

# ESPERIENZA MICROONDE

A. Rossi<sup>1</sup>, G. Lucibello<sup>1</sup>, F. Tassi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facoltà di Fisica, Università degli Studi Milano Bicocca

## Sommario

L'obiettivo dell'esperimento è di analizzare le caratteristiche di un'onda elettromagnetica nella banda delle microonde tramite l'utilizzo di un emettitore e di un ricevitore collegato ad un amperometro ed un voltmetro. Dallo studio di fenomeni quali la rifrazione, l'interferenza e la diffrazione siamo risaliti alla geometria del fascio e abbiamo verificato alcune leggi dell'ottica fisica.

## 1. Caratteristiche del fascio

### 1.1. Obiettivi

L'obiettivo di questa prima parte dell'esperienza è determinare la forma del fascio di onde elettromagnetiche, studiando la sua polarizzazione e la dipendenza dell'ampiezza del segnale da fattori geometrici.

### 1.2. Metodo

#### 1.2.1. Polarizzazione

Ponendo emettitore e ricevitore uno di fronte all'altro, abbiamo osservato come variasse l'intensità del segnale registrato dal ricevitore mentre ruotavamo quest'ultimo sul proprio asse e tenevamo fissa l'orientazione dell'emettitore. Il ricevitore converte autonomamente il segnale ricevuto in corrente elettrica, la quale intensità viene riportata su un amperometro analogico con sensibilità di 0,02 mA e amplificazione regolabile da  $\times 1$  fino a  $\times 30$ . Abbiamo inoltre collegato al ricevitore un voltmetro digitale, confrontando poi i risultati ottenuti con i diversi strumenti. Non è noto a quale quantità sia proporzionale l'intensità del segnale del ricevitore, quindi potrebbe essere sia il campo elettrico dell'onda  $E$  che la sua intensità  $I$ . Per campionare l'angolo di rotazione abbiamo usato il goniometro presente sul ricevitore, con una sensibilità dello strumento di  $5^\circ$ .

#### 1.2.2. Geometria

Per determinare la forma del fascio studiamo l'ampiezza del segnale, valutando come questa dipenda dalla posizione del ricevitore rispetto l'emettitore. Essi sono posti su una guida rettilinea graduata, formata da due bracci uniti da un goniometro. Il braccio su cui è posizionata la sorgente è fisso, l'altro invece è libero di ruotare attorno al centro del sistema. Noi abbiamo mantenuto fisso l'angolo, mentre variavamo la loro distanza.

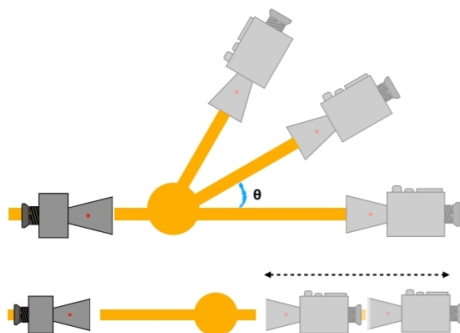


Figura 1. Modi per studiare la geometria del fascio

### 1.3. Analisi dati

#### 1.3.1. Polarizzazione

Il modello che descrive l'intensità del segnale dopo che attraversa un filtro polarizzatore è la legge di Malus

$$I = I_0 \cos^2(\theta),$$

dove  $I_0$  è l'intensità dell'onda alla sorgente e  $\theta$  è l'angolo formato dal piano dove oscilla l'onda con il piano dell'asse del filtro polarizzatore. Sapendo che  $I \propto E^2$ , analogamente la legge può essere scritta nella forma

$$E = E_0 \cos(\theta).$$

I valori dell'intensità sono stati presi sia tramite l'amperometro sia tramite il voltmetro (tabella 1). L'amperometro è stato impostato sull'amplificazione  $\times 30$ . Per ricavare il valore di  $I_0$  abbiamo misurato l'intensità del fascio con emettitore e ricevitore paralleli fra loro. Abbiamo successivamente ruotato ad intervalli di  $15^\circ$  il ricevitore. Come errore della misura dell'amperometro abbiamo preso la sensibilità dello strumento e l'abbiamo moltiplicata per il valore dell'amplificazione. Per quanto riguarda il voltmetro, il valore dato dello strumento non era fisso, ma oscillava a ripetizione. Per tale ragione abbiamo preso come errore l'ultima cifra che rimaneva fissa durante la misura. Infine, per l'angolo abbiamo preso la somma quadratica della sensibilità dei due goniometri.

Il nostro obiettivo è comprendere a quale quantità sia proporzionale il segnale  $M$  generato dal ricevitore. Supponendo che valga la legge di Malus infatti, se  $M$  fosse proporzionale ad  $E$  varrebbe che  $M = M_0 \cos(\theta)$ , mentre se fosse proporzionale ad  $I$  sarebbe invece vero che  $M = M_0 \cos^2(\theta)$ .

