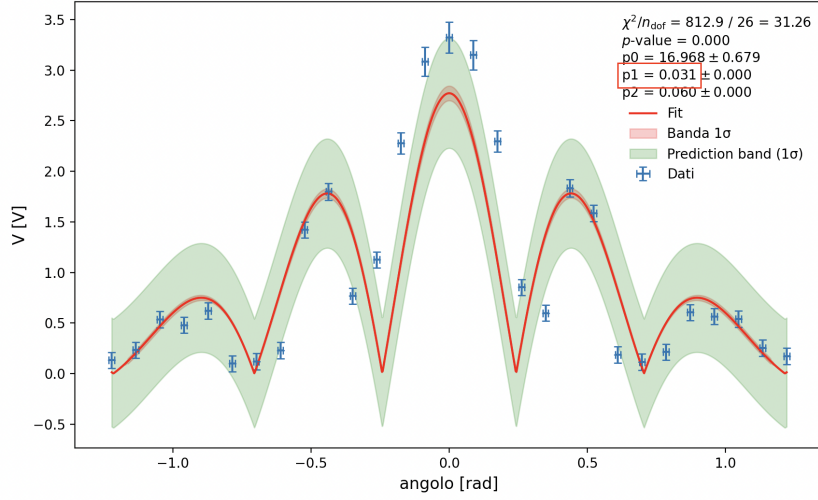


Figure 19: Fit dei dati secondo il modello a doppia fenditura di Young.

Dall'analisi dei parametri ottenuti abbiamo determinato la lunghezza d'onda del segnale:

$$\lambda_{\text{fit}} = 3.1 \text{ cm.}$$

5.2 Osservazioni

- Il valore ottenuto per la lunghezza d'onda,

$$\lambda_{\text{fit}} = (3.1213 \pm 0.0001) \text{ cm,}$$

è in accordo con il valore atteso per le microonde impiegate ($\sim 3 \text{ cm}$).

- Nonostante la coerenza del valore di λ_{fit} con le aspettative, i parametri statistici del fit indicano delle criticità. Infatti, osservando la Figura 19, la curva di fit (linea rossa) sembra seguire l'andamento generale dei dati sperimentali, cogliendo la posizione del massimo centrale e dei massimi laterali di primo ordine (attorno a $\pm 0.5 \text{ rad}$). Tuttavia, si notano delle discrepanze, specialmente per i massimi di secondo ordine (attorno a $\pm 1.0 \text{ rad}$), dove i dati sperimentali mostrano una maggiore dispersione e la curva di fit potrebbe non riprodurre accuratamente l'ampiezza o la fase. Anche l'ampiezza relativa dei picchi di primo ordine rispetto al massimo centrale potrebbe non essere perfettamente riprodotta.

6 Diffrazione di Bragg

La diffrazione di Bragg si verifica quando un fascio di onde (ad esempio onde radio o microonde) incide su un reticolo cristallino o, nel nostro caso, su un reticolo artificiale (cubo di Bragg) costituito da un insieme di strati uniformemente distanziati. La condizione di Bragg per il massimo di diffrazione è data da:

$$2d \sin \theta = n \lambda$$

dove:

- d è la distanza tra i piani reticolari (passo del reticolo),

- θ è l'angolo di incidenza (e uscita) misurato rispetto alla normale al reticolo,
- n è l'ordine di diffrazione (intero positivo),
- λ è la lunghezza d'onda del fascio incidente.

In pratica, variando l'angolo θ tra emettitore e ricevitore – entrambi dotati di horn per migliorare la direttività – si osservano picchi di tensione (corrispondenti a massimi di intensità) ogni volta che la relazione di Bragg è soddisfatta. Dall'angolo θ_{\max} in corrispondenza di un dato massimo di ordine n , si ricava la lunghezza d'onda:

$$\lambda = \frac{2d \sin(\theta_{\max})}{n}.$$

6.1 Analisi dei dati

Sono state registrate le seguenti misure di angolo (in gradi) e tensione V (in volt) per i massimo principali (primo e secondo ordine, $n = 1, 2$):

