

L'approccio della somma sui cammini:

L'interferenza come cuore della fisica quantistica

Massimiliano Malgieri

Dipartimento di Fisica, Università di Pavia

Padova, 20/01/2017



Outline della lezione



1. L'approccio della somma sui cammini: cos'è, qual è la sua storia, quali scelte epistemologiche sottointende.
2. L'approccio di Pavia: una presentazione in breve
3. Alcuni risultati dalle sperimentazioni in classe
4. Aspetti sperimentali della fisica quantistica nel curriculum di V Liceo scientifico

1. Sum over paths



- L'approccio didattico nasce dal lavoro di R.P. Feynman che ha proposto una formulazione alternativa della fisica quantistica nota come "path integral formulation".
- Si ispira fortemente ad un lavoro divulgativo di Feynman, "QED: la strana teoria della luce e della materia" (Adelphi, 2010).
- La prima ricostruzione didattica basata su questo approccio è di E.F. Taylor che la utilizzò a livello universitario, per studenti non fisici.
- Per la scuola secondaria, è stata considerata in particolare in Gran Bretagna, dove è stata adottata in un importante libro di testo.



- Elio Fabri (scuole AIF per insegnanti, contributi su riviste del panorama nazionale)
- Il gruppo dell'Università di Torino (Rinaudo, Cuppari, Violino, Borello). Sperimentazioni organiche in classe del percorso di Torino vengono effettuate negli anni 2000-2002
- Il gruppo dell'Università di Pavia (De Ambrosis, Onorato, Malgieri). Completa ri-progettazione del percorso e sperimentazione in classe nell'A.S. 2014/15.

Il cuore della proposta



L'approccio di Feynman consente di individuare una proprietà generale dei sistemi quantistici nella regola con cui si calcola la probabilità di un evento che può avvenire attraverso due o più "canali" (cammini, ma anche più in generale processi fisici) A, B, C... tra loro mutuamente esclusivi.

In fisica classica si ha

$$P = P_A + P_B + P_C \dots$$

mentre in fisica quantistica agli eventi sono associate ampiezze (complesse, che noi rappresentiamo come vettori) ψ_A , ψ_B , $\psi_C \dots$ e la probabilità dell'evento risulta

$$P = |\psi_A + \psi_B + \psi_C \dots|^2$$

In any event, we expect the relation

$$P_{ac} = \sum_b P_{abc}. \quad (2)$$

This is because, if initially measurement A gives a and the system is later found to give the result c to measurement C , the quantity B must have had some value at the time intermediate to A and C . The probability that it was b is P_{abc} . We sum, or integrate, over all the mutually exclusive alternatives for b (symbolized by \sum_b).

Now, the essential difference between classical and quantum physics lies in Eq. (2). In classical mechanics it is always true. In quantum mechanics it is often false. We shall denote the quantum-mechanical probability that a measurement of C results in c when it follows a measurement of A giving a by P_{ac}^q . Equation (2) is replaced in quantum mechanics by this remarkable law:⁵ There exist complex numbers φ_{ab} , φ_{bc} , φ_{ac} such that

$$P_{ab} = |\varphi_{ab}|^2, \quad P_{bc} = |\varphi_{bc}|^2, \quad \text{and} \quad P_{ac}^q = |\varphi_{ac}|^2. \quad (3)$$

The classical law, obtained by combining (1) and (2),

$$P_{ac} = \sum_b P_{ab} P_{bc} \quad (4)$$

is replaced by

$$\varphi_{ac} = \sum_b \varphi_{ab} \varphi_{bc}. \quad (5)$$

Punti di vista epistemologici



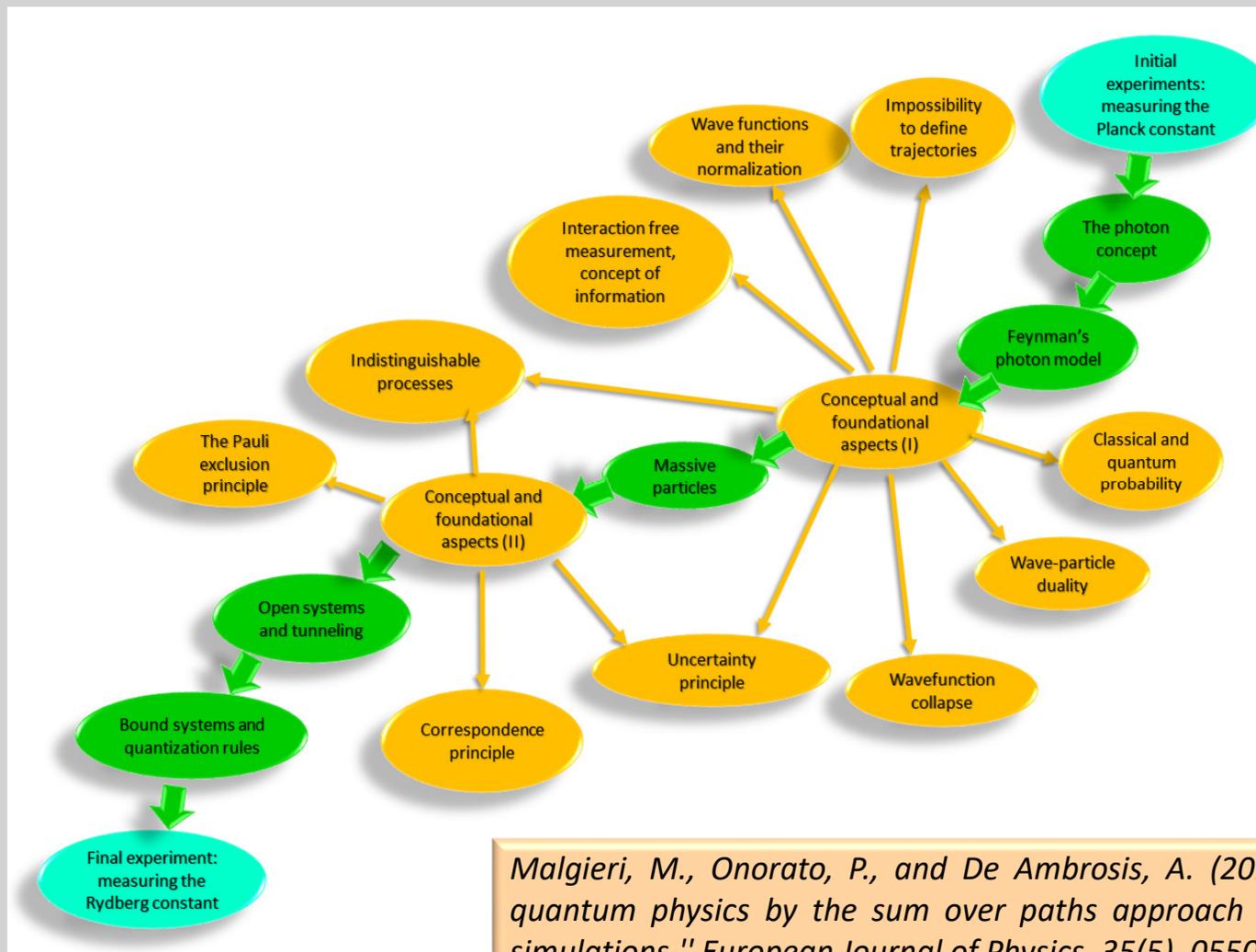
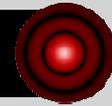
- L'apprendimento della fisica quantistica implica uno shift ontologico dall'ontologia classica fatta di oggetti, ad un altro tipo di ontologia.
- Gli ostacoli epistemologici hanno una grande rilevanza nell'insegnamento della fisica quantistica. La ricerca dimostra che gli studenti potrebbero comprendere come la fisica quantistica funziona, ma non accettare comunque ciò che essa implica.
- Qual è il punto di vista epistemologico proposto dall'approccio della somma sui cammini?

Due livelli di interpretazione



- La filosofia di base dell'approccio della somma sui cammini può essere riassunta nella filosofia "sorgente-rivelatore" (*source to detector*): le sorgenti, che emettono gli oggetti quantistici, e i rivelatori, che le emettono, possono essere visti come gli unici dati di realtà. Tutto il resto è un *modello*, che rappresenta il comportamento dell'oggetto quantistico, e a cui non viene associato un valore ontologico.
- Ad un esame più approfondito, tuttavia, è possibile associare un'interpretazione più "fisica" al modello, ossia quella per cui i diversi cammini possibili, e i fasori loro associati, forniscono una rappresentazione dello *stato* del sistema quantistico. Si può passare, quindi, da una ontologia sorgente-rivelatore, ad una in cui ciò che esiste è lo stato dell'oggetto quantistico. Va messo in evidenza comunque che entrambe le interpretazioni, sebbene con accenti diversi, sono modi validi di interpretare la fisica quantistica, e sono entrambi alternativi all'ontologia ad oggetti classici (particelle).

2. L'approccio di Pavia



Malgieri, M., Onorato, P., and De Ambrosis, A. (2014). "Teaching quantum physics by the sum over paths approach and GeoGebra simulations." European Journal of Physics, 35(5), 055024.

Linee generali del percorso



- Il percorso mira a superare l'approccio pseudo-storico adottato dalla gran parte dei libri di testo e a mettere a fuoco aspetti concettuali della fisica quantistica che possano rimanere parte del patrimonio culturale dello studente.
- Si cerca di far apprezzare appieno agli studenti l'importanza della regola per il calcolo della probabilità quantistica esposto precedentemente, analizzando anche alcune generalizzazioni.
- Vengono presentati anche esperimenti moderni, specialmente di ottica quantistica, che sono essenziali per chiarire aspetti concettuali come quelli legati alle misure "which way".
- Si sfrutta la possibilità dell'approccio di Feynman di *visualizzare il modello matematico* adottato. Risulta tuttavia fondamentale distinguere il piano del modello dal piano della realtà.

L'introduzione del fotone



Si parte dalle prove dell'esistenza del fotone, e dell'attribuzione ad esso delle sue caratteristiche di base: un'energia $E=h\nu$ e una quantità di moto di modulo $p=h\nu/c$. I fenomeni discussi vanno dall'effetto fotoelettrico (1905) all'effetto Compton (1920) fino agli esperimenti di doppia fenditura condotti negli anni '80 con luce di intensità talmente bassa da poter dire che un solo fotone alla volta passa attraverso le fenditure. Tali esperimenti conducono al formarsi su uno schermo fotosensibile di frange di interferenza costituite di singoli punti luminosi, che risultano per gli studenti una prova visibile molto efficace dell'interpretazione della luce come composta di quanti. Si ritiene importante soffermarsi sull'indivisibilità del fotone, al fine di evitare che gli studenti costruiscano un modello alternativo per cui il fotone interferisce con se stesso perchè si divide fisicamente in parti. A tal fine si presenta l'esperimento di Grangier et al. (1986) che dimostra come, indirizzando un fotone alla volta verso uno specchio semiriflettente, e ponendo un rivelatore (fotomoltiplicatore) a ciascuna delle sue uscite, solo uno dei due rivelatori scatti in coincidenza con ciascun fotone emesso.

La luce va dunque interpretata come composta di oggetti discreti, ma non di particelle classiche.

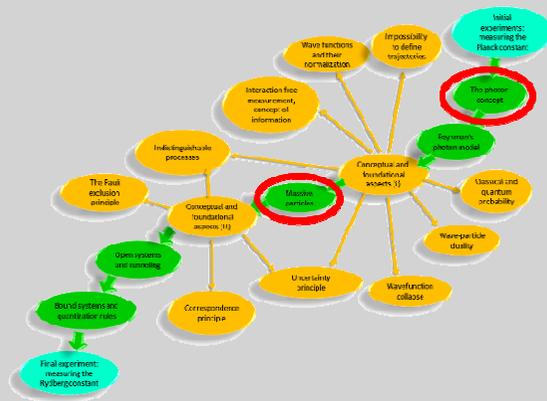
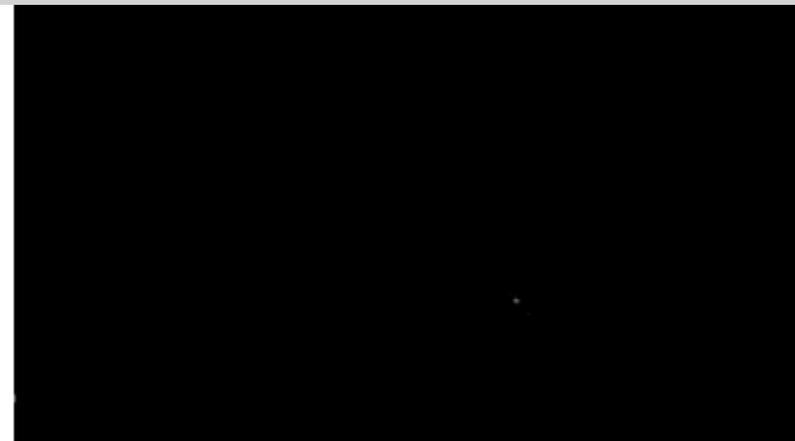
Doppia fenditura con singoli oggetti quantistici



Fotoni (Grangier et al., 2005)



Elettroni (Tonomura et al., Hitachi corp. 1989)

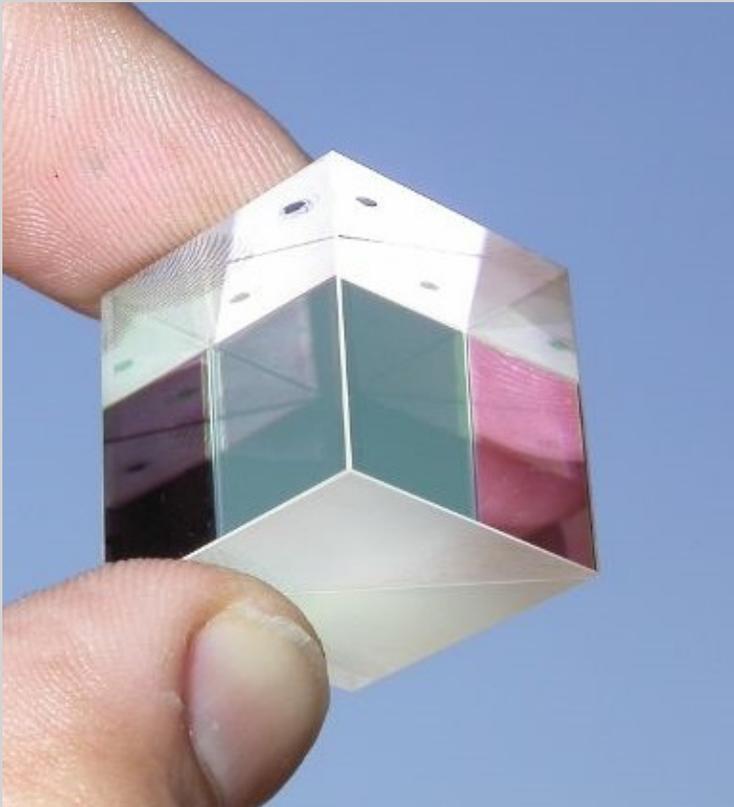


Può nascere una difficoltà: il fotone interferisce con se stesso perchè si divide fisicamente in due parti?

Il beam splitter e l'indivisibilità del fotone



Dal 1980 in poi si è sviluppata un'intera branca della fisica, l'ottica quantistica, che si occupa di studiare il comportamento e le caratteristiche dei fotoni.



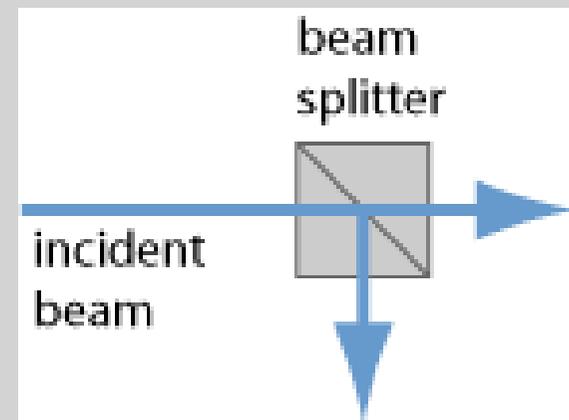
*Un **beam splitter** (divisore di fascio) è un elemento base degli esperimenti di ottica, anche classica, e in particolare degli interferometri. Esso può essere costituito da due prismi triangolari incollati alla loro base mediante una colla. Lo spessore dello strato di resina è tale che, per un certo intervallo di lunghezze d'onda, metà della luce incidente attraverso la "porta" uno (ossia una faccia del cubo) sia riflessa e che l'altra metà sia trasmessa.*

Il beam splitter e l'indivisibilità del fotone



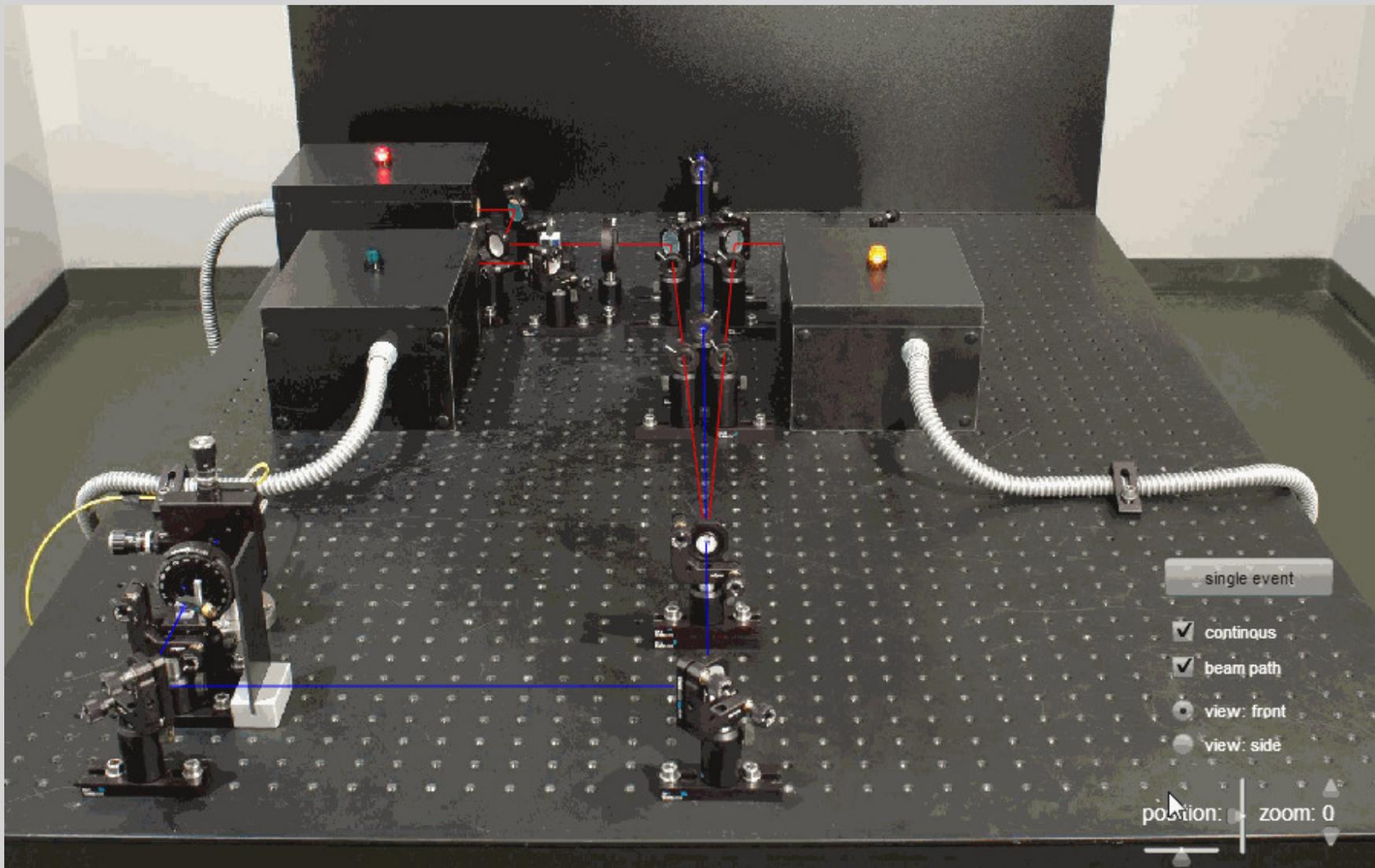
La caratteristica principale del beam splitter è che, se un raggio di luce collimata (ad es. una luce laser) viene diretta contro la sua faccia di ingresso, una percentuale fissata (solitamente il 50%) dell'intensità luminosa viene riflessa, secondo le normali leggi di riflessione, dalla faccia "diagonale" interna, mentre il resto della luce viene trasmessa indisturbata.