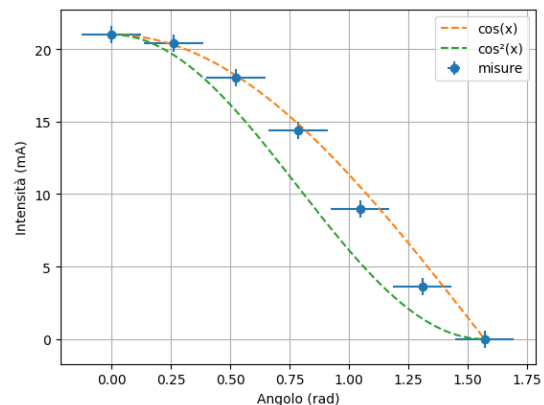
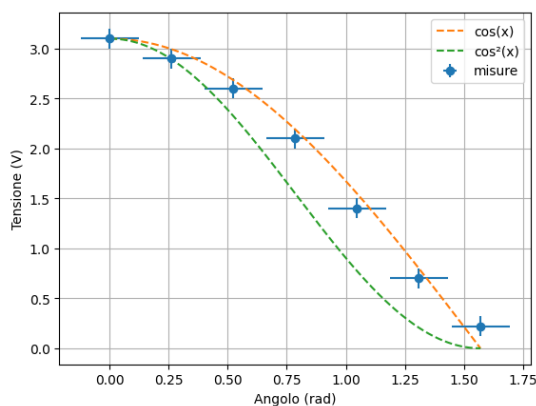
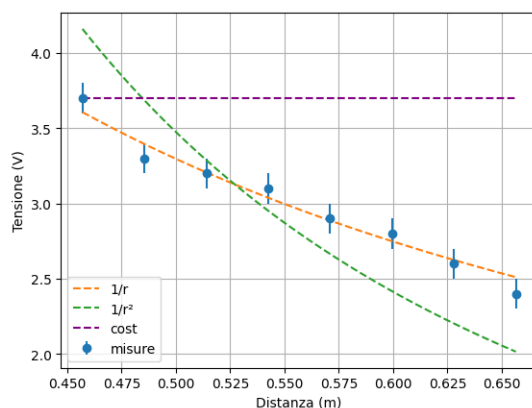


Figura 2. Intensità del segnale dell'amperometro in funzione dell'angolo a confronto con i due modelli



**Figura 3.** Intensità del segnale del voltmetro in funzione dell'angolo a confronto con i due modelli

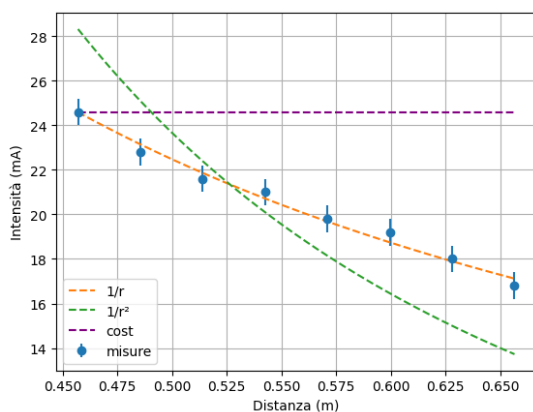


**Figura 5.** Intensità del segnale del voltmetro per i massimi in funzione della distanza a confronto con i vari modelli

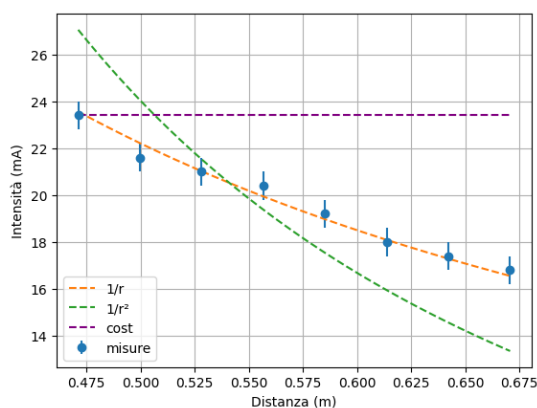
### 1.3.2. Geometria

Abbiamo posizionato i due apparati in modo che gli assi di polarizzazione fossero paralleli. Successivamente abbiamo allontanato il ricevitore per studiare l'andamento dell'intensità in funzione della distanza fra sorgente e ricevitore. In particolare studiamo come modelli possibili l'andamento costante (tipico di un'onda piana), l'andamento come  $1/r$  (tipico di un'onda sferica) e infine l'andamento come  $1/r^2$ .

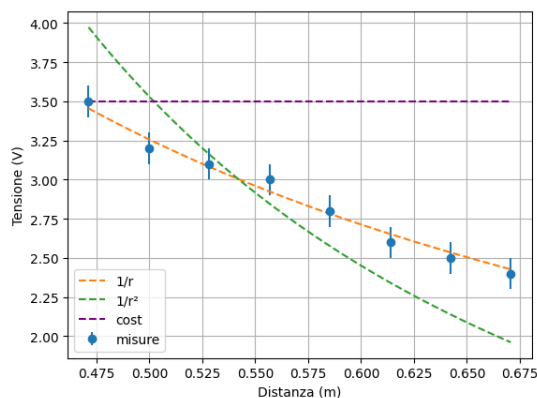
Essendo un'onda, inoltre, il valore dell'intensità non dipende solamente dalla distanza percorsa, ma anche dalla naturale oscillazione che compie. Per questo motivo, preso un primo valore, non ha senso misurare ad intervalli di lunghezza che non siano multipli interi della lunghezza d'onda. Quest'ultima la consideriamo nota senza errore e con valore di  $\lambda = 2.85$  cm [2]. Abbiamo svolto la misura per due volte: durante la prima abbiamo trovato un massimo di intensità e abbiamo allontanato gradualmente il ricevitore di multipli di  $\lambda$  (tabella 2), mentre per la seconda abbiamo svolto un procedimento analogo ma sfruttando i minimi di intensità (tabella 3). Per entrambe le misure abbiamo ancora una volta preso i dati sia dall'amperometro sia dal voltmetro.



