

STUCK IN A DULL, LOW PAYING JOB?
WANT TO MAKE *BIG MONEY*?

**BE A
QUANTUM
MECHANIC!**

... EVEN IF YOU NEVER
FINISHED HIGH SCHOOL!

STUDY AT HOME!

THE COLUMBIA INSTITUTE OF QUANTUM MECHANICS, INC.

Not affiliated with the Columbia Broadcasting System, Columbia University, the District of Columbia, or Columbia, Gem of the Ocean.



CUT OUT AND SEND



☐ Yes! I want to get in on the ground floor of this exciting new field. I understand no salesman will call.

NAME _____

ADDRESS _____

CITY, STATE, ZIP _____

COLUMBIA INSTITUTE OF QUANTUM MECHANICS
Suite 293, 1100 Back St., Improvidence, RI 02904

DIVENTA MECCANICO QUANTISTICO!

Attività concettuali e sperimentali per l'approccio ai fondamenti della Meccanica Quantistica.

La proposta è stata presentata allo stage «La Fisica in Gioco» rivolto a studenti di quinta dei Licei di Torino e provincia, tenutosi a Torgnon (Aosta) nell'aprile 2017.

Traendo spunto da questa esperienza si vuole qui proporre, con i possibili e prevedibili ampliamenti, un percorso attuabile durante le lezioni in classe

*Presentazione a cura di Silvia **Coscia** (L.S Cattaneo) e Laura **Montaldi** (I.I.S Copernico-Luxemburg) da un progetto elaborato con Sissi **Rinaudo** (INFN) e Riccardo **Urigo** (I.I.S Copernico-Luxemburg)*

AIF sez. Settimo Torinese

Corso di studi in Fisica Università di Torino

COSA DICONO LE INDICAZIONI NAZIONALI

DA “OBIETTIVI SPECIFICI DI APPRENDIMENTO”

L'affermarsi del modello del quanto di luce potrà essere introdotto attraverso lo studio della radiazione termica e dell'ipotesi di Planck (affrontati anche solo in modo qualitativo), e sarà sviluppato da un lato con lo studio dell'effetto fotoelettrico e della sua interpretazione da parte di Einstein, e dall'altro lato con la discussione delle teorie e dei risultati sperimentali che evidenziano la presenza di livelli energetici discreti nell'atomo. L'evidenza sperimentale della natura ondulatoria della materia, postulata da De Broglie, ed il principio di indeterminazione potrebbero concludere il percorso in modo significativo.

Quadro di riferimento relativo alla seconda prova scritta dell'Esame di Stato di Fisica per i licei Scientifici (15/12/2015): 30% orario

LA (NON SOLO) NOSTRA VALUTAZIONE

COMMENTO

- si rinuncia a presentare una teoria vera e propria, e ci si limita a fornire indizi empirici e modelli teorici in grado di evidenziare l'inadeguatezza della fisica classica
- si forniscono idee di base, concetti, formule che possono costituire il punto di partenza per lo studio della meccanica quantistica

VANTAGGI

- strumenti matematici semplici
- possibilità di concentrarsi sugli esperimenti
- si sviluppa un confronto articolato fra la fisica classica e la fisica moderna (a fianco della relatività)

DIFETTI

- si segue un approccio storico che può essere un ostacolo cognitivo a causa dell'utilizzo di modelli semiclassici (atomo di Bohr)
- non si affronta il nocciolo concettuale e formale delle nuove teorie quantistiche
- coesiste un miscuglio di quadri concettuali differenti (FC e MQ)
- si ignorano i successivi 90 anni di evoluzione della MQ

SPERIMENTAZIONI DIDATTICHE IN ITALIA

MOTIVAZIONI

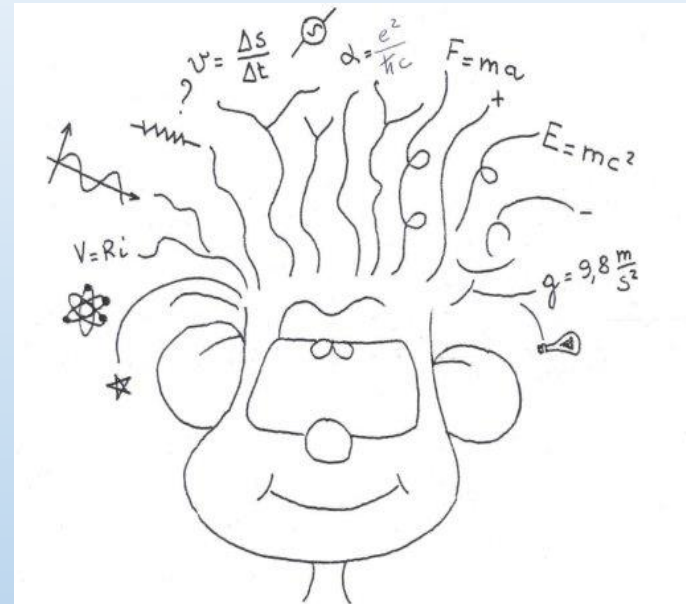
- sono passati ormai novant'anni dalla sua fondazione: è lecito tralasciarla del tutto dall'insegnamento?
- la portata culturale di una teoria che induce un nuovo modo d'interpretare e descrivere i fenomeni fisici, un nuovo modo di pensare che rivoluziona schemi mentali e concetti abituali, costituisce un progresso cognitivo cui è difficile rinunciare.

MODALITA'

Coniugare l'aspetto tecnico-strumentale con l'aspetto concettuale e culturale.

- GRUPPO DI ROMA
- GRUPPO DI UDINE
- GRUPPO DI BOLOGNA
- GRUPPO DI TORINO
- PROPOSTA DI ELIO FABRI (Pisa)

