

Percorso quantistica

Idea chiave	Come la facciamo (esperienza e formalizzazione)
Stato di una particella	Polaroidi + stato di polarizzazione singolo fotone
Onda – Particelle	Analogia con la diffrazione di elettroni
Funzione d'onda	Formulazione con bra e ket
Probabilità	Calcolo coefficienti
Evoluzione funzione d'onda	Discussione finale
Sovrapposizione e misura	Proiettori su $ h\rangle$ e $ v\rangle$ con calcolo coefficienti
Stati di sovrapposizione	Polaroid + Calciti
Principio di indeterminazione	Calciti + Calcolo nelle basi $ h\rangle$, $ v\rangle$ e $ d\rangle$
Processo di misura ed osservabili	Polaroidi + calcolo coefficienti
Collasso funzione d'onda	Polaroid + calciti
Onde stazionarie di materia	Discussione su comportamento ondulatorio

Sequenza attività

Durata (h)	Attività
1	Discussione questionario iniziale
2	Scheda I – Introduzione
1	Scheda II – Esperimenti con polaroid
2	Scheda III – Legge di Malus
1	Scheda IV – Esperimenti con calcite
2	Scheda V – Formalizzazione
2	Scheda VI – Conclusioni
1	Questionario finale
12	

Attività 1 - Discussione questionario iniziale

Obiettivo: far riflettere su: modelli atomici secondo fisica classica, energia potenziale, emissione di radiazione, orbitali

L'energia totale (cinetica) di una carica che orbita lungo una traiettoria circolare non è costante nel tempo

Vera perché nel sistema S' l'elettrone irraggia avendo accelerazione costante. La potenza emessa è costante, e la perdita di energia per irraggiamento va a spese dell'energia cinetica che in S' è associata esclusivamente al moto circolare uniforme. Alla diminuzione di energia cinetica corrisponde una diminuzione del raggio dell'orbita. Quindi per $t = \infty$ l'elettrone è fermo in S' ovvero si muove di moto uniforme con velocità $v = \text{cost}$ nel laboratorio.

Per far capire che la carica irraggia e quindi emette energia si può far notare che la potenza emessa è proporzionale al modulo del campo elettrico generato dalla carica al quadrato. Questo è in accordo con quanto studiato in elettrostatica dove abbiamo visto che al campo elettrico e magnetico è associata una energia E proporzionale a E^2 e B^2 . Nel caso più semplice si ricordi il caso del condensatore e dell'induttanza per spiegare la dipendenza al quadrato.

Per dopo: se una carica in moto viene rapidamente frenata, viene quindi accelerata, e una gran parte della sua energia cinetica si trasforma in energia e.m. mediante irraggiamento. Questo è il principio per la generazione di raggi X o gamma. Nelle macchine acceleratrici il meccanismo è lo stesso solo che la macchina fornisce la necessaria energia a mantenere la carica sulla traiettoria

Se allontaniamo due cariche la loro energia potenziale elettrica aumenta

Ricordare che U va come $1/d$ e quindi l'affermazione è falsa, ovviamente in modulo

Se avviciniamo due cariche la forza che si esercitano l'una sull'altra diminuisce

Ricordare che F va come $1/d^2$ e quindi l'affermazione è falsa. Ovviamente in modulo

Far fare conticino su differenza ordini di grandezza e commento delle altre alternative

Una carica elettrica sottoposta ad un campo elettrico costante può percorrere una traiettoria rettilinea

Vera, è accelerata ma la traiettoria può essere qualsiasi. Far attenzione a risposte con moto parabolico

Una carica elettrica sottoposta ad un campo magnetico costante può percorrere una traiettoria circolare

Vera, perché sottoposta alla F di Lorentz, che non fa lavoro ed è perpendicolare al piano di v ed B e la traiettoria è in generale elicoidale e può essere solo circolare se il moto avviene in un piano perpendicolare a B

L'energia di una carica elettrica in moto circolare è indipendente dalla sua frequenza

Falsa, si ricordi che $K = \frac{1}{2} m v^2$ con $v = \omega R$

Per la domanda a risposta multipla si veda il conto fatto prima. Ricordare come funziona il moto circolare ed in particolare le forze centrali che producono necessariamente moti circolari. A quel punto scrivere:

$$\frac{dE_k}{dt} = -P_{emessa} = k$$

Da cui l'energia cinetica diminuisce. E non solo. Il raggio decresce esponenzialmente perché la sua variazione è proporzionale al raggio stesso.

Un orbitale è una regione dell'atomo intorno al nucleo in cui gli elettroni ruotano

Falsa, gli elettroni non sono particelle che ruotano, altrimenti cadrebbero sul nucleo, vedi anche sopra

Ad un fissato livello energetico corrisponde un orbitale nel quale si può trovare l'elettrone

Falso, perché l'elettrone non ha un'energia corrispondente ad un livello energetico e non è contenuto con certezza in un orbitale, che ricordiamo sono come un sistema di coordinate, una base. Anche i livelli di energia sono approssimati e non c'è corrispondenza con certezza. Però far notare che questa potrebbe essere giusta se si trascurano interazioni elettrone - elettrone negli atomi a molti elettroni

Un orbitale è una regione dell'atomo dove un elettrone può essere trovato con una certa probabilità

Vero, sebbene gli orbitali siano solo un modello delle funzioni d'onda a molti elettroni. Corrispondono ad una funzione d'onda solo nel caso dell'idrogeno. Gli orbitali non possono essere osservati (al contrario degli atomi).

Attività 2 - Scheda I – Introduzione

Domanda	Commento/Descrizione
Quali esperienze che permettono di indagare la struttura della materia conosci? Se non ne conosci, quali sarebbero a tuo parere quelle più opportune? Riassumi brevemente	<i>Ci aspettiamo che confondano l'esperimento con lo strumento, pensando ad esempio al microscopio Indagare soprattutto quello che già conoscono e gli esperimenti che secondo loro sono utili o opportuni. Confrontarli con gli esperimenti "storici" e vedere se emergono naturalmente oppure no Richiamare la domanda del questionario ed i raggi X</i>
Quali sono i sistemi fisici che vengono indagati o che indagheresti in queste esperienze? Spiega brevemente.	<i>Ci aspettiamo che dicano atomi, elettroni, molecole, materiali...</i>
Quali grandezze sono misurate o misureresti in queste esperienze? Spiega brevemente	<i>Indagare se emerge DDP, spettro Ci aspettiamo però che gli studenti parlino di velocità distanza e altre grandezze meccaniche Indagare anche se emerge la relazione meccanica – e.m. . Possiamo far riferimento a e/m per far capire come relazione grandezze meccaniche a grandezze elettriche</i>
Quali informazioni sul comportamento della materia ritieni che queste esperienze forniscano o dovrebbero fornire?	<i>Struttura della materia, modelli dei componenti elementari della materia; potrebbero rispondere anche come è fatto l'atomo</i>

Con essa si intende condurre lo studente verso la polarizzazione della luce come situazione semplificata dal quale partire per investigare il comportamento della luce quando interagisce con la materia. Per fare ciò si dovrà guidare lo studente a comprendere il ruolo della luce nelle sue interazioni con la materia. La luce sarà quindi presa come modello per poter studiare il comportamento dei componenti della materia, e sarà quindi necessario guidarli agli esperimenti secondo lo schema concettuale

Luce → estrapolazione singolo fotone → generalizzazione particella qualsiasi.

In tal modo, si dovrebbe rendere più chiaro l'utilizzo dei polaroid nell'attività successiva.

Attività 3 – Scheda II – Esperienza con polaroidi

Obiettivo: descrivere l'interazione tra luce e materia (in questo caso i polaroid).

Domanda
1) Prendi un polaroid e esponendolo alla luce e tenendolo per una sua estremità, ruotalo: cosa osservi? Usa diverse sorgenti (es. schermo di un computer, smartphone.)
2) Prendi adesso due polaroid; descrivi cosa osservi nei seguenti casi: • Sovrapponendoli e tenendoli fermi • Sovrapponendoli e ruotandoli insieme rispetto ad un asse verticale • Sovrapponendoli e tenendone uno fermo, facendo ruotare l'altro attorno ad un asse ad esso perpendicolare.
3) Prendi due polaroid e sovrapponili, tienine uno fisso e lascia ruotare l'altro di 360° attorno ad un asse verticale. Descrivi come varia l'intensità della luce trasmessa dai due polaroid. In particolare: • Quanti massimi d'intensità luminosa osservi (in un giro completo) • Quanti minimi d'intensità luminosa osservi (in un giro completo) • Di che angolo approssimativamente bisogna ruotare il polaroid per passare da un massimo di trasmissione al minimo successivo?
4) Descrivi e/o illustra in che modo bisogna disporre due polaroid affinché: • La luce trasmessa sia massima • La luce trasmessa sia minima
5) In che modo è possibile ottenere le stesse configurazioni disponendoti tre polaroid? Argomenta la tua risposta, anche realizzando dei disegni.
6) E con più polaroid? Argomenta la tua risposta, anche realizzando dei disegni.
7) In che modo giustificherei il comportamento della luce nelle interazioni osservate con i polaroid?
8) Progetta un'esperienza di laboratorio che ti permetta di caratterizzare quantitativamente l'interazione della luce con un polaroid. • Qual è il numero minimo di polaroid di cui avresti bisogno? • Quali grandezze si dovrebbero misurare? • Quali misure e come si dovrebbero effettuare?