**Figura 4.** Intensità del segnale dell'amperometro per i massimi in funzione della distanza a confronto con i vari modelli



**Figura 6.** Intensità del segnale dell'amperometro per i minimi in funzione della distanza a confronto con i vari modelli



**Figura 7.** Intensità del segnale del voltmetro per i minimi in funzione della distanza a confronto con i vari modelli

## 1.4. Conclusioni

### Nota

Tutti i test d'ipotesi di questa relazione hanno come soglia di accettazione scelta il valore  $p = 0.05$

### 1.4.1. Polarizzazione

Svolgendo i fit con il metodo dei minimi quadrati, valutiamo quindi la dipendenza del segnale del ricevitore sfruttando la

legge di Malus. Nel caso  $M \propto E$ , il chi quadro ridotto di tale ipotesi vale  $\chi^2 = 2.4$  per quanto riguarda le misure prese con l'amperometro e  $\chi^2 = 1.2$  per le misure prese con il voltmetro. Nell'ipotesi invece che  $M \propto I$ , il valore è  $\chi^2 = 13.4$  per le misure prese con l'amperometro e  $\chi^2 = 14.9$  per quelle prese con il voltmetro. Dati i gradi di libertà delle misure, tutte e quattro hanno come valore critico  $\chi^2_{critico} = 2.09$  considerando il nostro p-value scelto. Dunque possiamo affermare che l'intensità del segnale non è proporzionale all'intensità dell'onda. Allo stesso tempo, seppur il voltmetro sembri indicare come plausibile l'ipotesi che  $M \propto E$ , il valore del chi quadro dell'amperometro è leggermente oltre la nostra soglia di accettazione. Questo non è di per sé un problema, dato che la documentazione dello strumento afferma che il valore  $M$  non è pensato per essere direttamente proporzionale né a  $E$  né a  $I$  data la non linearità del dispositivo, ma generalmente riflette un valore medio [2]. Quindi uno scarto di questo tipo è giustificabile, portandoci dunque a concludere che il segnale del ricevitore non può che essere in buona misura proporzionale al campo elettrico dell'onda.

#### 1.4.2. Geometria

Usando ancora una volta il metodo dei minimi quadrati, calcoliamo i vari chi quadro ridotti per i modelli  $\sim 1/r$  e  $\sim 1/r^2$ , sia per le misure prese con l'amperometro sia per quelle prese con il voltmetro, per quanto riguarda i massimi e successivamente per i minimi. Scartiamo in partenza l'ipotesi dell'andamento costante data l'evidente incorrettezza del modello. I valori sono nella tabella 4. Il valore critico dati i gradi di libertà è  $\chi^2_{critico} = 2.01$ . Concludiamo dunque rigettando l'ipotesi che l'onda abbia un'intensità che decresce con il quadrato della distanza, mentre confermiamo che decresce in modo inversamente proporzionale alla distanza. Questo comportamento è tipico delle onde sferiche, perciò possiamo affermare che l'onda emessa dalla sorgente è un'onda sferica.

## 2. Angolo di Brewster

### 2.1. Obiettivi

Vogliamo adesso misurare l'angolo di Brewster  $\theta_B$  di una lastra di polietilene osservando come il raggio viene riflesso e rifratto quando interponiamo la lastra tra trasmettitore e ricevitore.

### 2.2. Metodo

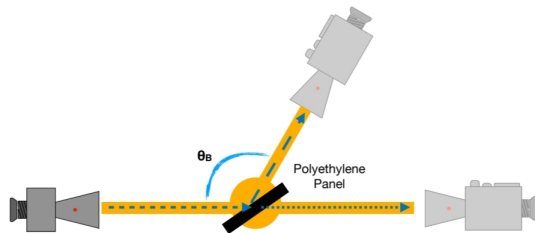


Figura 8. Configurazione per la misura dell'angolo di Brewster

Quando un'onda passa da un mezzo ad un altro, una parte dell'onda viene riflessa e una parte viene rifratta. I due raggi saranno parzialmente polarizzati. Se l'onda è polarizzata

linearmente in direzione parallela al piano di incidenza, esiste un particolare angolo di incidenza per cui l'onda riflessa scompare e rimane solo quella trasmessa. Quest'angolo è detto angolo di Brewster  $\theta_B$ .

Per effettuare le misurazioni abbiamo montato sul goniometro un piedistallo sul quale abbiamo appoggiato la lastra di polietilene. Per la configurazione iniziale abbiamo posto emettitore e ricevitore uno di fronte all'altro e abbiamo ruotato il pannello di  $20^\circ$  rispetto alla congiungente, come in figura 8. Abbiamo quindi osservato come variasse il segnale ruotando il braccio dell'emettitore. Affinché l'onda fosse polarizzata parallelamente al piano di incidenza, è stato necessario ruotare ricevitore ed emettitore di  $90^\circ$  rispetto alle misure precedenti.

### 2.3. Analisi dati

Data la sensibilità del goniometro di  $1^\circ$ , per trovare in maniera precisa il valore dell'angolo di Brewster abbiamo misurato per vari valori dell'angolo di incidenza il segnale generato dal ricevitore sotto forma di raggio trasmesso (tabella 5). Il valore dell'angolo di Brewster sarà dunque in corrispondenza del massimo della parabola che formano le misure prese. La sensibilità del segnale dell'amperometro è ancora 0.2 mA e il ricevitore è stato posto con amplificazione  $\times 30$ . Per il voltmetro invece consideriamo ancora l'ultima cifra che rimane fissa.

