

Microonde

Giovanni Laganà, Gioele Lo Presti, Gabriele Manzi

30 Marzo 2023

Indice

1	Apparato	2
2	Presa dati ed errori	4
3	Onde Stazionarie	5
3.1	Tipo di fronte d'onda	5
3.1.1	Tensione in funzione della distanza r	5
3.1.2	Tensione in funzione dell'angolo θ	7
3.2	Lunghezza d'onda	7
4	Polarizzazione, legge di Malus	8
4.1	Direzione di polarizzazione delle onde emesse	9
5	Riflessione	10
5.1	Discussione risultati	10
6	Rifrazione	11
6.1	Discussione del risultato	11
7	Angolo di Brewster	12
8	Interferometro di Fabry-Perot	13
8.1	Confronto lunghezze d'onda	14
9	Conclusione	14
10	Appendice A	15
10.1	Ipotesi fronte d'onda sferico	15
10.2	Ipotesi fronte d'onda piano	16
11	Appendice B (Tabelle dati)	18
11.1	tensione - distanza	18
11.2	tensione - angolo	18
11.3	polarizzazione, legge di Malus	19
11.4	riflessione	19
11.5	angolo di Brewster	20
11.6	Fabry-Perot	20

Abstract

In questo esperimento si sono studiate le caratteristiche delle microonde attraverso l'analisi di vari fenomeni. Si sono valutate le caratteristiche del fascio emesso dalla sorgente e la risposta del ricevitore; si è osservata la dipendenza dell'intensità misurata al ricevitore dalla distanza della sorgente e dall'angolo tra sorgente e ricevitore per studiare il tipo di fronte d'onda. Inoltre si è osservata la formazione di onde stazionarie e quindi si è calcolata la lunghezza d'onda. Si è studiata la polarizzazione delle onde, verificando la legge di Malus e verificando la direzione di polarizzazione con un filtro.

Si sono poi studiate riflessione (verificando la legge di Cartesio) e rifrazione delle onde, Inoltre si è studiato l'angolo di Brewster utilizzando un prisma di polistirolo riempito con pellets di styrene.

1 Apparato

L'apparato (Figura [1]) è costituito da un emettitore di microonde ed un ricevitore. Entrambi sono dotati di horn di forma rettangolare.

L'emettitore funge da sorgente di onde elettromagnetiche coerenti e polarizzate linearmente ed anche il ricevitore è polarizzato.

Emettitore e ricevitore sono disposti su una guida che permette di variare sia la distanza r tra i due, sia l'angolo θ che intercorre tra di loro.

L'emettitore utilizza un diodo Gunn in una cavità di risonanza di $10.525GHz$, tale diodo si comporta come un resistore che oscilla nella banda delle microonde. Analogamente il ricevitore utilizza una medesima cavità di risonanza con un diodo Schottky.

Si noti che la sorgente si può considerare circa puntiforme e locata a circa $5cm$ dalla fine dell'horn (linea in matita sull'horn in Figura [1], schema in Figura [2]). Analogamente possiamo considerare il punto effettivo di ricezione del segnale a circa $5cm$ all'interno dell'horn del ricevitore.

Si possono quindi considerare le onde come generate, appunto, nel punto di emissione effettiva ("Effective Point of Emission of Trasmitter Signal" Figura [2]).

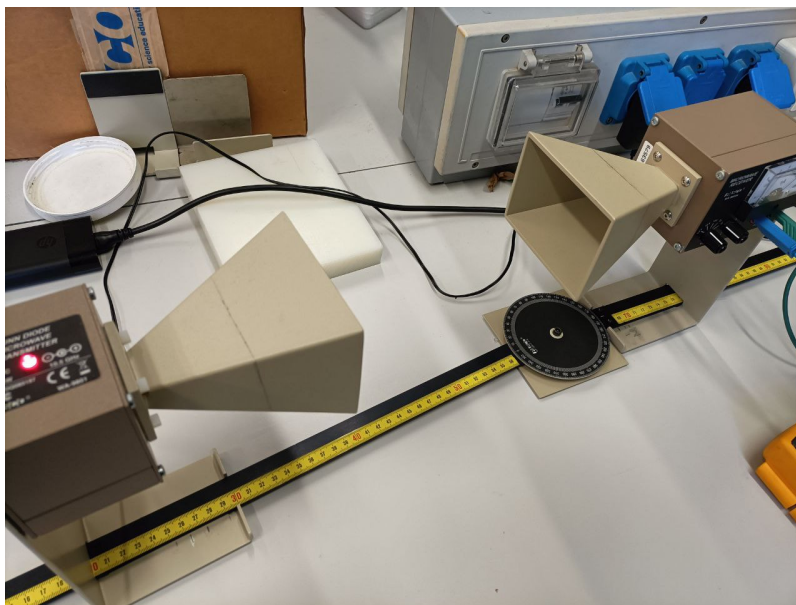


Figura 1. Emettitore e ricevitore su guida: *l'emettitore utilizza un diodo Gunn per emettere microonde che vengono riflesse e focalizzate dall'horn rettangolare metallico; analogamente il ricevitore dotato dello stesso horn rivela l'intensità delle microonde mediante un diodo Schottky.*

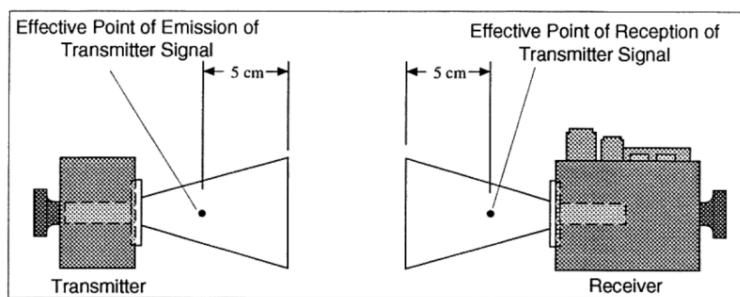


Figura 2. Schema dell'apparato: *il punto di effettiva trasmissione/ricezione si trova a circa 5cm all'interno dell'horn.*

Oltre a questi componenti si sono utilizzati una griglia orientata di tubi metallici ed un prisma di polistirolo riempibile di pellets di styrene.

È importante notare che il ricevitore non è riferito a una scala assoluta e il suo segnale può essere amplificato o traslato agendo rispettivamente sul selettore di scala o guadagno o sulla manopola che modifica l'offset. Inoltre, per le misurazioni, è possibile collegare al ricevitore un multimetro digitale, in questo caso la lettura deve essere effettuata in tensione e non in corrente.