Attività 4 – Scheda III – Legge di Malus

Obiettivo: ricavare la legge $\frac{I}{I_0} = \cos^2 \theta$

Attività 5 – Scheda IV – Esperimenti con calcite

Obiettivo: descrivere l'interazione tra luce e materia (in questo caso la calcite).

Domanda
1) Descrivi cosa accade alle immagini osservate nelle seguenti situazioni: • Appoggiando una faccia del cristallo sulla lettera scritta sul foglio e ruotandolo di un giro completo • Appoggiando le altre facce del cristallo sulla lettera scritta sul foglio e iniziando a ruotare fino ad effettuare un giro completo. • Quante immagini osservi? Rilevi differenza a seconda della faccia appoggiata? • Appoggiando sulla lettera scritta una lastrina di plexiglass e facendola ruotare di un giro completo.
2) Le immagini della lettera, prodotte dal cristallo, sono generate da fasci di luce diversi. Dalle osservazioni fatte, puoi concludere che tali fasci sono polarizzati? Come lo si fa a capire?
3) Il fascio di luce polarizzata di un puntatore laser incide su un cristallo birifrangente. Si intercettano su uno schermo i fasci che emergono dal cristallo • Quanti fasci si osservano? • Come varia il numero di fasci prodotti disponendo un polarizzatore dopo il cristallo e facendolo ruotare di un giro completo?

Scheda V – Formalizzazione interazioni polaroidi con fotone

Sulla base dei risultati ottenuti nelle esperienze precedenti, quali sono le grandezze che descrivono completamente l'interazione di un fotone con uno o più polaroid?

Lo stato di polarizzazione e l'intensità della luce che attraversa il polaroid. In particolare ci si chiede "quanta della luce è polarizzata lungo l'asse del polaroid?" a cui si dà risposta applicando il polaroid in una direzione fissata (ad esempio la direzione x).

Quale di queste grandezze si ottiene principalmente dalle osservazioni con i polaroid?

Lo stato di polarizzazione

Quale di queste grandezze si ottiene principalmente dall'esperimento con la legge di Malus?

L'intensità della luce che attraversa il polaroid

Quale di queste grandezze si ottiene principalmente dalle osservazioni con la calcite?

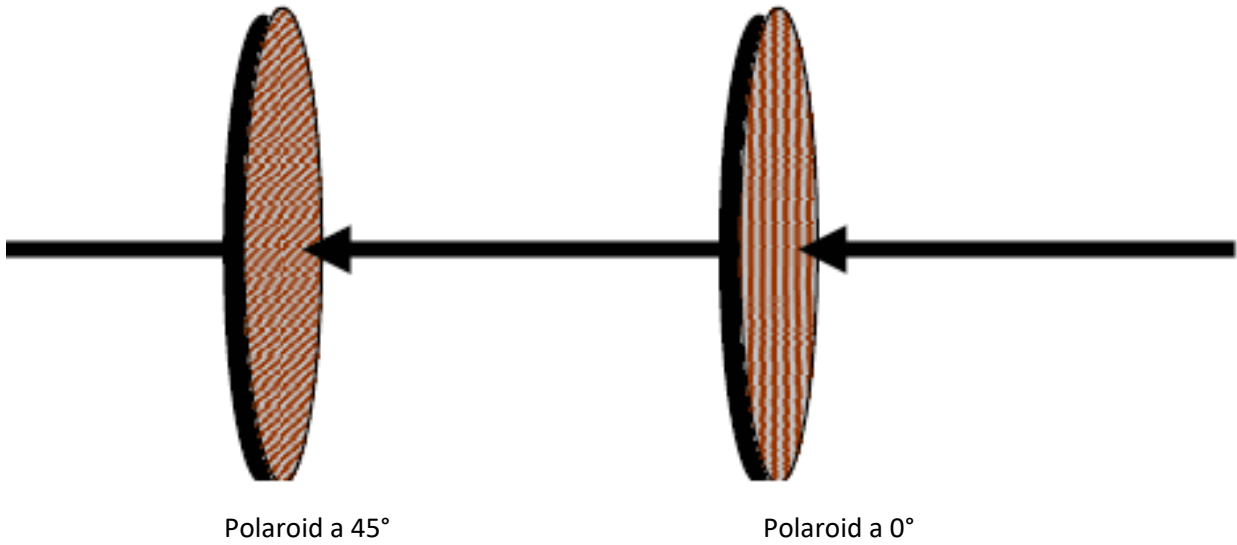
Lo stato di polarizzazione

Come formalizzeresti l'interazione di un fotone con uno o più polaroid?

Negli esperimenti condotti le due grandezze sopra individuate possono essere raggruppate nella seguente grandezza: "quanta luce è polarizzata secondo una certa direzione". Questa "grandezza" che effettivamente si può misurare si chiama osservabile. Associamo a questa [grandezza] osservabile un "operatore". Ad ogni polaroid orientato in una certa direzione associamo un operatore che indichiamo ad esempio con P_x dove x è la direzione di polarizzazione. Loro potrebbero dire con un funzione che ci dice, data una certa polarizzazione in ingresso, qual è la polarizzazione in uscita. Una possibile rappresentazione:

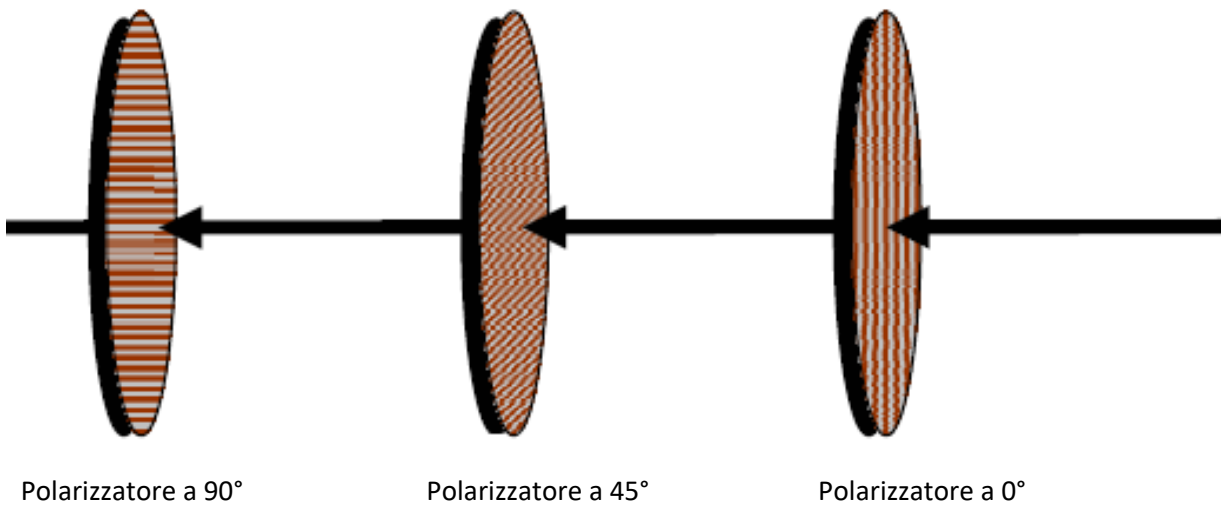
$I \rightarrow \square \rightarrow U$.

Sulla base delle tue osservazioni, come formalizzeresti l'interazione dei polaroid con il fotone, così come rappresentata in figura?

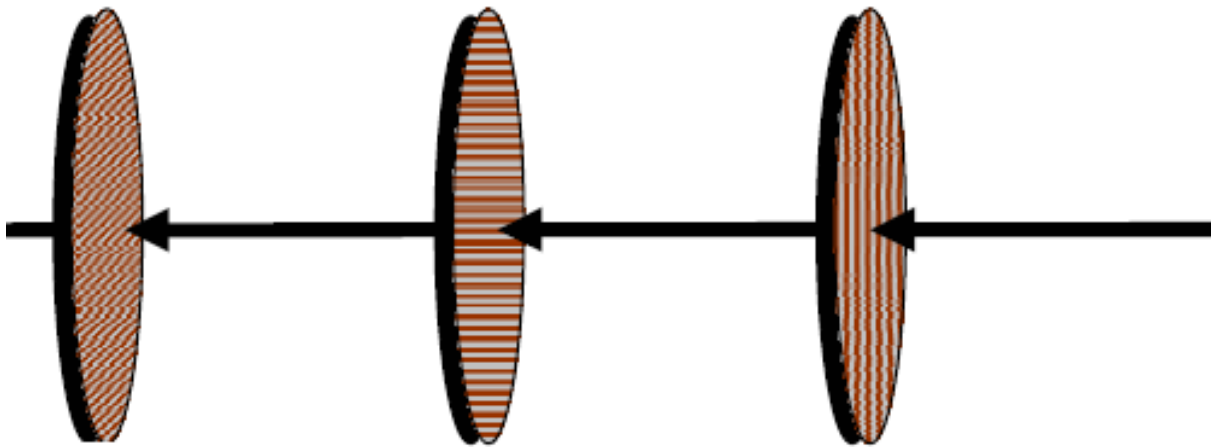


I due operatori in sequenza si scrivono: $P_d P_x$. Si può ricordare il formalismo delle funzioni composte

Considera le seguenti configurazioni di polaroid che interagiscono con un fotone. Sulla base delle tue osservazioni, come le formalizzeresti?