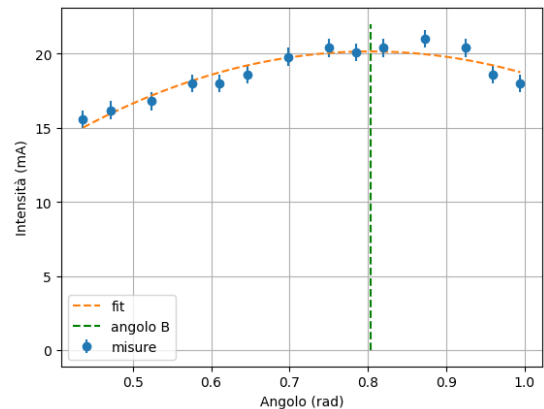


Figura 9. Calcolo dell'angolo di Brewster con le misure dell'amperometro

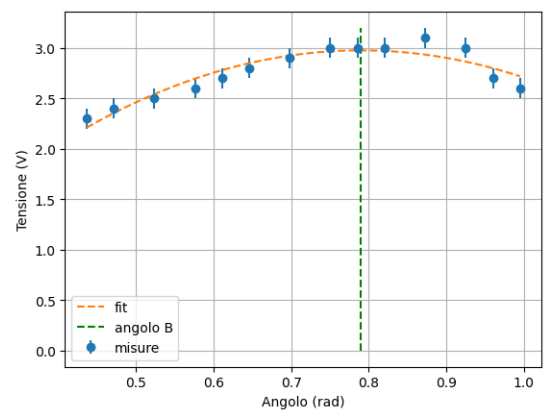


Figura 10. Calcolo dell'angolo di Brewster con le misure del voltmetro

### 2.4. Conclusioni

Il valore dell'angolo di Brewster ricavato dalle misure dell'amperometro e del voltmetro è rispettivamente  $\theta_B = (0.803 \pm$

0.004) rad e  $(0.79 \pm 0.03)$  rad. I due valori sono compatibili fra loro, ma non avendo un valore noto a priori o calcolabile, non ci è possibile sapere se tale valore è corretto o no. In una futura ripetizione dell'esperimento, si potrebbe studiare il fenomeno con una lastra di cui è noto l'indice di rifrazione del materiale o di cui è stato precedentemente misurato per poter verificare la misura svolta dell'angolo di Brewster.

### 3. Interferenza

#### 3.1. Obiettivi

Ci interessa adesso studiare il fenomeno dell'interferenza utilizzando la strumentazione in dotazione per ricostruire i modelli dell'interferometro di Fabry-Perot e della doppia fenditura.

#### 3.2. Configurazione di Fabry-Perot

##### 3.2.1. Metodo



Figura 11. Disposizione dell'interferometro di Fabry-Perot

Per costruire un interferometro di Fabry-Perot poniamo due lastre semi-riflettenti fra l'emettitore ed il ricevitore per formare una cavità in cui il raggio possa riflettere e creare quindi la figura d'interferenza. Abbiamo attaccato le lastre su due supporti magnetici che ci permettevano di farle scorrere sulla guida, e osservando costantemente il voltmetro e l'amperometro abbiamo allontanato una delle lastre misurando a che distanza si ponevano massimi e minimi di interferenza.

##### 3.2.2. Analisi dati

Dalle leggi dell'ottica ci aspettiamo che i massimi (e analogamente i minimi) siano distanziati fra loro di  $\lambda/2$ , dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della luce usata.

Abbiamo misurato i massimi e minimi di interferenza (tabella 6) e da essi calcoliamo dunque i vari  $\Delta d$ . Per evitare che il rumore di fondo influisca troppo sulle misure, sapendo che l'errore è casuale e che quindi le misure sono distribuite in modo normale, rigettiamo i dati che si discostano troppo dal resto delle misure. Decidiamo di porre come soglia di cutoff il valore di  $2\sigma$ , dato che il 95% delle misure sarà contenuto in tale intervallo. Per calcolare i residui normalizzati, sia per i massimi che per i minimi abbiamo calcolato la rispettiva media  $\langle \Delta d \rangle$  con tutti i dati da noi presi e abbiamo successivamente ottenuto per ogni  $\Delta d$  il corrispettivo residuo come

$$\delta = \frac{\Delta d - \langle \Delta d \rangle}{\sigma_{\Delta d}}$$

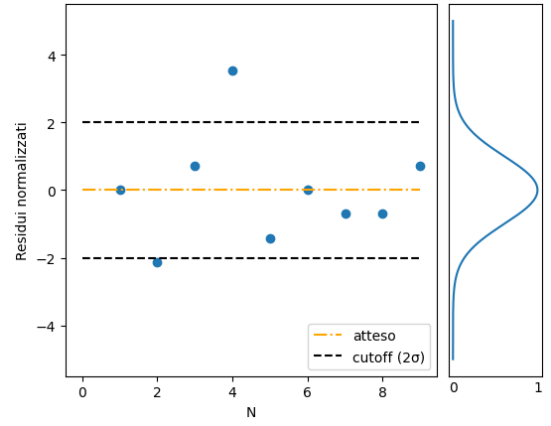


Figura 12. Accettazione e rigetto dei dati per i massimi

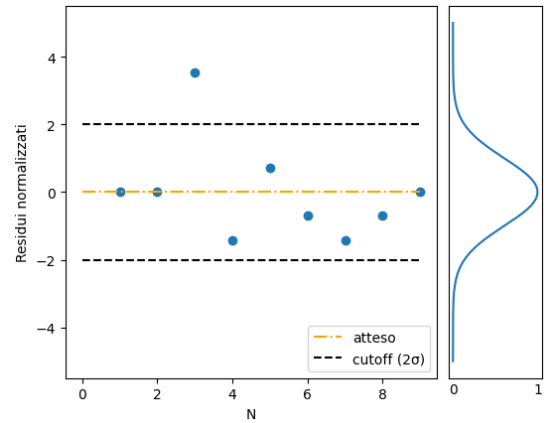


Figura 13. Accettazione e rigetto dei dati per i minimi

Con i  $\Delta d$  non rigettati calcoliamo la lunghezza d'onda, sapendo come detto in precedenza che vale  $\Delta d = \lambda/2$ . Abbiamo calcolato la media dei  $\Delta d$  ricavati dai massimi e successivamente dai minimi e otteniamo quindi come valori della lunghezza d'onda  $\lambda_{max} = (2.94 \pm 0.08)$  cm e  $\lambda_{min} = (2.88 \pm 0.07)$  cm, dove come pedice è specificato da quale set di misure è stato calcolato il valore.