2 Presa dati ed errori

I dati essenziali raccolti durante l'esperimento sono le distanze tra l'emettitore ed il ricevitore e l'angolo tra essi. Per la misurazione degli angoli, abbiamo utilizzato il goniometro presente sulla guida (Figura [1]).

Le distanze sono state misurate tra il supporto metallico che collega l'emettitore e il ricevitore alla guida e i punti di effettiva emissione/ricezione all'interno degli horn, δ_E e δ_R . In particolare, abbiamo registrato le distanze sull'apposita scala della guida per l'emettitore e il ricevitore (sottraendo i due valori visto che la guida è sostanzialmente un metro), e poi abbiamo sottratto δ_E e δ_R . In questo modo, siamo stati in grado di determinare la distanza reale tra i punti di emissione e ricezione. Questo procedimento è stato seguito per consentire una lettura più agevole delle distanze sulla guida.

Si noti che dunque mentre l'errore sugli angoli è dato dall'incertezza dello strumento $\sigma_\alpha = 1$, quello sulle distanze è dato dalla propagazione degli errori. In particolare l'incertezza del metro sulla guida è di $0.5mm$, la distanza effettiva si è calcolata come:

$$r = l_E - l_R - \delta_E - \delta_R$$

da cui, propagando l'errore si ha:

$$\sigma_r^2 = (\sigma_{l_E})^2 + (-\sigma_{l_R})^2 + (-\sigma_{\delta_E})^2 + (-\sigma_{\delta_R})^2$$

Quindi, dato che tutti gli errori sulle distanze sono il medesimo, σ_d , abbiamo:

$$\sigma_r = \sqrt{4\sigma_d^2} = 2\sigma_d$$

I valori delle delta sono:

- $\delta_E = (12.2 \pm 0.05)cm$
- $\delta_R = (16.3 \pm 0.05)cm$

Si noti che i dati raccolti si possono trovare tabulati nell' Appendice B (Tabelle dati).

3 Onde Stazionarie

Per com'è configurato l'apparato, quando vengono emesse le onde, si instaurano onde stazionarie, in quanto si forma una cavità di Fabry-Perot.

Questo è dovuto al fatto che gli horn non sono riflettori perfetti delle onde elettromagnetiche, ma agiscono come riflettori parziali. Di conseguenza, la radiazione proveniente dal trasmettitore rimbalza avanti e indietro tra gli horn del trasmettitore e del riflettore (diminuendo in ampiezza ad ogni passaggio). Tuttavia, se la distanza tra i punti effettivi di trasmissione e ricezione è uguale a $n\lambda/2$ (con $n \in \mathbb{N}$), allora tutte le onde riflesse più volte che entrano nell'horn del ricevitore saranno in fase con l'onda primaria trasmessa. Quando ciò accade, la lettura del misuratore sarà al massimo. Pertanto, grazie all'interazione tra gli horn del trasmettitore e del riflettore, si generano onde stazionarie all'interno della cavità.

Per questa ragione quindi si è scelto di misurare solamente i punti di massimo di queste onde stazionarie per studiare la dipendenza dell'intensità dalla distanza r tra emettitore e ricevitore e dall'angolo θ tra i due.

3.1 Tipo di fronte d'onda

Per capire come sono i fronti d'onda si può studiare la dipendenza della tensione misurata sul multimetro (che è proporzionale all'intensità media dell'onda) dalla distanza r tra emettitore e ricevitore e dall'angolo θ tra questi.

L'ipotesi iniziale era quella di fronti d'onda sferici, si è tuttavia osservato che i dati divergono dal modello teorico per una tale tipologia di fronti d'onda. Tuttavia non sono nemmeno compatibili con fronti d'onda piani, ma sembrano invece essere una qualche combinazione dei due. Si è allora scelto di approssimare con una combinazione lineare (come si vedrà successivamente). I risultati ottenuti inizialmente considerando fronti d'onda sferici e piani sono riportati nell'Appendice A.

3.1.1 Tensione in funzione della distanza r

Per un'onda sferica l'intensità media è proporzionale al quadrato del campo elettrico, mentre per un fronte d'onda piano è proporzionale al campo. Si è allora utilizzata una combinazione lineare del tipo $p_0 E^2 + p_1 E$.

Per studiare l'intensità in funzione della distanza r , abbiamo fissato l'angolo θ a 0° (ossia emettitore e ricevitore allineati) e abbiamo variato r , misurando la tensione registrata dal multimetro collegato al ricevitore per ciascuna distanza (Tabella [1]). Queste misure sono state effettuate solo sui massimi delle onde stazionarie, come spiegato nella sezione precedente (Tabella [1]).

Il modello teorico per l'intensità prevede una relazione del tipo:

$$I(r) = \alpha \cdot \frac{I_0}{r^2} + \beta \cdot \frac{I_0}{r} \quad (1)$$

dove I_0 è l'intensità alla sorgente. Nel nostro caso tuttavia la misura è quella della tensione che è però proporzionale all'intensità $V(r) = \gamma I(r)$ e dunque possiamo riscrivere la relazione come:

$$V(r) = \frac{p_0}{r^2} + \frac{p_1}{r} \quad (2)$$

dove si sono incorporate tutte le costanti.

Si sono quindi fittati i dati utilizzando ROOT. Come parametri iniziali si sono utilizzati $p_0 = p_1 = 1.2$, ovvero circa la metà di V_0 , il quale si è stimato ad occhio dal grafico.

Si noti che si sono eseguite molteplici operazioni di fit facendo variare i parametri iniziali in un range del 10% e si è scelto quello con il minor χ^2 (tale metodo è stato applicato per tutti i fit in questo esperimento). Di seguito i risultati del fit.