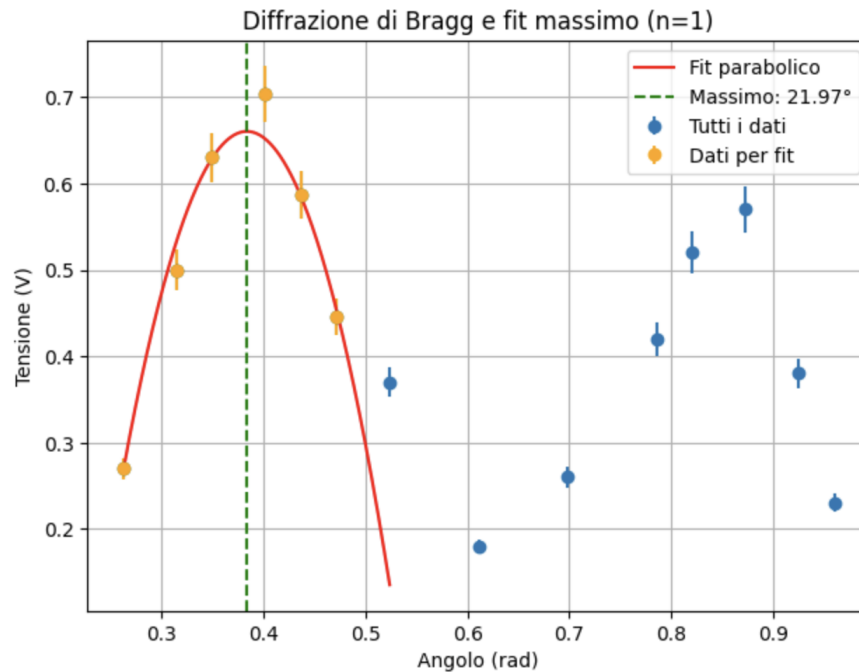


Figure 20: Plot dei dati sulla diffrazione di Bragg (e fit parabolico per massimo $n=1$)

Tra questi, il picco principale appare approssimativamente tra $\theta = 10^\circ$ e $\theta = 20^\circ$. Per ottenere una stima più accurata di θ_{\max} , si è eseguito un fit parabolico locale sui punti che circondano il massimo apparente come si vede anche in figura. In particolare:

- Sono stati selezionati i tre punti con $\theta_{\text{gradi}} = [10, 15, 20]$.
- Si è definita la funzione

$$V(\theta) = a\theta^2 + b\theta + c \quad (\theta \text{ in radianti}),$$

e si sono stimati a, b, c tramite `curve_fit`.

- Il vertice della parabola (angolo di massimo) è stato calcolato come

$$\theta_{\max} = -\frac{b}{2a}.$$

Dal fit si è ottenuto:

$$\theta_{\max} \approx 21.97^\circ \pm 0.15^\circ.$$

Calcolando il passo reticolare $d = 3.8$ cm, si calcola la lunghezza d'onda del primo ordine ($n = 1$):

$$\lambda_1 = 2d \sin(\theta_{\max}) \approx (2.86 \pm 0.07) \text{ cm}.$$

Studio del bias e confronto con la teoria

Nel corso dell'esperimento è stato inoltre tracciato il grafico teorico:

$$\theta(d) = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right)$$

per una lunghezza d'onda fissata, al variare del passo d , al fine di analizzare come si modifichi l'angolo di diffrazione in funzione della struttura del reticolo.