##### 3.2.3. Conclusioni

Considerato come valore noto a priori della lunghezza d'onda  $\lambda = 2.85$  cm, possiamo effettuare un test d'ipotesi di t di Student. Avendo gradi di libertà diversi per massimi e minimi, abbiamo come valori critici equivalenti al nostro p-value rispettivamente  $t_{critico} = 2.447$  e  $2.365$ . Per i valori di  $\lambda$  da noi ottenuti abbiamo  $t_{max} = 1.1$  e  $t_{min} = 0.33$ . Possiamo dunque concludere che entrambe le nostre misure della lunghezza d'onda sono in accordo con il valore dato.

#### 3.3. Configurazione doppia fenditura

### 3.3.1. Metodo

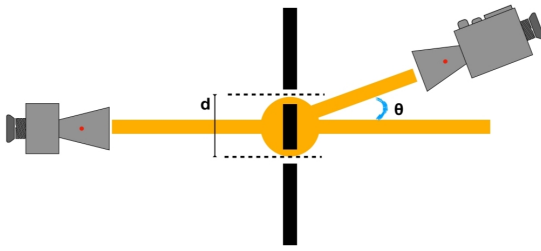


Figura 14. Configurazione doppia fenditura

Utilizzando una sbarra magnetica abbiamo montato tre lastre metalliche in modo da formare due fenditure di 1,5 cm come mostrato in 14. Come previsto dalle leggi dell'ottica, anche in questo caso si osserva una figura di interferenza. Abbiamo quindi rilevato la posizione dei massimi ruotando il ricevitore e mantenendo il resto del sistema fermo.

### 3.3.2. Analisi dati

Nota la distanza  $d$  fra le due fenditure, i massimi di interferenza si trovano ad angoli  $\theta_n$  che soddisfano la relazione

$$\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{d} \quad \text{dove } n = 0, 1, 2, \dots$$

Analogamente per i minimi avremo

$$\sin \theta_n = \frac{2n + 1}{2} \frac{\lambda}{d} \quad \text{dove } n = 0, 1, 2, \dots$$

Per misurare la distanza fra le due fenditure, abbiamo misurato la distanza fra gli assi che passano per i rispettivi centri, ottenendo il valore  $d = (17 \pm 0.2) \text{ cm}$ . L'incertezza della misura riflette l'impossibilità di sapere esattamente dove siano i centri delle fenditure, motivo per cui abbiamo scelto un valore maggiore della sensibilità dello strumento di 1 mm. Il valore della lunghezza d'onda  $\lambda = 2.85 \text{ cm}$  è dato e noto senza errore.

Gli angoli in cui abbiamo misurato massimi e minimi sono in tabella 7. Calcoliamo dunque  $n$  sia per i massimi sia per i minimi.

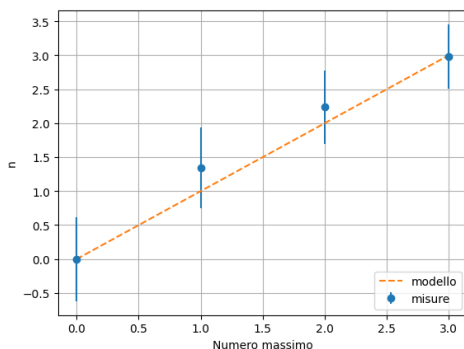


Figura 15.  $n$  per i massimi

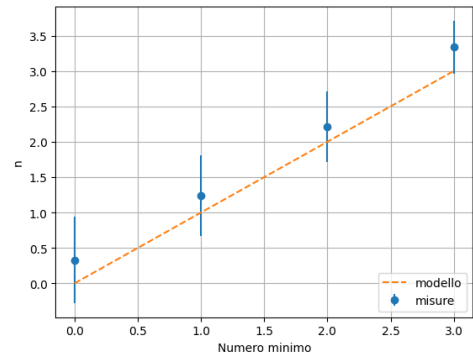


Figura 16.  $n$  per i minimi

Infine, per confermare che gli  $n$  misurati corrispondano agli  $N$  che ci aspettiamo, facciamo un fit su un modello del tipo  $y = ax$ , dove poniamo come  $x$  il numero  $N$  del massimo/minimo e come  $y$  il valore di  $n$  ricavato dalla legge dell'interferenza corrispondente. Ci aspettiamo che valga  $n = N$  (quindi  $y = x$ , con  $a = 1$ ). Usando il metodo dei minimi quadrati, calcoliamo che per i massimi e per i minimi vale rispettivamente che  $a_{\max} = 1.0 \pm 0.1$  e  $a_{\min} = 1.1 \pm 0.1$ .

### 3.3.3. Conclusioni

Tutti i valori di  $n$  misurati sono compatibili, con il loro errore, al modello dato dall'ottica. I valori di  $a_{\max}$  e  $a_{\min}$  sono compatibili con l'unità come previsto. In particolare, i due fit hanno entrambi riportato un chi quadro ridotto  $\chi^2 = 0.1$ , a fronte di un valore critico  $\chi^2_{\text{critico}} = 2.6$ . Concludiamo dunque che le nostre misure confermano che le leggi dell'ottica per l'interferenza valgono anche per onde elettromagnetiche nella banda delle microonde.

## 4. Diffrazione di Bragg

### 4.1. Obiettivi

L'obiettivo di quest'ultima parte dell'esperienza è quello di riprodurre l'esperimento con cui Bragg dimostrò la struttura reticolare dei cristalli usando i raggi X. In particolare cerchiamo di verificare la legge che predice la posizione dei massimi di interferenza.