Questo origina una domanda: cosa accade quando viene indirizzato verso il beam splitter un singolo fotone?

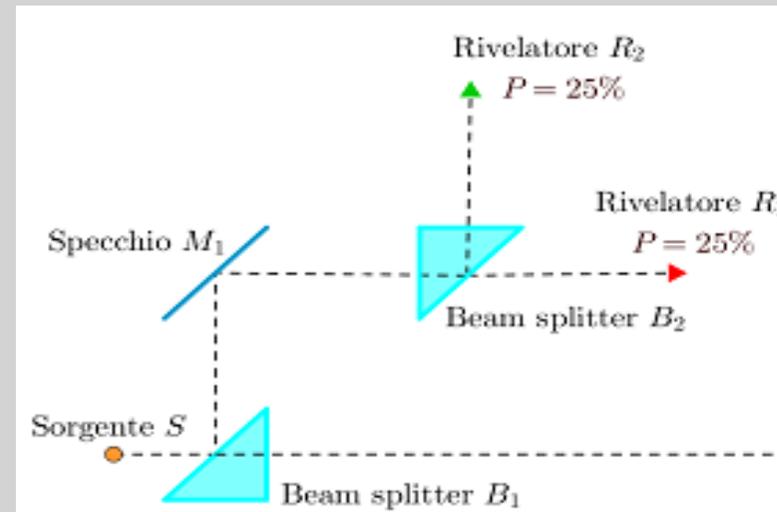
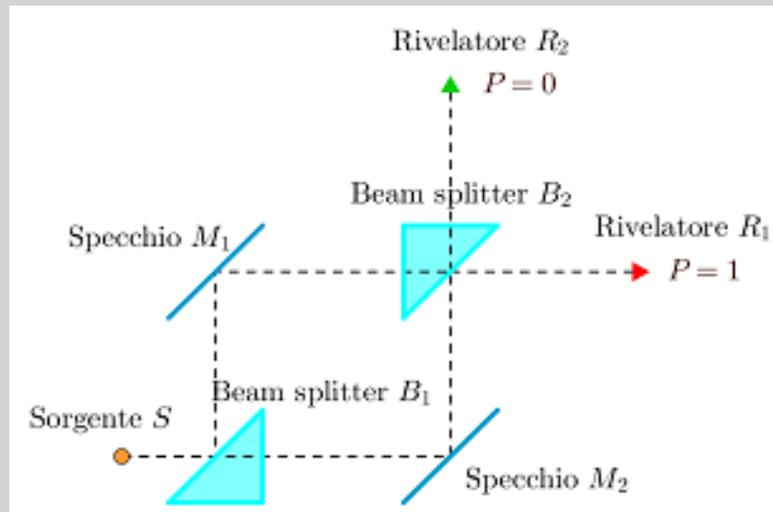


La meccanica quantistica fornisce una previsione per il risultato di questo esperimento, ma esso fu realizzato solo nel 1986.

Esperimento di Grangier



Un nuovo sistema-paradigma: il Mach-Zehnder



Nell'apparato sperimentale rappresentato in figura i divisori di fascio (beam splitter) hanno la caratteristica di riflettere o trasmettere, col 50% di probabilità, i fotoni incidenti. Il risultato, se viene rimosso uno dei due specchi (a destra è rimosso lo specchio M_2) appare in accordo con l'intuizione classica: si osservano il 25% dei fotoni incidenti al rivelatore R_1 , e il 25% a R_2 , perchè il 50% dei fotoni vengono persi al divisore di fascio B_1 . La stessa cosa accade se viene rimosso lo specchio M_1 anzichè lo specchio M_2 . Ma se entrambi gli specchi sono inseriti, il risultato è in totale disaccordo con l'intuizione classica che prevederebbe il 50% dei fotoni in R_1 e il 50% dei fotoni in R_2 . Al contrario, si osserva che tutti i fotoni vengono rivelati in R_1 .

Partendo dalla necessità di interpretare questo esperimento, come anche quello della doppia fenditura con fotoni singoli, si introduce quindi il modello di Feynman.

Il modello di Feynman



Nei problemi che riguardano fotoni o altri oggetti quantistici avremo quindi tipicamente una **sorgente** in grado di emettere fotoni, e uno o più **rivelatori** (che generalmente considereremo ideali, ossia con efficienza 100%) in grado di rivelare la presenza del fotone in quel punto.

***Nel modello**, il fotone non percorre una singola traiettoria, ma vengono presi in considerazione contemporaneamente **tutti i possibili cammini** (compatibili con i vincoli presenti nel problema) che portano dalla sorgente al rivelatore.*

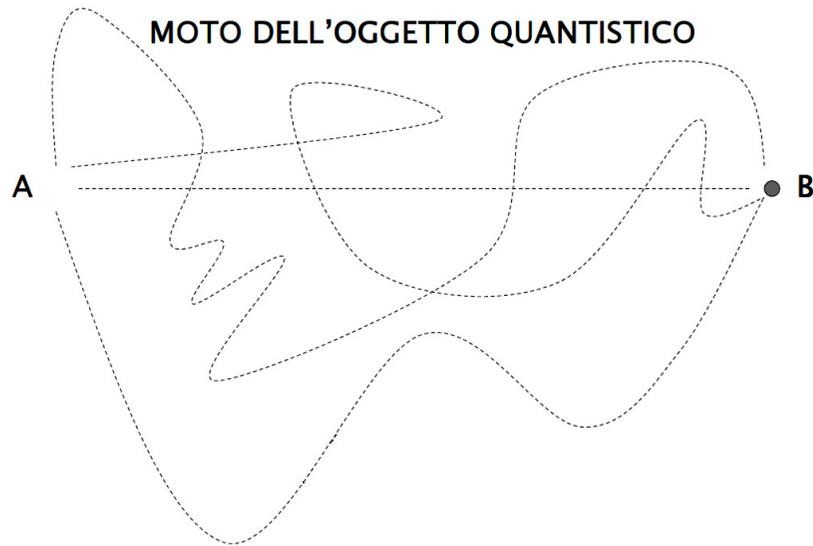
Il modello di Feynman



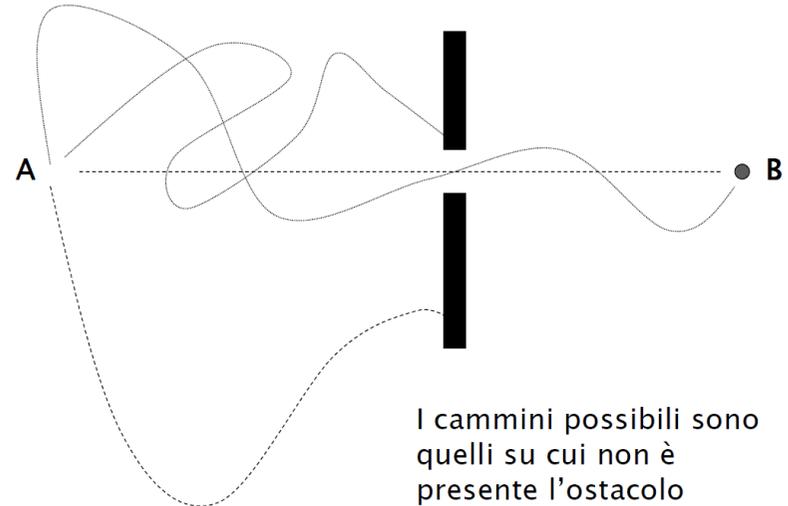
MOTO DELL'OGGETTO CLASSICO



MOTO DELL'OGGETTO QUANTISTICO



...se c'è un ostacolo



I cammini possibili sono quelli su cui non è presente l'ostacolo

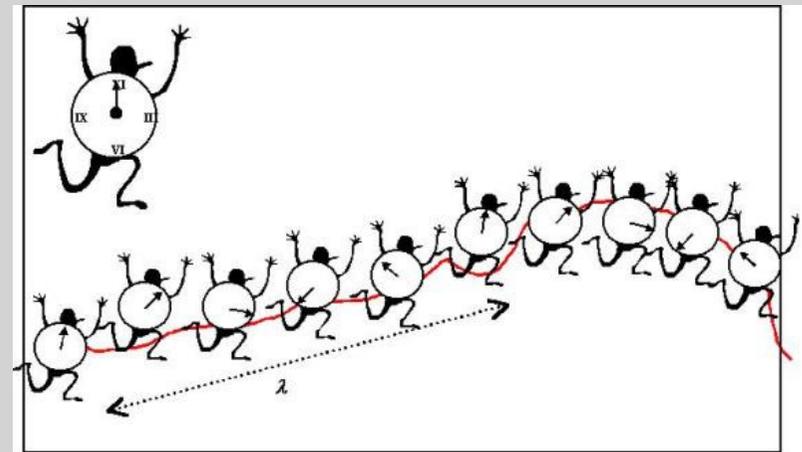
(Borello, 2002)

Il modello di Feynman



Lungo ciascun cammino, al fotone sarà associato un vettore di lunghezza unitaria (chiamato anche ampiezza) che ruota lungo il cammino, con una fase uguale a quella dell'onda classica, cioè $\varphi = kx - \omega t$. Per problemi indipendenti dal tempo (stazionari), potremo, come già fatto in ottica ondulatoria, ridurci a considerare solo $\varphi = kx$, ossia considerare un vettore che compie un giro completo nello spazio di una lunghezza d'onda (la lunghezza d'onda ad essa associata secondo la sua frequenza)

Il fotone ha quindi una periodicità intrinseca, come la lancetta di un orologio che gira lungo ciascun cammino ricordando l'ora (la fase) associata a quel particolare cammino.

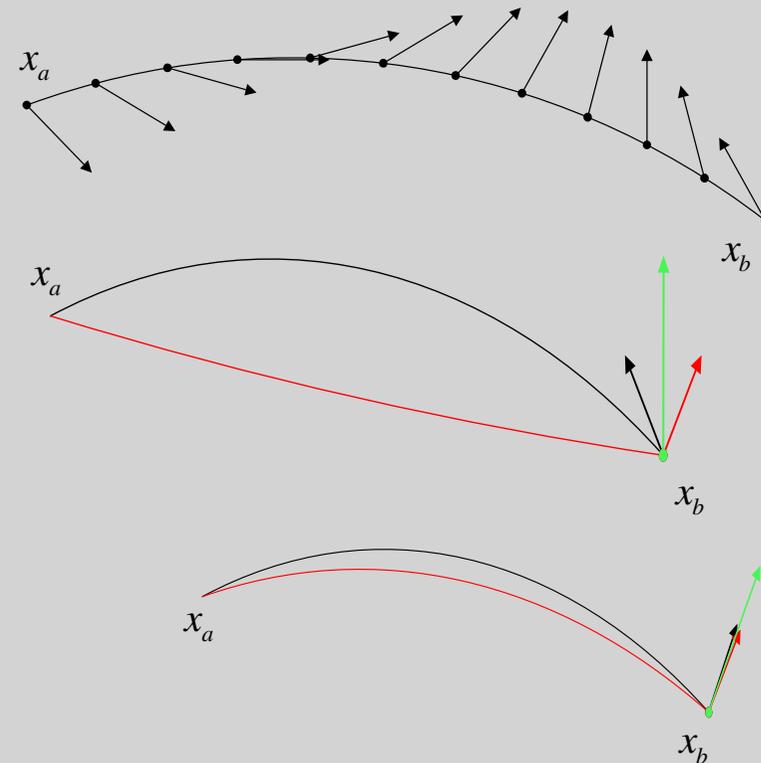


Il modello di Feynman



Nel punto corrispondente al rivelatore vengono sommati (vettorialmente) tutti i vettori corrispondenti ai vari cammini giunti in quel punto, ciascuno con la propria fase, che ne determina l'inclinazione. Il vettore così trovato può essere chiamato *ampiezza risultante*.

Il metodo per sommare le ampiezze fornisce il meccanismo di base per l'interferenza, perché l'ampiezza risultante da due vettori uguali che vengono sommati può avere intensità che varia da zero, fino al doppio del modulo dei vettori originari, a seconda dell'angolo fra essi (determinato dalla differenza tra le loro fasi)



Il modello di Feynman

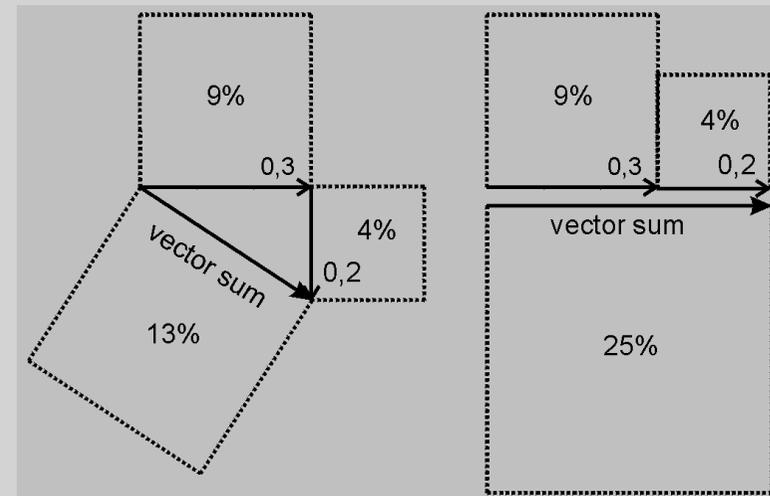


Una volta ottenuta l'ampiezza ad un certo rivelatore, per ottenere la probabilità di rivelare il fotone in quel punto occorrerà elevare al quadrato il modulo dell'ampiezza risultante. Si otterrà in questo modo un numero proporzionale alla probabilità di rivelazione.

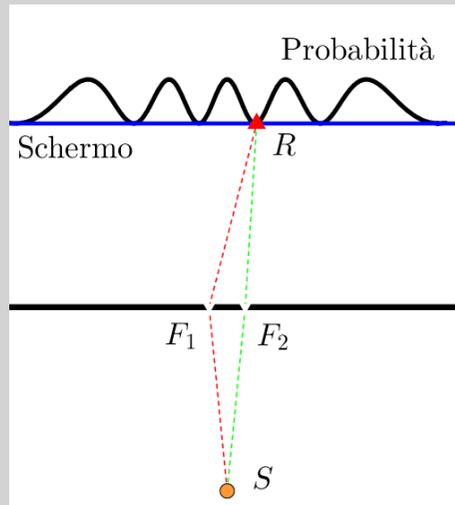
Otteniamo quindi una fondamentale legge quantistica per la somma delle probabilità: Se un evento E può accadere in due modi A e B tra loro indistinguibili, la probabilità dell'evento è ottenuta sommando le ampiezze (fasori) degli eventi A e B , e elevando poi al quadrato. Cioè non $P(E) = P(A) + P(B)$ ma

$$P(E) = |\vec{\psi}(A) + \vec{\psi}(B)|^2$$

Dove la lettera greca ψ indica, tradizionalmente, le ampiezze. Si ha quindi interferenza tra le due alternative.



Analisi della doppia fenditura



Con fenditure puntiformi

<https://www.geogebra.org/m/efBI3J9a>

Con fenditure non puntiformi

<https://www.geogebra.org/m/GALGGPlo>

Per determinare la probabilità di rivelare il fotone in R , vengono sommati tutti i vettori associati ai possibili cammini che vanno da S a R ; e la probabilità risulta proporzionale al quadrato del modulo del vettore risultante.