I tre operatori in sequenza si scrivono: $P_y P_d P_x$



Polarizzatore a 45°

Polarizzatore a 90°

Polarizzatore a 0°

I tre operatori in sequenza si scrivono: $P_d P_y P_x$

Confronta le due formalizzazioni. Quali conclusioni puoi trarre?

$P_y P_d P_x$ diverso da $P_d P_y P_x$ da cui segue che gli operatori $P_y P_d$ corrispondenti ai due osservabili non commutano tra loro. La dimostrazione matematica sarà fatta dopo

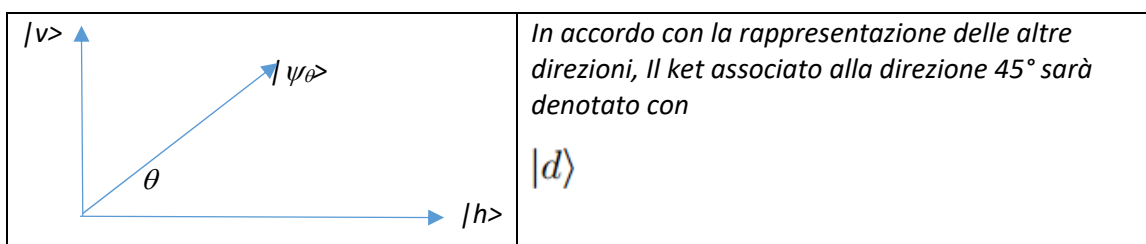
Scheda VI – Formalizzazione stato del fotone

Come formalizzeresti lo stato di un fotone polarizzato a:

- 0° , 90° , 45° , Angolo generico

Ogni sistema fisico che si osserva è rappresentato formalmente da uno stato. Loro potrebbero dire il vettore e diciamo che andrebbe bene ma devono specificare che punta alla direzione di polarizzazione. Si introduce il ket come rappresentazione compatta dello stato. Il ket deve contenere tutte le informazioni che possono essere conosciute riguardo il sistema in studio. In una rappresentazione con vettori di modulo 1 che puntano nella direzione di polarizzazione si ha $\psi_0 = (1,0)$; $\psi_{90} = (0,1)$; $\psi_{45} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1,1)$ Ovvero:

$$|\psi_0\rangle = |h\rangle, |\psi_{90}\rangle = |v\rangle, |\psi_\theta\rangle = \cos\theta|h\rangle + \sin\theta|v\rangle$$



A cosa serve conoscere lo stato di polarizzazione un fotone?

Se uno conosce lo stato di un sistema, se ne può prevedere il comportamento in un esperimento. In generale, però lo stato di polarizzazione non è l'insieme delle polarizzazioni possibili. Estendendo alla particella, si può dire che uno stato non è l'insieme delle posizioni occupate dalla particella

Sulla base di quanto ipotizzato in precedenza e di quanto osservato, come formalizzeresti lo stato di un fotone polarizzato ad un angolo generico che interagisce con un polaroid lungo una certa direzione?

Abbiamo visto che gli operatori sono associati a "cose" che possono essere osservate facendo un esperimento sul sistema. Quindi, gli operatori agiscono sugli stati. Ad esempio, $P_x \psi_\theta$ significa "quanta luce è polarizzata secondo la direzione x se in ingresso entra luce polarizzata lungo una direzione generica?"

Come formalizzeresti lo stato di un fotone polarizzato ad un angolo generico dopo che ha interagito con un polaroid che polarizza a:

- 0°
- 90°
- 45°

Partendo da un fotone polarizzato lungo direzione generica si ha:

$\psi_{dopo0} \propto h\rangle = c_x h\rangle;$ $\psi_{dopo90} \propto v\rangle = c_y v\rangle;$ $\psi_{dopo45} \propto d\rangle = c_z d\rangle;$	Si fa notare che applicando l'operatore ad uno stato iniziale si ottiene uno stato diverso. Si dirà che lo stato risultante finale rappresenta lo stato del sistema dopo una misura. Riservare per il futuro la risposta alla domanda: come è possibile conoscere lo stato del fotone prima dell'interazione, cioè della misura?
---	---

Scheda VII – Formalizzazione della misura e della probabilità

Cosa rappresenta il coefficiente numerico che moltiplica lo stato del fotone dopo la misura? Quale formalizzazione proporresti per ottenere questo coefficiente numerico?

Qui ti si guida all'introduzione del prodotto scalare tra due direzioni qualsiasi partendo dalla considerazione che il coefficiente è un numero. Data la rappresentazione vettoriale adottata

$$\psi_0 = (1, 0); \psi_{90} = (0, 1); \psi_{45} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1)$$

si può partire dai casi particolari in cui nel polaroid entra luce polarizzata secondo la sua direzione:

$$\psi_{0\text{dopo}0} = |h\rangle \Rightarrow c_x = 1;$$

$$\psi_{90\text{dopo}0} = 0 \Rightarrow c_x = 0;$$

$$\psi_{0\text{dopo}90} = 0 \Rightarrow c_y = 0;$$

$$\psi_{90\text{dopo}90} = |v\rangle \Rightarrow c_y = 1;$$

I casi particolari su scritti ci dicono che il coefficiente è anche compreso tra 0 e 1 nel apparato formale. Inoltre, deve dipendere dall'angolo relativo tra i due polaroid. In particolare, vale 1 quando i due polaroid sono paralleli e 0 ortogonali. L'operazione tra vettori che conosciamo che fornisce un coefficiente numerico con le caratteristiche scritte sopra è il prodotto scalare. Nel nostro formalismo scriveremo il prodotto scalare come:

$$\langle \vec{u} | \vec{v} \rangle \equiv \vec{u} \cdot \vec{v}$$

E dunque:

$$c_x = \langle h | u \rangle$$

Utilizzando l'operazione introdotta al punto precedente, come deve essere necessariamente rappresentato il polaroid dal punto di vista formale?

$$P_x |u\rangle = c_x |h\rangle = \langle h | u \rangle |h\rangle = |h\rangle \langle h | u \rangle \Leftrightarrow P_x \equiv |h\rangle \langle h|$$

$$P_y |u\rangle = c_y |v\rangle = \langle v | u \rangle |v\rangle = |v\rangle \langle v | u \rangle \Leftrightarrow P_y \equiv |v\rangle \langle v|$$

Se si impone che il coefficiente numerico sia dato dal prodotto scalare tra lo stato e la base in cui è espresso il proiettore. Esce quindi la forma $P_x = |x\rangle \langle x|$.

Utilizzando l'operazione introdotta al punto precedente, come formalizzeresti l'interazione di un fotone con due polaroid in sequenza orientati allo stesso modo?

$$P_x P_x |u\rangle = |h\rangle \langle h | h \rangle \langle h | u \rangle = |h\rangle 1 \langle h | u \rangle = |h\rangle \langle h | u \rangle = P_x |u\rangle$$

Cioè $P^2 = P$

Riscrivi adesso, utilizzando il formalismo introdotto, lo stato di un fotone polarizzato ad un angolo generico dopo che ha interagito con un polaroid che polarizza a:

- 0°

- 90°
- 45°

Un fotone polarizzato lungo una direzione generica si scrive:

$$|\psi_\theta\rangle = \cos(\theta)|h\rangle + \sin(\theta)|v\rangle$$

Teta, ricordiamo, è l'angolo tra il vettore che punta nella direzione della polarizzazione e l'asse orizzontale cioè quello lungo il quale è diretto $|h\rangle$.

