

MICROONDE

Laboratorio di Fisica II - CdL in Fisica dell'Università di Milano-Bicocca

February 25, 2023

Abstract

Le microonde sono onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda \sim cm che si prestano molto bene allo studio dell'ottica in una regione di frequenze differente da quella dello spettro visibile. In questo caso all'occhio viene sostituito uno strumento che rivela l'onda elettromagnetica in una determinata posizione. In questa esperienza si studiano fenomeni descritti dall'ottica geometrica o dall'ottica ondulatoria, identificando i modelli che descrivono meglio il fenomeno e misurando quantità caratteristiche come la lunghezza d'onda.

1 Scopo dell'esperienza

L'esperienza ha i seguenti obiettivi:

- lo studio delle caratteristiche del fascio emesso dalla sorgente e della risposta del ricevitore, in particolare:
 - l'osservazione del fenomeno delle onde stazionarie
 - lo studio della polarizzazione
- lo studio dei fenomeni di riflessione e rifrazione
- lo studio della polarizzazione
- la misura dell'angolo di Brewster
- lo studio del fenomeno dell'interferenza
- lo studio della diffrazione alla Bragg

2 Strumentazione e procedura sperimentale

L'esperienza si realizza usando un emettitore, un ricevitore con misuratore analogico a sensibilità regolabile, una guida millimetrata e un goniometro. Una serie di accessori consente di realizzare e muovere ostacoli riflettenti, semiriflettenti e rifrangenti.

L'**emettitore** è una sorgente di onde elettromagnetiche coerenti e polarizzate linearmente, si comporta all'incirca come una sorgente puntiforme. Il **ricevitore** è anch'esso polarizzato, cioè rileva solo la componente dell'onda elettromagnetica polarizzata in una specifica direzione, e trasduce il segnale

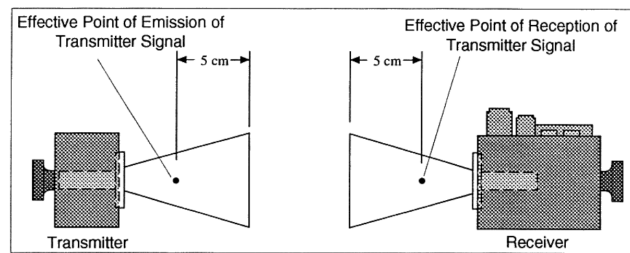


Figure 1: Emittitore e Ricevitore. I punti di emissione e ricezione dell'onda sono ~ 5 cm all'interno degli horn. In molte delle misure proposte la conoscenza esatta della loro posizione non è rilevante.

ricevuto in un segnale di corrente che è visualizzato su un amperometro analogico. Ricevitore ed emettitore sono provvisti di due **horn** (o trombe) a forma di tronco di piramide. Queste fungono da guida d'onda (sono di metallo quindi riflettono le onde e.m.) indirizzando il fascio. La sezione degli horn è rettangolare e quando sono orientati nello stesso modo (lato lungo/corto parallelo alla superficie del tavolo) la polarizzazione dell'onda emessa dall'emettitore è concorde con la polarizzazione del ricevitore (il segnale registrato è massimo).

La lettura fatta dal **ricevitore** non è riferita a una scala assoluta: può essere amplificata o traslata agendo rispettivamente sul selettore di **scala o guadagno** o sulla manopola che modifica l'**offset**. In questo modo è possibile adattare il valore del segnale prodotto dal ricevitore in modo da ottimizzare la misura in termini di sensibilità e dinamica. E' preferibile non modificare il guadagno durante una stessa raccolta dati, nel caso questo sia invece necessario controllare il fattore di amplificazione confrontando una stessa lettura effettuata su scale differenti. Oltre al lettore analogico è possibile collegare al ricevitore un multimetro digitale, in questo caso la lettura deve essere effettuata in tensione e non in corrente.

Suggerimenti:

- per entrambe le grandezze misurate (distanza e segnale e.m.) identificate le sorgenti di errore, in particolare cercate di capire se siete dominati dalla sensibilità della scala o dall'errore casuale (oppure se entrambi concorrono in ugual modo all'incertezza).
- per osservare la presenza di errori casuali verificate la riproducibilità della misura: se p.es. state determinando la posizione in cui si trova un massimo di segnale provate a ripetere la misura spostando il ricevitore e riportatelo nella posizione corrispondente al massimo. Ottenete sempre la stessa lettura sulla riga millimetrata (che vuol dire che l'incertezza sulla posizione del massimo è dominata dalla sensibilità del righello) oppure no ?