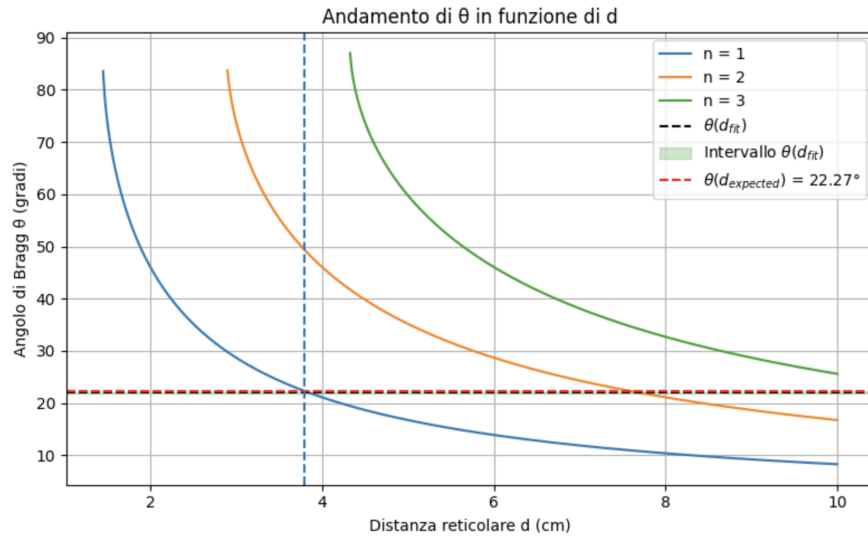


Figure 21: Andamento del passo reticolare in funzione dell'angolo

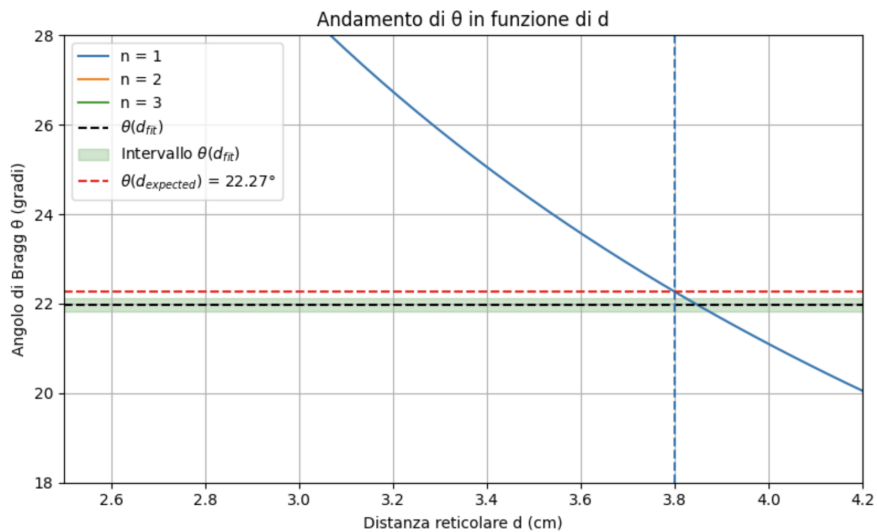


Figure 22: Andamento del passo reticolare in funzione dell'angolo zoomato

Questo confronto teorico ha permesso di verificare la coerenza tra il valore dell'angolo θ_{\max} ottenuto sperimentalmente e quello previsto dalla legge di Bragg per $n = 1$. Inoltre, ha messo in evidenza l'effetto del bias dovuto all'impostazione geometrica e al posizionamento dei dispositivi, che può alterare la corrispondenza diretta tra i valori ideali e quelli misurati.

6.2 Conclusioni

Dall'analisi delle misure di diffrazione di Bragg si ottiene una stima consistente della lunghezza d'onda:

$$\lambda \approx 2.89 \text{ cm} \quad (\text{primo ordine})$$

In sintesi, i risultati confermano la validità della legge di Bragg per la stima della lunghezza d'onda nel nostro set-up.

La lunghezza d'onda ottenuta con l'esperimento di diffrazione di Bragg risulta significativamente diversa da quella ricavata tramite l'interferometro di Fabry-Perot e dalla misura con la doppia fenditura di Young, rendendo poco significativi eventuali test statistici di confronto (ad esempio un t-test). Tuttavia, il valore trovato risulta compatibile con la lunghezza d'onda determinata nella prima parte dell'esperimento, in cui si è analizzata la geometria del fascio. In quel caso, un t-test tra le due misure restituisce un p-value di circa 30%, indicando una buona compatibilità entro le incertezze sperimentali.

7 Approfondimento: griglia come filtro polarizzatore

In questa fase, l'emettitore e il ricevitore sono stati mantenuti fissi e allineati per la massima trasmissione del segnale. Una griglia metallica, costituita da sbarre parallele con spaziatura $d \approx 1.54 \text{ cm}$, è stata interposta tra i due e ruotata attorno a un asse perpendicolare al piano delle sbarre e parallelo alla direzione di propagazione dell'onda. È stato misurato il segnale trasmesso V in funzione dell'angolo di rotazione α_{griglia} della griglia (dove $\alpha_{\text{griglia}} = 0$ corrisponde, per convenzione, alle sbarre orientate verticalmente, cioè perpendicolari alla polarizzazione orizzontale dell'onda incidente, per massima trasmissione).