Nel caso di due fenditure F_1 ed F_2 , considerate come puntiformi, vi sono solo due cammini possibili: $S-F_1-R$ ed $S-F_2-R$. E' allora semplice mostrare, adottando come usuale le approssimazioni di Fraunhofer e di piccoli angoli, che i massimi di interferenza, ossia i punti sullo schermo dove la probabilità di rivelare il fotone è massima, saranno quelli per cui i fasori associati ai due cammini sono in fase, il che avviene se la loro differenza di lunghezza è $\Delta l = n\lambda$ con $n \in \mathbb{Z}$. Al contrario i minimi, dove la probabilità di rivelare il fotone risulta nulla, corrisponderanno a $\Delta l = (n + 1/2)\lambda$.

Analisi della doppia fenditura



In questo primo esempio quindi i passaggi matematici sono essenzialmente gli stessi che si effettuano per l'analisi dal punto di vista dell'ottica ondulatoria; ad essi è associata tuttavia una diversa interpretazione, e viene costruito un diverso linguaggio. Anzichè di fase dell'onda si parlerà di fase del vettore associato ad un dato cammino, ed anzichè di massimi e minimi di interferenza dell'onda si parlerà di massima o minima probabilità di rivelare il fotone in un dato punto dello spazio. L'interpretazione usuale dell'esperimento della doppia fenditura viene recuperata attraverso la legge dei grandi numeri: se si inviano contro lo schermo un gran numero di fotoni, essi si accumuleranno nelle zone dove la probabilità di rivelazione è maggiore, mentre ben pochi saranno rivelati nei punti vicini a quello in cui è nulla, producendo le bande chiare e scure che si osservano nella figura di interferenza.

In modo analogo alla doppia fenditura, anche con l'aiuto di simulazioni, vengono trattati la determinazione dei minimi di interferenza nel caso della diffrazione da singola fenditura, i casi dell'interferenza da tre e quattro fenditure puntiformi e, attraverso una simulazione, il caso dell'interferenza con due fenditure non puntiformi.

Una regola aggiuntiva per la riflessione

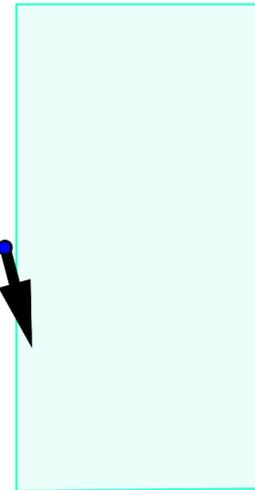


Se un cammino implica la riflessione del fotone all'interfaccia tra un mezzo con indice di rifrazione minore a uno con indice di rifrazione maggiore, il vettore associato a tale cammino riceve uno sfasamento di π (180°).

Fotone in arrivo



Fotone riflesso



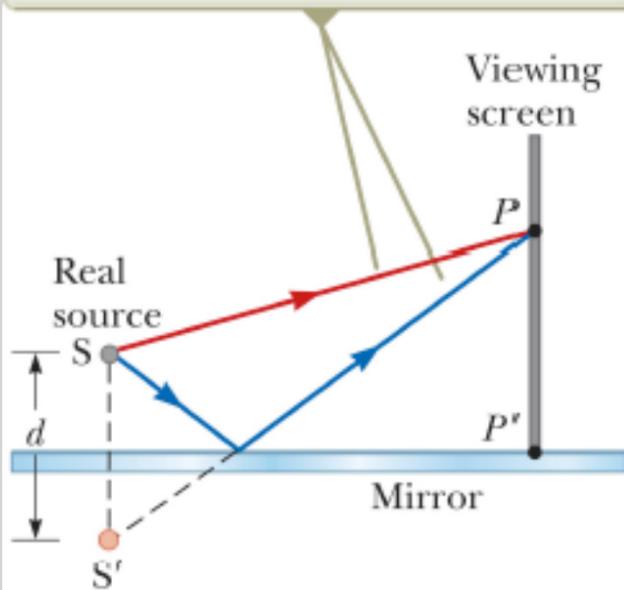
Analogamente al caso dell'ottica ondulatoria, lo sfasamento non avviene per riflessione «interna», ossia da un materiale con indice di rifrazione maggiore, ad uno con indice di rifrazione minore.

Lo specchio di Lloyd



Esempio: utilizzando uno specchio, uno schermo ortogonale ad esso, ed una sorgente di luce coerente, si può ottenere interferenza su uno schermo tra il cammino riflesso e quello diretto.

An interference pattern is produced on the screen as a result of the combination of the direct ray (red) and the reflected ray (blue).



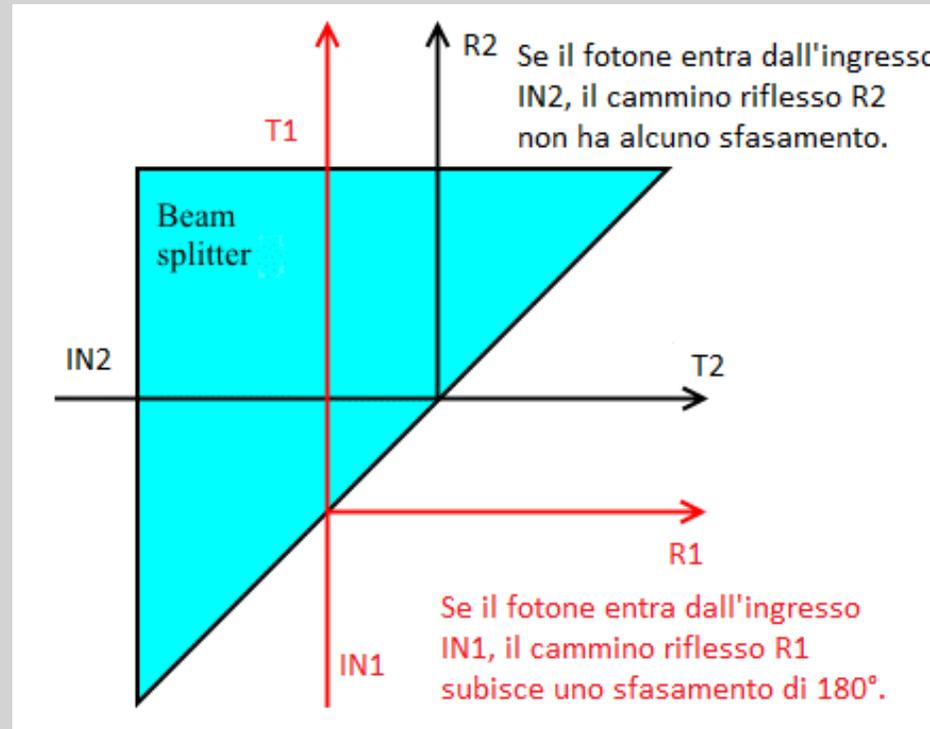
Nel punto dello schermo più vicino allo specchio si ha una frangia non illuminata, il che mostra lo sfasamento dovuto alla riflessione (i due cammini hanno la stessa lunghezza, ma interferiscono distruttivamente).

<https://tube.geogebra.org/student/muN23BWVo>

I divisori di fascio

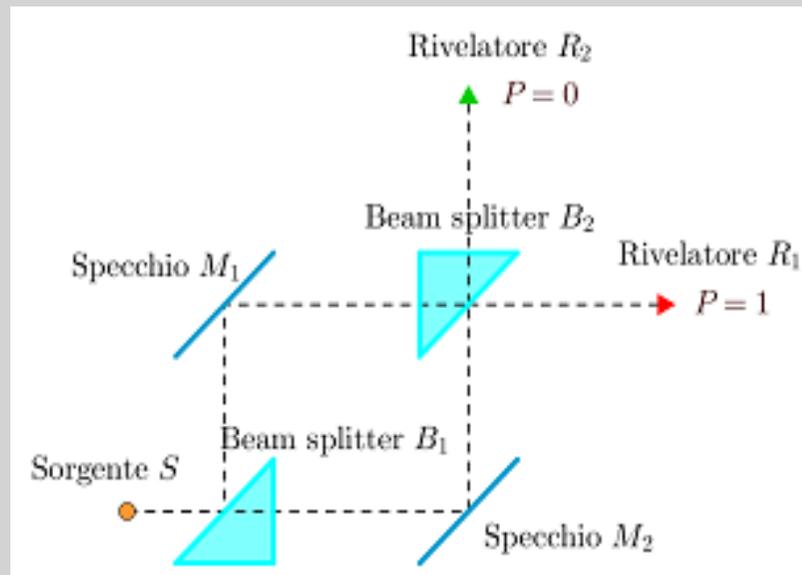


La regola per la riflessione ha conseguenze importanti per i divisori di fascio:



Tali caratteristiche devono essere tenute presenti nell'analisi degli interferometri.

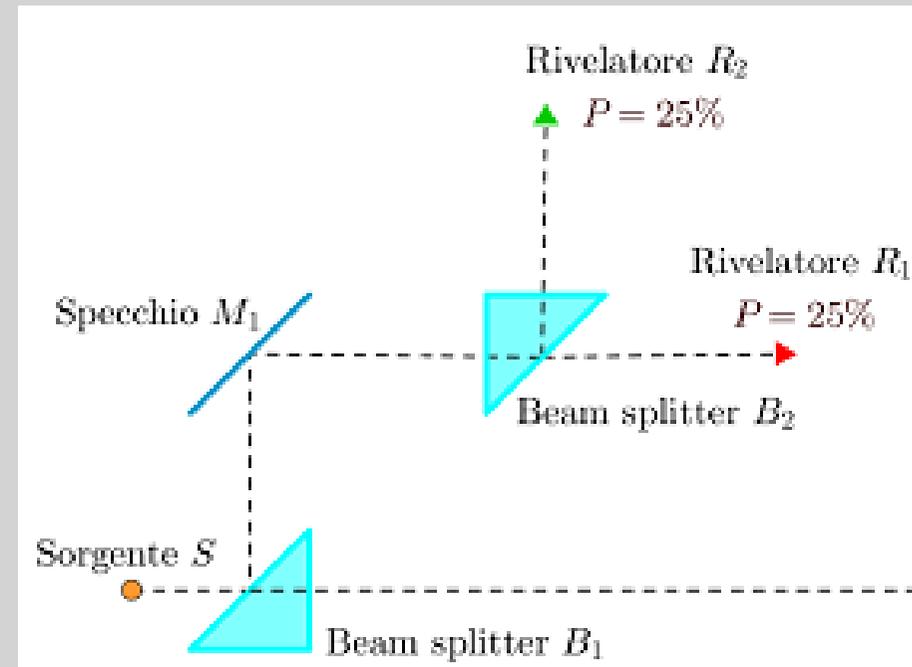
Analisi del Mach-Zehnder



<https://www.geogebra.org/m/NvbZqpuA>

Nell'esperimento vi sono due cammini possibili per ciascuno dei due rivelatori R_1 ed R_2 . Si assume che l'apparato sia costruito in modo da essere completamente simmetrico, in modo tale che tutti i cammini che vanno dalla sorgente a ciascuno dei due rivelatori abbiano la stessa lunghezza. Perciò, non viene prodotto nei fasori associati ai cammininessuno sfasamento dovuto alla lunghezza del cammino. Si conta allora il numero delle riflessioni esterne, dalla quale risulta che i fasori associati ai due cammini $S-R_1$ saranno in fase, sommandosi costruttivamente mentre quelli associati ai due cammini $S-R_2$ saranno in controfase, sommandosi distruttivamente, perciò la probabilità di rivelare il fotone in R_2 sarà nulla.

Analisi del Mach-Zehnder



L'analisi del secondo caso è ben diversa: in questo caso vi sono infatti solo due cammini possibili, uno da S ad R_1 ed uno da S ad R_2 . Non vi è quindi alcuna interferenza; le probabilità di rivelare il fotone ad R_1 o ad R_2 saranno proporzionali al quadrato del modulo di due fasori uguali, e dovranno quindi essere uguali.

Misure senza interazione



L'idea che sia il puro e semplice fatto di poter acquisire informazione *which way* sul sistema, e non una perturbazione dovuta all'atto della misura, a causare la distruzione dell'interferenza, è stata verificata sperimentalmente in tempi recenti, attraverso l'invenzione di metodi per ottenere informazioni su un sistema quantistico senza interagire materialmente con esso.

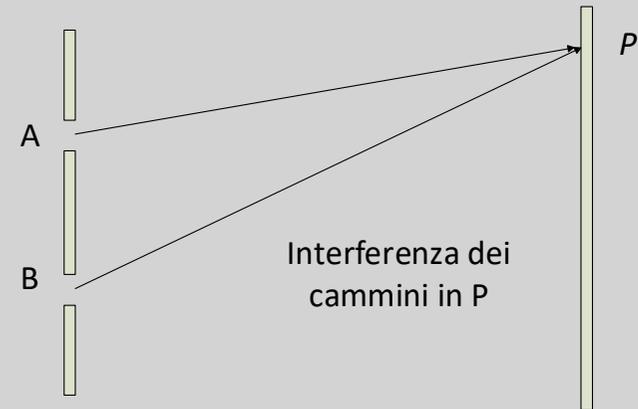
Un esperimento analogo a quello della doppia fenditura nel quale il fotone viene rivelato senza interagire con esso viene realizzato nel 1991.

Zhou, X. Y., Wang, L. J., & Mandel, L. Induced coherence and indistinguishability in optical interference. Physical review letters, 67(3), 1991, 318-321.

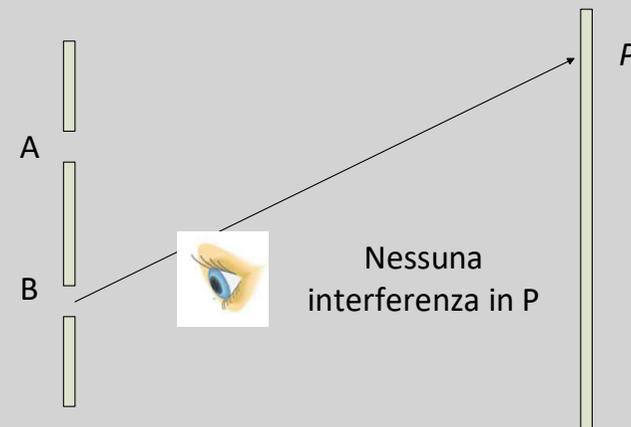
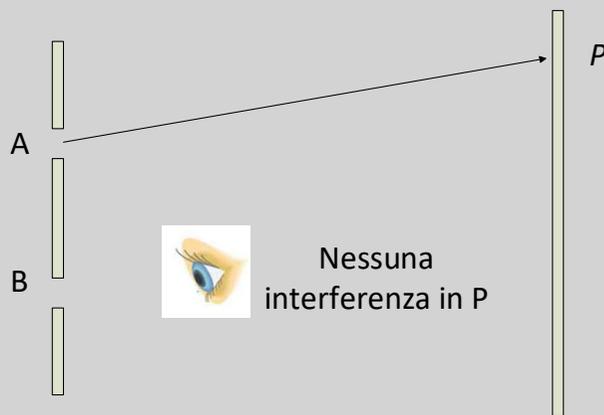
Le misure which way



L'oggetto quantistico «esplora» tutte le vie; da questo deriva l'interferenza nell'esperimento delle due fenditure. Ma se viene introdotto un osservatore o rivelatore che rivela il passaggio della particella ad una delle due fenditure, l'interferenza scompare.



<https://www.geogebra.org/m/GALGGPlo>



wave_particle_duality.ggb

Questo fenomeno è parte essenziale della classica formulazione del «dualismo onda-particella»: se viene costruito un esperimento atto a verificare il carattere particellare dell'oggetto quantistico, esso non potrà riscontrarne gli aspetti ondulatori, e viceversa.

Le misure which way



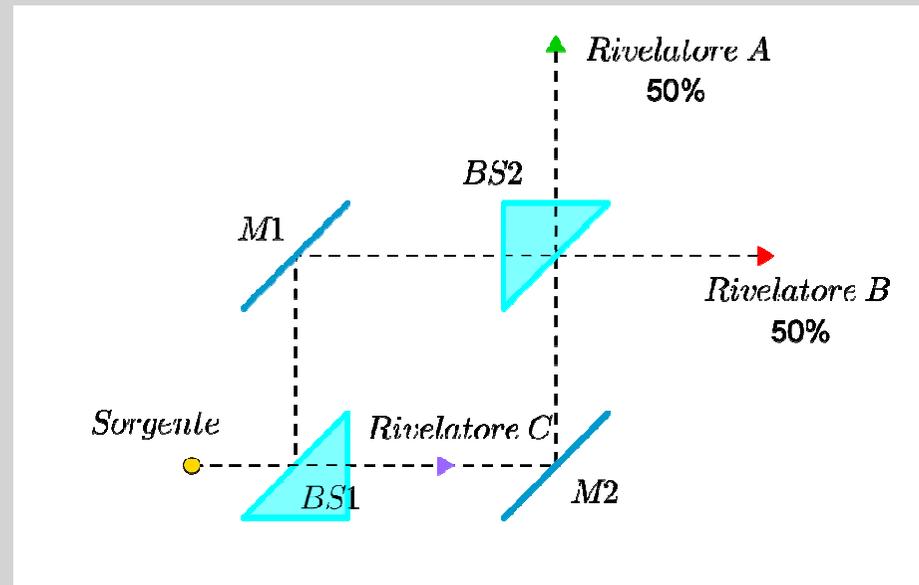
Se è possibile distinguere sperimentalmente quale cammino ha preso il fotone, non vi è più interferenza.

Posso interpretare il risultato in questo modo: se ho un'informazione, un dato di realtà, che consente di distinguere quali cammini l'oggetto quantistico non può aver preso, tali cammini non vanno più conteggiati tra quelli possibili.

Dunque «cammini *possibili*», non solo nel senso di «compatibili con i vincoli fisici imposti dal problema» ma anche «compatibili con l'informazione disponibile sul sistema».

Ottenere informazione su «quale via» (which way information) ha preso il fotone nell'esperimento delle due fenditure, riduce i cammini possibili ai soli cammini che passano attraverso la fenditura individuata dal dato sperimentale, distruggendo l'interferenza.

Il Mach-Zehnder con misura which way



Analogamente all'esperimento della doppia fenditura, il Mach-Zehnder può essere modificato con un rivelatore aggiuntivo che permette misure which way. Anche in questo caso, la distinguibilità dei cammini conduce alla perdita del fenomeno di interferenza.