### 4.2. Metodo

In laboratorio, per simulare un cristallo con reticolo cubico, avevamo a disposizione un cubo di ethafoam nel quale erano incastonate delle sferette di metallo; quando il fascio di microonde incide su quest'ultima forma un figura d'interferenza. Per effettuare le nostre misurazioni abbiamo sempre fatto riferimento al piano reticolare 100, quello per cui la distanza rispetto agli altri piani paralleli fosse massima (fare riferimento all'immagine 17). Affinché si verifichi la condizione di Bragg è necessario che l'angolo di incidenza sia uguale a quello di riflessione; per tener conto di ciò abbiamo misurato il segnale ruotando il ricevitore del doppio dell'angolo rispetto a quello di inclinazione del cubo. In particolare abbiamo ruotato il cubo con un passo di  $2^\circ$  e quindi il ricevitore con un passo di  $4^\circ$ .



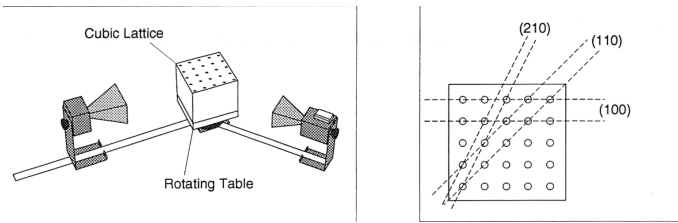


Figura 17. Configurazione strumenti e piani reticolari

### 4.3. Analisi dati

Le legge che Bragg usò afferma che si formano massimi di interferenza per

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

dove  $d$  è la distanza fra i due piani considerati e  $\theta$  è l'angolo di incidenza del raggio. Misuriamo che la distanza fra i piani è  $d = (3.80 \pm 0.02)$  cm, dove l'errore della misura tiene conto dell'impossibilità di conoscere esattamente la posizione del centro della sfera. Per ricavare la posizione dei massimi, abbiamo scansionato molti angoli compresi tra 0 e 90° per capire in maniera approssimativa l'andamento del segnale dell'amperometro (tabella 8). La lancetta di quest'ultimo presentava una notevole oscillazione e non permetteva di considerare come errore della misura la sensibilità dello strumento (0.06 mA, tenendo conto dell'amplificazione  $\times 3$ ). In particolare il valore oscillava approssimativamente di 3/4 tacche in entrambe le direzioni, portandoci a considerare un'incertezza per la misura di 0.2 mA. Come valore della misura abbiamo preso il valore centrale rispetto alla quale avveniva l'oscillazione.

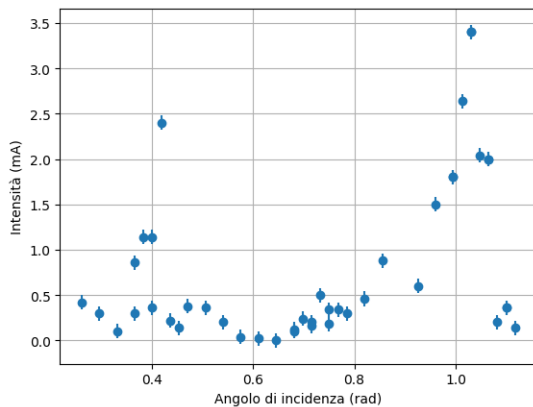


Figura 18. Ricerca dei massimi

Notando in maniera qualitativa la posizione dei massimi per angoli di circa 20° e 60°, interpoliamo usando come modello una parabola per trovare più precisamente il valore dell'angolo. I dati dimostravano una notevole varianza, quindi abbiamo deciso di studiare i residui normalizzati per ridurre al minimo l'impatto del forte rumore di fondo. Per entrambe le misure abbiamo preso i 13 valori più prossimi ai due angoli notati qualitativamente. Abbiamo quindi svolto un fit ( $y = ax^2 + bx + c$ , dove  $x$  è l'angolo e  $y$  il segnale dell'amperometro) e ottenuto un valore provvisorio dei tre coefficienti della parabola. I residui sono stati dunque calcolati come

$$\delta = \frac{y - y_{prov}}{\sigma_y}$$

dove  $y_{prov}$  è il valore calcolato con i coefficienti provvisori. Rigettiamo tutti i dati che si trovano oltre la soglia dei  $2\sigma$ , dato che all'interno di tale limite sarà presente il 95% delle misure come detto in precedenza.

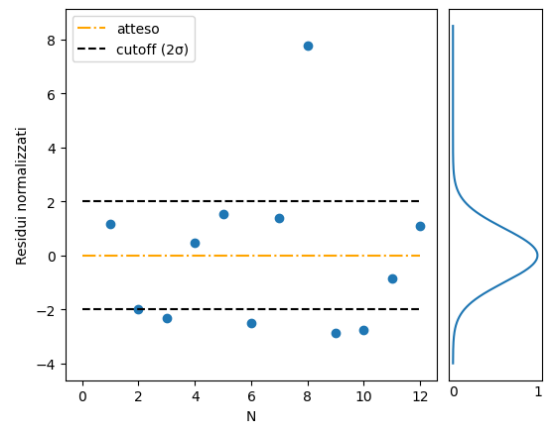


Figura 19. Accettazione e rigetto dei dati per 0.4 rad

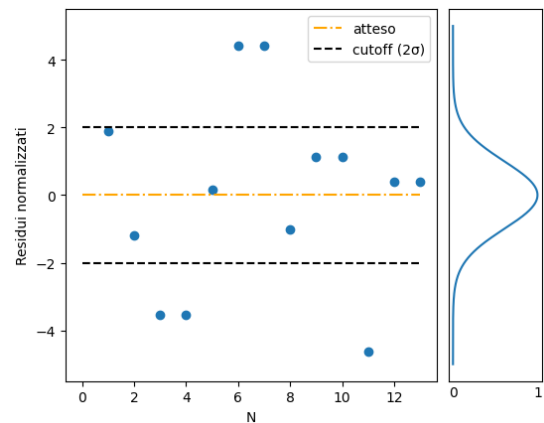


Figura 20. Accettazione e rigetto dei dati per 1.0 rad

Con i dati non rigettati ripetiamo il fit con una parabola e calcoliamo i nuovi coefficienti, i quali usiamo per ricavare il valore dell'angolo dei due massimi.

