

Università degli studi di Catania
Corso di laurea in fisica

Terza prova in itinere di
Laboratorio di Fisica II

Tesina sulla prova pratica di laboratorio
realizzata da

Esperienza:
Verifica della legge di Malus mediante un sistema di polaroidi

§ Introduzione teorica e descrittiva

Scopo dell' esperienza

L'esperienza permette una verifica sperimentale della legge di Malus che lega l'intensità del campo elettrico di un fascio di luce polarizzata all'angolo di rotazione dell'asse ottico della sostanza che ha polarizzato la luce stessa.

Descrizione teorica dell' esperienza

Esistono vari modi per ottenere luce polarizzata. Uno tra i più semplici si basa sulle proprietà di certi materiali, detti anisotropi, come ad esempio i polaroidi. I polaroidi sono sostanze costituite da macromolecole allungate tutte in una stessa direzione. Gli elettroni all'interno di queste macromolecole possono oscillare lungo una sola direzione. Un fascio di luce non polarizzata che attraversa il polaroide subirà dunque un fenomeno per cui la componente dei vari campi elettrici parallela alle macromolecole verrà assorbita; al contrario la componente ortogonale, dato che l'oscillazione dei relativi elettroni non è permessa all'interno del materiale, passa senza subire variazioni. Questa direzione privilegiata è detta asse ottico del polaroide. In altre parole il fascio di luce che prima era non polarizzato dopo aver attraversato il polaroide, almeno in linea di principio, conterrà onde i cui campi elettrici vibrano tutti nella stessa direzione, quella appunto data dall'asse ottico. Sappiamo che l'intensità di un'onda è proporzionale al quadrato del campo elettrico. La luce allora dopo aver passato il polaroide avrà una intensità

L'esperienza consiste nel far attraversare il fascio di luce polarizzata attraverso un' altro polaroide. Per differenziarli, chiameremo il primo polarizzatore, il secondo analizzatore. Anche questo ovviamente assorbirà una sola componente del campo elettrico, mentre l'altra passerà. In particolare la componente $E_0 \sin\theta$ verrà assorbita, la componente $E_0 \cos\theta$ non subirà alterazioni dal passaggio nel polaroide. L'intensità della luce in uscita dall'analizzatore sarà allora evidentemente

Le situazioni estreme sono rappresentate dal caso in cui $\theta = 0$ (gli assi ottici dei due polaroidi sono paralleli) e all'uscita dell'analizzatore raccogliamo il massimo di luce possibile ($I = I_0$) e dal caso in cui $\theta = \pi/2$ (i due assi ottici sono ortogonali), e dall'analizzatore non passa luce perchè la direzione privilegiata dal polarizzatore è la stessa che viene bloccata dall'analizzatore. Ovviamente tra le due situazioni estreme abbiamo tutte le condizioni intermedie e in particolare l'intensità del segnale luminoso che esce dall'analizzatore passa con continuità da zero al valore massimo, secondo l'andamento del quadrato del coseno.

Descrizione dell' apparato

Per realizzare l'esperienza si ha a disposizione un banco ottico in cui sono presenti un proiettore che emette luce (chiaramente non polarizzata), due polarizzatori in grado di ruotare attorno a una direzione fissa, e un sistema per misurare l'intensità del segnale luminoso in uscita (vedi figura nella pagina seguente). Questo sistema è rappresentato da una cellula fotoelettrica che trasforma il segnale luminoso in un impulso elettrico che verrà rivelato da uno strumento di misura opportuno.

In particolare, visto che le correnti da misurare sono dell'ordine di 10^{-6} A, si dispone di un microamperometro. La sua classe di precisione, così come scritto sullo stesso strumento, è 0.5; dunque l'errore a priori da assegnare alle misure, visto che il fondo scala dello strumento è di $100 \mu\text{A}$, sarà di $0.5 \mu\text{A}$. Nella realizzazione dell'esperienza si suppone che la cellula fotoelettrica abbia una risposta lineare rispetto all'intensità luminosa, in modo da poter immaginare una dipendenza diretta tra il valore di corrente che leggiamo sull'amperometro e l'intensità luminosa che vogliamo misurare. In sostanza se la legge di Malus si esprime in termini di intensità luminosa

noi considereremo che la stessa relazione valga per la corrente letta sul microamperometro:

Ovviamente tutti questi apparati sono liberi di scorrere sul banco ottico. E' a disposizione pure un collimatore da interporre tra il proiettore e il polarizzatore per regolare inizialmente il fascio di luce che colpisce lo strumento di rivelazione, così da poter regolare il tutto in modo da far coincidere il massimo di intensità luminosa da misurare col fondo scala dell'amperometro, e dunque sfruttare per le misure tutta la scala dello strumento, in modo da avere una misura quanto più accurata è possibile.