Probabilità classica e probabilità quantistica



Se un evento E può avvenire in due modi alternativi **sperimentalmente indistinguibili** A e B , ai quali sono associati ampiezze $\Psi(A)$ e $\Psi(B)$, la probabilità complessiva dell'evento E si calcolerà con la formula quantistica, ossia

$$P(E) = |\vec{\psi}(A) + \vec{\psi}(B)|^2$$

*Ma se l'evento E può avvenire in due modi alternativi **sperimentalmente distinguibili** A e B , ai quali sono associate probabilità separate $P(A)$ e $P(B)$, si utilizzerà la formula classica, cioè*

$$P(E) = P(A) + P(B)$$

E non si avrà quindi interferenza tra le due alternative.

Un "modello funzionale" della dualità

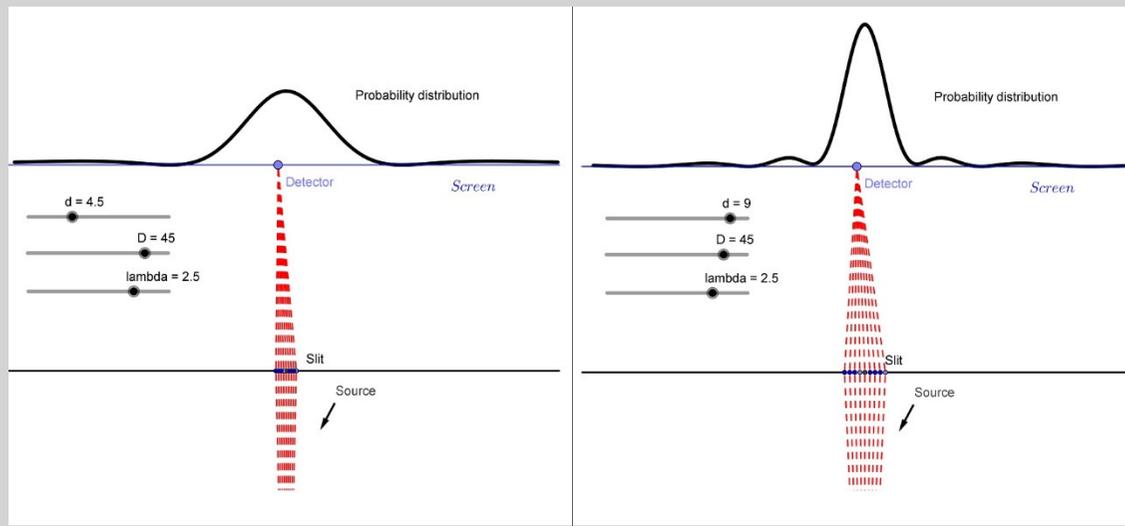


1. *Gli oggetti quantistici sono sempre rivelati come entità localizzate, ma la loro probabilità di rivelazione è data dalla **regola della probabilità quantistica considerando tutti i cammini (o processi) possibili**, che è responsabile dell'emergere di fenomeni ondulatori;*
2. *Se sul sistema viene acquisita informazione, mediante una misura which way, i cammini possibili per il sistema, per un dato esito della misura which way, sono ridotti in numero e si perde l'interferenza, o in altre parole si applica la regola della probabilità classica perchè processi non sono più indistinguibili.*

Gli apparati sperimentali Zhou-Wang-Mandel e Mach-Zehnder svolgono un ruolo cruciale nel chiarire questi punti per gli studenti.

Va messo in evidenza che, al contrario di quanto avviene nella fisica classica, il processo di misura è interno, e non esterno, al modello.

Il principio di indeterminazione



Consideriamo la diffrazione da singola fenditura con fotoni singoli, a energia fissata. Utilizzando la simulazione possiamo osservare, qualitativamente, che la figura di diffrazione si allarga al restringersi della fenditura, e viceversa.

<https://tube.geogebra.org/student/mSWnP0xGx>

Ma la larghezza della fenditura può essere vista come incertezza Δx sulla posizione del fotone nel momento in cui attraversa la fenditura (infatti, tutto quello che sappiamo di esso è che non può essere intercettato dallo schermo). Al contrario, la larghezza della figura di diffrazione può essere collegata all'incertezza Δp_x sulla componente x della quantità di moto del fotone, sempre nel momento in cui attraversa la fenditura.

Il principio di indeterminazione



Per essere un po' più precisi, l'incertezza sulla posizione del fotone è $\Delta x \approx d/2$. Possiamo stimare la parte dello schermo su cui il fotone cade con maggior probabilità con la parte compresa tra i primi due minimi, cioè tra i punti $y = \pm \lambda D/d$. Perciò possiamo stimare l'incertezza sull'angolo con cui il fotone è partito come $\Delta\theta = \lambda/d$ e quindi $\Delta p_x \approx p\Delta\theta = h/d$ da cui

$$\Delta x \Delta p_x \approx \frac{d}{2} \frac{h}{d} = \frac{h}{2}$$

L'argomentazione qui esposta produce un risultato approssimato; in fisica quantistica è tuttavia possibile derivare rigorosamente (teorema di Robertson) la relazione esatta

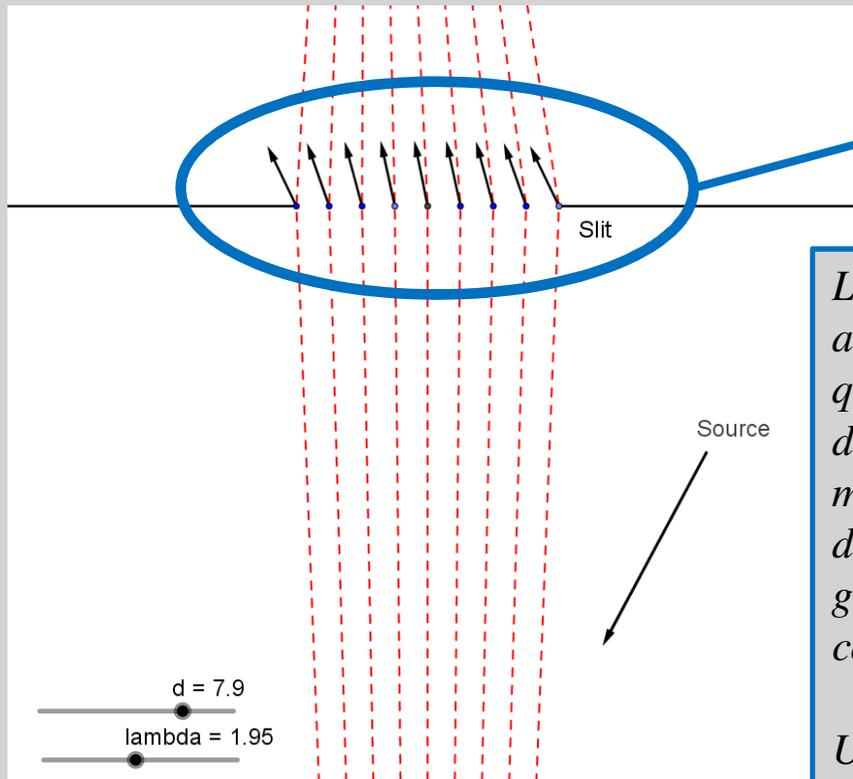
$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}$$



Nella prospettiva moderna (da discutere eventualmente alla luce del dibattito storico) il principio di indeterminazione non riguarda un disturbo causato al sistema col processo di misura, sebbene vi sia stato su questo un lungo dibattito storico che, in parte, prenderemo in considerazione. Riguarda invece una proprietà intrinseca dei sistemi quantistici, ossia l'impossibilità che essi si trovino in uno stato in cui i valori di grandezze tra loro incompatibili siano entrambe precisamente definite, oltre un certo limite intrinseco.

Per quanto riguarda la forma di indeterminazione più comune, quella tra la posizione di un oggetto quantistico lungo una certa direzione, e la sua quantità di moto lungo la stessa direzione, tale indeterminazione ha come ordine di grandezza la costante di Planck h , costante fondamentale della natura.

Il principio di indeterminazione e lo stato dell'oggetto quantistico



Stato dell'oggetto quantistico nel momento in cui attraversa la fenditura.

La riflessione sul principio di indeterminazione ci porta a discutere che cosa intendiamo per stato di un sistema quantistico. Per stato di un sistema quantistico dobbiamo intendere, in generale, una codificazione matematica, che contiene tutta l'informazione disponibile sul sistema, inclusi i possibili valori delle grandezze fisiche che per esso sono possibili, compatibilmente con il principio di indeterminazione.

Una possibile caratterizzazione dello stato di un oggetto quantistico ad un certo istante di tempo è, ad esempio, data dallo specificare tutte le possibili posizioni che l'oggetto può avere a quell'istante, nonché l'ampiezza (cioè il fasore) associata a tale posizione. Questa caratterizzazione dello stato si chiama "funzione d'onda" (spaziale).

Anche gli elettroni fanno così!!

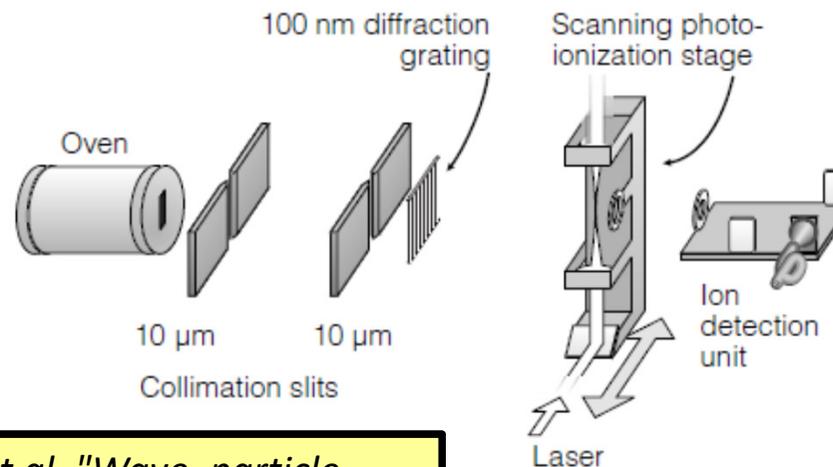
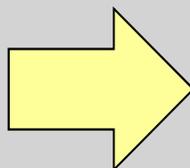
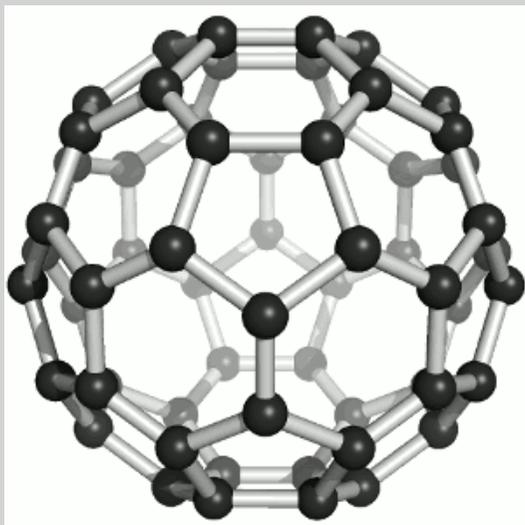


Che gli elettroni (e tutte le particelle massive) abbiano un comportamento analogo ai fotoni è previsto fin dall'inizio dalla fisica quantistica. Il primo esperimento di tipo «doppia fenditura» con un elettrone alla volta è stato eseguito nel 1976 da un gruppo di ricercatori italiani (Merli, Missiroli e Pozzi). Questo esperimento è stato votato come **l'esperimento più bello della fisica**, secondo un sondaggio promosso dalla rivista Physics World nel 2002.

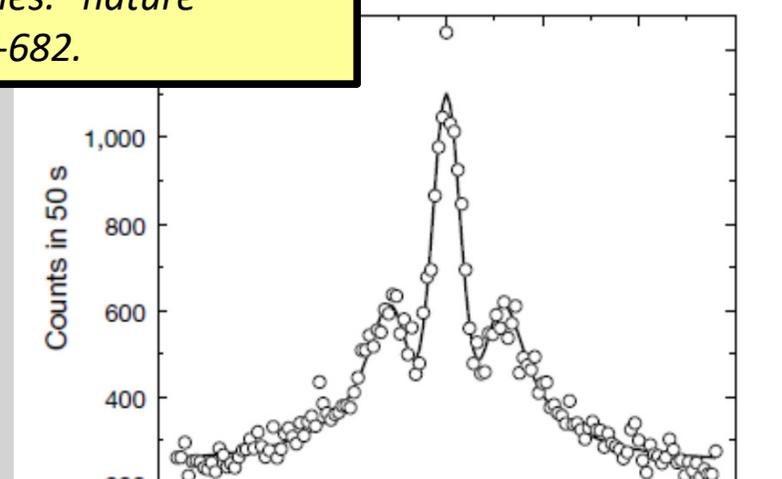
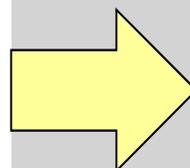
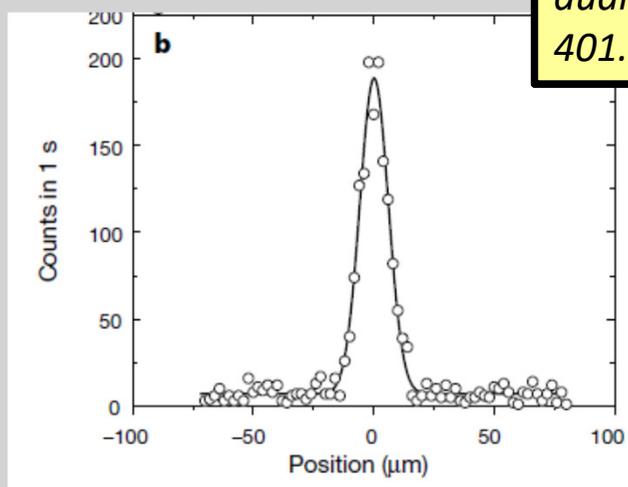
In anni recenti l'esperimento è stato ripetuto più volte a scopo educativo e divulgativo, registrando in filmati l'accumulo progressivo degli elettroni sullo schermo e la formazione delle frange di interferenza .



Diffrazione di molecole C60



Arndt, Markus, et al. "Wave-particle duality of C60 molecules." *nature* 401.6754 (1999): 680-682.



Le particelle massive



Come possiamo interpretare tutto ciò? Ripartiamo dalla formula per la fase del vettore associato al fotone: $\varphi = kx - \omega t$.

Possiamo scrivere questa formula utilizzando grandezze che abbiano lo stesso significato per fotoni e particelle massive?

Abbiamo imparato dall'effetto fotoelettrico che $\omega = 2\pi f = 2\pi E/h$, mentre dall'effetto Compton abbiamo capito che $k = 2\pi/\lambda = 2\pi p/h$. Possiamo allora scrivere la fase del vettore associato ad una particella massiva come

$$\varphi = \frac{2\pi}{h} (p \cdot x - E \cdot t)$$

Associamo quindi anche all'oggetto quantistico dotato di massa una lunghezza caratteristica, che è legata alla sua periodicità intrinseca: la lunghezza del tratto di cammino nel quale il vettore associato compie un giro completo.

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

*Questa lunghezza è detta **lunghezza d'onda di De Broglie**.*

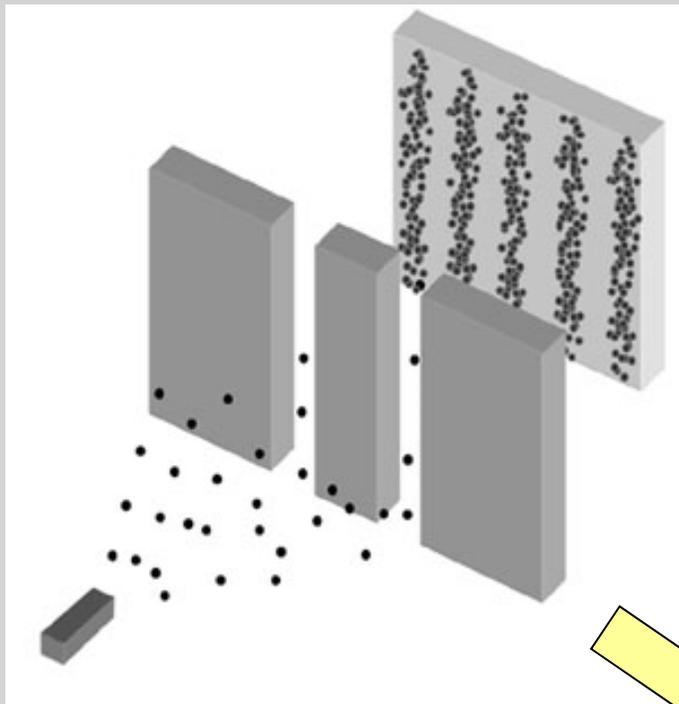
Un modello generale



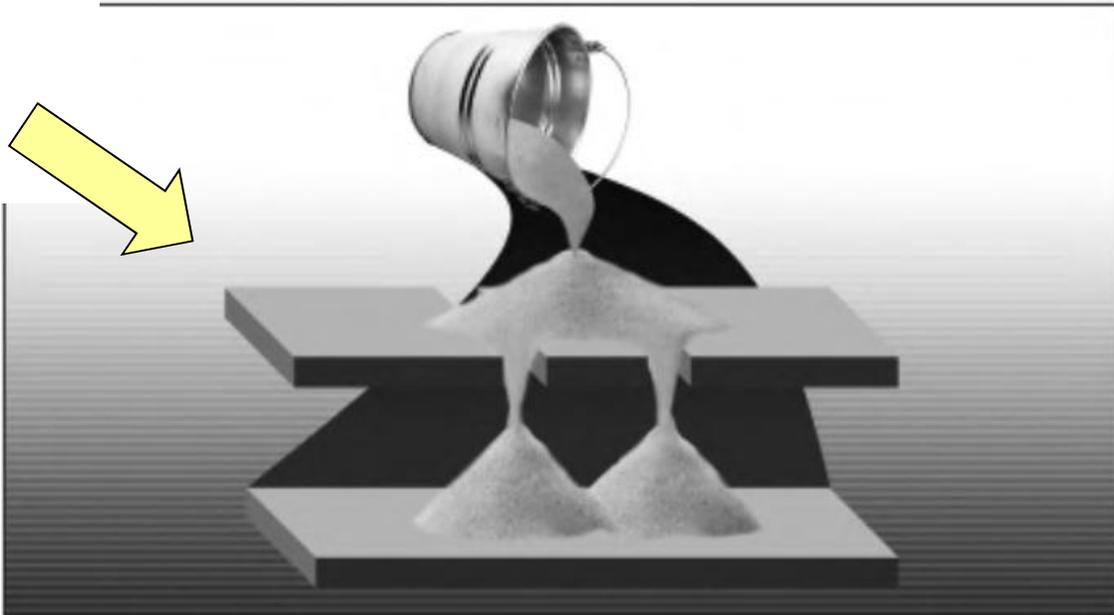
Una delle conseguenze è che le cose che eravamo abituati a considerare come onde, si comportano anche come particelle; e le particelle si comportano come onde; **in effetti, tutto si comporta nello stesso modo.** Quindi la meccanica quantistica unifica l'idea del campo con le sue onde, e quella di particella, in un unico concetto.