E dunque dopo il polaroid a 0° si ha:

$$\begin{aligned}\psi_{\theta \text{ dopo } 0} &= c_x |h\rangle = \langle h | \psi_\theta \rangle |h\rangle = \langle h | (\cos(\theta)|h\rangle + \sin(\theta)|v\rangle) |h\rangle = \\ &= (\cos(\theta)\langle h|h\rangle + \sin(\theta)\langle h|v\rangle) |h\rangle = (\cos(\theta)*1 + \sin(\theta)*0) |h\rangle = \cos(\theta)|h\rangle\end{aligned}$$

Simili espressioni si ottengono per gli altri casi. Per quella verticale si ha:

$$\begin{aligned}\psi_{\theta \text{ dopo } 90} &= c_y |v\rangle = \langle v | \psi_\theta \rangle |v\rangle = \langle v | (\cos(\theta)|h\rangle + \sin(\theta)|v\rangle) |v\rangle = \\ &= (\cos(\theta)\langle v|h\rangle + \sin(\theta)\langle v|v\rangle) |v\rangle = (\cos(\theta)*0 + \sin(\theta)*1) |v\rangle = \sin(\theta)|v\rangle = \cos(90-\theta)|h\rangle\end{aligned}$$

Come formalizzeresti la legge di Malus utilizzando gli enti introdotti in precedenza? Quale significato fisico puoi dare al rapporto tra intensità in uscita ed intensità in ingresso?

Il rapporto tra l'intensità trasmessa e quella incidente rappresenta la probabilità di osservare il fotone nello stato di polarizzazione permesso dai due polaroid. Infatti:

$$\cos^2 \theta = \frac{I_{tr}}{I_{in}} = \frac{\text{numero di fotoni trasmessi}}{\text{numero di fotoni incidenti}} = \frac{\text{casi favorevoli}}{\text{tot. casi}},$$

Per arrivare alla formalizzazione si parte dalla definizione assiomatica di probabilità (che è il caso generale della definizione frequentista utilizzata sopra)

$$P(A) \geq 0; P(U) = 1; P(A \cup B) = P(A) + P(B); A \cup B = U \Rightarrow P(A) + P(B) = 1$$

Con $P(A \cup B)$ si intende la probabilità che si verifichi l'evento A oppure l'evento B. Ricordare ad esempio testa e croce. Sia A l'evento "fotone polarizzato lungo direzione generica attraversa polaroid orientato orizzontalmente" e B l'evento "fotone polarizzato lungo direzione generica attraversa polaroid orientato verticalmente". Sappiamo che questi due eventi sono incompatibili nel senso probabilistico: essi non possono accadere contemporaneamente. Verifichiamo che la scrittura:

$$P(A) \equiv |\langle h | \psi \rangle|^2 \text{ e } P(B) \equiv |\langle v | \psi \rangle|^2$$

soddisfano le proprietà richieste. Infatti si ha:

$$1 \geq |\langle h | \psi \rangle|^2 = \cos^2(\theta) \geq 0 \text{ ma anche } 1 \geq |\langle v | \psi \rangle|^2 = \sin^2(\theta) \geq 0$$

$$|\langle h | \psi \rangle|^2 + |\langle v | \psi \rangle|^2 = \cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) = 1$$

L'ultima condizione si legge: si è certi che un fotone polarizzato lungo una direzione qualsiasi attraversa un polaroid orientato orizzontalmente oppure attraversa polaroid orientato verticalmente. Ci si può aiutare ricordando la legge di Malus e tenendo conto che si riottiene l'intensità iniziale ruotando il polaroid analizzatore. Dunque avremo:

Probabilità $\rightarrow$ prodotto scalare al quadrato

Poiché nel caso in esame vale la commutatività del prodotto scalare, cioè:

$$\cos(\theta) = \cos(\theta) \langle h | h \rangle + 0 = \cos(\theta) \langle h | h \rangle + \sin(\theta) \langle v | h \rangle = (\langle h | \cos(\theta) + \langle v | \sin(\theta) \rangle | h \rangle = \langle \psi | h \rangle$$

Si avrà:

$$\cos^2(\theta) = \cos(\theta) * \cos(\theta) = \langle \psi | h \rangle \langle h | \psi \rangle = \langle \psi | P_h | \psi \rangle$$

Consideriamo la grandezza: $\langle \psi | P_h | \psi \rangle$. Se il fotone è già polarizzato lungo la direzione a 0° si ha:

$$\langle \psi_0 | P_h | \psi_0 \rangle = \langle h | h \rangle \langle h | h \rangle = 1 * 1 = 1$$

Se invece il fotone è polarizzato lungo la direzione a 90° si ha:

$$\langle \psi_{90} | P_h | \psi_{90} \rangle = \langle v | h \rangle \langle h | v \rangle = 0 * 0 = 0$$

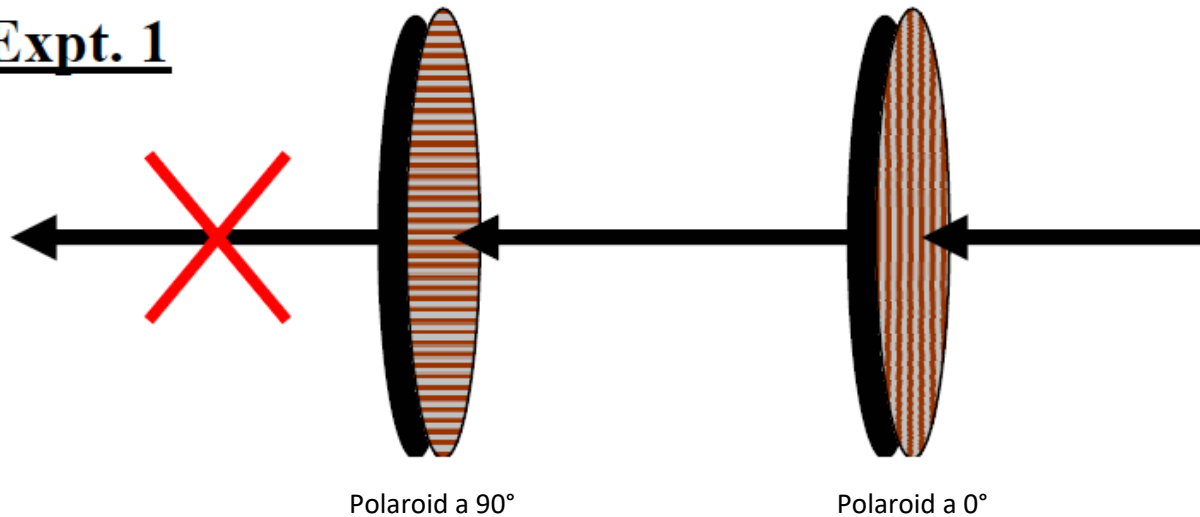
Poiché P_x è un proiettore, esso ci dice essenzialmente se c'è o meno una componente lungo quella direzione, per cui solo in questo caso il valore atteso, cioè $\langle \psi_\theta | P_x | \psi_\theta \rangle$ ci permette di prevedere la probabilità che un fotone polarizzato lungo una direzione qualsiasi attraversi il polaroid orientato lungo la direzione $\vec{x}$. In generale, la quantità $\langle \psi_\theta | P_x | \psi_\theta \rangle$ corrisponde al valore di aspettazione dell'osservabile P_x e non è una probabilità.

Far notare con gli esempi successivi che la formalizzazione è in accordo con le osservazioni sperimentali

Scheda VIII – Formalizzazione degli esperimenti con i polaroid

Prova a formalizzare i risultati dei seguenti esperimenti utilizzando gli enti introdotti in precedenza:

Expt. 1

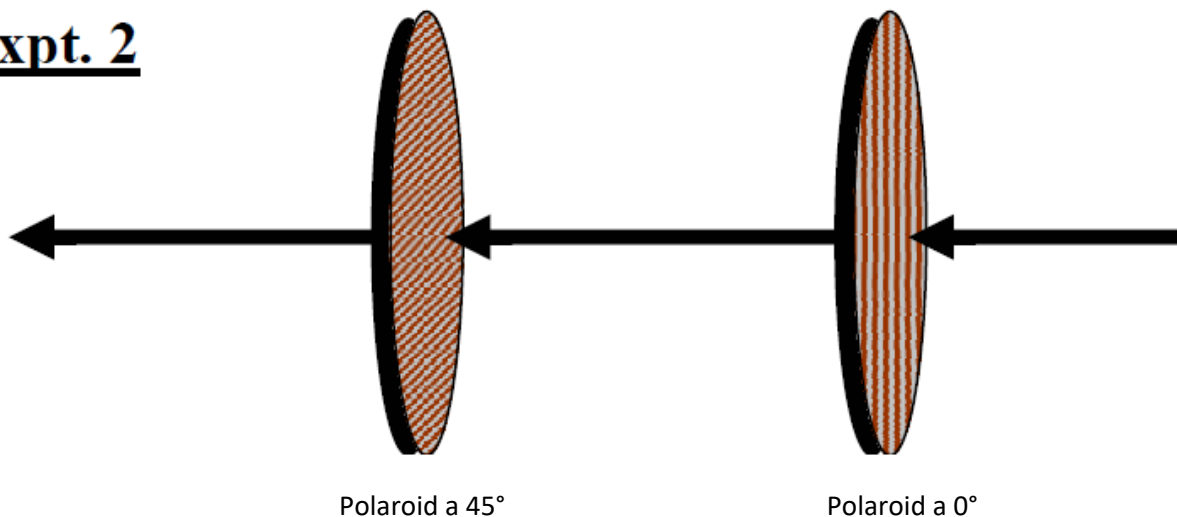


In questo caso, la probabilità di osservare il fotone al di là del secondo polaroid vale:

$$\langle \psi_0 | P_v | \psi_0 \rangle = \langle h | v \rangle \langle v | h \rangle = 0 * 0 = 0$$