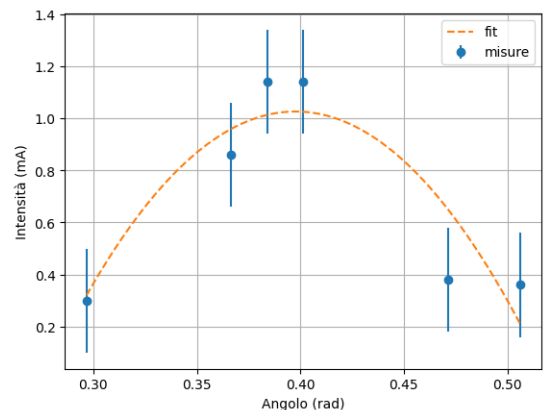
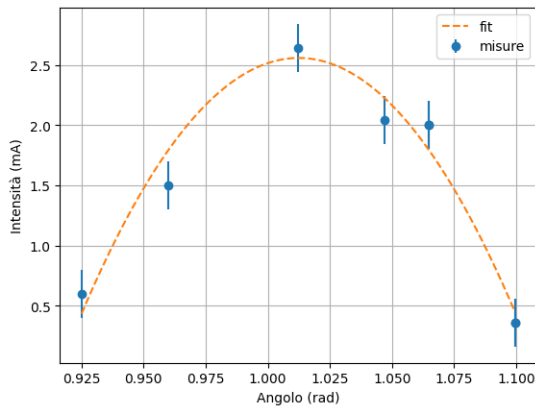


Figura 21. Calcolo del massimo nell'intorno di 0.4 rad



**Figura 22.** Calcolo del massimo nell'intorno di 1.0 rad

I valori dei due angoli per i quali osserviamo un massimo di interferenza sono  $\theta_1 = (0.40 \pm 0.1)$  rad e  $\theta_2 = (1.0 \pm 0.1)$  rad. Considerando la legge che descrive il fenomeno otteniamo come valori della distanza fra i piani  $d_1 = (3 \pm 1)$  cm e  $d_2 = (3.4 \pm 0.3)$  cm.

#### 4.4. Conclusioni

Per prima cosa notiamo come i due fit parabolici abbiamo rispettivamente chi quadro ridotto  $\chi^2 = 1.1$  e 1.2, a paragone con un valore critico di 2.6. Quindi concludiamo di aver effettivamente trovato dei massimi di interferenza.

Per quanto riguarda i valori della distanza fra i piani, scartiamo dalla nostra analisi  $d_1$ . Il suo errore è troppo grande per poter essere considerato un dato significativo ai fini dello studio del fenomeno. Invece per  $d_2$  effettuiamo un test d'ipotesi di t di Student. Il valore  $t$  associato alla misura vale  $t = 1.33$  e il corrispondente valore critico di 2.571. Lo studio di questo massimo ci permette dunque di giungere alla conclusione che il modello è in grado di descrivere ciò che abbiamo osservato.

In generale, questa esperienza è stata condizionata dall'elevato errore che l'amperometro dava. Il segnale non dava mai un valore certo, ma era caratterizzato da oscillazioni a volte anche ampie. Questo ha portato al rigetto di vari dati e all'impossibilità di usare uno dei valori di  $d$  ricavato. Inoltre, il fatto che  $\lambda$  e  $d$  fossero quasi uguali ha complicato lo studio del fenomeno di interferenza, portandoci a poter osservare solamente due massimi. Considerando che Bragg nel suo esperimento usò un raggio che aveva una lunghezza d'onda di un intero ordine di grandezza minore rispetto alla distanza fra gli atomi del reticolo cristallino [1], per poter verificare in modo più preciso questa legge è necessario in un futuro tentativo usare o una lunghezza d'onda minore o un cubo più grande con sfere più distanziate.

## 5. Appendice

### 5.1. Tabelle dati

Intensità (mA)	$\sigma_I$	Tensione (V)	$\sigma_V$
21.0	$\pm 0.6$	3.1	$\pm 0.1$
20.4		2.9	
18.0		2.6	
14.4		2.1	
9.0		1.4	
3.6		0.7	
0.0		0.22	$\pm 0.01$

**Tabella 1.** Valori di intensità e tensione per la legge di Malus

$d (\pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ m})$	Intensità ( $\pm 0.6 \text{ mA}$ )	Tensione ( $\pm 0.1 \text{ V}$ )
$6.56 \cdot 10^{-1}$	16.8	2.4
$6.28 \cdot 10^{-1}$	18.0	2.6
$5.99 \cdot 10^{-1}$	19.2	2.8
$5.71 \cdot 10^{-1}$	19.8	2.9
$5.42 \cdot 10^{-1}$	21.0	3.1
$5.14 \cdot 10^{-1}$	21.6	3.2
$4.85 \cdot 10^{-1}$	22.8	3.3
$4.57 \cdot 10^{-1}$	24.6	3.7

**Tabella 2.** Massimi di intensità

$d (\pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ m})$	Intensità ( $\pm 0.6 \text{ mA}$ )	Tensione ( $\pm 0.1 \text{ V}$ )
$6.71 \cdot 10^{-1}$	16.8	2.4
$6.42 \cdot 10^{-1}$	17.4	2.5
$6.14 \cdot 10^{-1}$	18.0	2.6
$5.85 \cdot 10^{-1}$	19.2	2.8
$5.57 \cdot 10^{-1}$	20.4	3.0
$5.28 \cdot 10^{-1}$	21.0	3.1
$5.00 \cdot 10^{-1}$	21.6	3.2
$4.71 \cdot 10^{-1}$	23.4	3.5