R. P. Feynman, "Sei pezzi facili", 1994

Limite classico



Al crescere della massa e/o dell'energia della particella, la lunghezza d'onda di de Broglie della particella diminuisce e il comportamento tende a diventare sempre più simile a quello classico.



<https://tube.geogebra.org/student/mRH0juaWD>

La spirale di Cornu



Nella spiegazione del principio di corrispondenza dal punto di vista della somma sui cammini ha grande importanza la "spirale di Cornu", tipica figura che forma la somma dei vettori associati ai cammini in molti casi di interesse. Da essa si può osservare come i cammini che danno il maggior contributo alla probabilità risultante siano quelli la cui lunghezza sta entro una lunghezza d'onda dal cammino classico (traiettoria). Da qui si può capire in che modo il modello preveda che, al diminuire della lunghezza d'onda, il comportamento del sistema quantistico si avvicini a quello dell'oggetto classico.

Esempi: oggetto quantistico libero

<https://www.geogebra.org/m/qTK7gICC>

Rifrazione

<https://www.geogebra.org/m/U4oiugBy>

Riflessione

<https://www.geogebra.org/m/UMbXFWOV>

Limite classico



All'aumentare della massa della particella si osserva la figura di interferenza sullo schermo trasformarsi in quella che è l'aspettativa classica per la distribuzione della probabilità di rivelazione di particelle lanciate verso due fenditure: due distribuzioni di probabilità ben separate sullo schermo, approssimativamente gaussiane, in corrispondenza delle due aperture.

<https://tube.geogebra.org/student/m971719>

Il limite classico per le particelle massive è il corrispondente del limite dell'ottica geometrica per i fotoni. Nel caso della riflessione da uno specchio parabolico si considera una sorgente molto lontana dallo specchio (idealmente all'infinito) e una serie di rivelatori posti sull'asse dello specchio. Utilizzando il metodo della somma sui cammini si trova una probabilità di rivelazione che ha un massimo nel fuoco della parabola. Al diminuire della lunghezza d'onda del fotone incidente (rispetto alla distanza focale dello specchio, che è la scala di lunghezza rilevante del problema) vediamo tale distribuzione di probabilità divenire sempre più piccata intorno al fuoco.

<https://tube.geogebra.org/student/m971769>

Cos' altro si può fare?



- Sistemi risonanti (modello ad esempio della diffrazione da pellicole sottili)

<https://www.geogebra.org/m/oiwrDPnR>

- Sistemi legati (anche per approfondire il principio di indeterminazione)

<https://www.geogebra.org/m/flp6tEZQ>

- Effetto tunnel

<https://www.geogebra.org/m/aJwL6lcO>

- Reticoli di diffrazione (anche a supporto della parte sperimentale)

<https://www.geogebra.org/m/AHDnFdMx>

- Introduzione al diverso comportamento di bosoni e fermioni attraverso l'esperimento di Hong-Ou-Mandel (Malgieri et al., 2016)

3. Alcuni risultati



Sperimentazione Pavia A.S. 2014/15 Liceo Scientifico Fermi, Genova

La sperimentazione più completa e organica (sono stati effettuati altri test ma solo di parti del percorso) è stata effettuata nell'a.s. 2014/15 in una V Liceo Scientifico del Liceo "Enrico Fermi" di Genova. La classe comprendeva 18 alunni. Al termine della sequenza, 6 alunni sono stati intervistati individualmente.

Verificare l'integrazione delle conoscenze: il paradigma KI



Nella didattica delle scienze, metodi di valutazione efficaci incentrati sulla verifica dell'acquisizione di modelli mentali comprensivi e integrati sono stati forniti dalla Knowledge Integration (KI) Theory (Lee et al., 2010; Liu et al., 2011).

Dal punto di vista della KI, l'apprendimento scientifico è tanto più soddisfacente quanto più gli studenti **articolano e verbalizzano le loro idee sugli argomenti del curriculum**, **aggiungono nuove idee normative al loro repertorio**, **sviluppano criteri scientifici per discernere le idee e per connetterle fra loro**, e **formano una visione più coerente della scienza come risultato dell'integrazione tra varie idee scientifiche**.

Una segno distintivo della prospettiva KI è **l'enfasi sull'importanza della coerenza interna** nei modelli concettuali degli studenti, e nei collegamenti che esprimono tra le le loro idee.

Così, capire e connettere diversi fenomeni, rapportare diversi livelli di spiegazione è un **aspetto fondamentale del conceptual change** (Linn, 2013) in quanto rivela la coerenza globale, e non solo locale dei modelli mentali degli studenti.

Compiti e griglie della KI



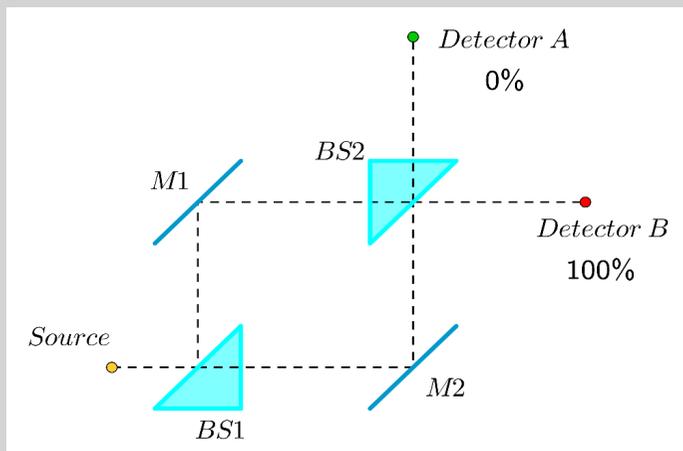
La linea di ricerca sulla Knowledge Integration ha sviluppato un metodo generale per valutare l'apprendimento di argomenti scientifici complessi sulla base di domande a risposta aperta ("KI tasks"), in cui gli studenti sono chiamati a **spiegare fatti scientifici producendo un discorso organizzato** nel quale siano collegati diversi principi, leggi, o fenomeni.

Le risposte sono classificate utilizzando griglie semi-standardizzate ("KI-rubrics") che caratterizzano su una scala a 5 o 6 livelli il numero e/o la consistenza e la validità dei link tra idee scientifiche che lo studente riesce a produrre a sostegno della sua risposta.

Il metodo delle tasks e rubrics KI ha dimostrato di possedere soddisfacenti proprietà psicometriche (Liu et al., 2008).

Score	Level	Description
0	No information	No answer to the given task
1	Irrelevant	Elicits ideas irrelevant to the context Elicits partially relevant ideas but answers a different question
2	Non normative or no link	Elicits non-normative ideas Elicits relevant ideas but makes non-normative links between ideas
3	Partial link	Recognizes a link between relevant ideas but does not fully elaborate the link
4	Full link	Elaborates a scientifically valid link between two relevant ideas
5	Complex link	Elaborates two or more relevant links between relevant ideas

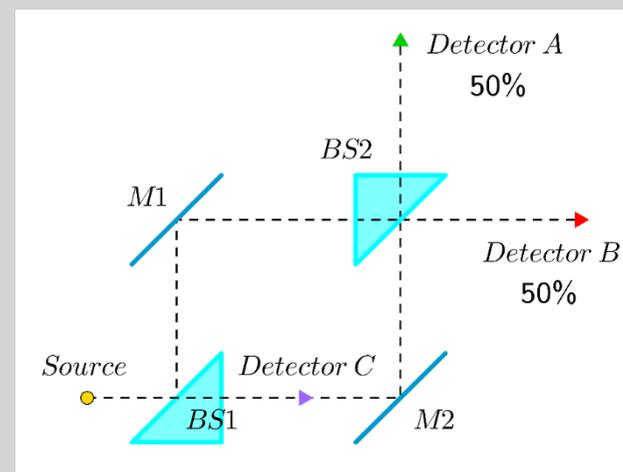
Domande che richiedono argomentazione



L'esperimento Mach-Zehnder ordinario e i suoi risultati (i due bracci hanno uguale lunghezza)

Nelle figure sono mostrati i risultati di due possibili esperimenti con un interferometro Mach-Zehnder. Il primo caso è quello ordinario, e si ha il 100% di probabilità di rivelare il fotone al rivelatore B. Nel secondo caso, con un rivelatore intermedio che segnala il passaggio del fotone (senza distruggerlo, e idealmente senza disturbarlo) si ha il 50% di probabilità di rivelare il fotone a ciascuno dei due rivelatori.

Descrivi e analizza anche formalmente gli esperimenti Mach-Zehnder delle figure. Rispondi inoltre alle seguenti domande: Quali proprietà dell'oggetto quantistico e del processo di misura su di esso sono evidenziate da tali esperimenti? Come convinceresti una persona che non conosce la fisica quantistica che tali aspetti sono sorprendenti ma non incomprensibili?



Risultato dell'esperimento Mach-Zehnder con un rivelatore intermedio C (non distruttivo)

Il metodo di analisi della KI



Ai fini dell'analisi con KI rubrics dividiamo la domanda in tre sotto-compiti e identifichiamo le idee rilevanti che possono essere articolate, e connesse in modo scientificamente valido dagli studenti

Subtask	Idee rilevanti, necessarie	Idee rilevanti, complementari
T2a: "Explain the outcome of the Mach-Zehnder interferometer with one photon at a time (Figure 7)"	Quantum object follows all paths, each path has an associated vector amplitude. Different paths giving the same experimental outcome interfere (quantum probability rule).	The amplitude vector associated to each path is a unitary vector with phase proportional to path length. Beam splitters add a π phase shift for internal reflection only.
T2b: "Explain the outcome of the Mach-Zehnder interferometer with one photon at a time and "which way" measurement (Figure 8)"	"which way" measurement makes paths of the quantum object distinguishable. Distinguishable paths do not interfere (classical probability rule).	In the new setup only one path per outcome remains, so probability is necessarily 50% at each detector. The photon is an indivisible entity
T2c: "Explain the apparent paradox and discuss the properties of quantum objects highlighted by the experiment"	Contradiction with classical probability rule Agreement with quantum probability rule (including the effect of "which way" measurement)	The photon does not follow one single trajectory. The photon is an indivisible entity.

Risultati

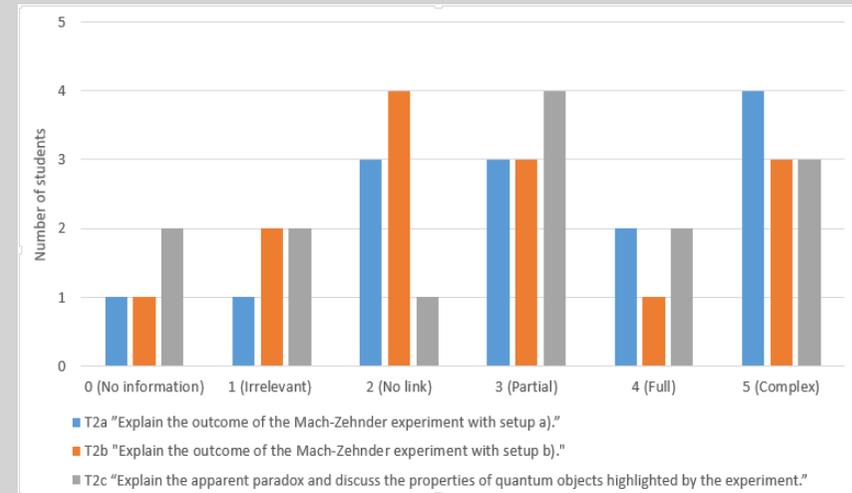


Analisi fenomenografica

Model	Frequency (n=14)
Quantum model (quantum object follows all possible paths, probability computed using quantum rule)	7
Vague duality (e.g. only phenomenologically describes the experiment and provides a statement of duality)	3
Classical corpuscle, deterministic	1
Hybrid model (interprets paths as possible trajectories, the photon only follows one path although it is impossible to determine which one)	1
Incoherent / impossible to determine	1
No answer	1

Il 50% degli studenti utilizza un modello quantistico

Analisi mediante KI rubrics



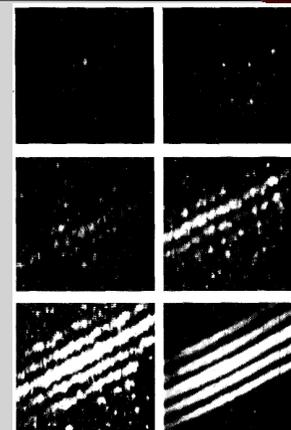
Più del 50% degli studenti effettua collegamenti almeno parzialmente corretti tra le idee. 5-6 studenti su 14 producono un'argomentazione che connette in modo scientificamente valido almeno due idee ("full" o "complex" link).

Domande che richiedono argomentazione



Facendo riferimento alla figura, si discutano i seguenti punti:

1. Se modellizzassimo l'elettrone come una particella classica, il risultato appare in contraddizione con i principi della probabilità. Perché? Come si può risolvere il paradosso con il modello di Feynman? Che significato ha quindi, per un oggetto quantistico, la "somma (delle ampiezze) sui cammini"? Come si calcola la probabilità di rivelare un oggetto quantistico?
2. Quali strumenti concettuali possono essere presi dall'esperimento Mach-Zehnder del quesito precedente per interpretare anche l'esperimento più bello della fisica?



T3a: "Compare the result to the expectation for classical particles and explain"

Classical corpuscle model predicts two "spots" only, in correspondence of the slits.

Quantum objects follow all possible paths and produce interference.

The amplitude vector associated to each path is a unitary vector with phase proportional to path length.

Rotation rate in space is proportional to the inverse of De Broglie wavelength.

Bright spots correspond to points in which amplitude vectors associated to paths are in phase.

T3b: "Find connections and common concepts with the case of the Mach-Zehnder interferometer"

Photons and electrons are both quantum objects.

All quantum objects are described by essentially the same mathematical model.

If in the two slit experiment a detector is placed at one of the slits, interference disappears, like in the Mach-Zehnder interferometer.

Dall'esperimento di Merli, Missiroli, Pozzi

Risultati

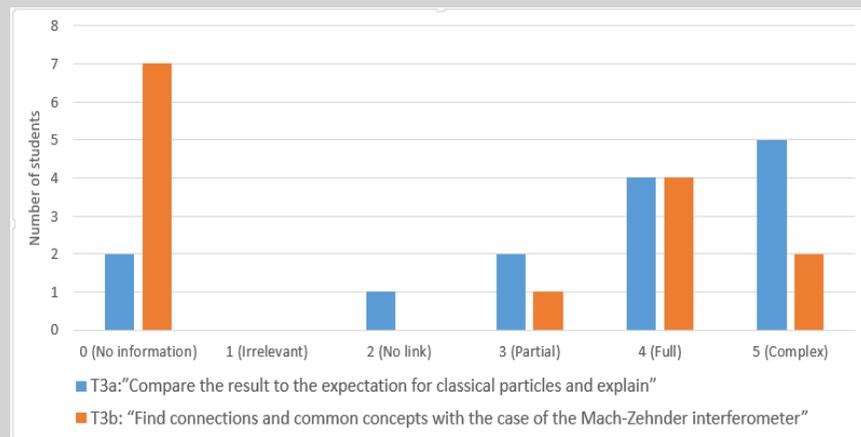


Analisi fenomenografica

Model	Frequency (n=14)
Quantum model (quantum object follows all possible paths, probability computed using quantum rule)	9
Vague duality (e.g. only phenomenologically compares the classical and quantum result and provides a vague statement of duality)	2
Incoherent / impossible to determine	1
No answer	2

9 studenti su 14 utilizzano un modello quantistico per descrivere l'esperimento delle due fenditure.

Analisi mediante KI rubrics



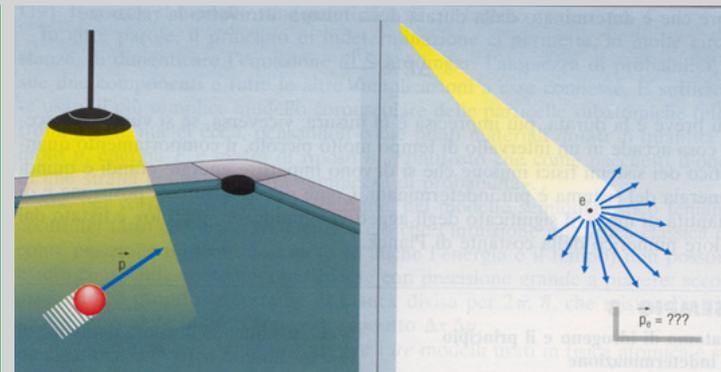
9 studenti su 14 producono un'argomentazione che connette in modo scientificamente valido almeno due idee ("full" o "complex" link) per descrivere la doppia fenditura. La domanda che richiede di connettere la descrizione della doppia fenditura polarizza la classe: la metà degli studenti non risponde, mentre l'altra metà produce argomentazioni almeno parzialmente valide, e 6 studenti su 14 connettono in modo scientificamente valido almeno due idee riguardanti la doppia fenditura e l'interferometro Mach-Zehnder.

