

MICROONDE

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

February 19, 2025

1 Introduzione all'esperienza

In questa esperienza, vengono esaminati fenomeni ottici come riflessione, rifrazione ed interferenza utilizzando onde elettromagnetiche con una lunghezza d'onda di circa 3 cm (circa 10 GHz). Tuttavia, anziché essere osservati direttamente dall'occhio umano, questi fenomeni vengono rivelati da un ricevitore apposito. Entrambi il ricevitore e l'emettitore impiegano un diodo e una cavità risonante per generare e propagare le onde elettromagnetiche. L'emettitore genera un'onda elettromagnetica coerente e polarizzata linearmente. L'emissione può essere concepita come proveniente da un punto all'interno del cono dell'emettitore, come illustrato nel manuale PASCO. Il ricevitore è dotato di un sistema che entra in oscillazione quando riceve il segnale a microonde, ma solo se la polarizzazione del segnale è parallela all'asse del diodo ricevente. Di conseguenza, viene registrata solo la componente del segnale che è parallela alla direzione di polarizzazione del ricevitore. L'onda elettromagnetica genera nel ricevitore un segnale in tensione (o corrente) che può essere osservato sul display del ricevitore o mediante un multimetro. Scegliete il metodo di lettura che meglio si adatta alla specifica esperienza (e.g. ricerca dei massimi utilizzando il display).

NOTA BENE: eseguite la lista di esperienze riportate in questo documento. Queste sono un sottoinsieme di quelle illustrate sul manuale PASCO.

2 Obiettivi dell'esperimento

L'obiettivo dell'esperimento è di:

1. Analizzare le caratteristiche del fascio emesso dalla sorgente e la risposta del ricevitore, concentrandosi su:
 - a Osservare il fenomeno delle onde stazionarie.
 - b Studiare la polarizzazione.

2. Misurare l'angolo di Brewster.
3. Studiare il fenomeno dell'interferenza.
4. Investigare la diffrazione alla Bragg su un reticolo.

3 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.

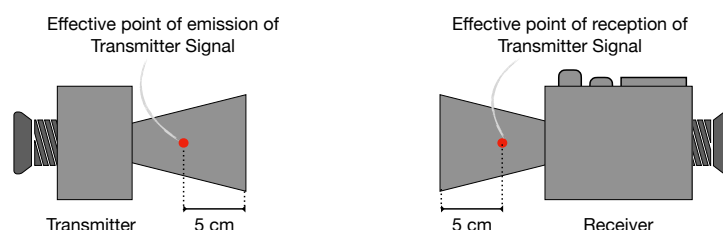


Figure 1: Emettitore e Ricevitore. I punti di emissione e ricezione dell'onda sono ~ 5 cm all'interno degli horn (guida d'onda). In molte delle misure proposte la conoscenza esatta della loro posizione non è rilevante.

L'**emettitore** è una sorgente di onde elettromagnetiche coerenti (mantengono costante la relazione tra le fasi delle onde emesse) e polarizzate linearmente (il suo campo oscilla in una direzione fissa lungo una linea retta). Esso 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 converte il segnale ricevuto in un segnale di corrente che è visualizzato su un amperometro analogico. Ricevitore ed emettitore sono provvisti di due **horn** (guida d'onda) a forma di tronco di piramide. Queste sono di metallo e, 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). Sarà necessario verificare quale sia l'orientamento relativo dei due horn per ottenere un segnale di intensità massima.

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 indotto sul ricevitore in modo da ottimizzare la misura in termini di sensibilità e dinamica. Si noti che i segnali potranno oscillare sia positivamente che negativamente rispetto ad un offset prescelto. In generale, è preferibile non modificare il guadagno durante una stessa raccolta dati, nel caso questo sia invece necessario controllare attentamente il fattore di amplificazione confrontando una stessa lettura effettuata su scale differenti (e.g. verificare la linearità del guadagno). 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. E' a discrezione del gruppo la scelta tra le due catene di lettura (e.g. in alcune una lettura può essere più comoda dell'altra).

Come interpretare le informazioni prodotte dal ricevitore?

- il ricevitore non misura direttamente l'intensità assoluta del campo elettromagnetico, ma una tensione (o corrente) proporzionale alla componente del campo elettrico nella direzione della polarizzazione.
- la lettura del ricevitore dipende da parametri interni come il guadagno, l'offset e la risposta del circuito.
- per confrontare misure diverse è fondamentale mantenere costante il guadagno o correggere eventuali variazioni.