3 Forma del fascio, tipo di segnale e fenomeno onde stazionarie

Il primo obiettivo dell'esperienza è quello di comprendere come funzionano emettitore e ricevitore e come è fatto il fascio di onde e.m. che state utilizzando. Progettate una serie di misure che vi consenta di studiare:

- la dipendenza del segnale dall'angolo θ tra ricevitore e emettitore (ruotando uno dei bracci della guida millimetrata)
- la dipendenza del segnale dalla distanza r ricevitore-emettitore (mantenendo i due strumenti allineati sulla guida millimetrata)

In entrambi i casi potete inizialmente campionare a un passo costante fissato δr e $\delta\theta$. Sulla base dei risultati ottenuti potete poi ottimizzare il passo e l'intervallo del campionamento per il tipo di studio che state facendo.

3.1 Onde Stazionarie

Al variare di r il segnale mostra un comportamento complesso: oscilla e decresce. Le oscillazioni sono dovute all'instaurarsi di onde stazionarie, questo fenomeno è prodotto dalla riflessione multipla del segnale sul ricevitore e sull'emettitore stesso) che realizza quella che si chiama cavità di Farby-Perot.

Ottimizzate la misura per poter determinare il periodo dell'oscillazione, la dipendenza della sua ampiezza da r e la dipendenza del valore medio del segnale da r . Combinando le misure che avete fatto dovrete essere in grado di discutere in modo quantitativo:

- un'ipotesi circa la forma del fascio (si comporta come se avesse un fronte d'onda piano o sferico ?) e la dipendenza del segnale dal campo e.m. (le ipotesi sulla forma del fascio vi portano a ipotesi sulla dipendenza di intensità e campo da r , il segnale appare proporzionale al campo, all'intensità o a una funzione più complessa ?)
- il **valore della lunghezza d'onda** delle microonde e il modo migliore per determinare tale valore.

3.2 Polarizzazione

Per completare la caratterizzazione del fascio potete ora studiare la sua polarizzazione. La **legge di Malus** prevede che l'intensità di un'onda polarizzata linearmente che attraversa un filtro polarizzatore, orientato secondo un angolo α rispetto alla direzione di polarizzazione dell'onda, sia:

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \alpha \quad (1)$$

dove α è l'angolo formato tra la direzione del campo elettrico e l'asse di trasmissione del filtro.

Il ricevitore che avete a disposizione in laboratorio è polarizzato, questo vuol dire che si comporta all'incirca come un misuratore di onde e.m. con annesso un filtro polarizzatore. Provate a studiare cosa succede al segnale registrato dal ricevitore se lo ruotate sul suo asse: è come se ruotaste il filtro polarizzatore

però se il segnale rilevato da ricevitore fosse proporzionale all'intensità dell'onda dovremmo valere la legge di Malus. Ponete emettitore e ricevitore uno di fronte all'altro, campionate l'angolo α di rotazione del ricevitore rispetto all'emettitore misurando ogni volta il segnale registrato.

Infine studiate il funzionamento della griglia come filtro polarizzatore. Cosa succede se disponete gli horn in modo da essere orientati a 90° uno rispetto all'altro e poi interponete la griglia cambiandone l'orientamento ?

3.3 Riflessione e Rifrazione

Verificate la legge di Cartesio (legge della **riflessione**) facendo riflettere le onde elettromagnetiche sulla lastra metallica quadrata e osservando quale relazione sussiste tra angolo di incidenza e angolo di riflessione. Potete campionare a passo fissato $\delta\theta$ l'angolo di incidenza e misurare il corrispondente angolo di riflessione. Valutate l'adattamento dei dati sperimentali alla legge di Cartesio, riuscite a verificare la sua validità sull'intero intervallo $0-90^\circ$?