Notare che dopo il primo polarizzatore lo stato del fotone è già "collassato" in una polarizzazione orizzontale

Expt. 2



In questo caso, la probabilità di osservare il fotone al di là del secondo polaroid vale:

$$\langle \psi_0 | P_d | \psi_0 \rangle = \langle h | d \rangle \langle d | h \rangle$$

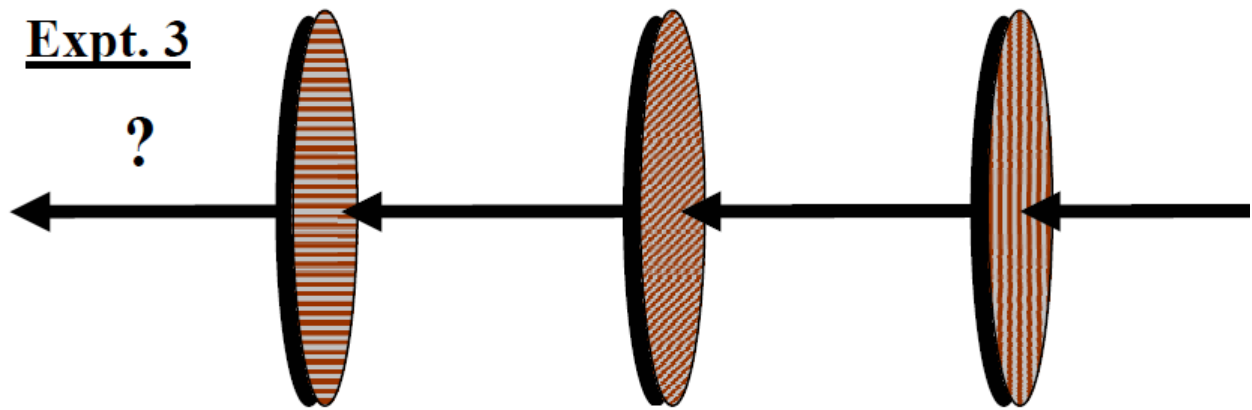
Occorre scrivere la direzione di polarizzazione a 45°. Per quanto detto in precedenza, potremmo ad esempio scrivere:

$$|d\rangle = \cos(45)|h\rangle + \sin(45)|v\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle + |v\rangle)$$

Svolgendo i prodotti:

$$\begin{aligned}\langle\psi_0|P_d|\psi_0\rangle &= \langle h|d\rangle\langle d|h\rangle = \langle h|\frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle + |v\rangle)\rangle\langle\frac{1}{\sqrt{2}}(\langle h| + \langle v|)|h\rangle = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\langle h|h\rangle + \langle h|v\rangle)\frac{1}{\sqrt{2}}(\langle h|h\rangle + \langle v|h\rangle) = \frac{1}{2}*1*1 = \frac{1}{2}\end{aligned}$$

Ancora una volta in accordo con il risultato sperimentale



In uscita dal secondo polaroid lo stato si scrive come:

$$P_d|\psi_0\rangle = |d\rangle\langle d|h\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle + |v\rangle)(\langle h| + \langle v|)|h\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle + |v\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}|d\rangle$$

cioè, come descritto in precedenza, lo stato del fotone (cioè la sua polarizzazione) è collassato nella nuova direzione. A questo punto, possiamo calcolare la probabilità finale di trovare il fotone dopo il secondo polaroid:

$$\begin{aligned}\langle d|P_{90}|d\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\langle h| + \langle v|)(|v\rangle\langle v|)\frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle + |v\rangle) = \\ &= \frac{1}{2}(\langle h|v\rangle\langle v| + \langle v|v\rangle\langle v|)(|h\rangle + |v\rangle) = \frac{1}{2}(\langle v|)(|h\rangle + |v\rangle) = \frac{1}{2}(\langle v|h\rangle + \langle v|v\rangle) = \frac{1}{2}*(0+1) = \frac{1}{2}\end{aligned}$$

Tenendo conto che già in precedenza avevamo una probabilità del 50% di attraversare il polaroid a 45°, avremo alla fine una probabilità del 25% di attraversare anche il terzo polaroid.

In pratica, è come se la presenza del polaroid a 45° “aumenti” la probabilità di osservare il fotone dopo il polaroid a 90°.

Dimostriamolo nel caso più generale. Partiamo inizialmente da due polaroid, uno lungo generica direzione, l'altro a 90°, quindi inseriamo il polaroid a 45° (per semplicità di conto). Le probabilità vanno calcolate dopo ogni polaroid. Coi soli due polaroid si avrà che la probabilità di osservare il fotone dopo il secondo polaroid (a 90°) vale:

$$\langle\psi_\theta|P_{90}|\psi_\theta\rangle = \langle\psi_\theta|v\rangle\langle v|\psi_\theta\rangle = \sin^2\theta$$

Inframmezzando il polaroid a 45° calcoliamo prima la probabilità di attraversare quello a 45°

$$\langle \psi_\theta | P_{45} | \psi_\theta \rangle = \langle \psi_\theta | d \rangle \langle d | \psi_\theta \rangle$$

Ma si ha:

$$\begin{aligned} \langle \psi_\theta | d \rangle &= \langle d | \psi_\theta \rangle = \langle h \cos(\theta) + v \sin(\theta) | \frac{1}{\sqrt{2}}(h + v) \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta) + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin(\theta) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\cos(\theta) + \sin(\theta)) \end{aligned}$$

E dunque:

$$\langle \psi_\theta | P_{45} | \psi_\theta \rangle = \frac{1}{2} (\cos(\theta) + \sin(\theta))^2 = \frac{1}{2} (1 + 2 \cos(\theta) \sin(\theta)) = \frac{1}{2} + \cos(\theta) \sin(\theta)$$

Ovviamente la polarizzazione sarà lungo la direzione a 45° per cui, la probabilità di attraversare il terzo polaroid, quello a 90° è:

$$\langle d | P_{90} | d \rangle = \langle d | v \rangle \langle v | d \rangle = \frac{1}{2}$$

La probabilità totale è il prodotto delle due probabilità quindi $\frac{1}{4} + \frac{\cos(\theta) \sin(\theta)}{2}$

Notare che per $\theta = 0$ otteniamo di nuovo il caso studiato sperimentalmente.

Confrontando le due probabilità si ha dunque:

$$\begin{aligned} \langle \psi_\theta | P_{90} | \psi_\theta \rangle &= \sin^2 \theta < \langle d | P_{90} | d \rangle \langle \psi_\theta | P_d | \psi_\theta \rangle = \frac{1}{4} + \frac{\cos(\theta) \sin(\theta)}{2} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \sin^2 \theta &< \frac{1}{4} + \frac{\cos(\theta) \sin(\theta)}{2} \Leftrightarrow \theta < 45^\circ \end{aligned}$$

Se la polarizzazione iniziale è orizzontale, il polaroid a 45° "aumenta" la probabilità di osservare il fotone dopo il polaroid a 90° . Ma se invece la polarizzazione iniziale è lungo una direzione maggiore di 45° , il polaroid a 45° diminuisce la probabilità di osservare il fotone dopo il polaroid a 90° . Basti pensare che se il fotone è polarizzato inizialmente proprio a 90° , incontrando il secondo polaroid a 90° si avrebbe la certezza di osservarlo, mentre invece, inserendo il polaroid a 45° , tale probabilità ovviamente diminuisce. Le probabilità dei due polaroid a 90° e 45° hanno "interferito", costruttivamente o distruttivamente in funzione della polarizzazione iniziale, proprio come succede con le onde. Una plausibile giustificazione può essere costruita tornando sui nostri passi e partendo dalla forma del proiettore lungo 45° . Si ha:

$$P_{45} = |d\rangle \langle d| = \frac{1}{2} (|h\rangle + |v\rangle) (\langle h| + \langle v|) = \frac{1}{2} (|h\rangle \langle h| + |h\rangle \langle v| + |v\rangle \langle h| + |v\rangle \langle v|) = \frac{1}{2} (P_0 + |h\rangle \langle v| + |v\rangle \langle h| + P_{90})$$

Come si vede nel proiettore lungo 45° compaiono sì i due proiettori lungo 90 e 0° ma anche dei due termini di "interferenza", non nulli. Nel calcolo della probabilità su un generico stato si ha, come visto prima:

$$\langle \psi_\theta | P_{45} | \psi_\theta \rangle = \langle \psi_\theta | \left[\frac{1}{2} (P_0 + |h\rangle\langle v| + |v\rangle\langle h| + P_{90}) \right] | \psi_\theta \rangle = \frac{1}{2} [\langle \psi_\theta | P_0 | \psi_\theta \rangle + \langle \psi_\theta | P_{90} | \psi_\theta \rangle + I(0, 90)]$$