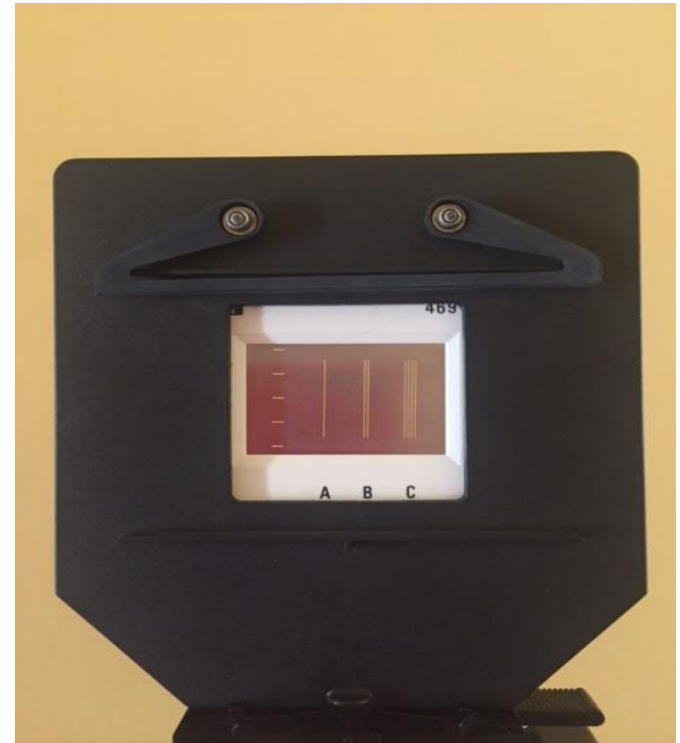
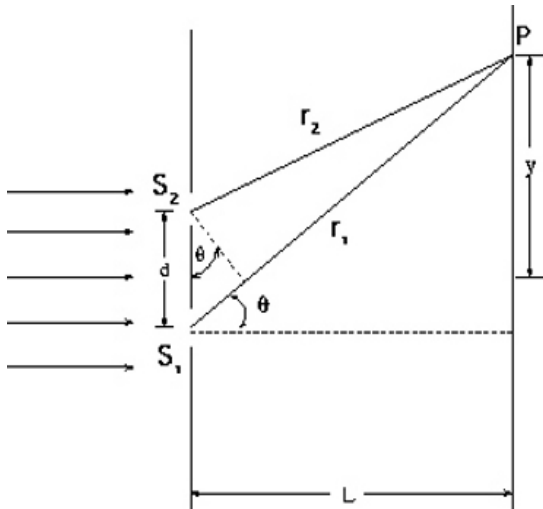
- Situazione
- Tempi
- Luogo
- Numero di studenti per tavolo
- Numero di docenti per tavolo
- Metodologia



PREREQUISITO 1

Esperimento della doppia fenditura di Young

veloci misure e calcoli per ritrovare le condizioni dell'interferenza costruttiva e distruttiva



PREREQUISITO 2

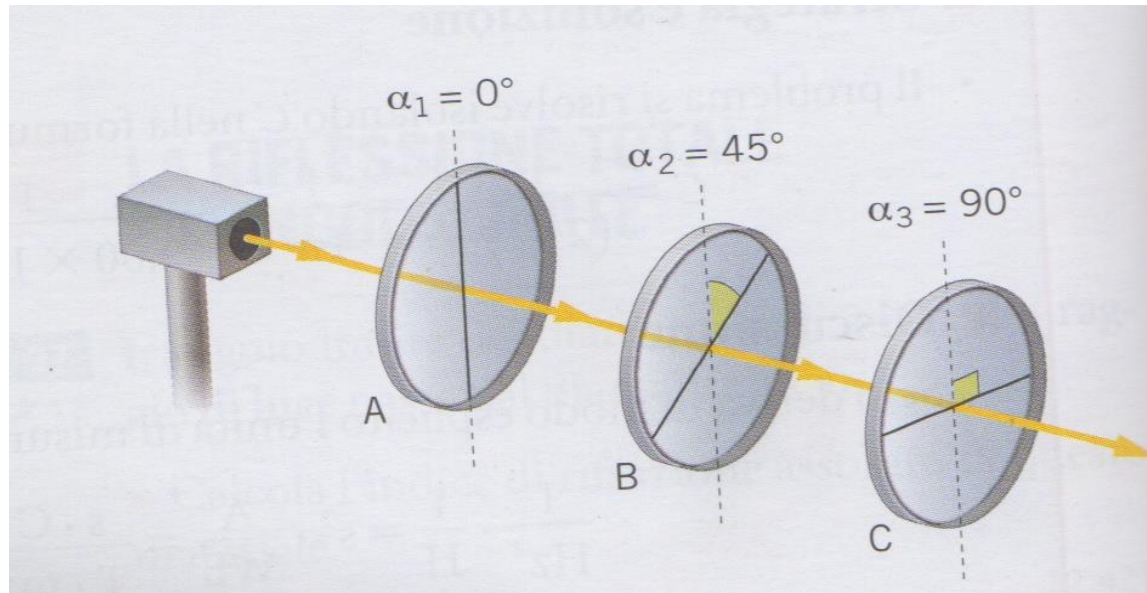
Fenomeno della polarizzazione

A) LA POLARIZZAZIONE DELLE ONDE IN GENERALE

Visualizzazione del fenomeno con una fune e due panche

B) LE CARATTERISTICHE DELLA LUCE POLARIZZATA LINEARMENTE

Applicazione della legge di Malus con tre filtri polaroid uguali




PREREQUISITO 3

Fotoni


La loro natura particellare è nota agli studenti dallo studio della fisica dei quanti, ma la loro capacità di interferire con se stessi, le caratteristiche di indivisibilità e il loro comportamento statistico sono stati illustrati mediante il sito **QuantumLab** (laboratorio interattivo pilotato a distanza)





Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

QuantumLab



introduction:

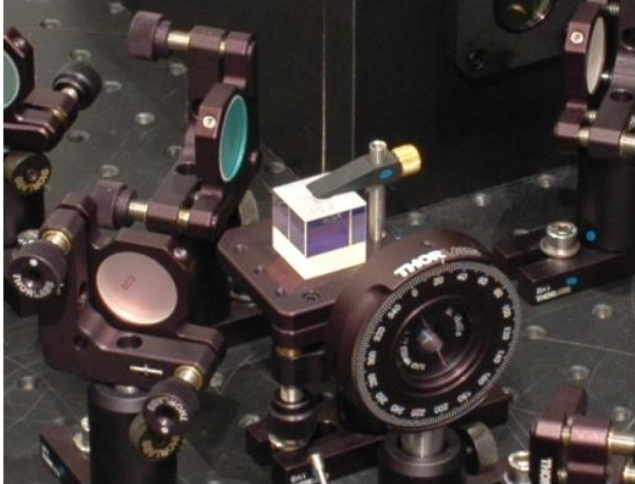
- [start-page](#)
- [concept](#)
- [basics](#)

experiments:

- [setup optic](#)
- [coincidences](#)
- [existence photon](#)
- [quantum-random](#)
- [entanglement](#)
- [cryptography](#)
- [interference](#)
- [photon-statistics](#)
- [Hong-Ou-Mandel](#)
- [Franson](#)

further:


- [literature](#)
- [imprint](#)




Does light consist of single portions?
Is there randomness in the quantum world?
How does quantum cryptography work?
What is entanglement?

An interactive approach to the fascinating world of quantum physics ([concept](#)).