Studiate il fenomeno della **rifrazione** utilizzando il prisma di polistirolo, la prima volta vuoto e successivamente riempito con i pellets di styrene. Posizionate il prisma sulla pedana di supporto che sarà stata centrata sul goniometro. Fate in modo che il raggio sia rifratto una sola volta passando attraverso il prisma (come?). Misurate l'angolo al vertice del prisma con un goniometro o con la trigonometria. Assumendo che l'indice di rifrazione dell'aria sia $n=1$ ricavate l'indice di rifrazione dello styrene (per farlo andrà verificato che l'indice di rifrazione del polistirolo è 1).

4 Angolo di Brewster

Quando un'onda incide sulla superficie di separazione tra due mezzi di indice di rifrazione differente si hanno un raggio riflesso e un raggio rifratto. Le intensità dei due raggi cambiano al variare dell'angolo di incidenza e della polarizzazione della luce.

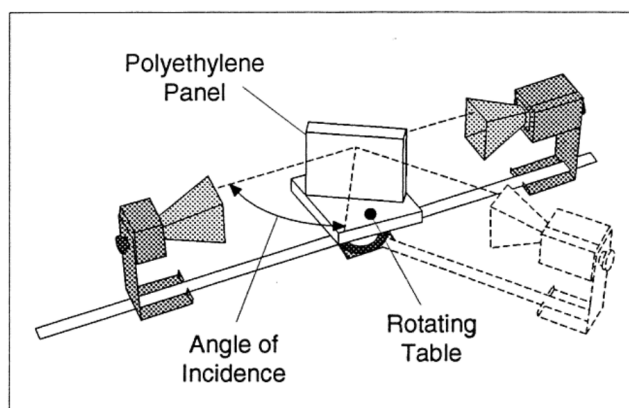


Figure 2: Misura dell'angolo di Brewster

Se l'onda incidente non è polarizzata (Fig. 3 sx), il raggio riflesso è parzialmente polarizzato nella direzione perpendicolare al piano di incidenza (quindi parallela alla superficie di separazione dei due mezzi) e il raggio rifratto è parzialmente polarizzato in direzione parallela al piano di incidenza. All'aumentare dell'angolo di incidenza l'effetto si amplifica fino a quando il raggio rifratto e quello riflesso sono completamente polarizzati. Questo avviene quando l'angolo di incidenza è pari all'**angolo di Brewster** θ_B .

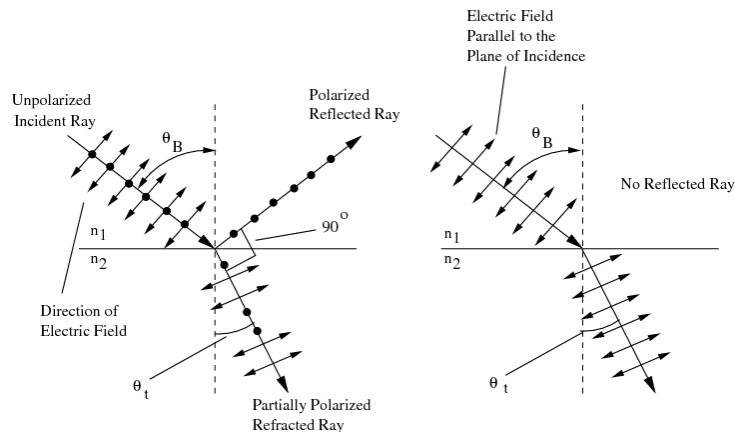


Figure 3: Riflessione e rifrazione di un raggio non polarizzato (sx) e polarizzato (dx) quando l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di Brewster. La freccia a doppia punta indica un campo elettrico con direzione parallela al piano di incidenza, quella a doppia punta con un pallino a metà indica un campo elettrico che ha sia componente parallela che perpendicolare al piano di incidenza, il solo pallino indica un campo elettrico perpendicolare al piano di incidenza (immagine da Wikipedia)

Se l'onda incidente è polarizzata linearmente in direzione parallela al piano di incidenza, allora quando l'angolo di incidenza è uguale a θ_B l'onda riflessa ha intensità nulla mentre l'onda trasmessa ha intensità massima (Fig. 3 dx).

Studiate questo fenomeno con la strumentazione che avete a disposizione e misurate l'angolo di Brewster. Per farlo montate sul goniometro la piattaforma di supporto e su di essa la lastra di polyetilene.