**Tabella 3.** Minimi di intensità

		$1/r$	$1/r^2$
Amperometro	Max	0.2	19.6
	Min	0.3	18.9
Voltmetro	Max	0.2	12.8
	Min	0.5	11.4

**Tabella 4.** Valori del chi quadro per le misure della geometria del fascio

$\theta (\pm 2 \cdot 10^{-2} \text{ rad})$	Intensità ( $\pm 0.6 \text{ mA}$ )	Tensione ( $\pm 0.1 \text{ V}$ )
$3.5 \cdot 10^{-1}$	15.0	2.2
$4.0 \cdot 10^{-1}$	15.6	2.3
$4.4 \cdot 10^{-1}$	15.6	2.3
$4.7 \cdot 10^{-1}$	16.2	2.4
$5.2 \cdot 10^{-1}$	16.8	2.5
$5.8 \cdot 10^{-1}$	18.0	2.6
$6.1 \cdot 10^{-1}$	18.0	2.7
$6.5 \cdot 10^{-1}$	18.6	2.8
$7.0 \cdot 10^{-1}$	19.8	2.9
$7.5 \cdot 10^{-1}$	20.4	3.0
$7.8 \cdot 10^{-1}$	20.1	3.0
$8.2 \cdot 10^{-1}$	20.4	3.0
$8.7 \cdot 10^{-1}$	21.0	3.1
$9.3 \cdot 10^{-1}$	20.4	3.0
$9.6 \cdot 10^{-1}$	18.6	2.7
$9.9 \cdot 10^{-1}$	18.0	2.6
1.05	14.4	2.1
1.10	13.2	1.9
1.13	12.6	1.9

**Tabella 5.** Angoli di rotazione dell'emettitore con rispettive rilevazioni del segnale per l'angolo di Brewster

minimi ( $\pm 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ )	massimi ( $\pm 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ )
$2.40 \cdot 10^{-1}$	$2.35 \cdot 10^{-1}$
$2.55 \cdot 10^{-1}$	$2.50 \cdot 10^{-1}$
$2.70 \cdot 10^{-1}$	$2.62 \cdot 10^{-1}$
$2.90 \cdot 10^{-1}$	$2.78 \cdot 10^{-1}$
$3.03 \cdot 10^{-1}$	$2.98 \cdot 10^{-1}$
$3.19 \cdot 10^{-1}$	$3.11 \cdot 10^{-1}$
$3.33 \cdot 10^{-1}$	$3.26 \cdot 10^{-1}$
$3.46 \cdot 10^{-1}$	$3.40 \cdot 10^{-1}$
$3.60 \cdot 10^{-1}$	$3.54 \cdot 10^{-1}$
$3.75 \cdot 10^{-1}$	$3.70 \cdot 10^{-1}$

**Tabella 6.** Distanza tra le lastre semi-riflettenti relative ai massimi e minimi d'interferenza della configurazione di Fabry-Perot

$\theta (\pm 2 \cdot 10^{-2} \text{ rad})$	Intensità ( $\pm 2 \cdot 10^{-1} \text{ mA}$ )
$2.6 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$
$3.0 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$
$3.3 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$
$3.7 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$
$3.7 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-1}$
$3.8 \cdot 10^{-1}$	1.1
$4.0 \cdot 10^{-1}$	1.1
$4.0 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$
$4.2 \cdot 10^{-1}$	2.4
$4.4 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$
$4.5 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$
$4.7 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$
$5.1 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$
$5.4 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$
$5.8 \cdot 10^{-1}$	0.0
$6.1 \cdot 10^{-1}$	0.0
$6.5 \cdot 10^{-1}$	0.0
$6.8 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$
$6.8 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$
$7.0 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$
$7.2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$
$7.2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$
$7.3 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
$7.5 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$
$7.5 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$
$7.7 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$
$7.9 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$
$8.2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
$8.6 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^{-1}$
$9.3 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$
$9.6 \cdot 10^{-1}$	1.5
1.00	1.8
1.00	1.8
1.01	2.6
1.03	3.4
1.03	3.4
1.05	2.0
1.06	2.0
1.06	2.0
1.08	$2 \cdot 10^{-1}$
1.10	$4 \cdot 10^{-1}$
1.10	$4 \cdot 10^{-1}$
1.12	$1 \cdot 10^{-1}$

**Tabella 8.** Campionamento di angoli e intensità per la legge di Bragg

## Riferimenti bibliografici

- [1] W. L. Bragg, «The diffraction of short electromagnetic waves by a crystal», indirizzo: [https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/archivos\\_10/Bragg-firstpaper-mini.pdf](https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/archivos_10/Bragg-firstpaper-mini.pdf).
- [2] «Scheda PASCO», indirizzo: [https://elearning.unimib.it/pluginfile.php/1676144/mod\\_resource/content/1/PASCOMicroonde.pdf](https://elearning.unimib.it/pluginfile.php/1676144/mod_resource/content/1/PASCOMicroonde.pdf).

$\theta_{max} (\pm 2 \cdot 10^{-2} \text{ rad})$	$\theta_{min} (\pm 2 \cdot 10^{-2} \text{ rad})$
0.0	$1.4 \cdot 10^{-1}$
$2.2 \cdot 10^{-1}$	$3.0 \cdot 10^{-1}$
$3.8 \cdot 10^{-1}$	$4.7 \cdot 10^{-1}$
$5.2 \cdot 10^{-1}$	$7.0 \cdot 10^{-1}$

**Tabella 7.** Angoli di rotazione del ricevitore relativi ai massimi e minimi d'interferenza della configurazione a doppia fenditura