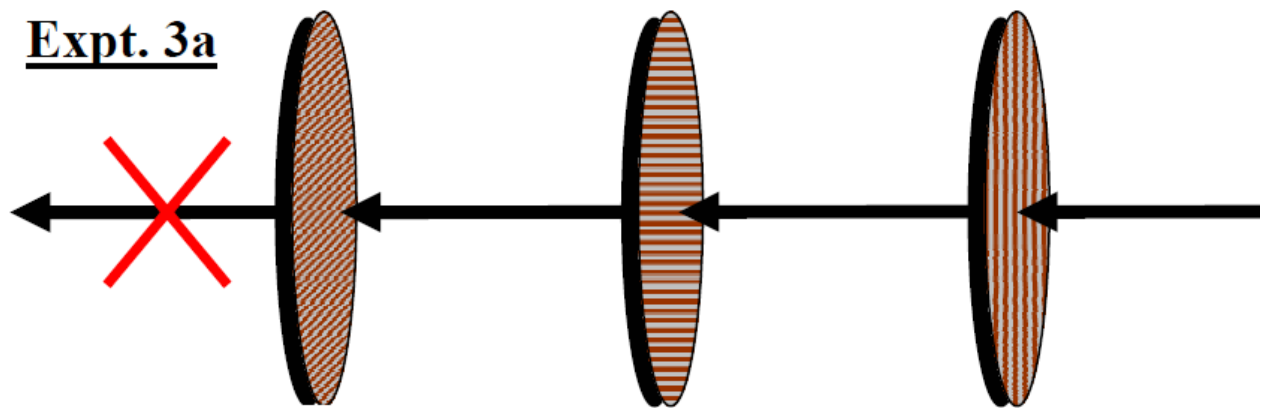
$$I(0, 90) = \langle \psi_\theta | |h\rangle\langle v| | \psi_\theta \rangle + \langle \psi_\theta | |v\rangle\langle h| | \psi_\theta \rangle = 2 \langle h | \psi_\theta \rangle \langle v | \psi_\theta \rangle = 2 \cos(\theta) \sin(\theta) \Leftrightarrow$$

$$\langle \psi_\theta | P_{45} | \psi_\theta \rangle = \frac{1}{2} [\langle \psi_\theta | P_0 | \psi_\theta \rangle + \langle \psi_\theta | P_{90} | \psi_\theta \rangle] + \cos(\theta) \sin(\theta)$$

Risultato che avevamo già ottenuto. Ma la scrittura qui riportata mette in evidenza che la probabilità di trovare il fotone oltre il polaroid di 45° è pari alla somma delle probabilità lungo le due direzioni componenti + un termine di “interferenza” diverso da zero se $0^\circ < \theta < 90^\circ$. Notare che il termine di interferenza deve esistere per soddisfare le proprietà delle probabilità. Se $\theta = 45^\circ$ infatti si deve avere: $\langle \psi_\theta | P_{45} | \psi_\theta \rangle = 1$ e questo si ha solo tenendo conto del termine di interferenza.

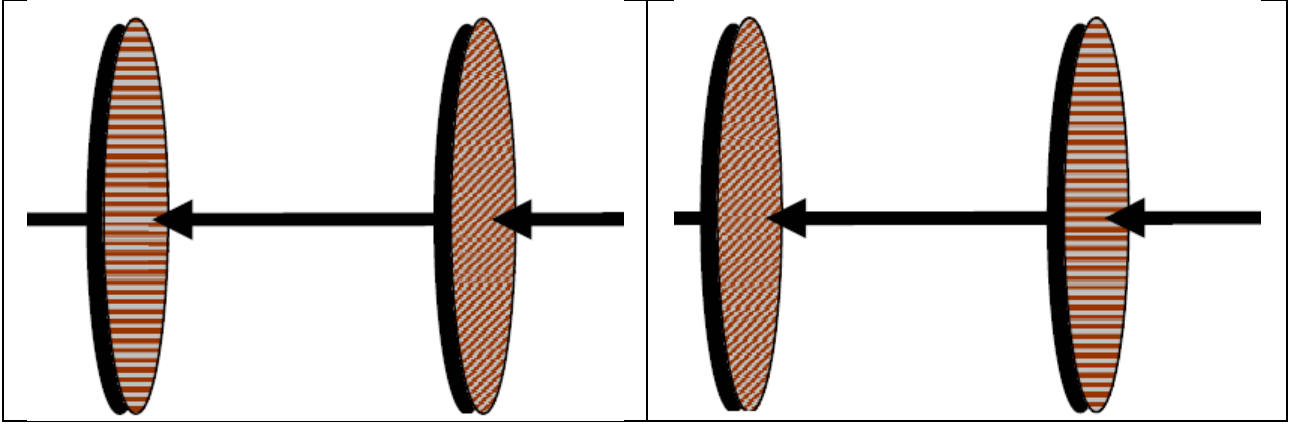
Tutto ciò, ovviamente, NON impedisce comunque di definire lo stato di polarizzazione del fotone (e quindi lo stato di una particella qualsiasi). In questo contesto semplificato, per le particelle, in generale, si dice che essa si comporta a volte come un’onda a volte come una particella, questo perché la particella può “interferire” con altre particelle o con se stessa come un’onda. Al contrario, l’evidenza osservata non supporta la conclusione che la posizione della particella sia regolata da un’equazione simile a quella delle onde, o che la particella possa propagarsi come un’onda, o infine, che la particella abbia la velocità di un’onda elettromagnetica

Come ricorderai, nell’esperimento riportato in figura non c’è luce in uscita dai tre polaroid.



Prova a dimostrare che il formalismo introdotto in precedenza ci permette di prevedere che l’inversione dei due filtri a 45° e 90° modifica la misura sullo stato di polarizzazione di un fotone inizialmente polarizzato ad esempio a 0° . Per aiutarti, considera il ragionamento fatto della scheda V.

Il formalismo introdotto ci permette di descrivere le due situazioni:



Come visto sopra, si avrà infatti, dopo il polaroid a 45°:

$$P_d |\psi_0\rangle = |d\rangle \langle d|h\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |d\rangle$$

Applicando quindi il proiettore lungo la direzione 90° si ha:

$$\begin{aligned} P_{90} P_d |\psi_0\rangle &= |v\rangle \langle v| \frac{1}{\sqrt{2}} |d\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |v\rangle \langle v|d\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |v\rangle \langle v| \frac{1}{\sqrt{2}} (|h\rangle + |v\rangle) = \\ &= \frac{1}{2} |v\rangle (\langle v|h\rangle + \langle v|v\rangle) = \frac{1}{2} |v\rangle (0 + 1) = \frac{1}{2} |v\rangle \end{aligned}$$

Invece, nel secondo caso avremo:

$$P_{90} |\psi_0\rangle = |v\rangle \langle v|h\rangle$$

E dunque:

$$P_d P_{90} |\psi_0\rangle = |d\rangle \langle d|P_{90} |\psi_0\rangle = |d\rangle \langle d|v\rangle \langle v|h\rangle = 0 |d\rangle$$

E dunque $P_{90} P_d \neq P_d P_{90}$

Più in generale, se il fotone è inizialmente polarizzato lungo una direzione qualsiasi, avrà:

$$\begin{aligned} P_d |\psi_\theta\rangle &= |d\rangle \langle d|\psi_\theta\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} (|h\rangle + |v\rangle) (\langle h| + \langle v|) |\psi_\theta\rangle = \frac{1}{2} (|h\rangle + |v\rangle) (\langle h| + \langle v|) (\cos \theta |h\rangle + \sin \theta |v\rangle) = \\ &= \frac{1}{2} (|h\rangle + |v\rangle) (\cos \theta \langle h|h\rangle + \sin \theta \langle h|v\rangle + \cos \theta \langle v|h\rangle + \sin \theta \langle v|v\rangle) = \frac{1}{2} (|h\rangle + |v\rangle) (\cos \theta + \sin \theta) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\cos \theta + \sin \theta) |d\rangle \end{aligned}$$

E quindi:

$$\begin{aligned} P_{90} P_d |\psi_\theta\rangle &= |v\rangle \langle v| \frac{1}{\sqrt{2}} (\cos \theta + \sin \theta) |d\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (\cos \theta + \sin \theta) (|v\rangle \langle v|d\rangle) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\cos \theta + \sin \theta) \frac{1}{\sqrt{2}} |v\rangle = \frac{1}{2} (\cos \theta + \sin \theta) |v\rangle \end{aligned}$$

Viceversa si ha:

$$P_{90} |\psi_\theta\rangle = |v\rangle \langle v | \psi_\theta \rangle = (|v\rangle) (\langle v |) (\cos \theta |h\rangle + \sin \theta |v\rangle) = (|v\rangle) (\cos \theta \langle v | h \rangle + \sin \theta \langle v | v \rangle) = \sin \theta |v\rangle$$

$$\begin{aligned} P_d P_{90} \psi_\theta &= |d\rangle \langle d | \sin \theta |v\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} (|h\rangle + |v\rangle) (\langle h | + \langle v |) \sin \theta |v\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} (|h\rangle + |v\rangle) (\sin \theta \langle v | v \rangle) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} (|h\rangle + |v\rangle) \sin \theta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta |d\rangle \end{aligned}$$

e dunque $P_{90} P_d \neq P_d P_{90}$

Cosa puoi concludere a partire dalla formalizzazione proposta?