Consigliamo come prima cosa di studiare il fenomeno osservando la variazione del segnale trasmesso: posti ricevitore ed emettitore uno di fronte all'altro, si ruota la lastra di polyetilene misurando il segnale ricevuto. Per ottenere una buona stima dell'angolo di Brewster potete usare un'interpolazione parabolica dei punti campionati in prossimità del massimo del segnale. Ripetete la misura per entrambe le polarizzazioni ed provate poi a studiare il segnale riflesso.

5 Interferenza

E' possibile studiare il fenomeno dell'interferenza realizzando differenti configurazioni. Studiatene almeno due cercando di ricostruire non solo la **posizione**

dei massimi (confrontando poi i risultati sperimentali con il modello che pensate descrivere il fenomeno) ma anche l'**intensità del segnale** al variare della posizione del ricevitore.

Interferenza da doppia fenditura: utilizzando un supporto magnetico posizionato sul goniometro, montare tre lastre di metallo in modo da costruire due fenditure di circa 1,5 cm. Ruotando il ricevitore è possibile studiare la figura di interferenza mettendola in relazione con la lunghezza d'onda.

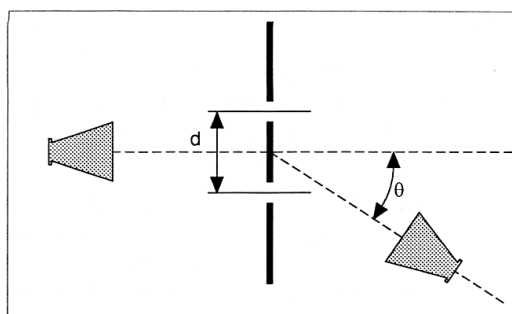


Figure 4: Configurazione doppia fenditura

Specchio di Lloyd: disporre emettitore, ricevitore e lasta riflettente come in figura 5. Il ricevitore riceverà due fasci: quello direttamente proveniente dalla sorgente e quello proveniente dallo specchio creando una figura di interferenza. Spostando lo specchio si modifica la differenza di cammino ottico tra i due fasci per cui il ricevitore registra massimi e minimi di interferenza. Studiare questa figura mettendola in relazione con la lunghezza d'onda.

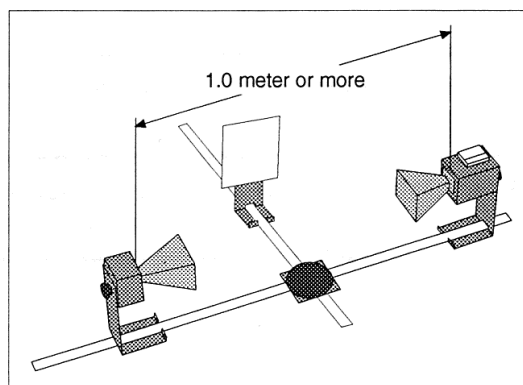


Figure 5: Configurazione specchio di Lloyd

Interferometro di Fabry-Perot: posizionare due lastre semiriflettenti parallele tra loro e con emettitore e ricevitore (si veda la figura 6). Si crea così

una cavità di Fabry-Perot. Cambiando la distanza tra le lastre si modifica la dimensione della cavità e il ricevitore registra un cambiamento della figura di interferenza. Studiare questa figura mettendola in relazione con la lunghezza d'onda.

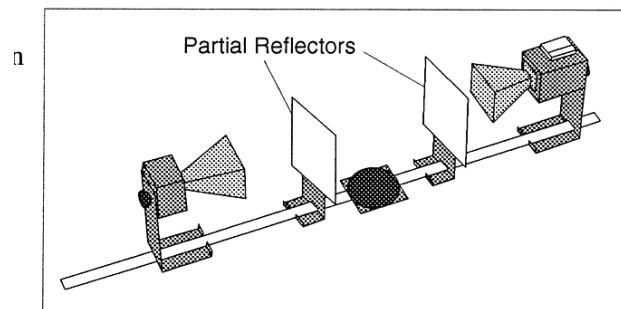


Figure 6: Configurazione di Fabry-Perot

Interferometro di Michelson: posizionare emettitore, ricevitore, lastre riflettenti (A, B) e lastra semiriflettente (C) come indicato in figura 9. In questo modo il fascio di onde e.m. prodotto dall'emettitore è suddiviso in due fasci che percorrono cammini differenti. Cambiando la lunghezza dei bracci dell'interferometro si modifica la differenza di cammino ottico tra i due fasci e il ricevitore registra un cambiamento della figura di interferenza. Studiare questa figura mettendola in relazione con la lunghezza d'onda.