Descrizione pratica dell'esperienza

La prima parte dell'esperienza consiste nell'allineare tutti gli strumenti sul banco ottico. Quindi si accende il proiettore e, mantenendo fisso l'analizzatore, si ruota velocemente il polarizzatore fin quando si trova, seppur in modo orientativo, la posizione in cui nella cellula fotoelettrica viene raccolta la massima intensità luminosa. In questa situazione si interviene sul collimatore fin quando l'ago del microamperometro va a fondo scala. Nella realizzazione dell'esperienza ho notato che questa situazione si raggiunge solo eliminando il collimatore, cioè se tutta la luce emessa dal proiettore viene coinvolta nell'esperienza. Ho poi fissato che questa fosse la posizione in cui gli assi ottici dei due polarizzatori hanno sfasamento nullo, cioè $\theta = 0^\circ$. Fatto questo, inizia la realizzazione vera e propria dell'esperienza che consiste nel ruotare l'analizzatore, ovvero il suo asse ottico, e di misurare per ogni posizione la corrente segnata dal microamperometro. Per avere un risultato quanto più accurato è possibile ho scelto di variare l'angolo di rotazione dell'analizzatore con passo costante pari a 5° . Per poter poi effettuare una analisi statistica dei dati ho scelto di ripetere l'esperienza quattro volte, avendo così a disposizione per ogni diverso angolo quattro valori di corrente, dai quali calcolare la media e l'errore statistico (da aggiungere all'errore a priori).

Così come discusso nella descrizione teorica, la relazione che lega l'angolo di deviazione dell'asse ottico del polarizzatore rispetto a quello dell'analizzatore con la corrente segnata dal microamperometro non è lineare, ma di tipo cosinusoidale. La relazione può però facilmente essere linearizzata: abbiamo infatti

posto $i = y$ e $\cos^2\theta = x$ si ottiene

Tuttavia va precisato che quanto detto finora vale nelle ipotesi ideali fatte più o meno implicitamente nella trattazione teorica e supponendo una condizione di perfetto funzionamento di tutti gli strumenti, cosa che certamente non è vera. In particolare sono tre le probabili fonti di divergenza della teoria dalla pratica. Abbiamo infatti assunto che la cellula fotoelettrica riveli solo ed esclusivamente la luce che passa l'analizzatore. In realtà per quanto l'ambiente in cui è realizzata l'esperienza sia stato oscurato, avremo sempre un residuo di luce ambientale che potrebbe essere rivelata dalla cella come presenza di fondo che porteremo dietro in tutte le misure. Inoltre il proiettore non è una sorgente monodirezionale, nè i polaroidi hanno una superficie molto estesa, dunque è verosimile che parte della luce del proiettore venga diffusa nell'ambiente e rivelata dalla fotocellula. A causa di questi due fattori in sostanza potrebbe essere presente un valore (piccolo) di intensità luminosa rivelata costantemente dallo strumento ma che nella realtà non ha nulla a che fare con l'esperienza, e dunque potrebbe costituire una intensità di corrente di fondo. Ovviamente questa corrente di fondo sarà tanto più evidente tanto più sensibile e raffinata è la capacità di risoluzione della fotocellula e il suo rapporto di conversione del segnale luminoso in segnale elettrico. Al limite, la fotocellula potrebbe non essere affatto sensibile a delle intensità di fondo dopotutto minime come quelle di cui si è discusso. In ogni caso si può tentare di effettuare una misura della corrente segnata dal microamperometro col proiettore spento e dunque vedere quanto influisce sulla misura la luce ambientale; in seguito si può accendere il proiettore ma schermare i polaroidi così da misurare il valore di corrente dovuta alla diffusione della luce del polaroide stesso. In laboratorio ho eseguito questa misura; tuttavia utilizzando il microamperometro a disposizione, in entrambi i casi la corrente segnata è stata nulla. Ho provato dunque ad utilizzare uno strumento più preciso, e in particolare un galvanometro. Ma anche con questo strumento, pur utilizzando la scala più precisa a disposizione, non ho rilevato alcuna corrente, nè riferita alla luce ambientale, nè riferita alla luce diffusa dal polaroide. Ciò lascia intendere quanto anticipato, e cioè che la cellula fotoelettrica con buona probabilità non è sensibile a questo tipo di intensità luminose. E' però possibile una terza imprecisione dovuta al fatto che i polaroidi non sono ideali, e dunque non faranno passare luce il cui campo elettrico vibra esattamente in una direzione, ma entro un determinato range di direzioni. In particolare nella condizione in cui gli assi ottici dei due polaroidi sono tra loro ortogonali, mentre nella descrizione ideale risultava che la direzione di vibrazione privilegiata dal polarizzatore era drasticamente bloccata dall'analizzatore, nella realtà le componenti di vibrazione che riescono a passare dal polarizzatore oltre quella prevista, non saranno bloccate, anzi risulteranno privilegiate, dall'analizzatore, e dunque giungeranno nella cellula fotoelettrica. Questo fenomeno dipende evidentemente dalla qualità dei polaroidi, ma ancora una volta dalla sensibilità del rivelatore, in quanto si tratta comunque di valori di intensità molto bassi. Per tener conto di questi e di tutti quei fattori di imprecisione che derivino dal discostamento dalle ipotesi teoriche fatte, sarà opportuno introdurre nella relazione un fattore legato a queste intensità luminose di fondo, per cui la relazione che considererò sarà

e dunque ricercherò una relazione del tipo

ovvero

dove y_0 e y_f saranno i parametri da determinare tramite best-fit. In particolare il valore calcolato per y_f farà capire se e quanto abbiano influito i vari fattori di imprecisione di cui si è discusso.