German version



homepage under construction, updated: 15.04.2010
© didactics of physics, University Erlangen-Nuremberg, Germany



Collegamenti IT 18:18 10/03/2017

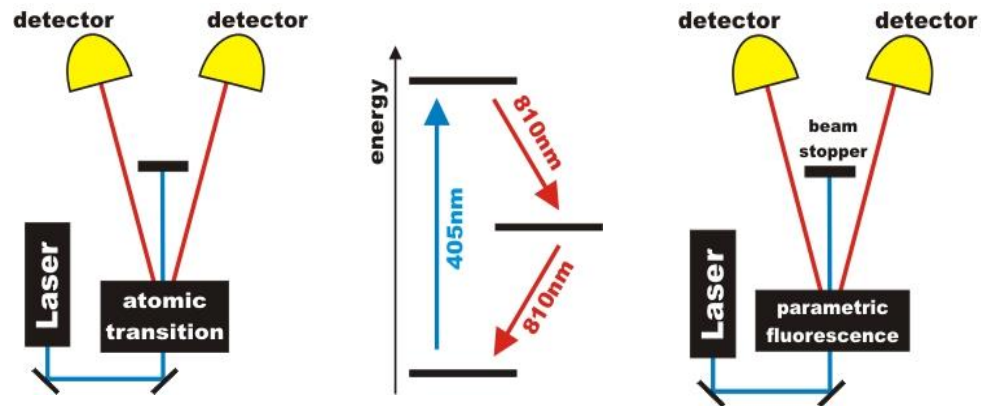
BASICS

Basic 1

Generation and detection of single photons

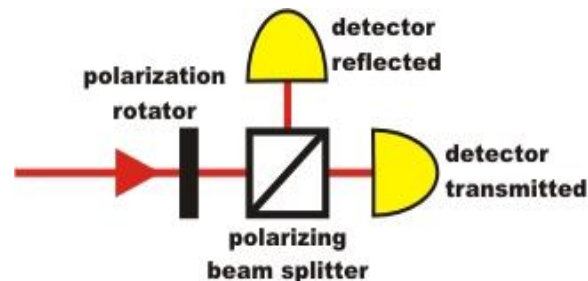
Preparation of single photons

The process is called parametric down conversion: we generate two photons of equal wavelength 810nm from a blue photon at 405nm



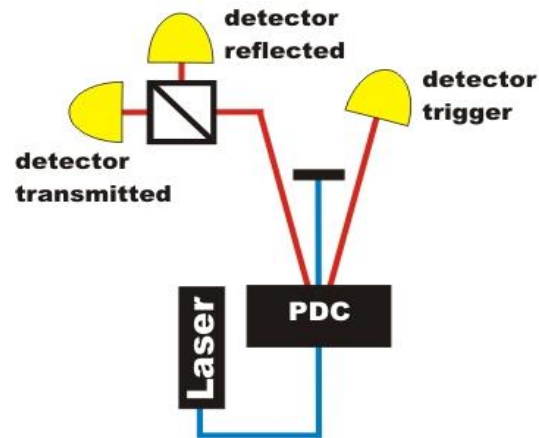
Basic 2

Polarization measurement



EXPERIMENTS

- A-PHOTON AS A QUANTUM OBJECT



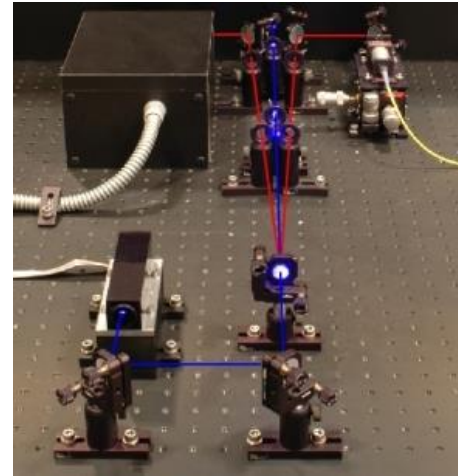
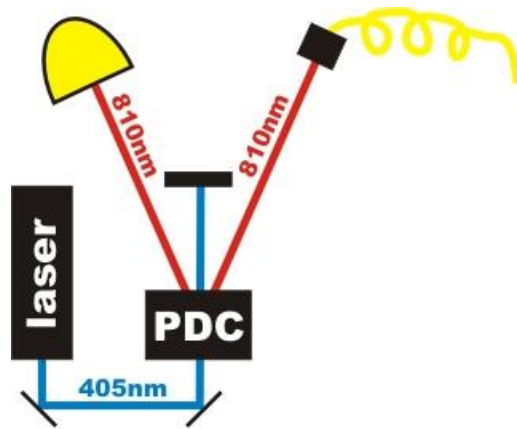
Approach 1: single events

Light consist of indivisible portions, named quanta, or more specifically, Photons. At this point, nothing is said about the spatial properties, i.e. there no reason to call photons “particles”.

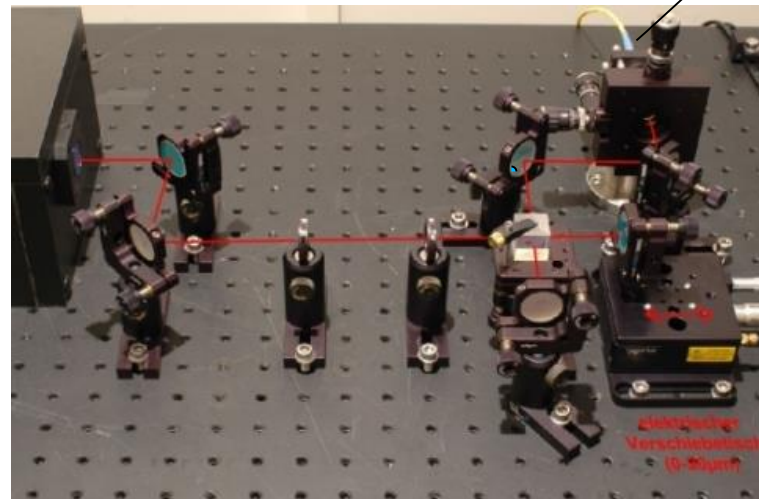
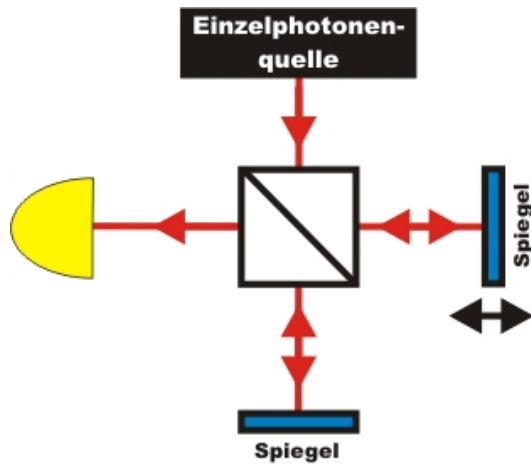
Approach 2: count rates continuous

The light quantum cannot be divided.