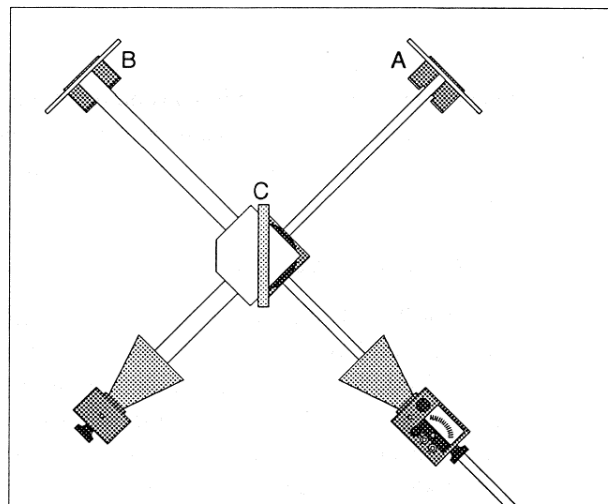


Figure 7: Configurazione di Michelson

6 Diffrazione di Bragg

In questa esperienza si utilizza un cubo di Bragg, questo riproduce su scala macroscopica un cristallo con reticolo cubico. Gli atomi del reticolo diffondono i raggi X su di essi incidenti dando luogo a un pattern di interferenza, allo stesso modo le sferette di acciaio incastonate nel cubo di Bragg diffondono il fascio di microonde incidente e producono una figura di interferenza.

Si posiziona sul goniometro la pedana di supporto e il cubo di Bragg. Si sceglie un piano reticolare (un fascio di piani, paralleli tra loro e passanti per le sferette metalliche incastonate nel cubo) e si misura l'intensità delle onde riflesse da quel piano al variare dell'angolo di incidenza. La condizione di Bragg si verifica quando la differenza di cammino ottico tra i raggi riflessi dai differenti piani paralleli al piano reticolare scelto dà luogo a interferenza costruttiva. Si ponga attenzione a fare misure sempre in condizioni per cui

$$\theta_{\text{incidenza}} = \theta_{\text{riflessione}}$$

relativamente allo stesso piano. Un modo è quello di tenere fisso l'emettitore, ruotare il cubo di un angolo α e il ricevitore di un angolo $2 * \alpha$.

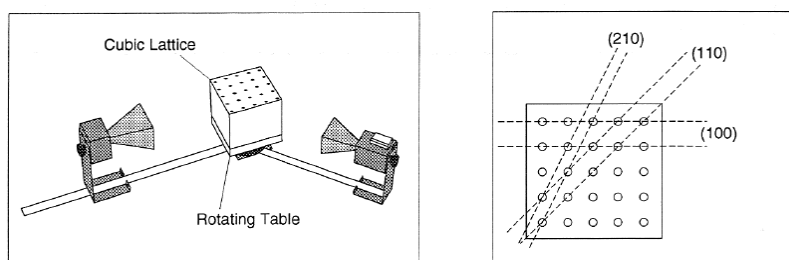


Figure 8: Configurazione per la diffrazione di Bragg

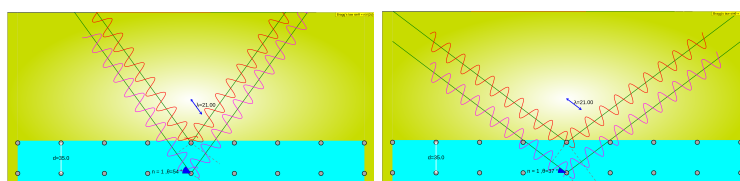


Figure 9: Studio della diffrazione di Bragg sul piano cristallino parallelo alla superficie di separazione tra i due mezzi: si varia l'angolo di incidenza e si osserva l'onda riflessa. Simulazione da <https://iwant2study.org>

7 BIBLIOGRAFIA

- Manuale PASCO disponibile sul sito.

- libro di Fisica 2
- interferometro di Faby-Perot https://en.wikipedia.org/wiki/FabryPérot_interferometer
- simulazione diffrazione di Bragg <https://iwant2study.org>