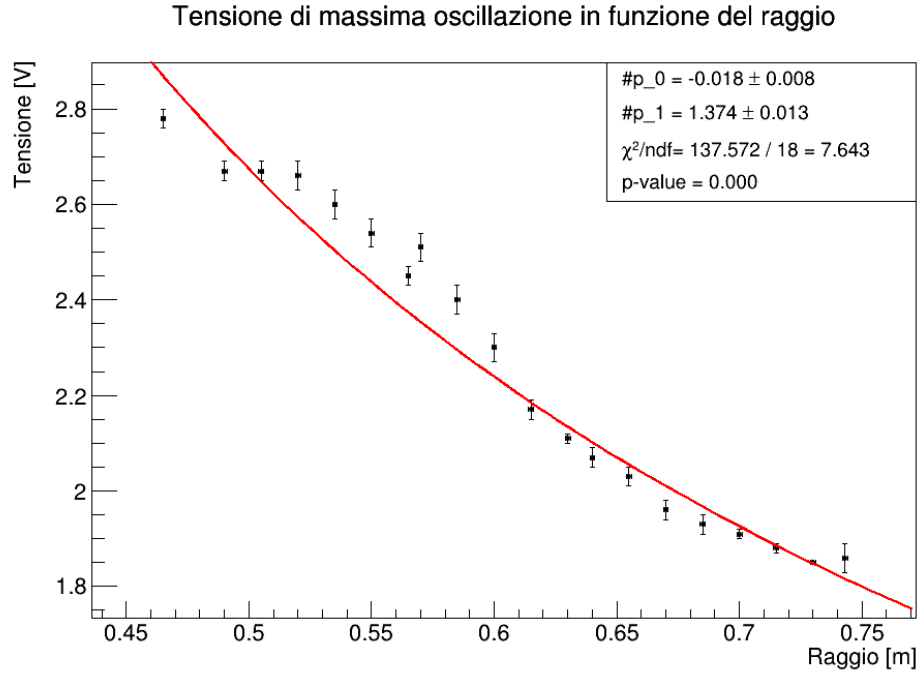


Figura 3. *Fit dei dati tensione in funzione della distanza r : la tensione registrata dal ricevitore, che è proporzionale all'intensità delle microonde, diminuisce allontanando la sorgente. Si sono effettuate le misure in corrispondenza dei massimi delle onde stazionarie che si instaurano tra i due horn i quali formano una cavità di Fabry-Perot.*

3.1.2 Tensione in funzione dell'angolo θ

Per la tensione in funzione dell'angolo ci si aspetta un andamento gaussiano. In particolare si sono raccolti dati (Tabella [2]) in un range di angoli tra 0° e 45° , dunque ci aspettiamo di osservare i valori della tensione lungo una gaussiana, in particolare la parte di gaussiana con $V > \mu = 0$ se μ è la media di questa.

Si è quindi effettuato il fit mediante ROOT, utilizzando parametri iniziali stimati ad occhio dal grafico.

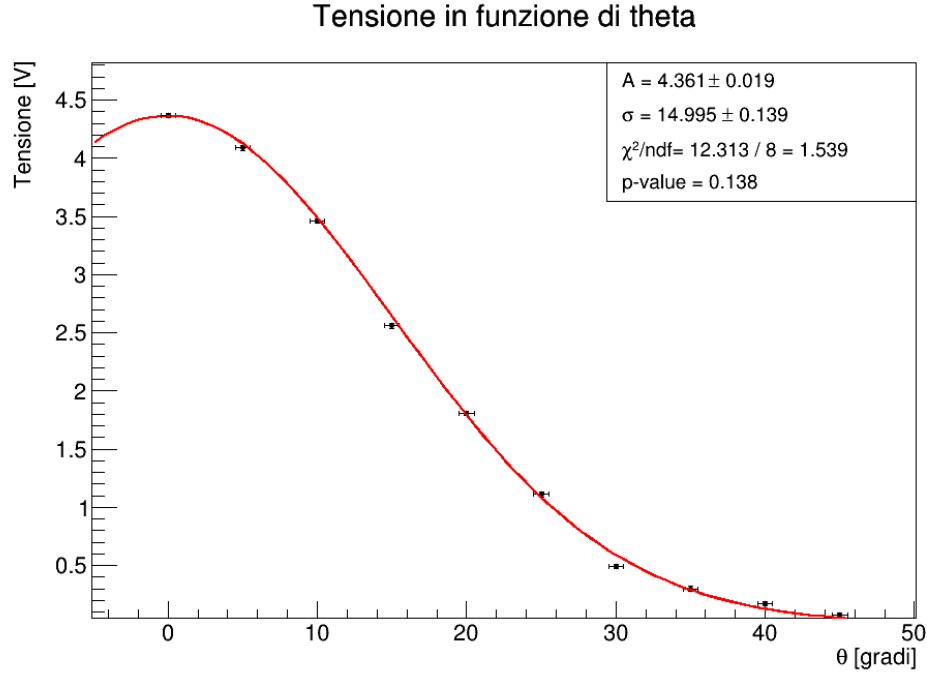


Figura 4. *Fit dei dati tensione in funzione dell'angolo θ : si sono presi i dati variando l'angolo tra emettitore e ricevitore (sempre sui massimi delle onde stazionarie che si instaurano nella cavità di Fabry-Perot) con un range di angoli tra 0° e 45° . L'andamento segue una distribuzione gaussiana.*

3.2 Lunghezza d'onda

Utilizzando gli stessi dati del punto (4.0.1) possiamo calcolare la lunghezza d'onda sfruttando il fatto che quando si misura la tensione massima vale la relazione $r_n = n\lambda/2$. Quindi misurando la distanza r di due massimi successivi possiamo ricavare lambda come:

$$\lambda = 2 \cdot (r_{n+1} - r_n) \quad (3)$$

Con errore propagato:

$$\sigma_\lambda = \sqrt{8\sigma_d^2} = 2\sqrt{2} \cdot \sigma_d$$

Essendo gli errori tutti uguali si è quindi fatta la media dei λ trovati.¹

$$\bar{\lambda} = (2.9 \pm 0.1) \text{ cm}$$

¹L'errore è quindi il medesimo dell'errore su un singolo lambda, infatti $\sigma_\lambda^2 = \sum (1/N)^2 \cdot \sigma_\lambda = \sigma_\lambda$.

4 Polarizzazione, legge di Malus

Secondo la legge di Malus, l'intensità I di un'onda sferica polarizzata linearmente che attraversa un filtro polarizzatore, orientato secondo un certo angolo α rispetto alla direzione di polarizzazione dell'onda, si determina attraverso la formula:

$$I(\alpha) = I_0 \cdot \cos^2(\alpha) \quad (4)$$

In questo caso, α rappresenta l'angolo formato tra la direzione del campo elettrico e l'asse di trasmissione del filtro.