Domande che richiedono argomentazione



Nel libro di testo di U. Amaldi (ed. 2003) il principio di indeterminazione è presentato nel modo seguente:

Per “vedere” una particella dobbiamo fare in modo che essa diffonda la “luce” che incide su di essa in maniera che una parte della “luce” diffusa giunga ai nostri occhi o agli strumenti di rivelazione. Per fare ciò è necessario che la lunghezza d’onda della luce utilizzata sia al più delle dimensioni dell’oggetto che si vuole “vedere” (la domanda riporta il seguito della presentazione di Amaldi)



Commenta tale presentazione, rispondendo alle seguenti domande: Quali punti oggi non sono più accettabili come scientificamente corretti quando si parla di indeterminazione quantistica? Quali critiche possono essere mosse a questa trattazione dell’indeterminazione? Quali esempi possono essere fatti per mostrare che la trattazione del testo non è adeguata?

Subtask

T1a: “Recognize that the presentation is not consistent with the current understanding of the principle and explain”

Idee rilevanti, necessarie

The principle is presented as the consequence of a disturbance due to measurement.
Uncertainty is nowadays understood as intrinsic indeterminacy.

Idee rilevanti, complementari

Measurement does not necessarily imply physical interaction.
Uncertainty appears in contexts unrelated to measurement.
Single slit diffraction with variable slit width is a more faithful representation of the principle.

Risultati

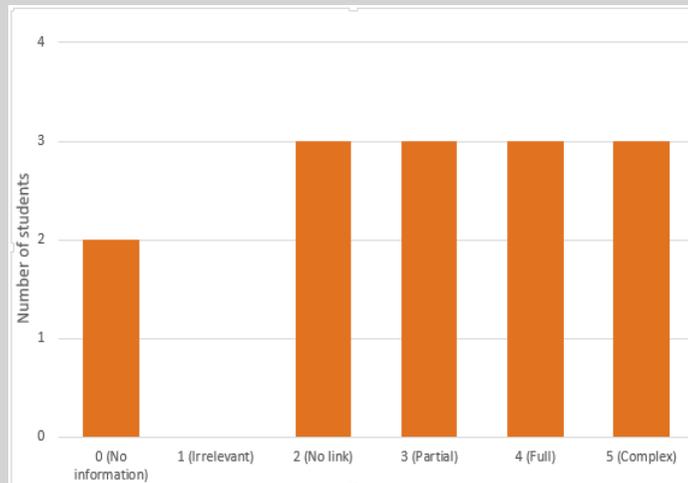


Analisi fenomenografica

Model	Frequency (n=14)
Quantum model (intrinsic indeterminacy)	8
Measurement disturbs system (agrees with text)	2
Deterministic hidden variable	1
Undecidable, either quantum model or unavoidable noise	1
No answer	2

8 studenti su 14 adottano un modello pienamente quantistico del principio di indeterminazione (indeterminazione intrinseca).

Analisi mediante KI rubrics



6 studenti su 14 producono un'argomentazione che connette in modo scientificamente valido almeno due idee ("full" o "complex" link) per criticare la presentazione di Amaldi del principio di indeterminazione.

Il caso di Chiara



Esaminando in dettaglio il caso di uno degli studenti traiamo interessanti indicazioni su che tipo di modelli mentali della fisica quantistica possono essere costruiti in un caso di successo per l'approccio sum over paths. Va notato che Chiara non era, prima del percorso, una studentessa "eccellente" in fisica, anche se otteneva generalmente risultati discreti. Schematizzando, possiamo individuare i seguenti elementi:

1. Chiara identifica come elemento centrale e unificante per la teoria quantistica la regola per il calcolo delle probabilità

I: Quindi secondo te la differenza maggiore tra fisica classica e fisica quantistica dove la trovi?

C: Beh lo pensavo alla probabilità, alla legge probabilistica

T: e quindi in particolare come effetti?

C: Per esempio, in particolare, stavo pensando alla probabilità di rivelare un fotone, sempre nel caso dell'interferenza è uguale alla somma delle ampiezze al quadrato, mentre nella fisica classica si sommano le probabilità, e anche se per esempio una biglia passasse, cioè se venisse una cuspid e da una fenditura e una cuspid e dall'altra, come probabilità sommeresti le due probabilità, invece non è così.

"Se modellizzassimo l'elettrone come una particella classica ci aspetteremmo che, come una biglia, o passi da una parte o passi dall'altra e non si verifichi la figura di interferenza. La probabilità di rivelare l'elettrone non sarebbe più quella quantistica $P = |\psi_1 + \psi_2 + \dots|^2$ ma quella classica $P = P_1 + P_2$ "

Il caso di Chiara



2. Chiara ha ben chiaro il ruolo di "oggetto intermedio" del modello di Feynman e non attribuisce ad esso un ruolo esistenziale. Anzi, si può dire che Chiara opera uno "shift ontologico" nel senso che l'oggetto centrale del suo discorso è il modello, e non le proprietà classiche dell'oggetto, come la posizione, la traiettoria etc.

C: Nella somma sui cammini all'oggetto quantistico è associato nel nostro modello matematico un vettore; e il vettore compie un giro per ogni lunghezza d'onda, e praticamente un oggetto quantistico, quando facciamo un esperimento, dobbiamo presupporre che compia tutti i cammini possibili perché dal momento che noi non lo individuiamo non possiamo sapere da che parte è andato e finché non lo riveliamo non possiamo sapere per certo dov'è andato

I: Visto che abbiamo parlato anche del questionario che abbiamo fatto all'inizio del corso questo questionario ha stimolato delle riflessioni che si sono rivelate utili nel seguito del percorso?

C: Eh aspetti.. il questionario quello su i modelli matematici beh più che altro sul fatto del modello matematico... anche il discorso che abbiamo fatto prima sulla realtà come è descritta dal modello matematico più che altro sono quelle le riflessioni.

"All'oggetto quantistico è associato convenzionalmente un vettore, che compie un giro per ogni lunghezza d'onda..."

"Questo avviene perchè i vettori associati ai due cammini percorsi dal fotone sono in controfase..."

Il caso di Chiara



3. Il modello della somma sui cammini permette a Chiara di spiegare, ossia di evidenziarne il senso aiutandosi con una rappresentazione matematica/formale, la distruzione dei fenomeni di interferenza in seguito ad una misura "which way", che costituisce un aspetto centrale del dualismo onda-particella .

I: E come interviene l'acquisizione di informazione in un sistema quantistico

*C: Probabilmente... se un sistema viene rivelato, cioè quando ottieni informazione non dovresti perturbare il sistema ma succede che comunque **scompare la figura di interferenza perché comunque perdi dei cammini e quindi la figura di interferenza cambia** cioè, se noi per esempio abbiamo la probabilità di rivelare un elettrone o un fotone...*

(...) I: Sì, ma ti ha convinto perché l'ha detto il professore e tu ti fidi del professore o

*C: Eh, sempre per lo stesso motivo, perché studiando facendo esperimenti, è risultato evidente che le cose vanno così. **Anche per il modello matematico: se togli un cammino si distrugge l'interferenza e quindi...***

*"Anche se il rivelatore non perturba l'esperimento, ottenere informazioni sui cammini cambia la situazione. **Se sappiamo che il fotone non è passato per un certo cammino la probabilità di trovare il fotone varia poichè le strade possibili diminuiscono**, infatti per determinare la probabilità di trovare un oggetto quantistico dobbiamo tenere in considerazione tutti i cammini possibili"*

Il caso di Chiara



4. Chiara è in grado di connettere "longitudinalmente" la fisica classica a quella quantistica.

I: Eh però a questo punto ti chiedo: se io applico la formula di de Broglie al tavolo

*C: **Quella della lunghezza d'onda***

I: Sì

*C: **Eh ha una lunghezza d'onda ma è talmente piccola da risultare irrilevante: più l'oggetto è grande più la lunghezza d'onda è piccola quindi non ci sono interferenze***

5. Chiara attribuisce il principio di indeterminazione ad una proprietà intrinseca dell'oggetto quantistico. Inoltre, il suo uso costante del termine "oggetto quantistico" per riferirsi sia all'elettrone sia al fotone dimostra che ha costruito un modello mentale unitario.

*C: Poi sul principio di indeterminazione, ho capito esattamente che è un principio **intrinseco all'oggetto quantistico** e che si considera sia il rapporto tra energia e tempo, sia il rapporto tra lo spazio e la quantità di moto, però per esempio nell'ultima verifica che abbiamo fatto, ho capito l'esempio che abbiamo fatto, perché per esempio **se facciamo passare un oggetto quantistico da una fenditura**, è stato chiaro che riducendo lo spazio della fenditura ho una maggiore determinazione sulla posizione, però poi la figura di interferenza si allarga, perché poi la quantità di moto, di conseguenza la quantità di moto risulta più indeterminata.*

*"Gli **oggetti quantistici hanno intrinseche** delle caratteristiche che possono sembrare paradossali, **come l'indeterminazione** per quanto riguarda la quantità di moto e la posizione".*

Il caso di Chiara



6. Il discorso di Chiara presenta evidenza di riflessione metacognitiva e meta-teorica, un aspetto che molti autori hanno collegato allo sviluppo di un processo di cambiamento concettuale

I: Ma quindi la meccanica quantistica ha soddisfatto la tua esigenza di rigore logico?

*C: (...) Cioè, dipende. (pausa) può essere vista sia dal punto di vista di (pausa) dipende da come intendi il concetto di logica perché se intendi... **All'inizio pensavo di intendere il concetto di logica come abitudine, quello che siamo abituati a pensare, ma poi ci ho ripensato e ho detto la logica non è proprio come siamo abituati a pensare. Allora mi sono chiesta cos'è la logica?** E quindi sono un po' partita da Aristotele dalle regole di deduzione, dall'intuizione e via dicendo, poi ho visto che ci sono dei corsi di logica matematica ma alla fine diciamo che ho visto che diventava troppo lungo e ho abbandonato la strada e ho pensato un giorno ci tornerò sopra*

I: Ma secondo te quali aspetti della logica formale vengono messi in discussione dalla meccanica quantistica

*C: **Il principio del terzo escluso assolutamente, l'idea se c'è A e non A, le due cose sono incompatibili**, invece sembra che l'oggetto quantistico per esempio sia onda sia particella*

Alcune conclusioni provvisorie



L'approccio di Feynman **può contribuire a superare alcune delle difficoltà** che sorgono nell'insegnamento della fisica quantistica a livello di scuola superiore. In particolare, l'approccio offre un modello funzionale naturale del dualismo onda-particella che aiuta gli studenti a costruire **modelli mentali più coerenti e integrati**. L'idea della legge per il calcolo delle probabilità di eventi che possono avvenire attraverso diversi "canali" alternativi come elemento centrale di differenza tra la fisica classica e quantistica sembra avere un grande potenziale educativo, e permette di integrare nell'insegnamento esperimenti moderni, specie di ottica quantistica, come quelli basati su misure "which way".

Secondo i nostri dati, l'utilizzo coerente del modello di "oggetto quantistico" nell'ambito dell'approccio di Feynman permette di **evitare le incoerenze**, evidenziate da altri autori, **tra i modelli mentali degli studenti riguardo l'elettrone e il fotone**. Nella nostra sperimentazione inoltre, circa la metà degli studenti sono stati in grado di riconoscere esplicitamente almeno alcuni aspetti del parallelismo tra i due modelli.

Alcuni casi di particolare successo dimostrano che **l'approccio di Feynman può portare, anche al livello di scuola superiore, ad esempi di vero e proprio "cambiamento concettuale"** verso concezioni, atteggiamenti epistemologici e modelli genuinamente quantistici.

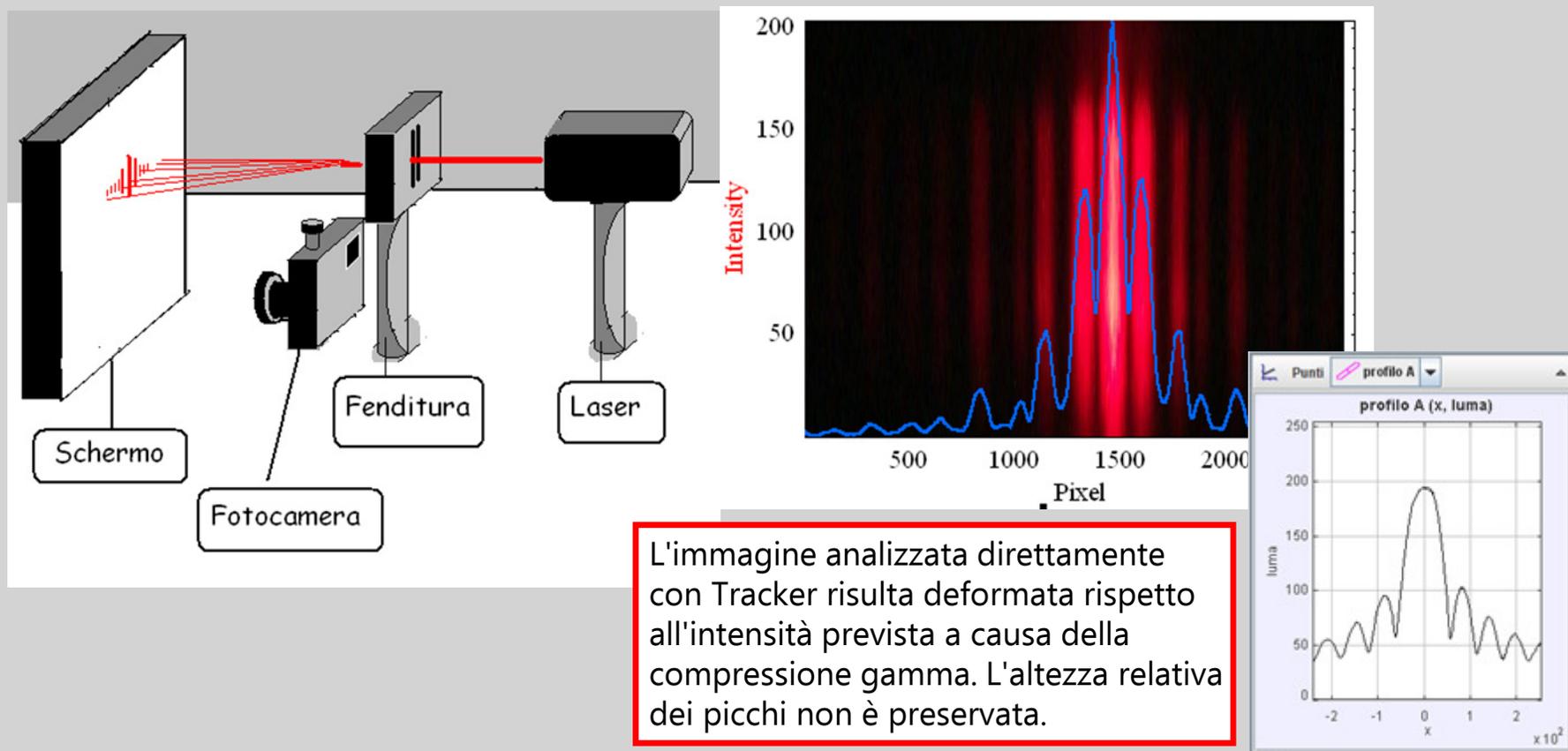
4. Alcuni esperimenti connessi alla fisica quantistica



Negli ultimi anni il gruppo di ricerca in didattica dell'Università di Pavia ha svolto un lavoro specifico su come associare lo sviluppo di alcuni aspetti sperimentali alla didattica della fisica moderna, e in particolare della fisica quantistica.

Esperimento della doppia fenditura

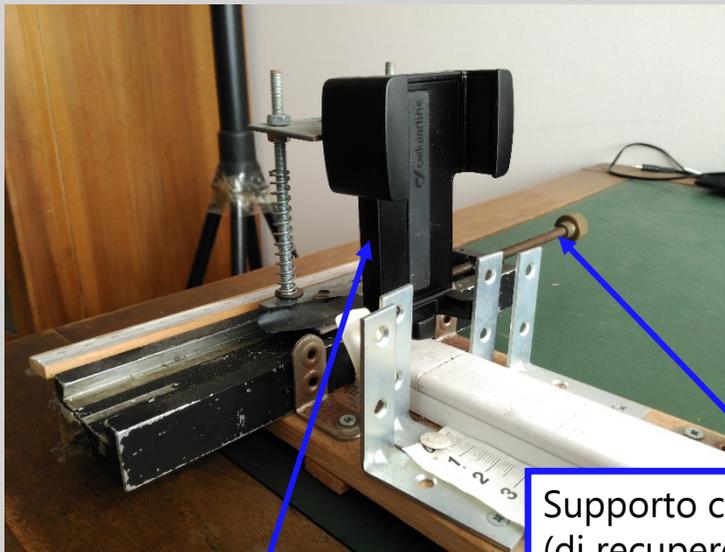
Lo studio della doppia fenditura con la fotocamera dello smartphone, e in generale gli esperimenti in cui la misura dell'intensità è cruciale, soffrono del problema della "compressione gamma" delle immagini acquisite dalla fotocamera, che può essere difficile da trattare.



Esperimento della doppia fenditura

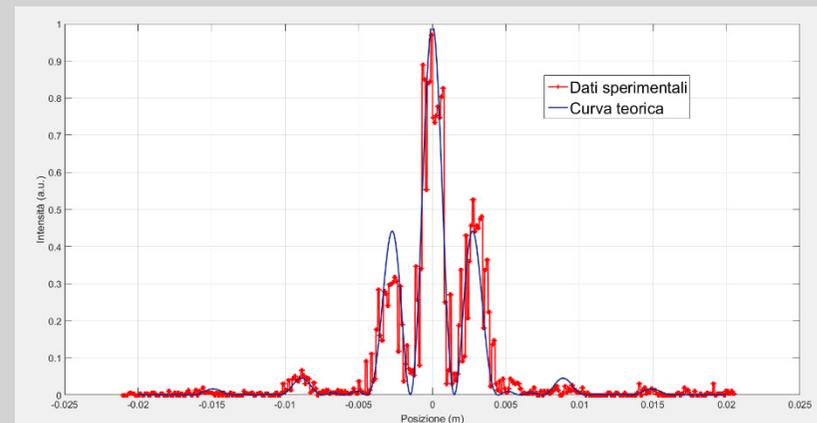


Il sensore di luce dello smarphone può permettere una misura più "fisica" e un diretto confronto con la previsione teorica.



Supporto con vite micrometrica (di recupero)

Supporto per smartphone da cruscotto.