In generale, il fatto di conoscere la probabilità di una misura a partire dallo stato e dall'operatore che rappresenta l'osservabile viene riassunto dicendo che per ogni sistema fisico esiste una funzione d'onda che descrive lo stato del sistema e che permette di prevedere la probabilità della misura di una qualsiasi grandezza fisica associata al sistema, ad esempio una particella. Quindi, in meccanica quantistica, la funzione d'onda di una particella determina in modo completo lo stato di un sistema fisico, ma gli stati permessi di un sistema fisico non dipendono da essa. In particolare, la funzione d'onda non descrive le possibili posizioni né l'energia di una particella, e nemmeno di una qualsiasi altra grandezza fisica. Inoltre, poiché le misure sono prevedibili solo grazie ad una operazione del tipo $\langle \psi_\theta | P_d | \psi_\theta \rangle$, da sola la psi non permette di prevedere i possibili stati della particella ed il valore di una qualsiasi grandezza fisica associata alla particella. In generale, la funzione d'onda è un vettore e a seconda del sistema che rappresenta ha delle dimensioni. Per le particelle non è adimensionale, e le sue dimensioni dipendono dal significato che si dà a $\langle \psi_\theta | \psi_\theta \rangle$.

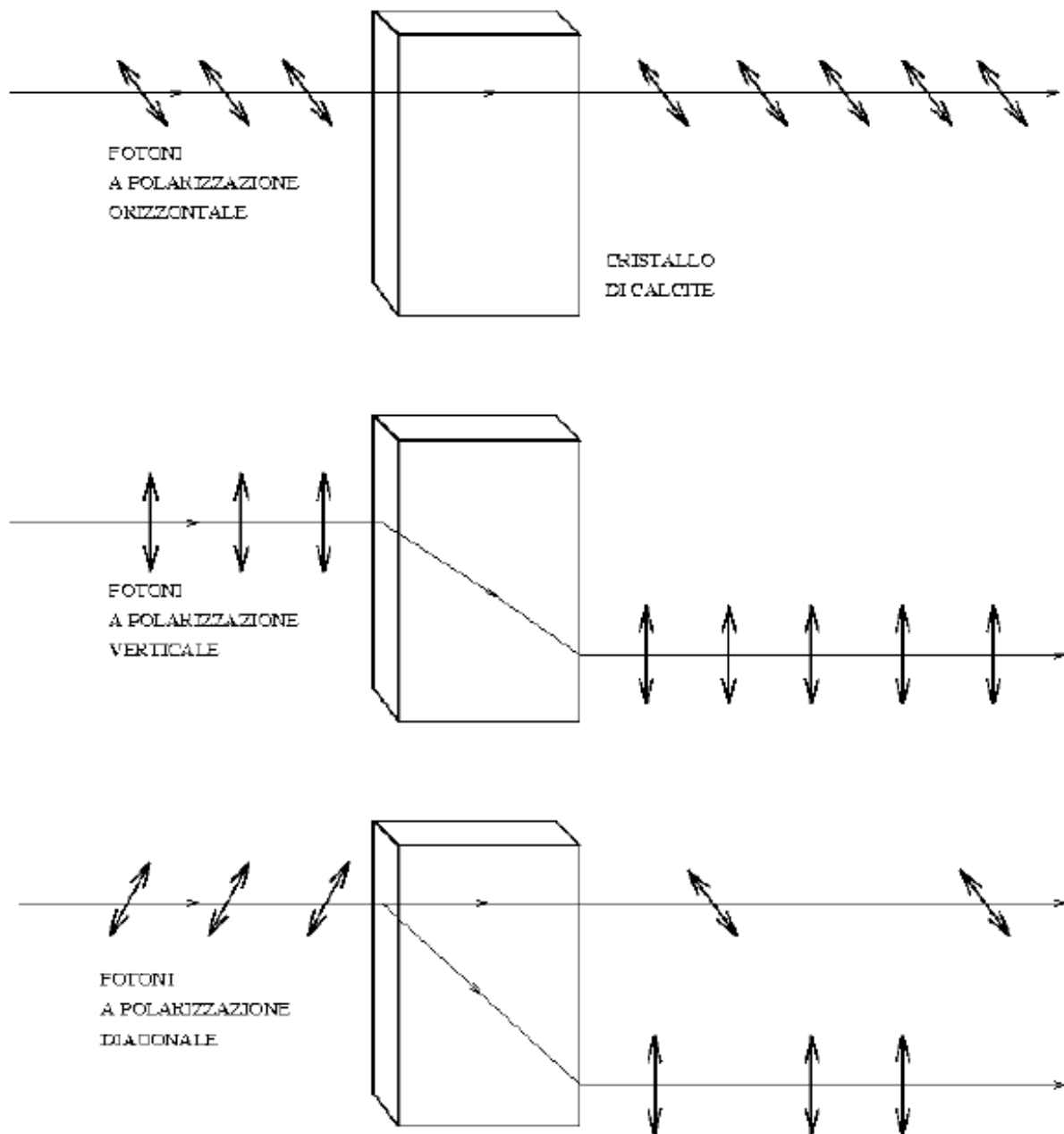
Altro risultato interessante è che: $P_{90} P_d \neq P_d P_{90}$ che si traduce dicendo che i due operatori non commutano

Abbiamo dimostrato che per i proiettori l'ordine in cui si fa la misura è importante. Non appena si effettua la misura con uno dei proiettori lo stato del fotone collassa nella direzione corrispondente a quel primo proiettore e quindi l'informazione associata all'altro operatore, quindi all'altra direzione viene "persa". Far notare che non è che la misura dopo disturba la prima misura. Al limite, si può dire che dopo aver misurato lungo una direzione, qualsiasi informazione su eventuali altre direzioni di polarizzazione sono perse e quindi si può descrivere il fotone solo con quella direzione di polarizzazione, dobbiamo rinunciare alla descrizione nell'altra direzione, non avrebbe significato. In alternativa si può dire che la conoscenza della polarizzazione lungo una direzione ci impedisce di conoscere la polarizzazione nell'altra direzione considerata nella commutazione. La commutazione di due operatori a cui corrispondono due osservabili è un modo per formalizzare la possibilità (o impossibilità) di misurare contemporaneamente i due osservabili. Quindi, NON si può definire uno stato assegnando valori alle coordinate e alla velocità della particella. La conclusione a cui siamo arrivati si chiama principio di indeterminazione, usualmente enunciato per posizione e velocità: se si assegnano valori numerici definiti alla posizione la velocità di una particella non è definita. In alternativa, si potrebbe anche dire che tanto maggiore è la precisione con cui conosciamo la velocità di una particella, tanto maggiore è la indeterminazione con cui ne conosciamo la posizione. Altri enunciati del principio di indeterminazione non sono corretti: in particolare, il principio non stabilisce alcun limite intrinseco alla nostra capacità sperimentale di conoscere, contemporaneamente e con precisione qualunque, posizione e velocità di una particella o stabilire se la posizione e la velocità di una particella dipendono l'una dall'altra. Inoltre, non è legato alla precisione numerica con cui è possibile calcolare contemporaneamente posizione e velocità di una particella. Infine, sono ugualmente sbagliate le "classiche" interpretazioni del principio, anche a causa dell'iniziale interpretazione di Heisenberg stesso (microscopio di Heisenberg): in particolare, non è vero che se misuriamo con una certa precisione la posizione della particella, ne alteriamo il valore della velocità (e viceversa).

Scheda IX – Formalizzazione degli esperimenti con la calcite

Sulla base di quanto introdotto finora, come formalizzeresti lo stato di un fotone che interagisce con la calcite? Fai riferimento alle osservazioni condotte in precedenza.

La calcite rivelerà la polarizzazione del fotone entrante a seconda di come verrà orientata. Per semplicità supponiamo che essa abbia birifrangenza tale che in uscita si abbiano fotoni polarizzati solo lungo la direzione orizzontale o verticale. Allora si avrà:



I due fasci uscenti sono polarizzati lungo due direzioni mutualmente ortogonali (ad esempio 0° e 90° , oppure 45° e 135°). Questo esperimento è l'analogo ottico dell'esperimento di Stern Gerlach che invece separa spazialmente elettroni quando interagiscono con un campo magnetico non omogeneo

Come formalizzeresti l'interazione di un polaroid con i fascetti uscenti dalla calcite?