Ancora una volta si sfrutta la proporzionalità tra l'intensità e la tensione misurata con il multimetro collegato al ricevitore per scrivere:

$$V(\alpha) = V_0 \cdot \cos^2(\alpha) \quad (5)$$

Mentre per un onda piana abbiamo:

$$V(\alpha) = V_0 \cdot |\cos(\alpha)| \quad (6)$$

Dunque facendo una combinazione lineare delle due e unendo le varie costanti si ottiene:

$$V(\alpha) = p_0 \cdot \cos^2(\alpha) + p_1 \cdot |\cos(\alpha)| \quad (7)$$

Il ricevitore, polarizzato, si comporta essenzialmente come un misuratore di onde elettromagnetiche, con un filtro polarizzatore integrato. Si è dunque proceduto ruotando il ricevitore sul suo asse, simulando una rotazione del filtro polarizzatore, e si è osservato come ciò influenzi il segnale registrato dal ricevitore.

Durante il rilevamento di queste misure si è tenuta la distanza tra ricevitore ed emettitore $r = (36.5 \pm 0.05)cm$ (Tabella [3]).

Si sono quindi convertiti gli angoli da gradi a radianti e si sono fittati i dati utilizzando ROOT (di nuovo si sono eseguiti molteplici fit). Come parametri iniziali si sono utilizzati, come in precedenza (sezione 3.1.1), $p_0 = p_1 = 1.2$. Di seguito i risultati.

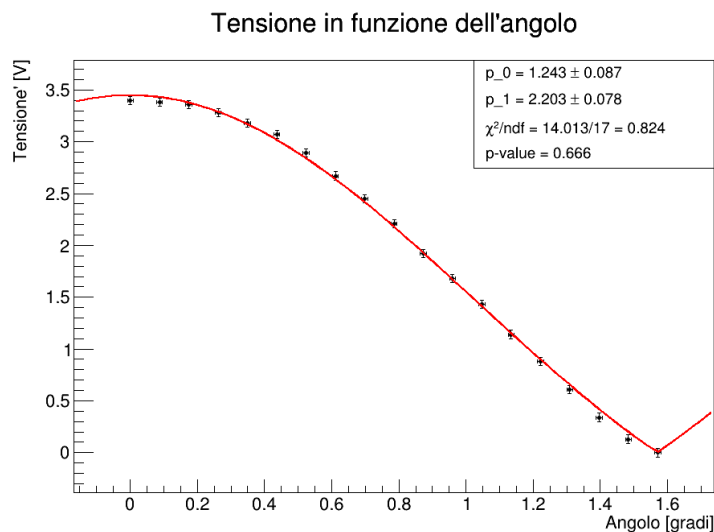


Figura 5. Fit dei dati di polarizzazione: l'emettitore di microonde produce onde polarizzate linearmente ed il ricevitore agisce anche come un filtro di polarizzazione. Si sono presi i dati ruotando l'emettitore l'angolo l'asse che lo congiunge al ricevitore.

4.1 Direzione di polarizzazione delle onde emesse

Si può studiare la direzione di polarizzazione delle onde emesse frapponendo un filtro polarizzante tra emettitore e ricevitore. Il filtro è costituito da barre metalliche parallele su un struttura costituita di un materiale dielettrico (Figura [6]).

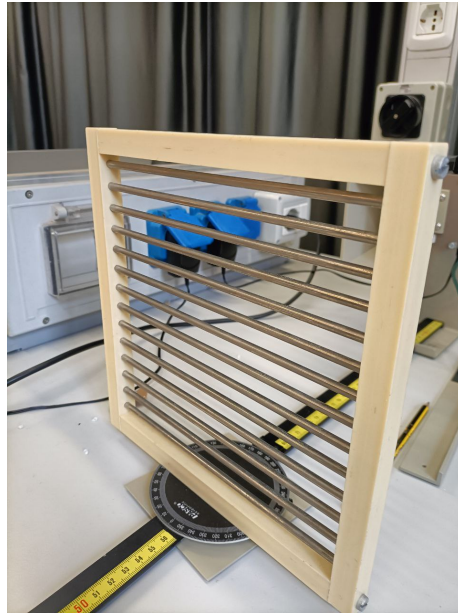


Figura 6. *Griglia polarizzante: costituita da barre metalliche conduttrici disposte in parallelo, in un frame di materiale dielettrico; blocca la componente delle onde polarizzata parallelamente alla direzione di conduzione, ovvero la direzione delle barre metalliche.*

Il filtro si comporta da conduttore lungo la direzione delle barre e da dielettrico nell'altra, quindi mettendo sorgente e rivelatore orientati nello stesso modo si può ruotare il filtro affinché le onde vengano bloccate (perciò il ricevitore non misura nulla), ovvero quando la direzione di conduzione è parallela alla direzione di polarizzazione e quindi alla direzione delle barre.

Si è dunque scoperto che le onde emesse sono polarizzate parallelamente al lato maggiore dell'horn.

5 Riflessione

Si può utilizzare una lastra metallica per riflettere le microonde. Si è posizionata una tale lastra sulla parte rotante della guida e si sono misurati angolo di incidenza e angolo di riflessione (Tabella [4]).

Ci si aspetta che questi due angoli siano uguali, come descritto dalla legge di Cartesio.

Si è quindi effettuato il fit della relazione lineare $\theta_i = m\theta_r$ con ROOT, utilizzando come parametro iniziale $m = 1$.