B - INTERFERENCE OF SINGLE PHOTONS

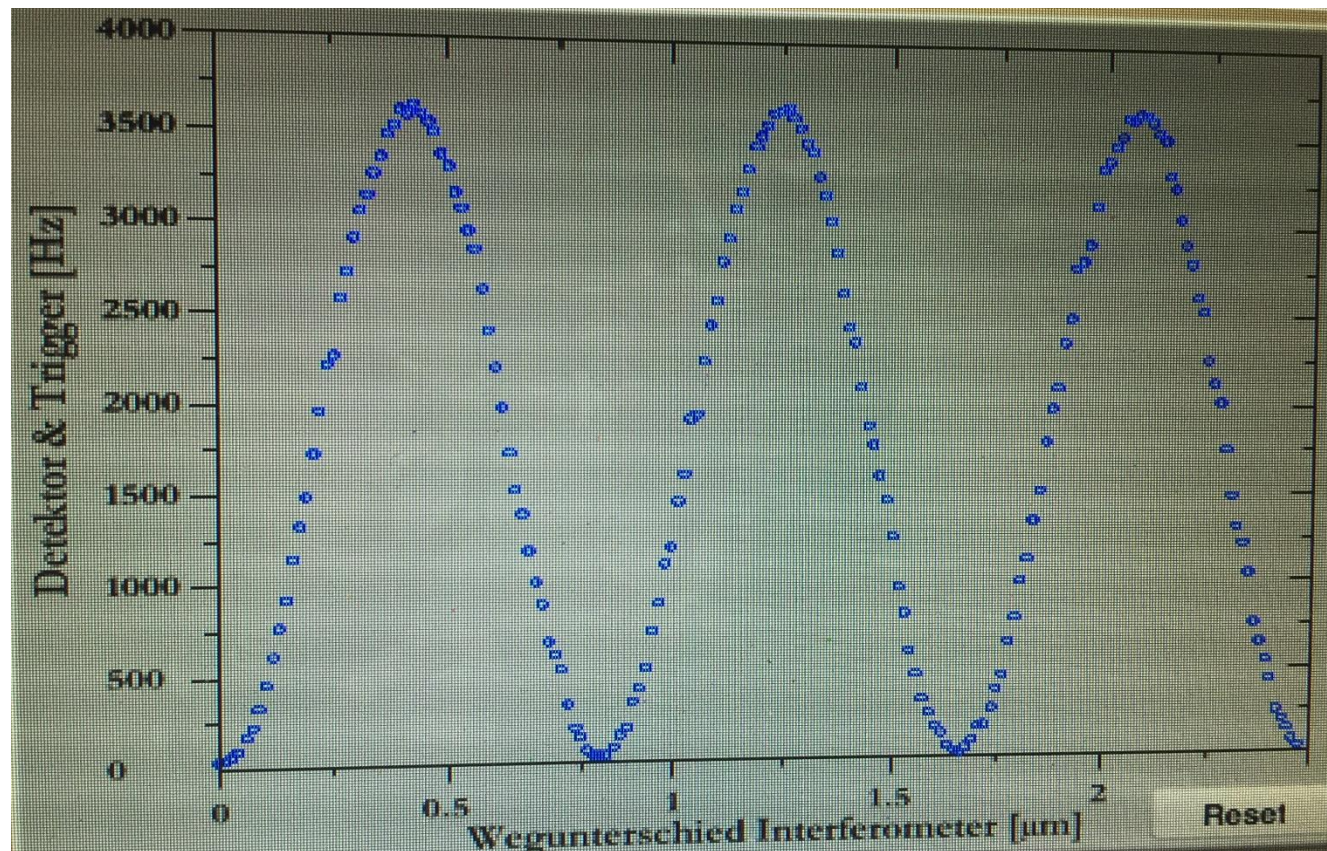


Announced single photon source. Left: sketch, right: experiment



Interferometer for single photons. Left: sketch, right: experiment

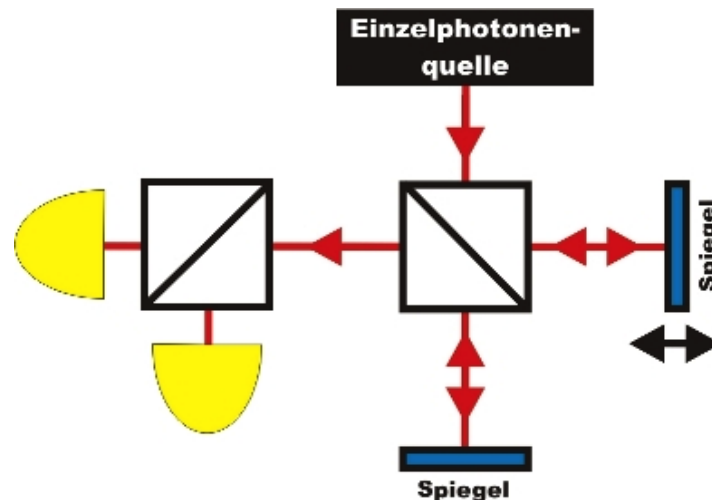
IL FOTONE INTERFERISCE CON SE STESSO
IL FOTONE RIVELA UN COMPORTAMENTO ONDULATORIO



C - INTERFERENCE AND INDIVISIBILITY OF SINGLE PHOTONS

L'interferenza del fotone singolo con se stesso si osserva alla prima divisione del fascio. Ma quello che si osserva dopo la seconda divisione è che l'identico fotone, che prima ha fatto interferenza con se stesso, ora incide su uno dei due rivelatori o sull'altro, in modo casuale, ma in pari misura. Cioè, nel secondo fascio, rivela indivisibilità e comportamento statistico.