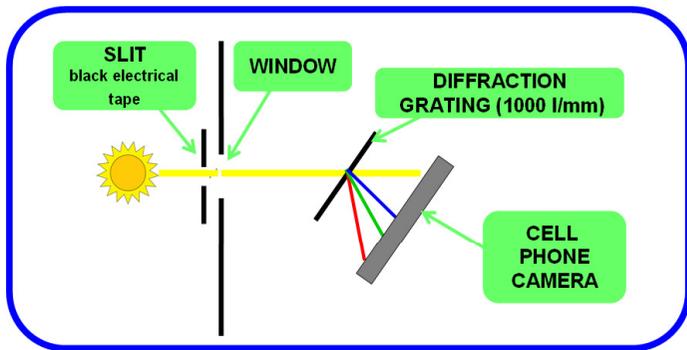
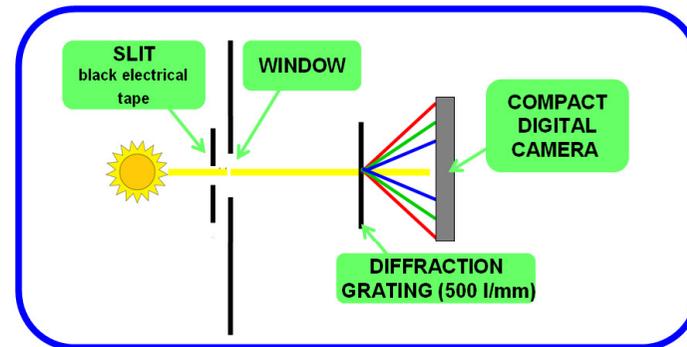
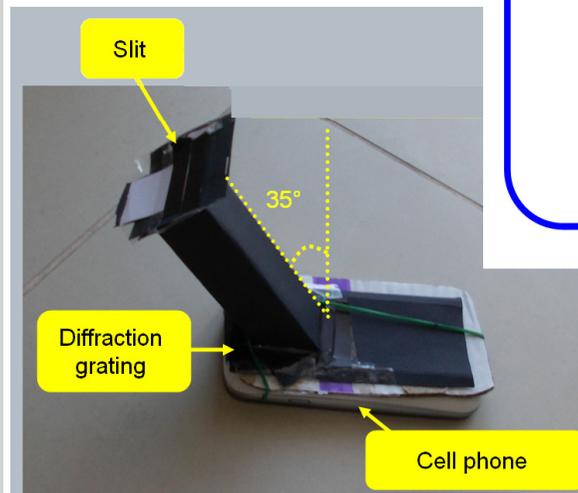
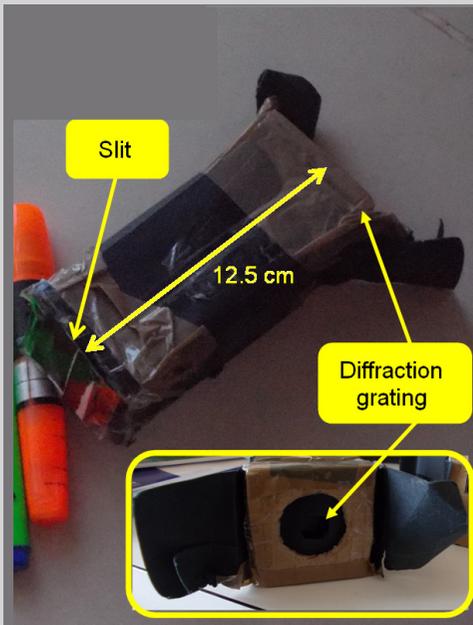


Dati ottenuti (primo tentativo, con alcuni problemi)

Livella laser (Leroy Merlin 5.90 €, adatta anche per l'ottica geometrica)



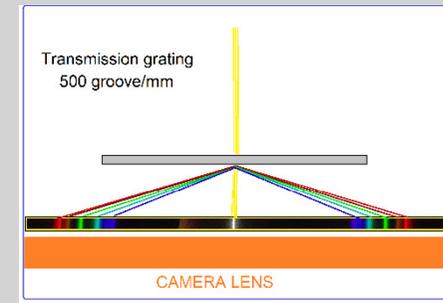
Spettrometri home-made



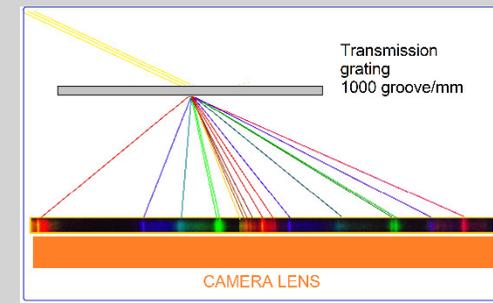
Due tipi di spettrometro:

- SC_{570} , (reticolo da 570 l/mm fotocamera digitale compatta geometria lineare)
- SP_{1000} , (reticolo 1000 l/mm, smartphone)

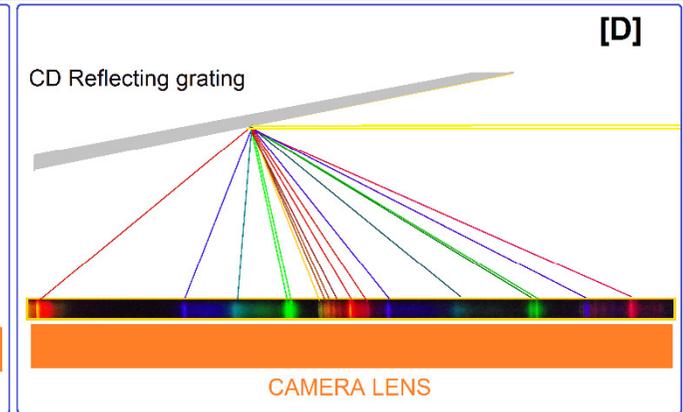
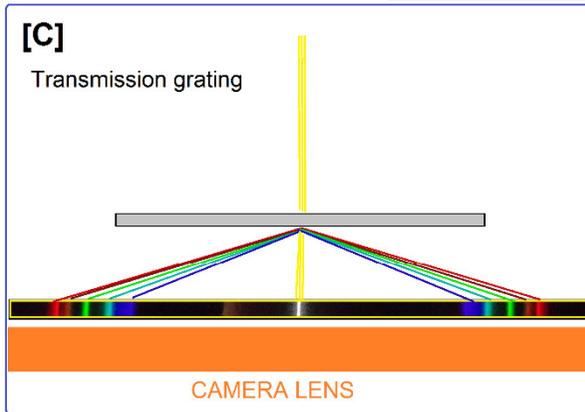
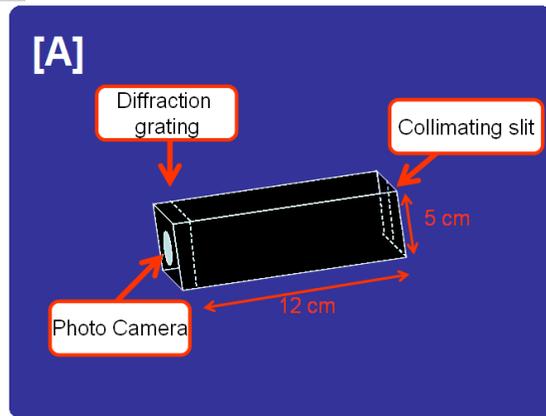
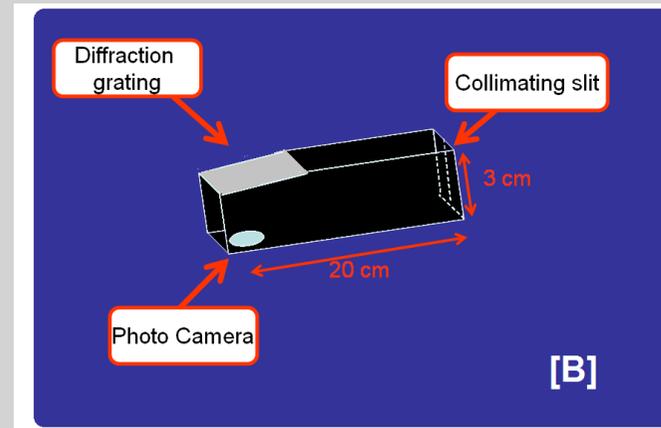
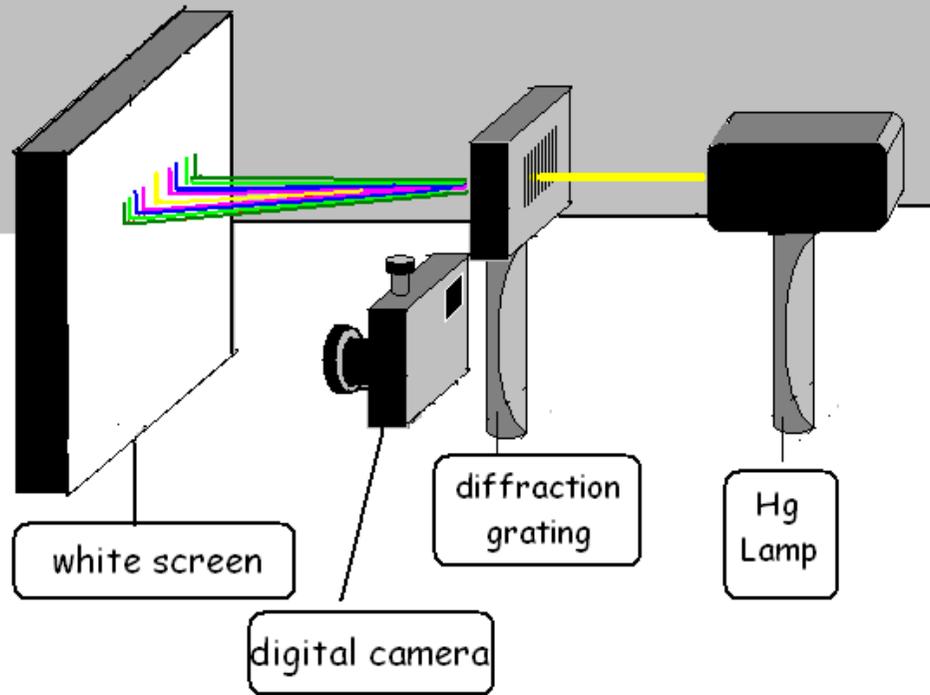
SPETTRI SIMMETRICI



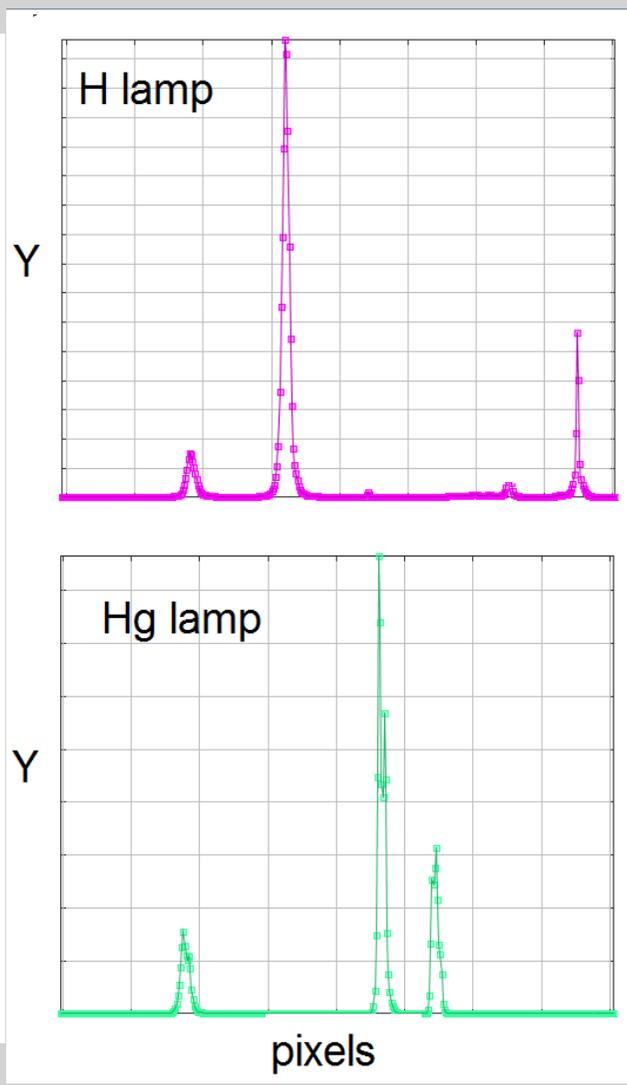
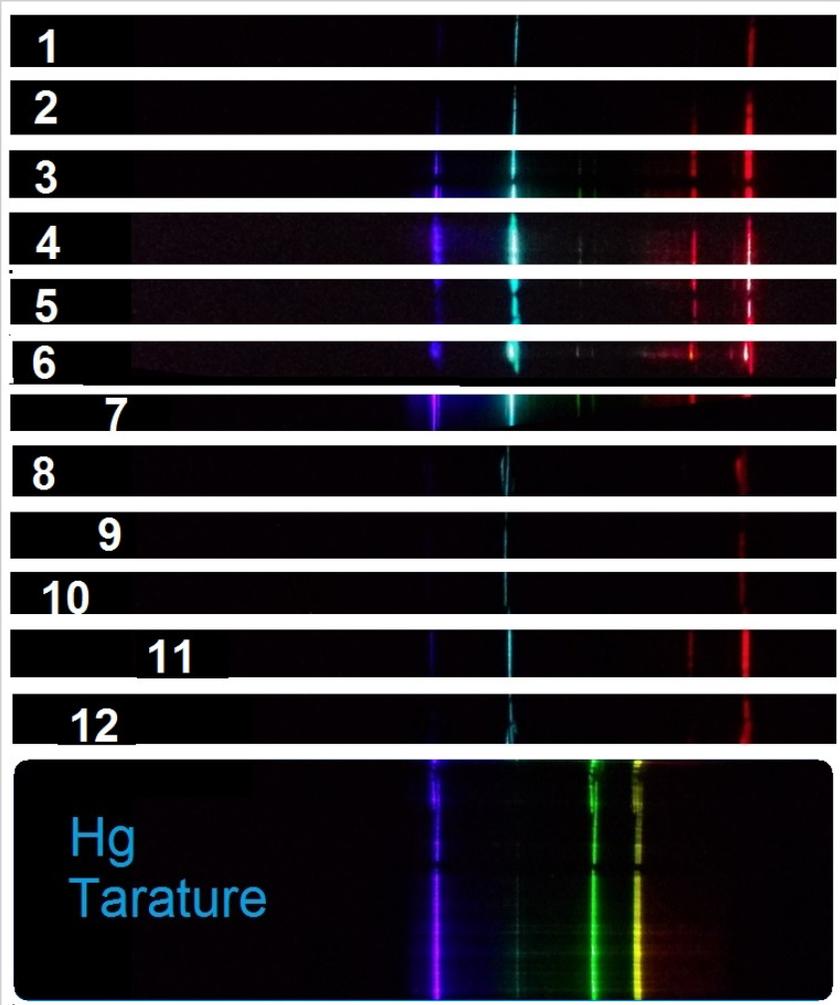
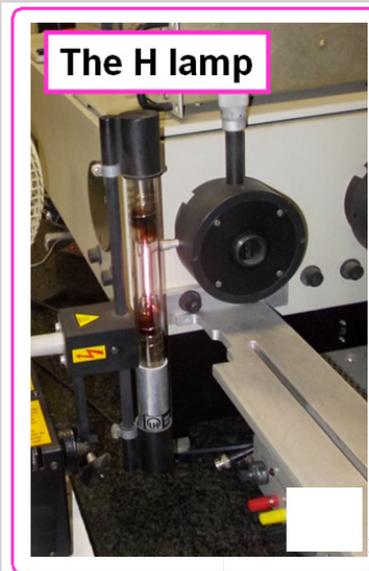
ORDINI DIVERSI



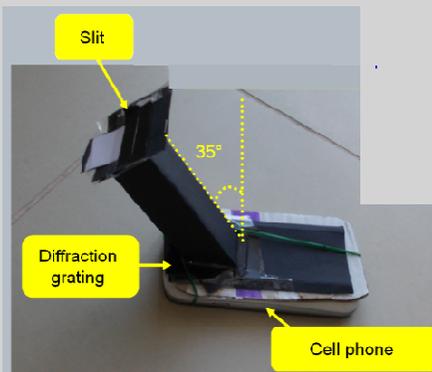
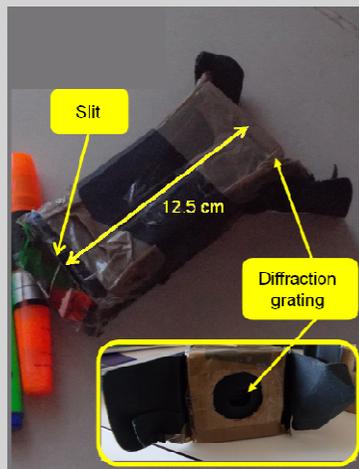
Spettrometri home-made



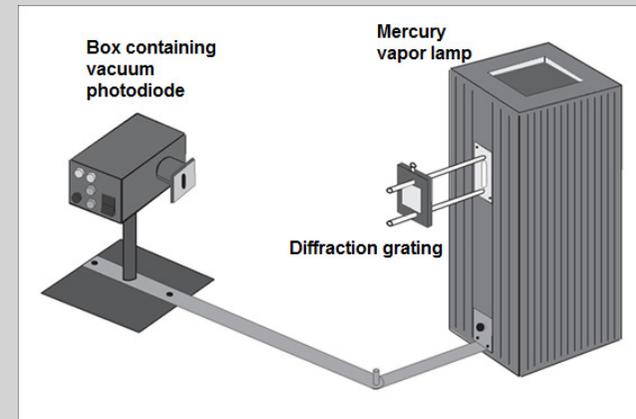
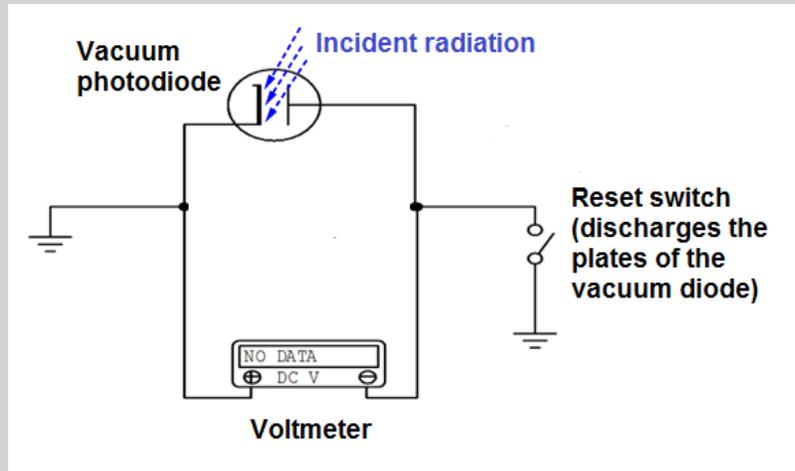
Osservazione degli spettri e misura della costante di Rydberg