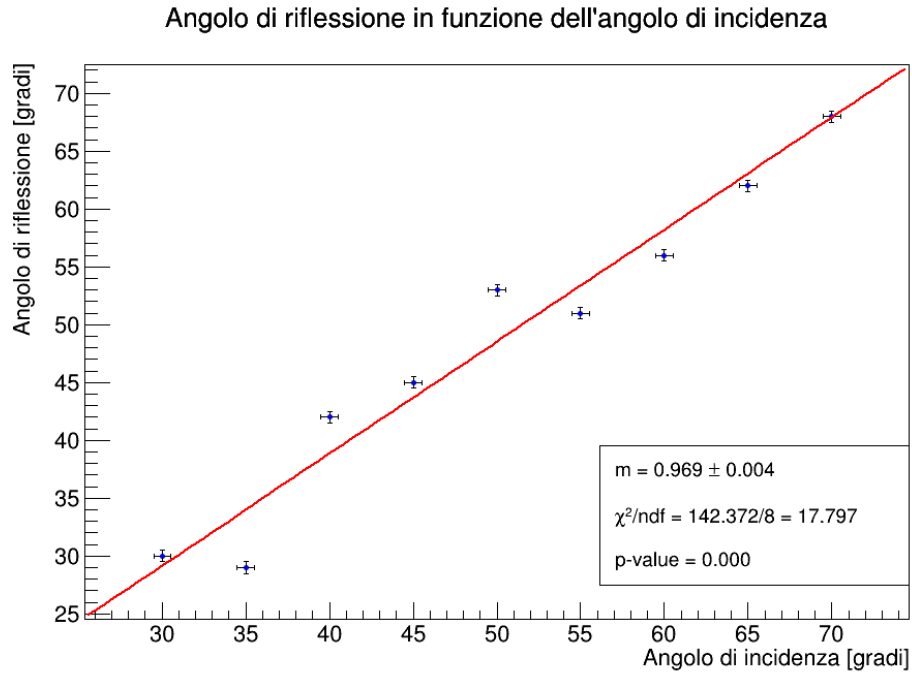


Figura 7. Fit dati riflessione: si è posizionata una lastra metallica (che agisce da riflettore) tra ricevitore ed emettitore e si è variato l'angolo di incidenza delle onde

5.1 Discussione risultati

Si osserva che il fit non è accettabile nemmeno con una soglia del 1%, tuttavia l'andamento lineare con $m = 1$ è riconoscibile nei dati quantomeno qualitativamente. Possibili fonti di errore potrebbero essere legate alla complessità delle onde che si instaurano per via delle varie riflessioni (si ricordi che anche gli horn riflettono parzialmente).

Si è infatti notato che quando si stavano prendendo le misure c'erano diversi picchi dell'intensità di corrente misurata dal ricevitore, di cui il maggiore corrisponde all'angolo di riflessione del "centro dell'onda" (quello di interesse), è tuttavia possibile che si siano a volte misurati massimi locali vicini a quello assoluto.

6 Rifrazione

Si può utilizzare un prisma di polistirolo riempito di pellets di styrene per diffrangere le microonde. Se posizioniamo il prisma in modo tale che questo abbia il cateto lungo perpendicolare alla direzione delle onde emesse (Figura [8]) allora si verificherà solo una diffrazione, poiché quando l'onda incontra per la prima volta il prisma lo fa ortogonalmente, quindi secondo la legge di Snell $n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_r)$; ma $\theta_i = 0$ (è l'angolo rispetto alla normale della superficie) e dunque $\theta_r = 0$.

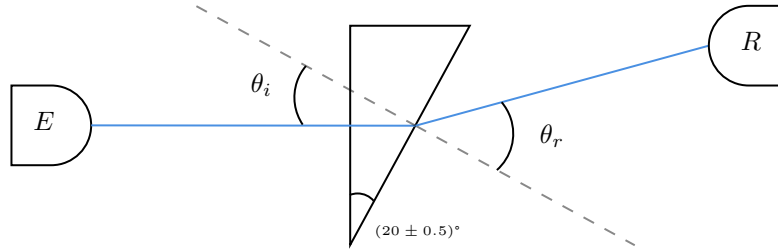


Figura 8. *Schema apparato sperimentale per rifrazione: le onde emesse vengono fatte incidere ortogonalmente con un cateto del prisma in modo tale che avvenga una sola rifrazione quando le onde incidono con l'ipotenusa.*

Si è inizialmente utilizzato il prisma vuoto e verificato che le microonde passassero dritte attraverso, ovvero non ci fosse rifrazione $\theta_{r0} = 0^\circ$. Ciò significa che i bordi di polistirolo (spessore $\approx 2\text{cm}$) non rifrangono le microonde.

Si è poi riempito il prisma con i pellets e ruotato il ricevitore fino a trovare il massimo dell'intensità di corrente, si è quindi misurato l'angolo di rifrazione $\theta_{r1} = (29 \pm 0.5)^\circ$.

Si è quindi potuto calcolare l'indice di rifrazione dello styreen come:

$$n_s = \frac{\sin(\theta_r)}{\sin(\theta_i)} \quad (8)$$

dove si considera 1 l'indice di rifrazione dell'aria. Inoltre θ_i è per geometria uguale all'angolo del prisma ovvero $(20 \pm 0.5)^\circ$. L'errore associato si ottiene, tramite propagazione, come:

$$\sigma_{n_s}^2 = \left(\frac{\cos(\theta_r)}{\sin(\theta_i)} \cdot \sigma_{\theta_r} \right)^2 + \left(\frac{-\sin(\theta_r) \cos(\theta_i)}{\sin^2(\theta_i)} \cdot \sigma_{\theta_i} \right)^2$$

Otteniamo quindi:

$$n_s = (1.42 \pm 4.10)$$

6.1 Discussione del risultato

È evidente che il risultato ottenuto non è significativo, infatti l'errore è maggiore del valore stesso.

L'errore in n_s è grande rispetto al suo valore perché la funzione (3) è altamente sensibile alle variazioni di θ_r e θ_i , specialmente quando questi angoli sono piccoli. Questa sensibilità si riflette nelle derivate parziali di n_s rispetto a θ_r e θ_i , che compaiono nella formula di propagazione dell'errore.

7 Angolo di Brewster

Quando una radiazione elettromagnetica incide su un materiale dielettrico, parte di questa viene riflessa e parte viene rifratta.

Se tale radiazione è polarizzata linearmente e parallelamente alla superficie di incidenza, allora l'intensità della componente riflessa dipenderà dall'angolo di incidenza. In particolare, esiste un angolo specifico, chiamato angolo di Brewster, a cui la radiazione riflessa si estingue completamente e quindi quella trasmessa è massima.

Le misurazioni (Tabelle [5] e [6]) si sono fatte guardando la trasmissione, e quindi cercando i massimi. Per la simmetria del sistema ci sono due massimi, simmetrici rispetto all'asse congiungente emettitore e ricevitore. Per ottenere una migliore precisione nella stima dei massimi si sono raccolti dati attorno a questi (trovati guardando l'amperometro sul ricevitore) che in prima approssimazione possono essere rappresentati da delle parabole.

Si osservi che è necessario conoscere la direzione di polarizzazione delle onde emesse, in quanto questa dev'essere parallela al piano di incidenza, ovvero il "piano del tavolo". Tale informazione si era ricavata nella sezione precedente permettendo quindi di orientare emettitore e ricevitore in maniera corretta.