sono proprio adiacenti o comunque le sono molto vicini. A pagina 8 viene invece presentata la retta calcolata tramite best-fit, e la cui equazione è stata prima scritta. Si sarebbero potute graficare pure le due rette estreme ottenute considerando pure l'errore sui due parametri, ma poichè questo è molto piccolo, non si distanzieranno in modo apprezzabile da quella centrale. In questo grafico l'asse delle ascisse contiene il valore di $\cos^2\theta$. Questa però è una funzione di periodo $[0, \pi]$ e dunque non è utile riportare tutti i dati sperimentali: ad ogni valore delle ascisse corrispondono quattro punti sperimentali, che si sarebbero sovrapposti e dunque il grafico risulterebbe illeggibile. Per evitare questo inconveniente ho scelto di graficare il valor medio dei quattro punti cui corrisponde sostanzialmente la stessa ordinata, assegnando come errore il valor medio dei singoli errori. In questo modo si ha un'idea qualitativa della posizione dei punti sperimentali e del loro rapporto rispetto alla retta di best-fit. Ovviamente però nel calcolare l'equazione della retta stessa ho tenuto conto di tutti i dati sperimentali.

§ Risultati ottenuti

Va innanzitutto notato che questa esperienza consente di effettuare misure con una elevata accuratezza, dato che l'errore relativo medio riscontrato tra i valori di corrente calcolati è pari a circa il 7%.

Per quanto riguarda invece l'analisi dei risultati stessi, si trova che il valore di i_0 determinato tramite best-fit coincide sostanzialmente con il valore rilevato sperimentalmente ($i_0 = 100.40 \pm 0.22$), il che indica chiaramente che proprio dal fit di una curva come quella prevista dalla legge di Malus, si ottiene un parametro sovrapponibile a quello sperimentale, cioè in altre parole, i dati sperimentali hanno in buona sostanza l'andamento previsto dalla legge di Malus. E' interessante osservare poi che il suo errore relativo è davvero minimo, pari allo 0.2%. Considerazioni a parte vanno fatte invece per il parametro i_f . Si era infatti detto che sperimentalmente sembrava che nè la luce ambientale nè la luce diffusa dal polarizzatore costituivano una intensità luminosa di fondo apprezzabile per la cellula fotoelettrica a

disposizione. Ora, tramite best-fit si è trovato un valore di corrente di fondo $i_f = 1.23 \pm 0.15$, che certamente, per quanto piccolo, è ben diverso da quanto previsto sulla scorta dei dati sperimentali. Tra l'altro il suo errore relativo è del 12%, valore certamente grande se rapportato con quelli trovati per tutte le altre misure di questa esperienza. Questi dati possono essere spiegati in parte per la presenza di una ulteriore causa di luce di fondo (di cui si era parlato), legata al fatto che i polaroidi certamente non sono strumenti ideali e dal perfetto funzionamento. Questo ha influito sul parametro i_f calcolato, visto che non è possibile misurare preventivamente questa intensità, al contrario di quanto fatto per le altre due. Non è però assurdo ritenere che anche gli altri due fenomeni, che appaiono non rilevanti singolarmente, se combinati insieme, producono su tutto il campione di dati degli effetti considerevoli. D'altra parte questo valore calcolato è poco più del doppio della sensibilità del microamperometro, e questo può giustificare l'affermazione ora fatta. Circa l'errore che grava su questo parametro, è probabile che ciò sia da amputare al fatto che non si è effettuata una misura vera e propria della corrente di fondo, misura da cui poter ricavare poi il nostro parametro, che invece dipende esclusivamente da elaborazioni statistiche.

§ *Conclusione*

In conclusione, si può certamente affermare che si tratta di una esperienza la cui realizzazione è molto semplice, e che permette di verificare una nota legge della fisica. I risultati ottenuti possono essere senza dubbio considerati soddisfacenti in quanto si è trovata la piena aderenza tra questi e le previsioni teoriche.

§ *Bibliografia*

- E. Amaldi – R. Bizzarri – G. Pizzella, Fisica generale, ed. Zanichelli
- J. R. Taylor, Introduzione alla sperimentazione fisica, ed. Zanichelli
- M. Lattuada, Appunti del corso di *Laboratorio di fisica II*, A.A. 2002/2003
- M. Severi, Introduzione alla sperimentazione fisica, ed. Zanichelli

§ Indice

Introduzione teorica e descrittiva

Scopo dell'esperienza pag. 1

Descrizione teorica dell'esperienza pag. 1

Descrizione dell'apparato pag. 1

Descrizione pratica dell'esperienza pag. 2

Dati sperimentali e loro elaborazione

Dati sperimentali pag. 4

Curva di massima verosimiglianza pag. 6

Risultati ottenuti pag. 6

Grafico dei dati sperimentali e della curva di best-fit pag. 7

Grafico dei dati sperimentali e della curva di best-fit linearizzata pag. 8

Conclusione pag. 9

Bibliografia pag. 10