Suggerimenti: Le principali quantità che andrete a misurare sono la distanza (e l'angolo) fra ricevitore e trasmettitore e l'intensità/ampiezza del segnale e.m.

- 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 per esempio 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? Al fine di poter permettere una valutazione delle sistematiche più accurata potrebbe essere utile che la misura/lettura venga eseguita da una o più persone diverse del gruppo.

4 Prendere confidenza con la strumentazione

Per caratterizzare il ricevitore, iniziate misurando il segnale ricevuto in diverse condizioni: variando l'angolo di polarizzazione, la distanza dall'emettitore e il guadagno del ricevitore. Vedere come varia il segnale in funzione dell'offset impostato. Queste informazioni vi aiuteranno a interpretare correttamente le misure successive.

- verifica della risposta in funzione della polarizzazione: confrontare la lettura del segnale quando il ricevitore è allineato o ruotato rispetto all'emettitore.
- studio della sensibilità: determinare l'intervallo dinamico del ricevitore, ovvero la soglia minima e massima misurabile con precisione.
- studio del rumore: testare possibili sorgenti di rumore che possono alterare la lettura del segnale (e.g. oggetti ingombranti, come computer, installati tra ricevitore e trasmettitore, presenza di cellulari, eventuali interferenze con altri trasmettitori in prossimità).

5 Caratteristiche del fascio: polarizzazione, ampiezza e geometria

5.1 Polarizzazione

Come prima attività di questa esperienza dovrete effettuare la caratterizzazione del fascio, studiandone la sua polarizzazione. La **legge di Malus** prevede che l'intensità di una 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 (si veda Figura 2).

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 ?

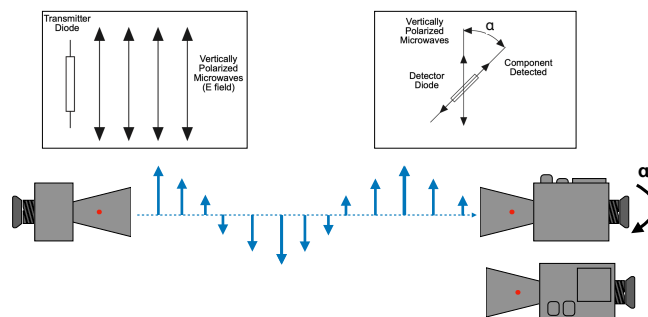


Figure 2: Visione schematica dell'andamento dell'intensità del fascio in funzione dell'angolo, α , tra ricevitore e emettitore.

5.2 Ampiezza

Il secondo obiettivo dell'esperienza è quello di comprendere come è fatto il fascio di onde e.m. che state utilizzando, e studiare come l'ampiezza dei segnali letti dipenda dalla relativa posizione dell'emittore e del ricevitore. 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), come mostrato in Figura 3 (Immagine superiore).
- la dipendenza del segnale dalla distanza r ricevitore-emettitore (mantenendo i due strumenti allineati sulla guida millimetrata) come mostrato in Figura 3 (Immagine inferiore)

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.

5.3 Geometria

Al variare della distanza ricevitore-emettitore, r , il segnale mostra un comportamento caratteristico: oscilla e decresce. Le oscillazioni sono dovute all'instaurarsi di onde stazionarie, prodotte dalla riflessione multipla del segnale sul ricevitore e sull'emettitore stesso. Si realizza così una *cavità di Farby-Perot* (vedi Figura 4).

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:

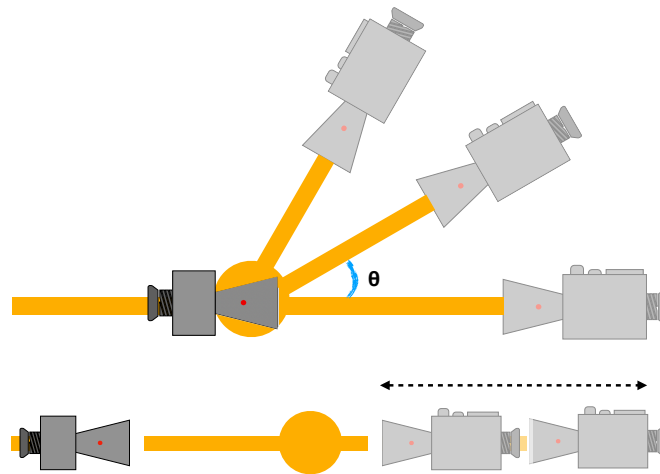


Figure 3: Come movimentare il Ricevitore (o l'emettitore) per studiare le caratteristiche della sorgente di microonde.