Si sono quindi fittate le due parabole dei massimi con ROOT (utilizzando parametri iniziali scelti ad occhio dal grafico). Si sono così ottenuti $\theta_{M1} = (55.41 \pm 0.05)^\circ$ e $\theta_{M2} = (51.86 \pm 0.08)^\circ$ (Figura [9]). Tali angoli si sono ricavati dai parametri della parabola come $-b/2a$ e l'errore si è propagato con la formula generale $\mathbf{D}^T \mathbf{C} \mathbf{D}$, dove \mathbf{D} è il vettore delle derivate parziali e \mathbf{C} la matrice di covarianza.

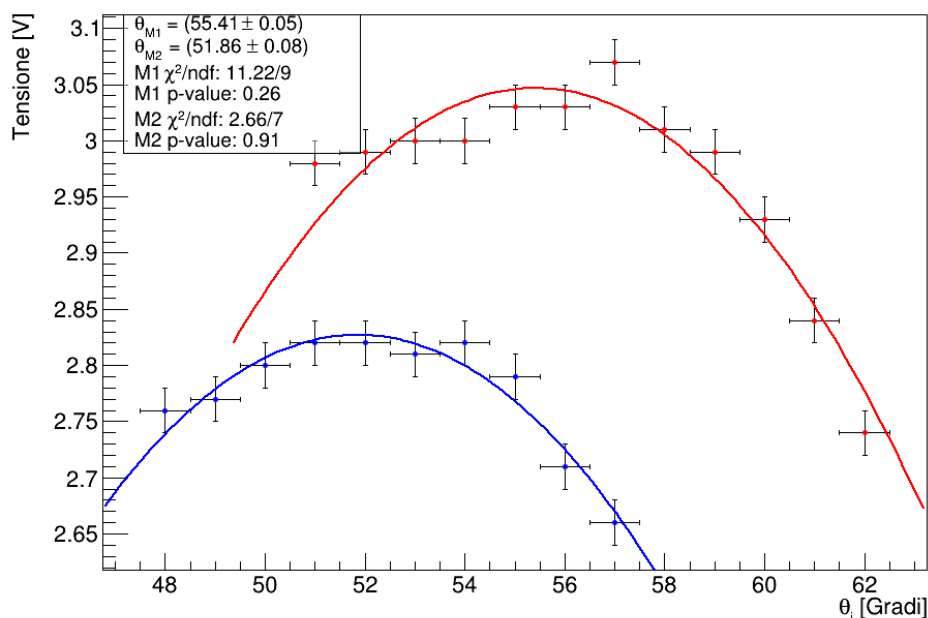


Figura 9. Fit dati massimi Brewster: si sono misurati i valori della tensione attorno ai due angoli di Brewster in modo da trovare il valore dell'angolo fittando con una parabola, cioè un'approssimazione attorno ai massimi. Si noti che ci sono due massimi per la simmetria del sistema (descritta sopra).

Da questi angoli si ricava quindi l'angolo di Brewster θ_B come:

$$\theta_B = \frac{\theta_{M1} + \theta_{M2}}{2}$$

con un errore propagato:

$$\sigma_{\theta_B} = \frac{\sqrt{\sigma_{\theta_{M1}}^2 + \sigma_{\theta_{M2}}^2}}{2}$$

si è ottenuto quindi:

$$\theta_B = (53.64 \pm 0.05)^\circ$$

8 Interferometro di Fabry-Perot

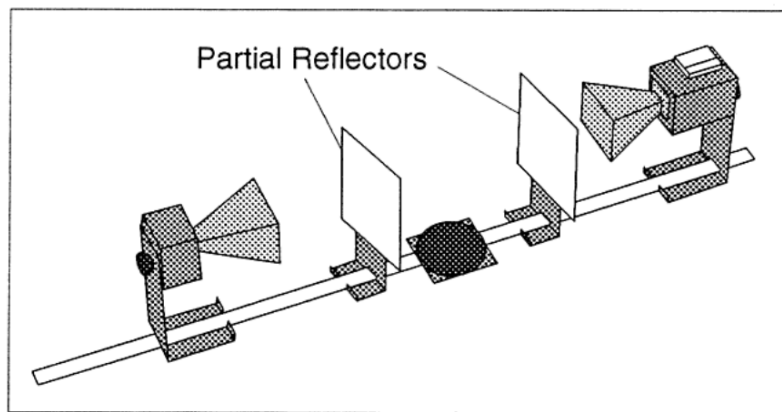


Figura 10. Apparato inteferometro di Fabry-Perot: Emettitore e ricevitore sono disposti parallelamente e sulla guida sono disposte due lastre di metallo, anch'esse parallele, che si comportano da riflettori parziali formando una cavità di Fabry-Perot.

Come precedentemente discusso, si forma una cavità di Fabry-Perot quando le onde elettromagnetiche vengono riflesse da due riflettori parziali, infatti quando un'onda elettromagnetica incontra un riflettore parziale, parte dell'onda viene riflessa e parte viene trasmessa, si forma così una sovrapposizione di onde all'interno della cavità. Si è costruito un interferometro di questo tipo usando due lastre di metallo come riflettori parziali, posizionate parallelamente tra emettitore e ricevitore, anch'essi paralleli (Figura [10]).

L'onda proveniente dalla fonte si riflette avanti e indietro tra i due riflettori parziali. Tuttavia, con ogni passaggio, parte della radiazione passa al rilevatore. Se la distanza tra i riflettori parziali è uguale a $n\lambda/2$, dove λ è la lunghezza d'onda della radiazione e n è un numero intero, allora tutte le onde che passano al rilevatore in qualsiasi istante saranno in fase. In questo caso, si rileverà un segnale massimo dal ricevitore. Se la distanza tra i riflettori parziali non è un multiplo di $\lambda/2$, allora si verificherà un certo grado di interferenza distruttiva, e il segnale non sarà massimo.