Osservazione e misura dello spettro di emissione dei LED



L'effetto fotoelettrico

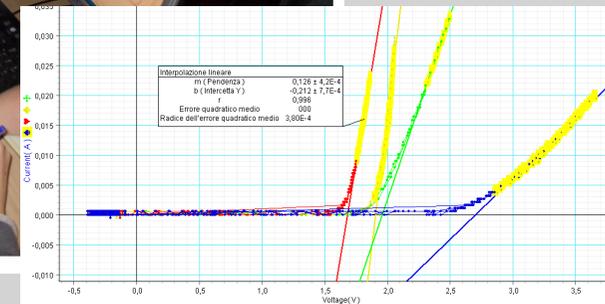
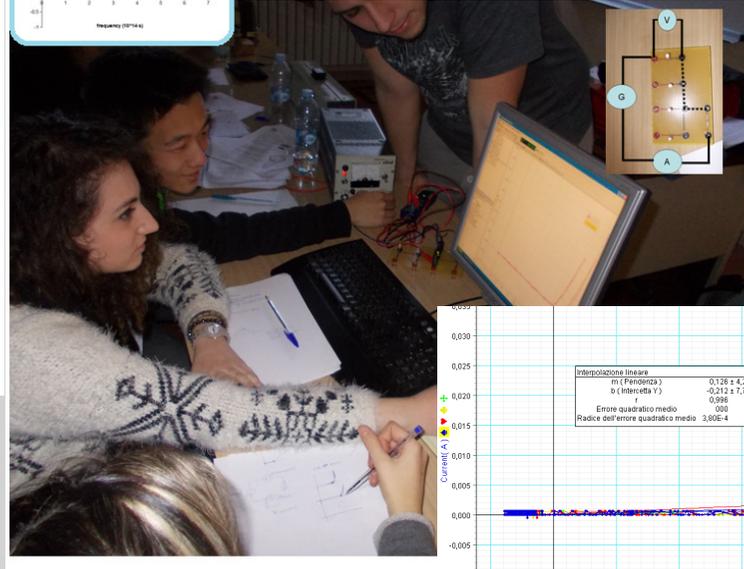
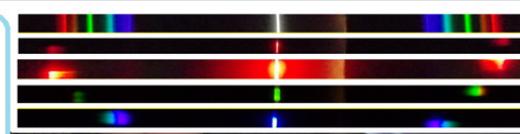
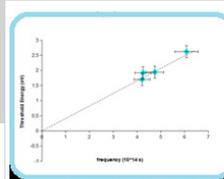
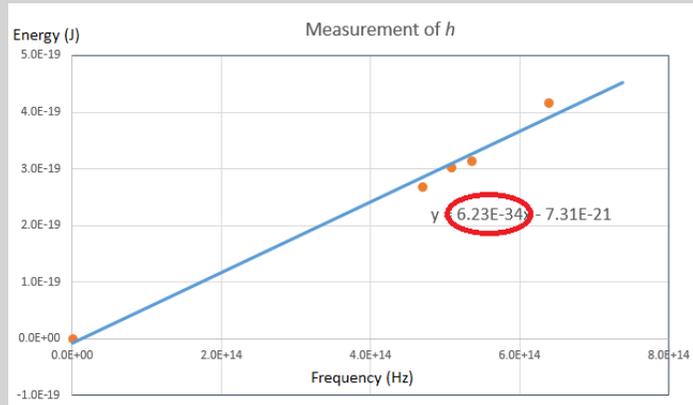
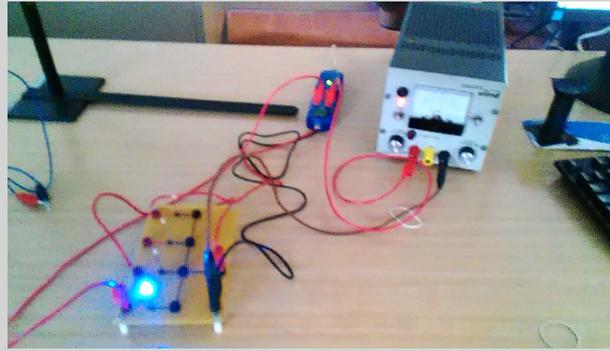


The photoelectric effect is studied using the standard PASCO h/e apparatus used for the undergraduate laboratory. The activity is divided in two steps:

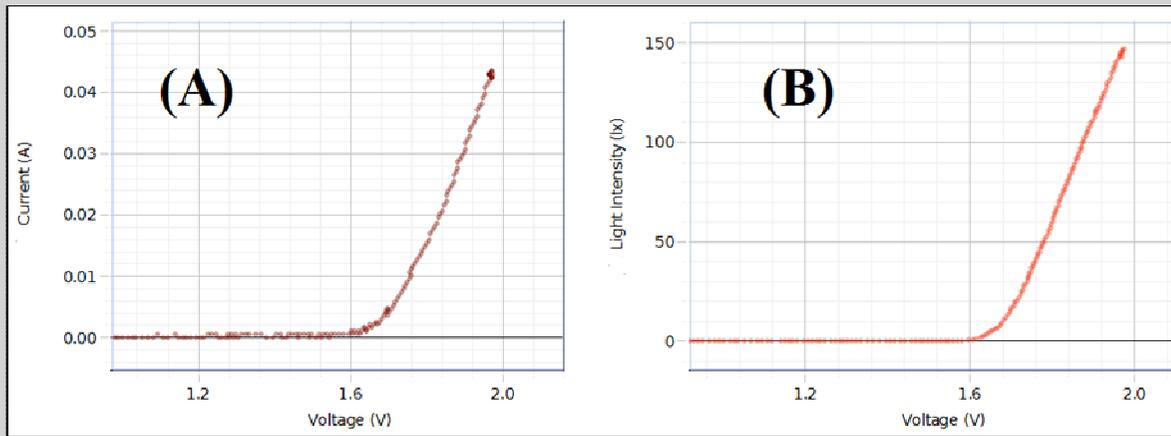
- 1) By using a variable transmission filter, the stopping potential (in this case, the potential difference at the terminals of the vacuum diode after electrical equilibrium is reached) is shown to be independent of the intensity of the incident light.
- 2) By directing diffracted light of different colours to the intake of the vacuum photodiode box, students measure that the stopping potential is instead dependent of the frequency of incoming light. The dependence is verified to be approximately linear, and the value of h is estimated.

The treatment of the dependence of photoelectric current on the intensity of incident light is qualitative: students observe that, by increasing the light intensity through a variable transmission filter, the capacitance takes more time to charge and adjust to a stable voltage level.

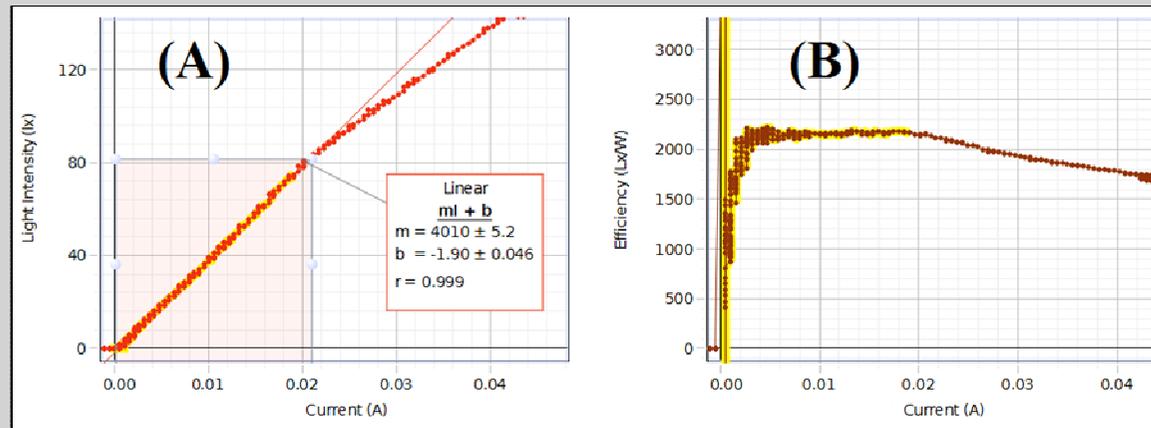
Misura di h con i LED



Misura dell'efficienza quantistica dei LED



Current vs. voltage (A) and illuminance (in lx) vs. voltage (B) curves for the Kingbright WP710A10SRC/E Super Bright Red LED. Light intensity is measured on the LED axis at about 8 cm from the LED capsule.



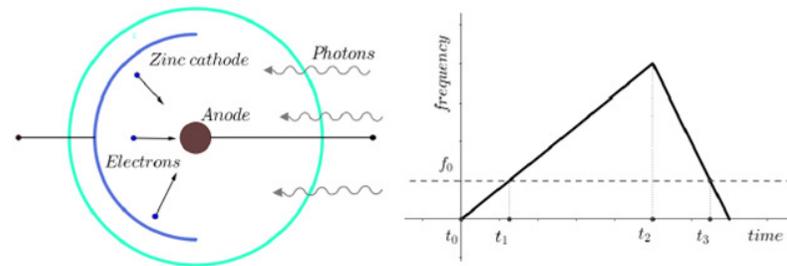
Filluminance vs. current (A) and efficiency in lx/W vs. current (B) curves for the Kingbright WP710A10SRC/E, measurements in the same conditions as the previous figure. The graph (A) also shows the linear interpolation of the data in the range 0-20 mA.

Test concettuali basati sul lavoro di laboratorio

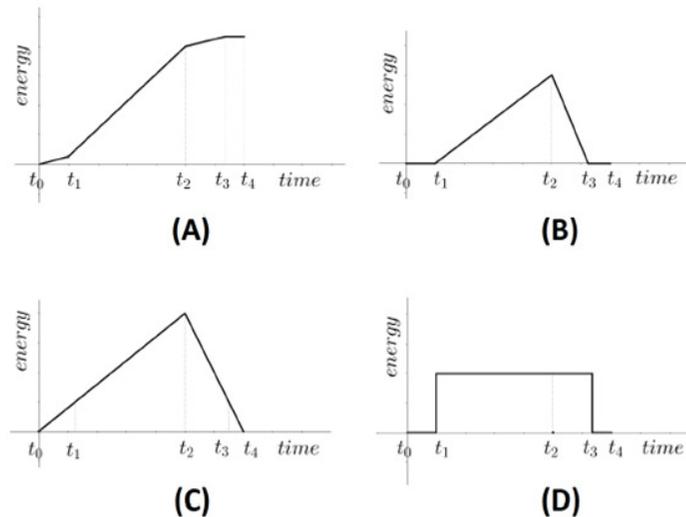


Type of answer	n. of students (N=16)
Correct answer (B)	14
With correct explanation	14
Answer C (no threshold)	1
Answer A (integration-like process)	1

Question 1. A vacuum photodiode (figure below, left) similar to the one used in the lab, is illuminated with electromagnetic radiation with a frequency slowly varying in time from zero to a maximum value as shown in the figure below, right.



Which one of the following graphs best represents the time dependence of the maximum kinetic energy of the electrons emitted from the photocathode (when the graph shows zero kinetic energy, electrons are not emitted)?



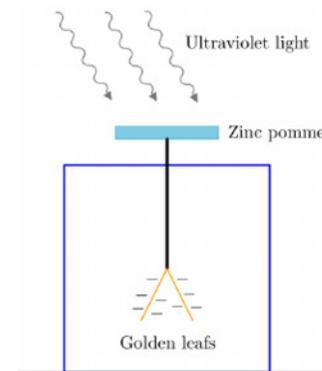
Explain your reasoning.

Test concettuali basati sul lavoro di laboratorio



Type of answer	n. of students (N=16)
Correct answer (true)	6
<i>With correct explanation</i>	6
Wrong answer (false)	10
<i>Incorrect explanation based on the idea that photoelectric effect only depends on frequency</i>	10

Question 2. In the experiment represented in the figure below, a gold leaf electroscope is initially charged with a small negative electric charge, so that the gold leaves diverge. The upper pommel of the electroscope, which is used for charging and discharging it, is a plate made of zinc, a metal capable of producing photoelectric effect.



If the zinc plate is illuminated with ultraviolet light, the zinc emits electrons and gradually the electroscope is discharged, so that the gold leaves become nearer and nearer until they eventually adhere one to each other.

Suppose that the ultraviolet light lamp, which emits light at a fixed frequency, can be used at different intensity levels. Is it true that, if the intensity of the light which illuminates the plate is higher, the gold leaves close faster, while if the intensity is lower, the leaf close slower?

True

False

Explain your reasoning.

Bibliografia per argomenti



1. Sum over paths

Feynman, R. P. (1985). QED: The strange theory of light and matter. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Feynman, R. P. (1948) "Space-time approach to non-relativistic quantum mechanics." *Reviews of Modern Physics*, 20(2), 367.

Feynman, R. P. and Hibbs, A. R. (1965). Quantum mechanics and path integrals. New York, NY: MacGraw Hill.

Taylor, E. F., Vokos, S., O'Meara, J. M. and Thornber, N. S. (1998). "Teaching Feynman's sum-over-paths quantum theory." *Computers in Physics*, 12, 190.

Rinaudo, G. (2010) "Il metodo di Feynman della somma su molti cammini per l'introduzione della Meccanica Quantistica", in Michelini, M. (ed.) *Formazione a distanza degli insegnanti all'innovazione didattica in fisica moderna e orientamento*, Udine (Italy): LithoStampa.

Ogborn, J. and Whitehouse, M. (eds), (2000). *Advancing Physics AS*. Bristol (UK): Institute of Physics Publishing.

Dobson, K. , Lawrence, I. and Britton, P. (2000). "The A to B of quantum physics." *Physics Education*, 35(6), 400.

Fabri, E. "Come introdurre la fisica quantistica nella scuola secondaria superiore", *La Fisica nella Scuola*, 29 (1996), 63

Fabri, E. "La fisica moderna nella scuola"; *La Fisica nella Scuola*, 42 suppl. al n. 3 (2009) 3.

Malgieri, M., Onorato, P., & De Ambrosis, A. (2015). *Insegnare la fisica quantistica a scuola: un percorso basato sul metodo dei cammini di Feynman*. *Giornale di Fisica*, 56(1).

Malgieri, M., Onorato, P., and De Ambrosis, A. (2014). "Teaching quantum physics by the sum over paths approach and GeoGebra simulations." *European Journal of Physics*, 35(5), 055024.

Malgieri, M., Tenni, A., Onorato, P., & De Ambrosis, A. (2016). "What Feynman could not yet use: the generalised Hong–Ou–Mandel experiment to improve the QED explanation of the Pauli exclusion principle." *Physics Education*, 51(5), 055002.



2. Knowledge integration, conceptual change, appropriazione

Liu, O. L., Lee, H. S., Hofstetter, C., and Linn, M. C. (2008). "Assessing knowledge integration in science: Construct, measures, and evidence." *Educational Assessment*, 13(1), 33-55.

Vosniadou, S., Ioannides, C., Dimitrakopoulou, A., & Papademetriou, E. (2001). Designing learning environments to promote conceptual change in science. *Learning and instruction*, 11(4), 381-419.

Linn, M. C. (2006). "The knowledge integration perspective on learning and instruction." In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (pp. 243–264). New York: Cambridge University Press.

Kalkanis, G., Hadzidaki, P., & Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, 87(2), 257-280.

Oh, J. Y. (2011). Using an enhanced conflict map in the classroom (photoelectric effect) based on lakatosian heuristic principle strategies. *International journal of science and mathematics education*, 9(5), 1135-1166.

Levrini, O., & Fantini, P. (2013). Encountering productive forms of complexity in learning modern physics. *Science & Education*, 22(8), 1895-1910.

Levrini, O., Fantini, P., Tasquier, G., Pecori, B., and Levin, M. "Defining and operationalizing appropriation for science learning," *Journal of the Learning Sciences*, 24(1), 93-136 (2015).



3. Aspetti sperimentali

Zhou, F., & Cloninger, T. (2008). Computer-based experiment for determining Planck's constant using LEDs. *The Physics Teacher*, 46(7), 413-415.

Checchetti, A., & Fantini, A. (2015). Experimental Determination of Planck's constant using Light Emitting Diodes (LEDs) and Photoelectric Effect. *World Journal of Chemical Education*, 3(4), 87-92.

Indelicato, V., La Rocca, P., Riggi, F., Santagati, G., & Zappalà, G. (2013). Analysis of LED data for the measurement of Planck's constant in the undergraduate laboratory. *European Journal of Physics*, 34(4), 819.

Precker, J. W. (2007). Simple experimental verification of the relation between the band-gap energy and the energy of photons emitted by LEDs. *European Journal of Physics*, 28(3), 493.

Khaparde R. B. and Puthiyadan, S. (2007). Efficiency of a Light Emitting Diode, *Physics Education (II)*, 23(4), 291–298

Onorato, P., Malgieri, M., & De Ambrosis, A. (2015). Measuring the hydrogen Balmer series and Rydberg's constant with a homemade spectrophotometer. *Eur. J. Phys*, 36(058001), 058001.

Onorato, P., Malgieri, M., and De Ambrosis, A. (2015). "Quantitative analysis of transmittance and photoluminescence using a low cost apparatus." *European Journal of Physics*, 37(1), 015301.

Kraftmakher, Y. "Experiments with light-emitting diodes", *American Journal of Physics*, 79, 825, 2011.