- la forma del fascio (si comporta come se avesse un fronte d'onda piano o sferico ?)
- la dipendenza del segnale dal campo e.m., ovvero che tipo di dipendenza si trova fra r e l'ampiezza del segnale osservato sul ricevitore (e.g. proporzionalità al campo, o all'intensità o ad una funzione più complessa ?)
- il **valore della lunghezza d'onda** delle microonde e il modo migliore per determinare tale valore.



Figure 4: Esempio di fenomeno di onde stazionarie instaurato nel sistema di microonde.

Nel calcolare l'andamento della variazione del segnale in funzione della distanza r , vi accorgete che il risultato non mostrerà un andamento ideale (e.g. $1/r$, $1/r^2$, ...) poiché alcuni effetti al contorno (e.g. effetti geometrici e varie interferenze) influenzeranno il risultato.

6 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.

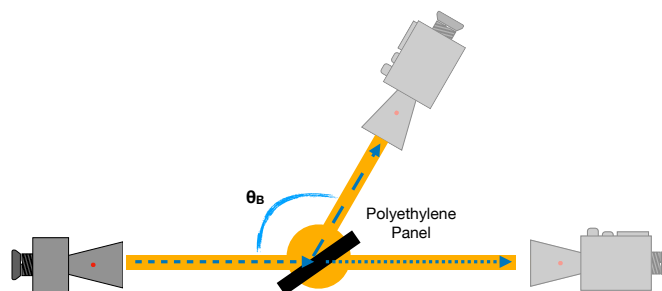


Figure 5: Misura dell'angolo di Brewster

Se l'onda incidente non è polarizzata (Fig. 6 sinistra), 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 .

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. 6 destra).

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 polietilene.

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 polietilene misurando il segnale ricevuto. E' possibile estrapolare una buona stima dell'angolo di Brewster usando una interpolazione parabolica dei punti campionati in prossimità del massimo del segnale (l'angolo di Brewster corrisponderà al minimo della parabola). Ripetete la misura per entrambe le polarizzazioni ed provate poi a studiare il segnale riflesso.

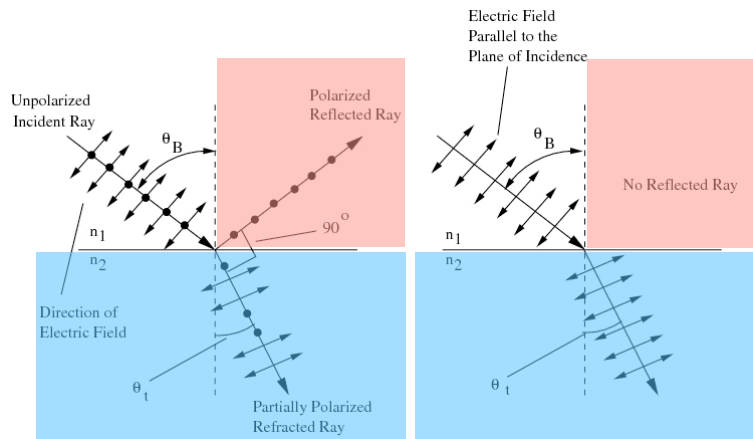


Figure 6: Riflessione e rifrazione di un raggio non polarizzato (sinistra) e polarizzato (destra) quando l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di Brewster. La freccia a doppia punta indica un campo elettrico con direzione parallela al piano di incidenza, quella a doppia punta con un pallino a metà 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).

7 Interferenza

E' possibile studiare il fenomeno dell'interferenza realizzando differenti configurazioni. Studiatene almeno due¹ cercando di ricostruire le caratteristiche della figura di interferenza:

- posizione dei massimi
- lunghezza d'onda
- intensità del segnale in funzione della distanza r

utilizzando il modello specifico di ogni sistema di misura (e.g. doppia fenditura, cavità Fabry-Perot, specchio di Lloyd e Michelson) che prende in considerazione i parametri sopra riportati.

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.