Si è dunque variata la distanza tra le lastre registrando le distanze per cui si osservava un massimo di intensità di corrente sull'amperometro del ricevitore (Tabella [7]). Si può quindi calcolare la lunghezza d'onda in maniera del tutto analoga a quanto fatto in precedenza, guardando la distanza tra due massimi consecutivi ed utilizzando la (3), ottenendo:

$$\bar{\lambda} = (3.05 \pm 0.14)cm$$

8.1 Confronto lunghezze d'onda

Si è confrontata la lunghezza d'onda ricavata dai dati dell'interferometro di Fabry-Perot con quella ricavata dallo studio della tensione in funzione della distanza. Essendo entrambe le grandezze delle medie pesate, con errori associati ricavati dalla propagazione degli errori si è scelto di utilizzare il t-test di Welch, in quanto permette di confrontare valori distribuiti normalmente ma con due varianze differenti. Questo approccio presume appunto che i due valori di λ siano distribuiti secondo una distribuzione gaussiana, tuttavia per come si sono calcolati ciò non è corretto in quanto a ciascun valore è associato un peso differente, ma è almeno un'approssimazione che si è ritenuta sufficientemente buona.

Le deviazioni standard delle distribuzioni si sono ricavate come $\sigma_{\lambda_i} = \text{err}_{\lambda_i} \cdot \sqrt{n_i}$, dove il numero di gradi di libertà (n_i) rappresenta il numero di misure effettuate (quantità di valori utilizzati per fare la media pesata).

$$t = \frac{|\lambda_1 - \lambda_2|}{\sqrt{\sigma_{\lambda_1}^2/n_1 + \sigma_{\lambda_2}^2/n_2}} = 0.87$$
$$p\text{-value} = 0.40$$

Si può quindi accettare la compatibilità dei valori con una soglia del 5%.

9 Conclusione

Si è osservato che l'apparato genera onde con un andamento complesso, infatti le ipotesi iniziali di fronte d'onda sferico e piano non sono compatibili con i dati sperimentali.

Il modello combinato di fronte d'onda, una via di mezzo tra quello sferico e quello piano, ha prodotto i risultati più accurati, specialmente nell'analisi della tensione in funzione di θ .

Si sono presentate svariate fonti di errore, tra cui le più significative sono:

- La difficoltà nel prendere le misure sui massimi, ovvero quando si ha un'onda stazionaria
- La poca precisione del goniometro che ha condotto a un grande errore sull'indice di rifrazione n_s
- Il fatto che gli horn si comportano come riflettori parziali

È stato possibile determinare la lunghezza delle microonde con due metodologie e si è ottenuta una compatibilità tra i due risultati (soglia del 1%), mentre non si è ottenuto un risultato significativo per l'indice di rifrazione dello styrene.

Per poter ottenere risultati migliori si dovrebbe quindi utilizzare un apparato più preciso, in particolare con uno strumento di misura degli angoli più accurato, questo permetterebbe di ricavare un valore significativo di n_s .

Si potrebbe inoltre studiare in maniera più approfondita la forma effettiva dei fronti d'onda, ricavandola teoricamente a partire dalla geometria del sistema e verificare che si adatti ai dati sperimentali.

10 Appendice A

10.1 Ipotesi fronte d'onda sferico

La prima ipotesi che si era fatta è quella di un fronte d'onda sferico, tuttavia l'adattamento delle relative funzioni ai dati è scadente (non accettabile con una soglia dell'1%), come si può vedere di seguito.

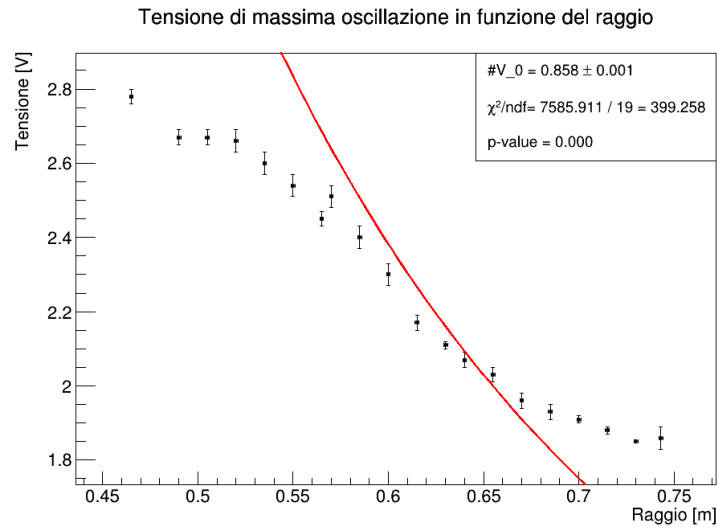


Figura 11. *Fit dati $V - r$ con onde sferiche*

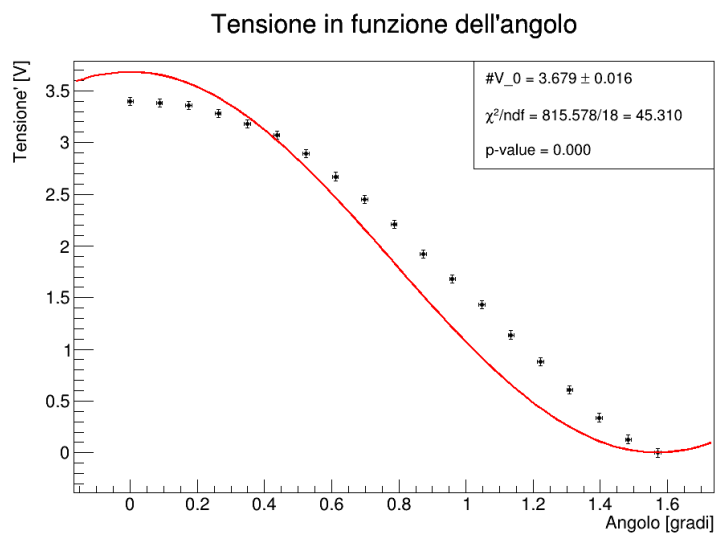


Figura 12. *Fit dati polarizzazione con onde sferiche*

10.2 Ipotesi fronte d'onda piano

Avendo scartato l'ipotesi di fronti d'onda sferici si è pensato allora che fossero piani. Di nuovo tuttavia l'adattamento ai dati risulta scarso (non accettabile con una soglia dell'1%).

Sebbene il fit sui dati della tensione in funzione di r (Figura [13]) sembri qualitativamente seguire l'andamento (almeno quanto quello effettuato con la combinazione lineare di cui sopra) è evidente dal fit sui dati di polarizzazione (Figura[14]) che nemmeno un modello ad onde piane sia adatto.