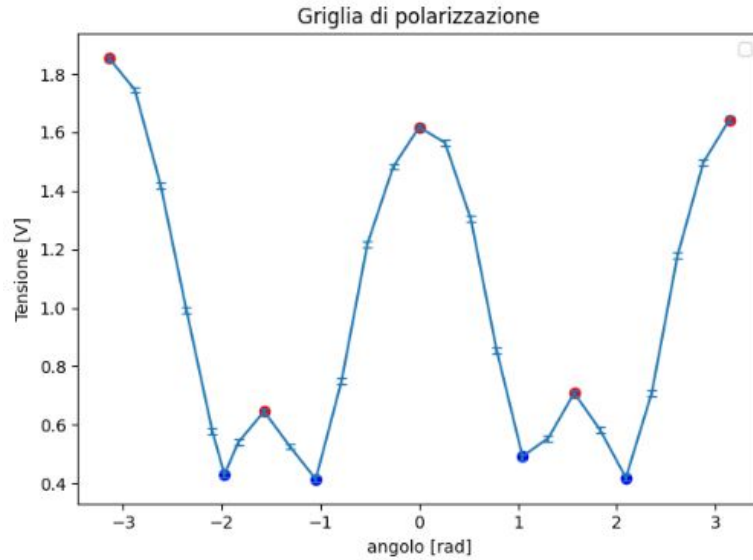


Figure 23

I risultati sperimentali, presentati in Figura 23, mostrano un comportamento che si discosta significativamente dalla Legge di Malus ($V \propto |\cos(\alpha_{\text{griglia}})|$), come evidenziato anche dal confronto in Figura 24. Sebbene si osservino massimi di trasmissione quando le sbarre sono perpendicolari alla polarizzazione dell'onda ($\alpha_{\text{griglia}} \approx 0, \pm\pi \text{ rad}$), appaiono dei massimi locali inattesi quando le sbarre sono parallele alla polarizzazione dell'onda ($\alpha_{\text{griglia}} \approx \pm\pi/2 \text{ rad}$). In queste configurazioni, la Legge di Malus predirebbe una trasmissione nulla. Inoltre, i minimi di trasmissione non si trovano esattamente a $\pm\pi/2 \text{ rad}$, ma appaiono spostati, approssimativamente a $\pm 60^\circ$ e $\pm 120^\circ$. Il dettaglio di questo comportamento anomalo nelle regioni attorno a $\pm\pi/2 \text{ rad}$ è visibile in Figura 25.

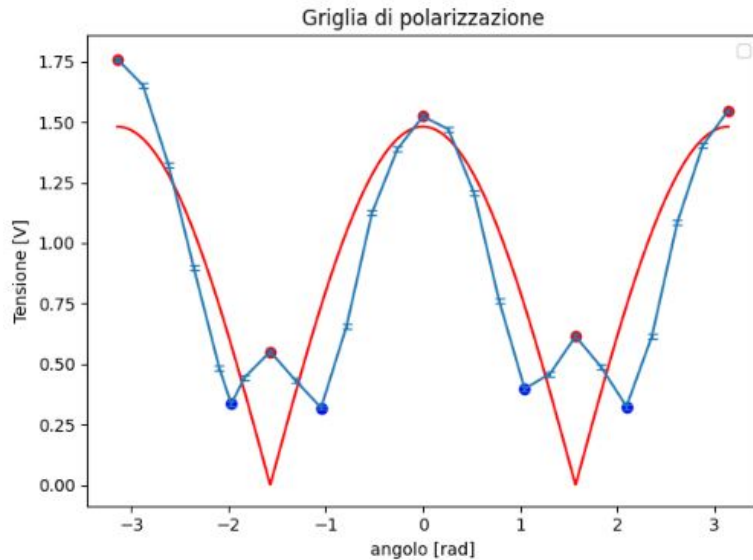


Figure 24: Confronto

La principale ragione ipotizzata di questa deviazione risiede nelle caratteristiche fisiche della griglia rispetto alla lunghezza d'onda delle microonde ($\lambda \approx 3 \text{ cm}$). Con una spaziatura tra le sbarre $d \approx 1.54 \text{ cm}$, il rapporto $\lambda/d \approx 1.95$ indica che d è dell'ordine di $\lambda/2$. In tale regime, la griglia non agisce come un polarizzatore