Specchio di Lloyd: disporre emettitore, ricevitore e lasta riflettente come in figura 8. Il ricevitore riceverà due fasci: quello direttamente proveniente

¹Ai fini della valutazione finale ne saranno utilizzate solamente due.

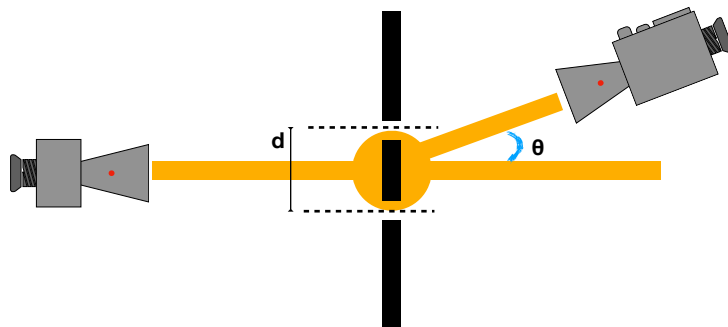


Figure 7: Configurazione doppia fenditura

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.

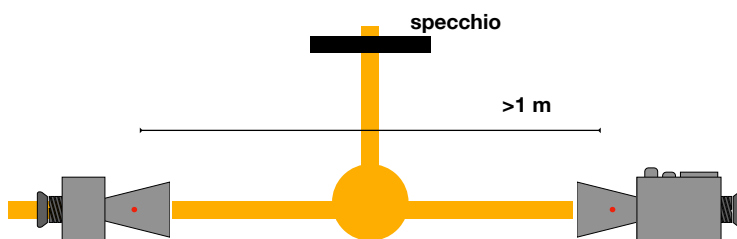


Figure 8: Configurazione specchio di Lloyd

Interferometro di Fabry-Perot: posizionare due lastre semiriflettenti parallele tra loro e con emettitore e ricevitore (si veda la figura 9). 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.

Interferometro di Michelson: posizionare emettitore, ricevitore, lastre riflettenti (A, B) e lastra semiriflettente (C) come indicato in figura 12. 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.

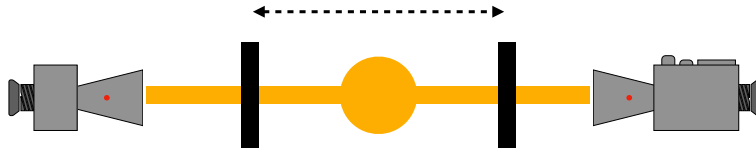


Figure 9: Configurazione di Fabry-Perot

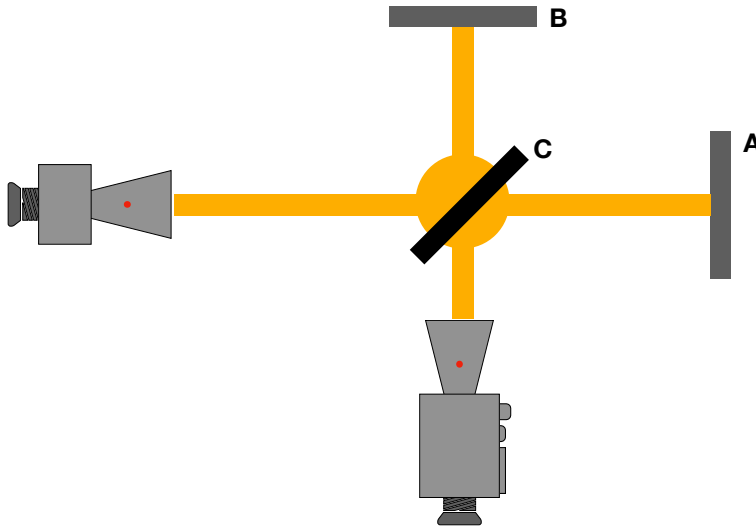


Figure 10: Configurazione di Michelson

8 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 ad una figura 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:

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (2)$$

dove λ è la lunghezza d'onda del fascio incidente, n un numero intero e θ

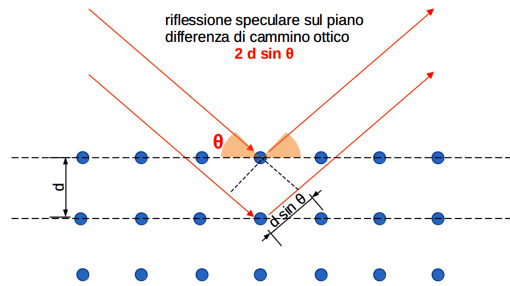


Figure 11: Studio della diffrazione di Bragg sul piano cristallino parallelo alla superficie di separazione tra i due mezzi: si varia l'angolo di incidenza e si osserva l'onda riflessa.