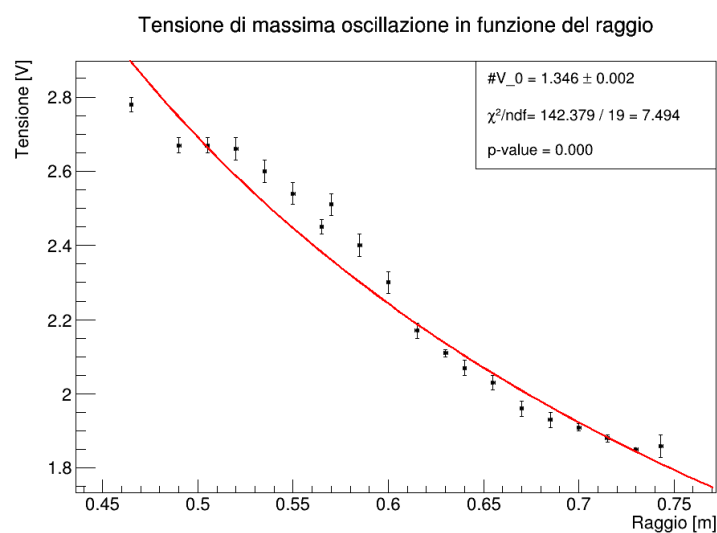


Figura 13. *Fit dati $V - r$ con onde sferiche*

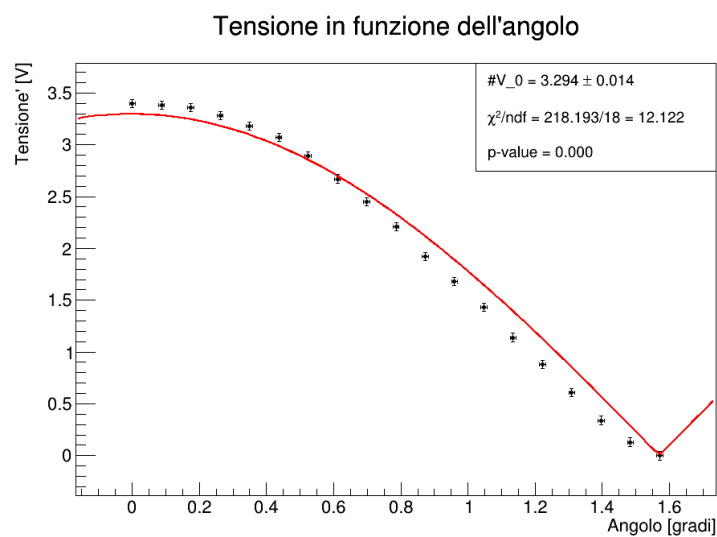


Figura 14. *Fit dati polarizzazione con onde sferiche*

11 Appendice B (Tabelle dati)

11.1 tensione - distanza

$r[m]$	err. $r[m]$	Tensione [V]	err. Tensione [V]
0.743	0.001	1.86	0.030
0.730	0.001	1.85	0.003
0.715	0.001	1.88	0.010
0.700	0.001	1.91	0.010
0.685	0.001	1.93	0.020
0.670	0.001	1.96	0.020
0.655	0.001	2.03	0.020
0.640	0.001	2.07	0.020
0.630	0.001	2.11	0.010
0.615	0.001	2.17	0.020
0.600	0.001	2.30	0.030
0.585	0.001	2.40	0.030
0.570	0.001	2.51	0.030
0.565	0.001	2.45	0.020
0.550	0.001	2.54	0.030
0.535	0.001	2.60	0.030
0.520	0.001	2.66	0.030
0.505	0.001	2.67	0.020
0.490	0.001	2.67	0.020
0.465	0.001	2.78	0.020

Tabella 1. *Dati tensione - distanza r*

11.2 tensione - angolo

$\theta[^\circ]$	Tensione [V]	err. Tensione [V]
0	4.37	0.02
5	4.09	0.02
10	3.46	0.02
15	2.56	0.02
20	1.81	0.02
25	1.11	0.02
30	0.49	0.02
35	0.30	0.02
40	0.17	0.02
45	0.07	0.02

Tabella 2. *Dati tensione - angolo θ (errore sugli angoli 0.5°)*

11.3 polarizzazione, legge di Malus

$\alpha[^\circ]$	Tensione [V]	err. Tensione [V]
0	3.40	0.04
5	3.38	0.04
10	3.36	0.04
15	3.28	0.04
20	3.18	0.04
25	3.07	0.04
30	2.89	0.04
35	2.67	0.04
40	2.45	0.04
45	2.21	0.04
50	1.92	0.04
55	1.68	0.04
60	1.43	0.04
65	1.14	0.04
70	0.88	0.04
75	0.61	0.04
80	0.34	0.04
85	0.13	0.04
90	0.00	0.04

Tabella 3. *Data polarizzazione (errore sugli angoli 0.5°)*

11.4 riflessione

$\theta_i[^\circ]$	$\theta_r[^\circ]$
70	68
60	56
50	53
40	42
30	30
65	62
55	51
45	45
35	29

Tabella 4. *Dati riflessione (errore sugli angoli: 0.5°)*

11.5 angolo di Brewster

$\theta_i[^\circ]$	Tensione [V]	err. Tensione [V]
57	3.07	0.02
58	3.01	0.02
59	2.99	0.02
60	2.93	0.02
61	2.84	0.02
56	3.03	0.02
55	3.03	0.02
54	3.00	0.02
53	3.00	0.02
52	2.99	0.02
51	2.98	0.02
62	2.74	0.02

$\theta_i[^\circ]$	Tensione [V]	err. Tensione [V]
50	2.80	0.02
51	2.82	0.02
52	2.82	0.02
53	2.81	0.02
54	2.82	0.02
55	2.79	0.02
49	2.77	0.02
56	2.71	0.02
57	2.66	0.02
48	2.76	0.02

Tabella 5. *Dati intorno al primo massimo (errore sugli angoli: 0.5°)*

Tabella 6. *Dati intorno al secondo massimo (errore sugli angoli: 0.5°)*

11.6 Fabry-Perot

$r_{\text{lastre}}[m]$	Tensione [V]	err. Tensione [V]
0.243	1.84	0.02
0.257	1.76	0.02
0.273	1.80	0.02
0.290	1.80	0.02
0.305	1.79	0.02
0.320	1.78	0.02
0.335	1.77	0.02
0.350	1.78	0.02
0.365	1.73	0.02

Tabella 7. *Dati interferometro di Fabry-Perot (errore sulla distanza: $0.5mm$)*