Sketch of the experiment with a second 50% beam splitter behind the interferometer

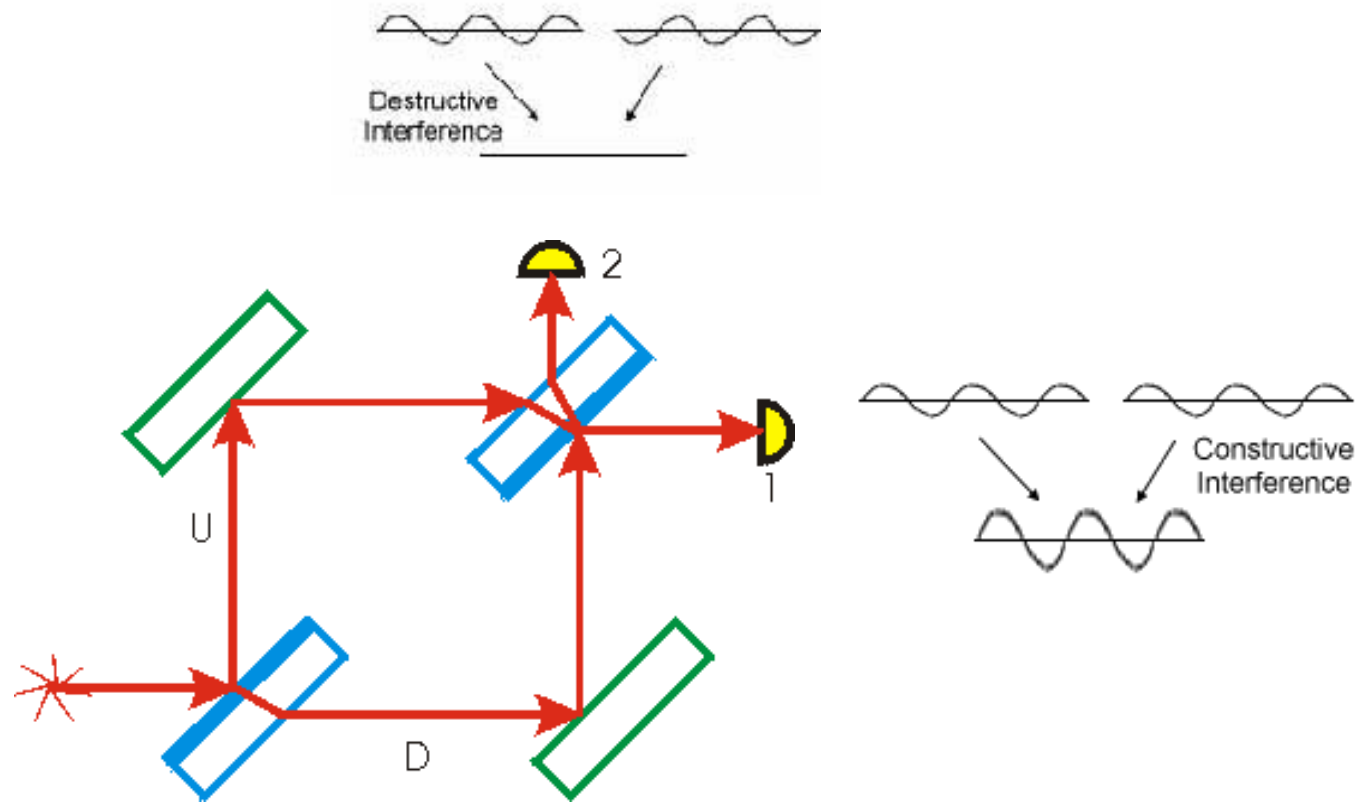


L'esperimento illustra tre caratteristiche del fotone:

- INDIVISIBILITÀ
- INTERFERENZA
- COMPORTAMENTO STATISTICO



INTERFEROMETRO DI MACH-ZEHNDER



IL FOTONE SEMBRA COMPIERE ENTRAMBI I CAMMINI

CANCELLAZIONE QUANTISTICA

-esperimento reale-

L'esperimento della cancellazione quantistica consiste nel tracciare il percorso compiuto dal fotone,
ossia mettere un'informazione sul fotone (quindi niente figure di interferenza) e poi "cancellare" questa conoscenza e ritornare ad una situazione indeterminata che permette la formazione di figure di interferenza.

Anche se l'esperimento è condotto con miliardi di fotoni, possiamo ragionare in termini di singolo fotone

Materiali:

Laser

Coppia di filtri polarizzati parallelamente accostati fra loro e divisi da un fil di ferro

Coppia di filtri polarizzati perpendicolarmente accostati fra loro e divisi da un fil di ferro (etichettatore di percorsi) (foto)

Un filtro polarizzatore

Schermo

Procedura

1. Vedere l'interferenza
2. Cancellare l'interferenza
3. Capire come sono etichettati i fotoni
4. Cancellare l'informazione



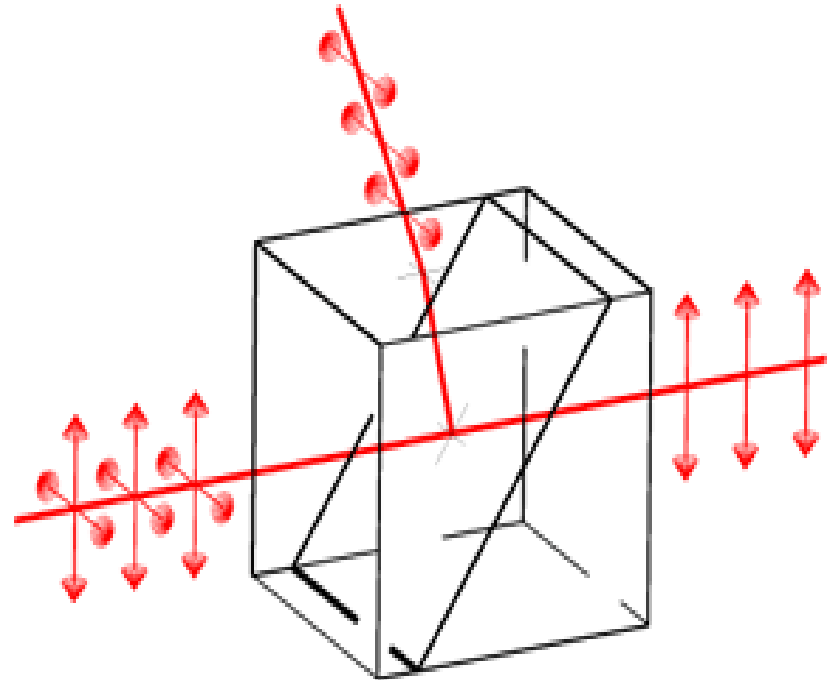
Ma si tratta di SOVRAPPOSIZIONE o di MISCELA DI STATI?

$V \cup O$ oppure $V + O$?

Per rispondere usiamo i cristalli birifrangenti (calcite)

Sono stati utilizzati cristalli di calcite commerciali utilizzando come sorgente un puntatore laser.

Ci si limita ad aspetti semiquantitativi, per comprendere appieno il concetto di stato quantistico, svincolando l'interpretazione dalla specifica modalità con cui avviene l'interazione tra fotoni e filtri polarizzatori.