ideale, ma piuttosto come una struttura diffrattiva periodica. Quando le sbarre sono orientate parallelamente al campo elettrico incidente (a $\alpha_{\text{griglia}} \approx \pm\pi/2 \text{ rad}$), l'interazione onda-struttura diventa particolarmente complessa. Le sbarre, aventi dimensioni comparabili con $\lambda/2$, possono entrare in risonanza con l'onda incidente, comportandosi come un array di piccole antenne che riemettono o diffondono l'energia in avanti, causando così una trasmissione anomala invece di un blocco. Questo fenomeno, talvolta associato alle “anomalie di Wood”, spiega i massimi locali osservati. I minimi effettivi, spostati rispetto alle posizioni previste dalla Legge di Malus, sono una conseguenza di questa complessa interazione tra gli effetti di polarizzazione e diffrazione/risonanza. La presenza di minimi non nulli suggerisce anche una non idealità intrinseca del polarizzatore o la presenza di componenti di segnale non perfettamente polarizzate.

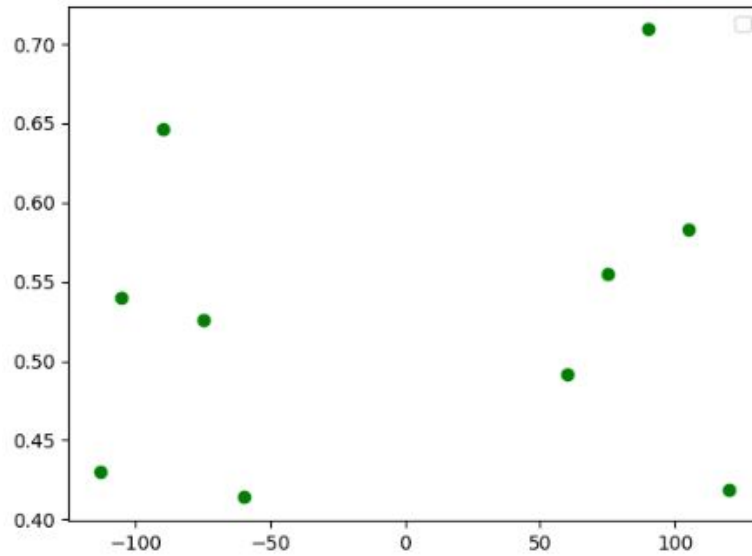


Figure 25: Comportamento anomalo vicino ai massimi locali

7.0.1 Conclusioni:

- La griglia, inizialmente posta in orizzontale, garantisce il massimo passaggio della radiazione. Questo significa che il trasmettitore genera il segnale con campo elettrico polarizzato verticalmente.
- Notiamo, nel grafico 23, che il primo massimo è superiore agli altri due, tuttavia, per rotazioni di 180 gradi, ci aspetteremmo un comportamento periodico per simmetria del sistema. Invece si ha un $\Delta V = 0.25V$ tra i massimi. Questo fenomeno è da attribuire ad errori sistematici importanti.

8 Appendice

Table 1: Studio dell'ampiezza in funzione dell'angolo.

Angolo ($^{\circ}$)	Tensione (V)
0.000	3.520
10.000	3.240
20.000	2.050
30.000	0.680
40.000	0.418
50.000	0.139
60.000	0.022
70.000	0.015
80.000	0.013
90.000	0.030
-10.000	3.520
-20.000	2.617
-30.000	1.604
-40.000	0.730
-50.000	0.270
-60.000	0.101
-70.000	0.008
-80.000	0.005
-90.000	0.002

Table 5: Dati sperimentali dell'esperimento di Young: Tensione media in funzione dell'angolo.

Angolo ($^{\circ}$)	Tensione Media (V)	Angolo ($^{\circ}$)	Tensione Media (V)
-70.000	0.131	5.000	3.150
-65.000	0.241	10.000	2.297
-60.000	0.537	15.000	0.852
-55.000	0.548	20.000	0.598
-50.000	0.611	25.000	1.833
-45.000	0.098	30.000	1.585
-40.000	0.128	35.000	0.186
-35.000	0.228	40.000	0.115
-30.000	1.421	45.000	0.213
-25.000	1.798	50.000	0.605
-20.000	0.766	55.000	0.565
-15.000	1.125	60.000	0.539
-10.000	2.293	65.000	0.256
-5.000	3.085	70.000	0.171
0.000	3.323		

Table 2: Misure con trasmettitore a fine corsa sul goniometro: tensione in funzione dell'angolo.