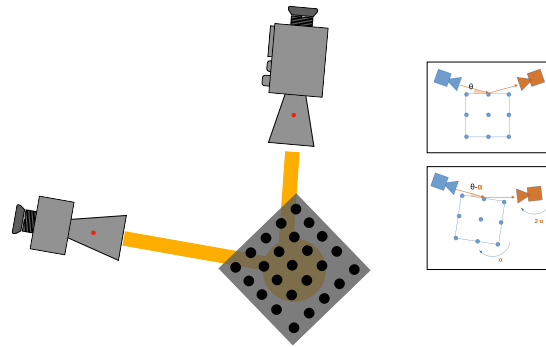


Figure 12: Configurazione per la diffrazione di Bragg

l'angolo di incidenza. 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 $2 * \alpha$ (si veda Figura 12).

9 Appendice: la legge di Bragg

La legge di Bragg è un caso particolare della diffrazione di Laue, che determina gli angoli di scattering coerente e incoerente da un reticolo cristallino. Quando i raggi X incidono su un particolare atomo, fanno muovere la nuvola elettronica come un'onda elettromagnetica. Il movimento di queste cariche irradia nuovamente onde con frequenza simile, leggermente sfocata a causa di diversi effetti, e questo fenomeno è noto come scattering di Rayleigh. Fondamentalmente, questa legge spiega la relazione tra un raggio di luce X che colpisce e la sua riflessione da una superficie cristallina.

La Legge di Bragg afferma quanto segue:

Quando il raggio X incide su una superficie cristallina, il suo angolo di incidenza, θ , si rifletterà con lo stesso angolo di scattering, θ . E, quando la differenza di cammino, d , è uguale a un numero intero, n , di lunghezza d'onda, λ , si verificherà interferenza costruttiva.

Il processo esatto si verifica anche nello scattering di onde di neutroni tramite nuclei o un'interazione di spin coerente con un elettrone isolato. Questi campi d'onda che vengono riemessi interferiscono tra loro in modo distruttivo o costruttivo, creando un modello di diffrazione su un rivelatore. L'analisi della diffrazione è l'interferenza d'onda risultante, e questa analisi è nota come diffrazione di Bragg.

Equazione di Bragg

Secondo l'Equazione di Bragg:

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

- L'equazione spiega perché le facce dei cristalli riflettono i fasci di raggi X sotto particolari angoli di incidenza (Θ, λ) .
- La variabile d indica la distanza tra gli strati atomici, e la variabile λ specifica la lunghezza d'onda del fascio di raggi X incidente e n come un intero.

Questa osservazione illustra l'interfaccia d'onda dei raggi X, chiamata diffrazione dei raggi X (XRD), e dimostra la struttura atomica dei cristalli.

Premio Nobel a Bragg

Bragg è stato inoltre premiato con il Premio Nobel per la Fisica per aver identificato le strutture cristalline iniziando con NaCl, ZnS e diamante. In

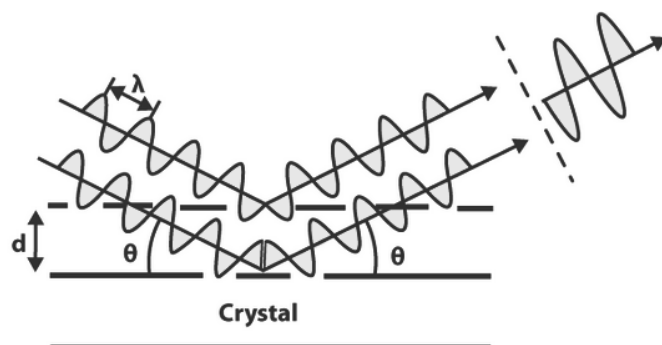


Figure 13: Figura di interferenza da diffrazione Bragg

aggiunta, per comprendere la struttura di ogni stato della materia mediante qualsiasi fascio, ad esempio, ioni, protoni, elettroni, neutroni, con una lunghezza d'onda simile alla distanza tra le strutture molecolari, è stata sviluppata la diffrazione.

10 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>