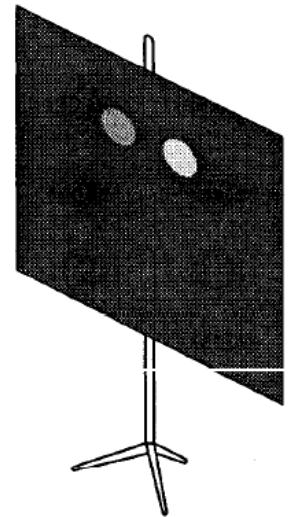
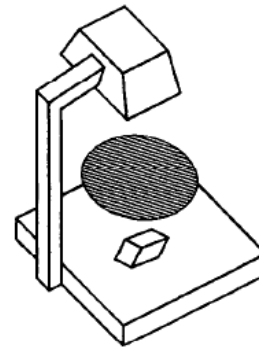
PRIMO ESPERIMENTO

Posiamo un cristallo birifrangente su un proiettore ...

Il primo esperimento con i cristalli di calcite è consistito nel misurare l'intensità relativa e la polarizzazione del fascio ordinario e del fascio straordinario, intercettando con uno schermo prima un fascio, poi l'altro, poi entrambi

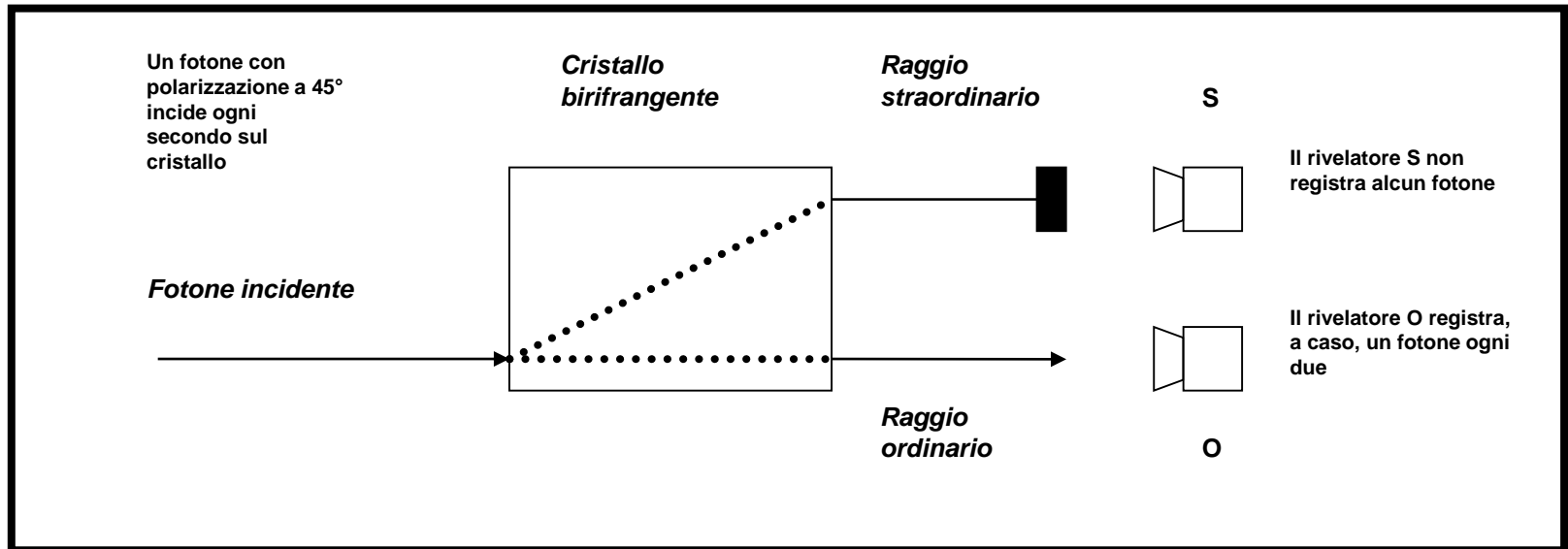
Per comodità chiameremo direzione di polarizzazione VERTICALE quella del fascio ORDINARIO e ORIZZONTALE quella del fascio STRAORDINARIO.

Le intensità relative dei due fasci dipendono dalla direzione di polarizzazione del fascio incidente secondo la legge di Malus