Il fatto che ruotando il polaroid si ritorna a vedere un solo fascetto o una sola lettera ci dice che la luce uscente dalla calcite è polarizzata ma non sappiamo come. Con il polaroid misuriamo tale direzione di polarizzazione. Nel caso più semplice si ha, come sempre:

$$|\psi_\theta\rangle = \cos(\theta)|h\rangle + \sin(\theta)|v\rangle$$

Per cui sovrapponendo un polaroid con orientamento a 0° lo stato finale sarà nello stato di polarizzazione $|h\rangle$. Ma come abbiamo visto in precedenza il proiettore lungo la direzione a 45° non commuta con nessuno dei due proiettori lungo le direzioni "usuali" 0° e 90° . Quindi un fotone uscente con polarizzazione a 45° potrebbe essere espresso come

$$|\psi_{45}\rangle = 1|d\rangle$$

Che si può scrivere come:

$$|\psi_{45}\rangle = 1|d\rangle + 0 = 1|d\rangle + 0|d'\rangle$$

Dove

$$\langle d'|d\rangle = 0$$

E quindi:

$$\left\langle d' \left| \frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle + |v\rangle) \right. \right\rangle = 0 \Leftrightarrow \langle d'|h\rangle + \langle d'|v\rangle = 0 \Leftrightarrow \langle d'|h\rangle = -\langle d'|v\rangle$$

In generale anche la direzione $\langle d'|$ dovrebbe poter essere espressa in termini di $\langle h|$ e $\langle v|$ cioè:

$$|d'\rangle = \alpha|h\rangle + \beta|v\rangle$$

O anche:

$$\langle d'| = \alpha\langle h| + \beta\langle v|$$

e sostituendo si ha:

$$\langle (\alpha\langle h| + \beta\langle v|)|h\rangle = -\langle (\alpha\langle h| + \beta\langle v|)|v\rangle \Leftrightarrow \alpha = -\beta$$

Cioè:

$$|d'\rangle = \beta(-|h\rangle + |v\rangle)$$

Se imponiamo la condizione che un fotone polarizzato lungo 0° o 90° sia osservato con probabilità pari al 50% come nel caso di $|d\rangle$ otteniamo semplicemente:

$$|d'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(-|h\rangle + |v\rangle)$$

Da queste relazioni si ricava anche che:

$$|h\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|d\rangle - |d'\rangle)$$

$$|v\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|d\rangle + |d'\rangle)$$

Il fotone polarizzato lungo la direzione generica si scriverà ora:

$$\begin{aligned} |\psi_\theta\rangle &= \cos(\theta) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|d\rangle - |d'\rangle) \right) + \sin(\theta) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|d\rangle + |d'\rangle) \right) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left((\cos(\theta) + \sin(\theta))|d\rangle + (\cos(\theta) - \sin(\theta))|d'\rangle \right) \end{aligned}$$

Adesso, sovrapponendo un polaroid con orientamento a 0° , dovremmo ottenere nuovamente uno stato di polarizzazione a 0° . Infatti si ha:

$$\begin{aligned} |h\rangle\langle h| |\psi_\theta\rangle &= |h\rangle\langle h| \left[\cos(\theta) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|d\rangle - |d'\rangle) \right) + \sin(\theta) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|d\rangle + |d'\rangle) \right) \right] = \\ |h\rangle \left[\frac{\cos(\theta)}{\sqrt{2}}\sqrt{2} + \frac{\sin(\theta)}{\sqrt{2}}*0 \right] &= \cos(\theta)|h\rangle \end{aligned}$$

Cosa puoi concludere a partire dalla formalizzazione proposta?

Questo risultato suggerisce che la proprietà di essere polarizzato orizzontalmente nella direzione d' interferisce distruttivamente con la proprietà di essere polarizzato orizzontalmente nella direzione d a causa della differenza del segno (differenza di fase) con le quali le ampiezze sono sommate nella sovrapposizione. L'interferenza distruttiva garantisce che lo stato finale sia puramente polarizzato lungo la direzione 0° .

Scheda X – Collasso, sovrapposizione, conclusioni

Come interpreteresti l'interazione di un fotone con i polaroidi e le calciti? Spiega brevemente

Abbiamo ricavato che in generale una particella può trovarsi in uno stato (ad esempio un fotone ha una certa polarizzazione) a sua volta di sovrapposizione di due o più stati (ad esempio, il fotone può essere in due stati di polarizzazione, tra loro ortogonali). Contrariamente a quanto previsto dalla dinamica classica, una particella è quindi in tutti gli stati simultaneamente e fino a quando non facciamo una misura gli stati possono interferire l'uno con l'altro costruttivamente o distruttivamente. Questo rende gli stati di sovrapposizione una novità della dinamica quantistica rispetto alla dinamica classica. Quindi, in generale, i valori di una grandezza fisica in uno stato costituito dalla sovrapposizione di due stati non sono definiti fin quando non si effettua una misura sullo stato. Ma in generale, il risultato di una misura eseguita su un sistema nello stato costituito dalla sovrapposizione di due stati non sarà uno stato intermedio tra i due stati iniziali, ma uno stato del tutto nuovo. Ad esempio, l'energia di una particella il cui stato è costituito dalla sovrapposizione di due stati non è la somma delle energie degli stati iniziali

Quali differenze o somiglianze riscontri tra le interazioni classiche tra la luce e la materia ed le interazioni del singolo fotone con la materia? Spiega brevemente

Ripercorrendo all'indietro le evidenze raccolte, si può dire che la misura è un processo che crea un nuovo stato e che essa determina la probabilità dei diversi risultati possibili che si possono prevedere partendo dallo stato creato dalla misura precedente. Tenendo conto anche dell'esperienza dei tre polaroid, facendo due misure successive della stessa grandezza fisica non si ottengono gli stessi risultati perché questi dipendono dallo stato del sistema, quindi dalla ψ . Tali caratteristiche rendono il processo di misura in meccanica quantistica concettualmente e formalmente molto diverso dalla meccanica classica, ma non perché in meccanica quantistica ci sono pochi strumenti adatti ad effettuare misure. I due processi non sono concettualizzati allo stesso modo, sebbene si possa parlare anche in quantistica di errore sperimentale ed anche in fisica classica si usi la probabilità e la statistica, solo perché in meccanica quantistica il processo di misura cambia lo stato, e questa è una possibilità che in fisica classica è totalmente esclusa. Formalmente questa caratteristica della misura in meccanica quantistica va sotto il nome di "collasso" della funzione d'onda. Con questo termine intendiamo che lo stato della particella comincia una nuova evoluzione mantenendo nell'evoluzione da quell'istante in poi il valore della grandezza misurata. In generale, non è vero che la nuova evoluzione comporti poi un ritorno allo stato antecedente alla misura e soprattutto che la lunghezza d'onda della particella diminuisca fino a diventare nulla, visto che la particella acquista solo un nuovo stato, non diventa qualcosa di diverso.

Come utilizzeresti i risultati delle esperienze da te condotte e della formalizzazione da te proposta, per interpretare la struttura della materia?

Ad esempio, il comportamento ondulatorio delle probabilità, ci suggerisce che effettivamente la meccanica quantistica la struttura dell'atomo e la sua stabilità attraverso onde stazionarie associate agli elettroni. Come si è visto in chimica, quindi un orbitale è una regione dell'atomo dove un elettrone può essere trovato con una certa probabilità. Non è quindi una regione dell'atomo intorno al nucleo in cui gli elettroni ruotano. Anche l'evoluzione di una particella avrà un andamento ondulatorio, in particolare la sua frequenza di oscillazione sarà proporzionale all'energia della particella

È possibile secondo te formalizzare allo stesso modo dei fotoni altre proprietà di grandezze utili ad indagare la struttura della materia? Elenca solo le idee chiave che sarebbero utili per la descrizione formale

Le idee chiave sono: misura, sovrapposizione e probabilità e queste possono essere utili per descrivere qualsiasi grandezza del sistema.

Ad esempio, poiché possiamo solo predire la probabilità che il sistema evolva da uno stato ad un altro, in generale, l'evoluzione temporale dello stato di una particella sarà simile a quella di un'onda. Quindi, un sistema lasciato indisturbato non evolverà nel tempo ritornando nello stato iniziale e nemmeno avremo che la probabilità di ottenere un particolare valore di una qualsiasi grandezza fisica associata alla particella è indipendente dall'evoluzione temporale dello stato della particella.

Poiché una misura modifica lo stato di una particella, non tutte le grandezze si possono descrivere allo stesso modo. Ad esempio, se la misura di energia di un elettrone dà un certo risultato ad un certo istante, questo significa che l'elettrone manterrà quella energia per tutto il suo moto perché l'energia è una costante del moto. Invece, ciò non accadrà per posizione e velocità perché in generale la misura cambierà lo stato del sistema.