Angolo ($^{\circ}$)	Tensione (V)
0.000	4.050
10.000	3.090
20.000	1.704
30.000	0.750
40.000	0.343
50.000	0.131
60.000	0.029
70.000	0.026
80.000	0.018
90.000	0.004
-10.000	3.780
-20.000	1.920
-30.000	1.050
-40.000	0.455
-50.000	0.156
-60.000	0.045
-70.000	0.018
-80.000	0.012
-90.000	0.002

Table 3: Dati finali per il decadimento $1/r$: distanza r_{fin} in funzione del segnale V_{fin} .

Distanza r_{fin} (cm)	Tensione V_{fin} (V)
34.900	2.950
36.500	2.850
37.850	2.810
39.200	2.760
40.700	2.690
42.300	2.550
43.600	2.480
45.100	2.450
46.500	2.360
47.900	2.320

Table 4: Dati sperimentali per la determinazione dell'angolo di Brewster: Tensione in funzione dell'angolo di incidenza.

Angolo di Incidenza ($^{\circ}$)	Tensione (V)
0.000	2.606
10.000	2.256
20.000	2.420
30.000	2.424
35.000	2.554
40.000	2.575
45.000	2.717
50.000	2.646
52.500	2.778
54.000	2.882
55.000	2.914
56.000	2.894
57.500	2.804
60.000	2.247
65.000	1.382

Table 6: Dati sperimentali per l'interferometro di Fabry-Perot: distanza tra specchi in funzione del segnale.

Dist. (cm)	V (V)	Dist. (cm)	V (V)	Dist. (cm)	V (V)	Dist. (cm)	V (V)
18.000	1.502	26.500	1.410	34.500	1.227	42.500	0.753
18.500	1.075	27.000	1.040	35.000	0.816	43.000	0.852
19.000	0.998	27.500	0.798	35.500	1.052	43.500	1.200
19.500	1.441	28.000	0.867	36.000	1.168	44.000	0.825
20.000	0.720	28.500	0.798	36.500	0.831	44.500	1.119
20.500	1.098	29.000	0.852	37.000	0.735	45.000	1.204
21.000	1.257	29.500	1.482	37.500	1.437	45.500	0.769
21.500	0.684	30.000	0.812	38.000	0.823	46.000	1.231
22.000	0.887	30.500	0.855	38.500	0.740	46.500	1.210
22.500	1.504	31.000	1.405	39.000	0.787	47.000	0.762
23.000	0.680	31.500	1.150	39.500	1.235	47.500	1.392
23.500	1.010	32.000	1.013	40.000	0.986	48.000	1.153
24.000	1.308	32.500	0.856	40.500	0.842	48.500	0.743
24.500	1.254	33.000	0.678	41.000	1.233	49.000	1.432
25.000	1.457	33.500	1.252	41.500	0.868	50.000	1.154
25.500	1.056	34.000	1.049	42.000	1.361	51.000	1.218
26.000	0.716					52.000	1.470

Table 7: Dati sperimentali per la griglia di polarizzazione: ampiezza in funzione dell'angolo.

Angolo ($^{\circ}$)	Tensione (V)	Angolo ($^{\circ}$)	Tensione (V)
-180.000	1.854	0.000	1.618
-165.000	1.746	15.000	1.565
-150.000	1.419	30.000	1.304
-135.000	0.991	45.000	0.855
-120.000	0.578	60.000	0.492
-113.000	0.430	75.000	0.555
-105.000	0.540	90.000	0.709
-90.000	0.646	105.000	0.583
-75.000	0.526	120.000	0.419
-60.000	0.414	135.000	0.709
-45.000	0.751	150.000	1.180
-30.000	1.219	165.000	1.498
-15.000	1.483	180.000	1.643

Table 8: Dati sperimentali per la diffrazione di Bragg: Tensione in funzione dell'angolo di osservazione.

Angolo ($^{\circ}$)	Tensione (V)
15.000	0.270
18.000	0.500
20.000	0.630
23.000	0.703
25.000	0.587
27.000	0.446
30.000	0.370
35.000	0.180
40.000	0.260
45.000	0.420
47.000	0.520
50.000	0.570
53.000	0.380
55.000	0.230