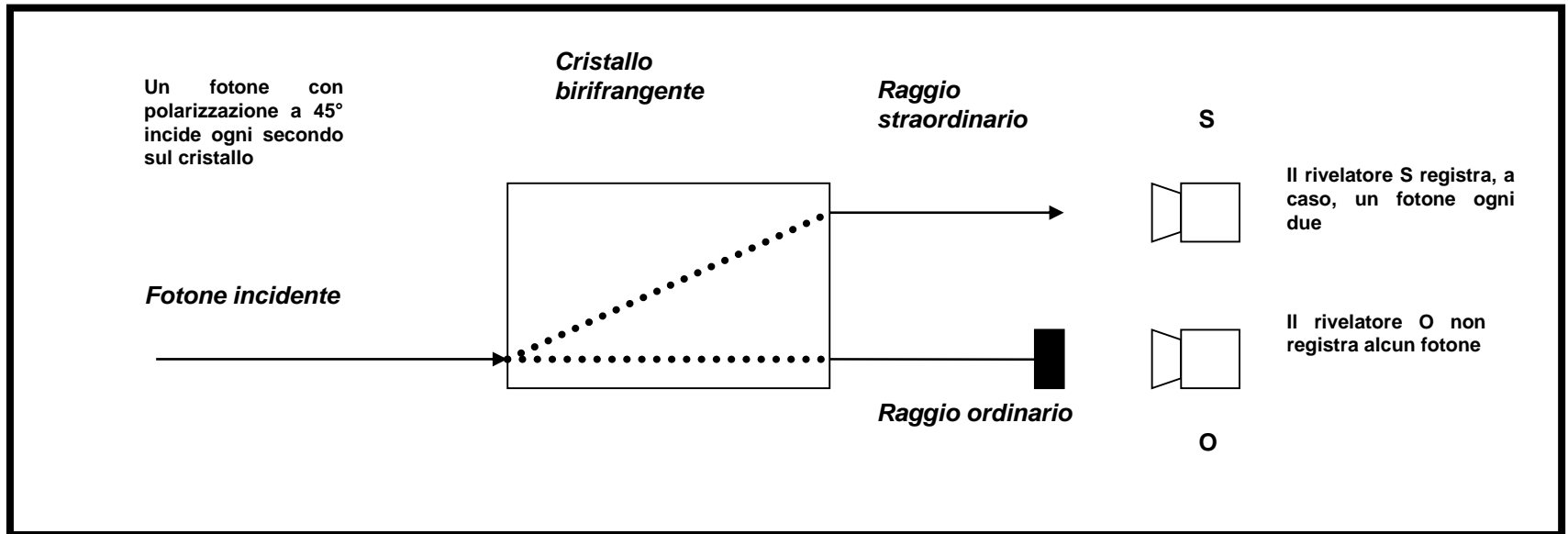


RIASSUMENDO

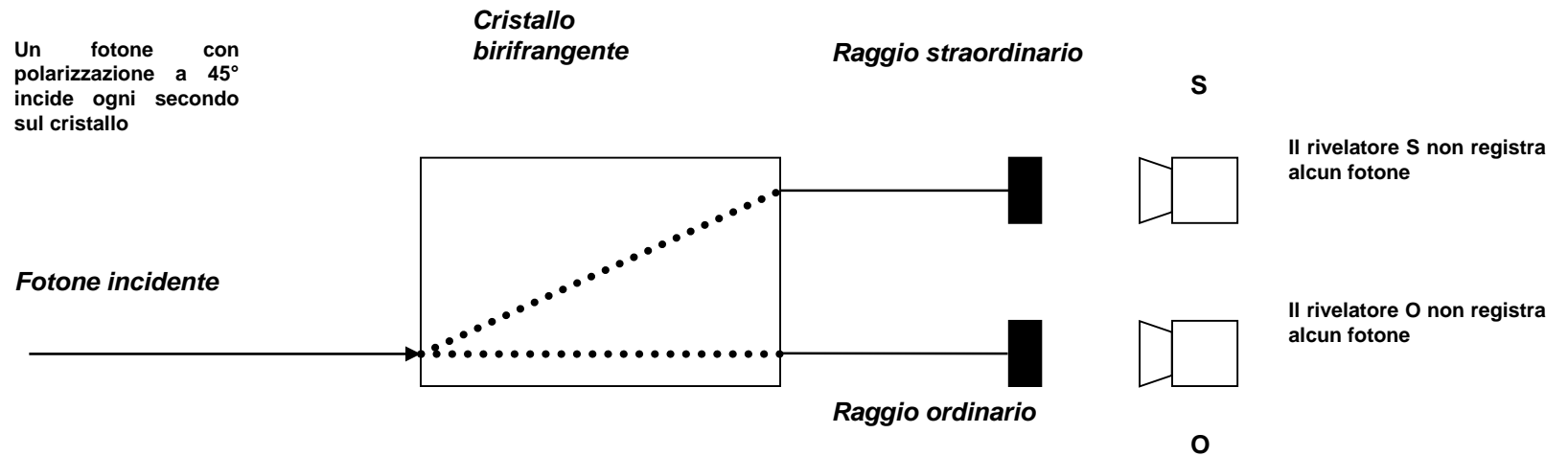
1) Il fotone è assorbito lungo il raggio straordinario



2) Il fotone è assorbito lungo il raggio ordinario



3) Buio totale



SECONDO ESPERIMENTO

SISTEMA DI DUE CRISTALLI DI CALCITE DIRETTA E INVERSA ALLINEATI

Data la correlazione fra cammino e stato di polarizzazione dei fotoni è lecito chiedersi se l'insieme dei fotoni che emergono dal primo cristallo sia composto dal 50% di fotoni V che seguono il cammino non deflesso e dal 50% di fotoni O che seguono il cammino deflesso.

Nel sistema di due cristalli di calcite vengono SEMPRE trasmessi TUTTI i fotoni mantenendone le proprietà.

Quindi:

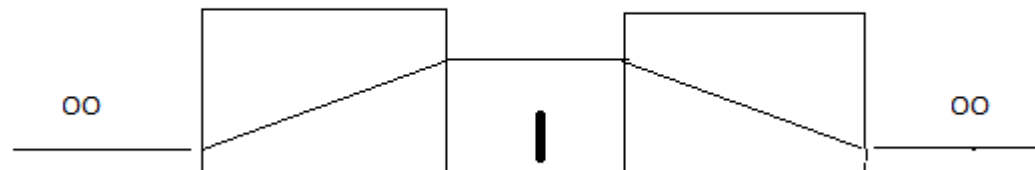
TUTTI i fotoni incidenti con polarizzazione a 45° vengono trasmessi se si tratta di una SOVRAPPOSIZIONE DI STATI.

SOLO LA META' dei fotoni incidenti viene trasmessa se si tratta di una MISCELA DI STATI.

CON DUE CRISTALLI

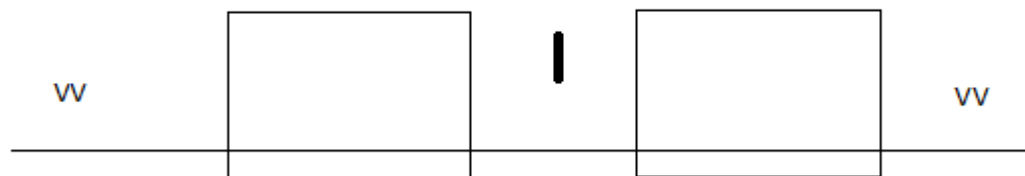
FOTONI INCIDENTI

FOTONI TRASMESSI



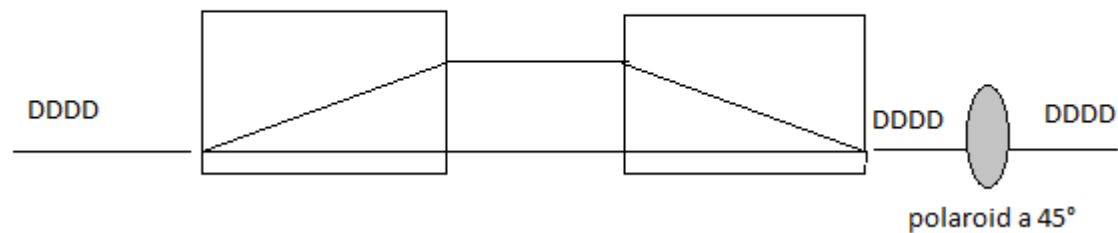
FOTONI INCIDENTI

FOTONI TRASMESSI



FOTONI INCIDENTI

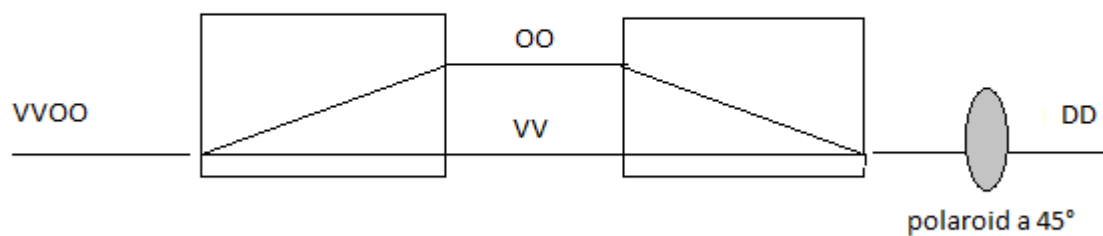
FOTONI TRASMESSI



IN DEFINITIVA...

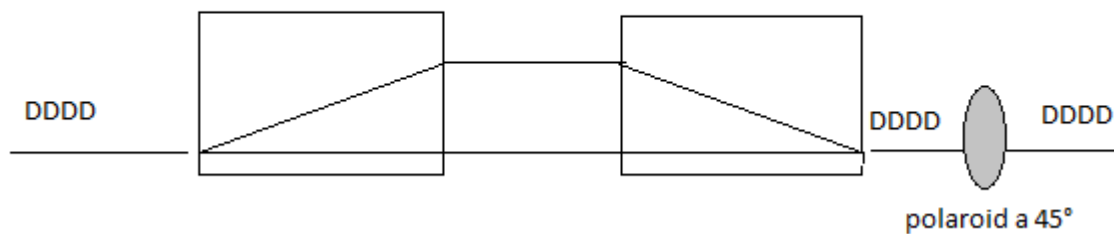
FOTONI INCIDENTI

FOTONI TRASMESSI



FOTONI INCIDENTI

FOTONI TRASMESSI



.... NON È POSSIBILE ATTRIBUIRE UNA TRAIETTORIA AL FOTONE

IL FOTONE:

- NON SEGUE IL CAMMINO V
- NON SEGUE IL CAMMINO O
- NON LI SEGUE ENTRAMBI
- NON NE SEGUE NESSUNO DEI DUE

PERCIÒ È IN UNO STATO PER NOI INIMMAGINABILE:
LO STATO DI SOVRAPPOSIZIONE $V+O$

INOLTRE NON POTENDO OSSERVARE SIMULTANEAMENTE DUE
PROPRIETÀ INCOMPATIBILI (V e O) VIENE SPIEGATO IN MODO SEMPLICE
L'INDETERMINISMO QUANTISTICO

Alle stesse conclusioni si può arrivare analizzando esperimenti di diffrazione di
particelle --->
analogia con la diffrazione di elettroni (ipotesi di de Broglie ecc.)

CONCLUSIONI

VANTAGGI

- far capire i concetti fondamentali e in modo corretto e aperto a ulteriori sviluppi (EPR, Wheeler, non località, entanglement...)
- Non usar formule e non presupporre la conoscenza di nessuna formula (neanche Malus...)

DUBBI

- il tavolo lavoravano pochi studenti motivati: e con l'intera classe, in orario curricolare?
- se rivolto a tutta la classe, fornisce una preparazione finalizzata allo svolgimento di una eventuale seconda prova di Fisica all'esame di Stato?

INFINE

- tutti i docenti di Matematica e Fisica sono interessati a un approfondimento così specialistico e distante dai libri di testo?
- la preparazione degli insegnanti sulla Fisica Moderna è in generale omogenea e adeguata a questo tipo di approccio?

BIBLIOSITOGRAFIA

Ugo Besson *Didattica della fisica* Carocci editore 2015

Elio Fabri <http://www.sagredo.eu/fq>

G.C Ghirardi *Un'occhiata alle carte di Dio* il Saggiatore editore 2001

Marisa Michelini *Proposte didattiche sulla fisica moderna* Università degli Studi di Udine 2010

Alberto Stefanel *La meccanica quantistica nella scuola: interazione di fotoni con polaroid e cristalli birifrangenti per l'introduzione dello stato quantico* La fisica nella scuola, XXXIV, 1 supplemento

R. Hillmel, P. Kwiat *Una gomma quantistica fai-da-te* Le Scienze Luglio 2007

<http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/quantumlab/english/index.html>

Scheda di lavoro (esempio)

L'interazione di luce laser con un cristallo birifrangente

Osservato come la luce non polarizzata interagisce con un cristallo birifrangente, si vuole esplorare ora come la luce polarizzata, come quella emessa da un laser interagisce con un cristallo birifrangente.

Il fascio di luce polarizzata di un puntatore laser incide su un cristallo birifrangente. Si intercettano su uno schermo S i fasci che emergono dal cristallo. Si osservano le macchie luminose che si formano.

C1. Previsioni

C1.1 Qual è il numero di macchie che ci si aspetta di osservare sullo schermo S? _____

C1.2 Se si allontana di qualche centimetro lo schermo S, con cui si intercettano i fasci, nelle macchie che si osservano? _____

C1.3 Si intercettano i fasci emergenti dal cristallo con un polaroid.

❖ Se si ruota il polaroid intorno alla direzione del fascio laser, ci si aspetta che cambi l'intensità delle macchie luminose sullo schermo? _____

❖ Ci si aspetta di trovare orientazioni del polaroid, per cui si ha una sola macchia?

☐ Sì ☐ No

Explicitare la risposta _____



C1.4 Si ruota di un piccolo angolo ($<30^\circ$) il cristallo, intorno alla direzione di incidenza della luce.

❖ La posizione delle macchie sullo schermo resterà la stessa? _____

❖ Si analizza la polarizzazione dei fasci con un polaroid. Che cosa ci si aspetta di osservare?

C2. Esperimento. Si effettui ora l'esperimento

C2.1 Quante macchie luminose si osservano sullo schermo S? _____

C2.2 Si allontana lo schermo S. Che cosa cambia nelle macchie luminose che si osservano su di esso?

C3. Si intercettano i due fasci emergenti dal cristallo con un polaroid usato come analizzatore.

C3.1 Cambia l'intensità delle macchie osservate sullo schermo S, quando si ruota il polaroid

intorno alla direzione della luce incidente?

C3.2 Illustrare come si deve orientare il polaroid, per osservare sullo schermo S una sola macchia

luminosa.

C4. Si ruota di un piccolo angolo ($<30^\circ$) il cristallo, intorno alla direzione di incidenza della luce.

C4.1 La posizione delle macchie sullo schermo resta la stessa? _____

Spiegare _____

C4.2 Si analizza la polarizzazione dei fasci con un analizzatore. Cambia l'intensità delle macchie intercettate sullo schermo? Spiegare.

C4.3 Si confronta la polarizzazione dei fasci di luce trasmessi dal cristallo in questa situazione (sezione B4) e nella situazione analizzata inizialmente (sezione B3). Quali analogie/differenze si rilevano?

Analogie tra le due situazioni Differenze tra le due situazioni

C5. Confronto

C5.1 Confrontare le previsioni con le osservazioni fatte. Discutere analogie e differenze.

Analogie

Differenze

C5.2 In base alle osservazioni fatte.

❖ Si ritengono ancora valide le ipotesi alla base delle previsioni? ☐ Sì ☐ No

❖ Quali modifiche si devono a tali ipotesi? _____

C6. Conclusioni

C6.1 Si riepilogano in forma di conclusioni le osservazioni effettuate.

C6.2 Schizzo della situazione, con indicazione anche della polarizzazione del fascio incidente e dei fasci trasmessi dal cristallo.