

Alcuni risultati di sperimentazioni sull'insegnamento dell'informazione e computazione quantistica a studenti della scuola secondaria di secondo grado.

Massimiliano Malgieri

Dipartimento di Fisica, Università di Pavia



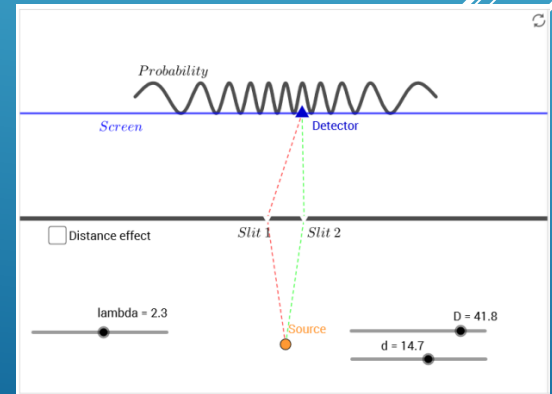
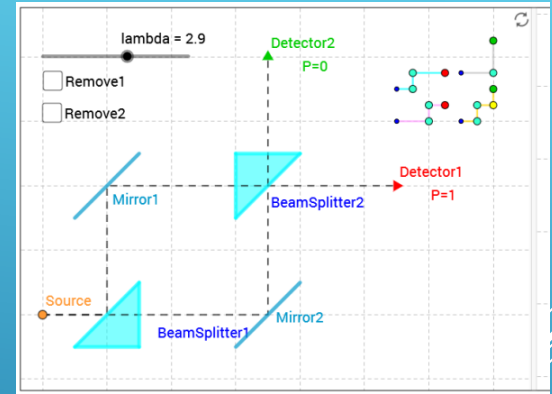
50 anni della sezione AIF di Pavia, 25-26 febbraio 2026



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

IL LAVORO SULL'APPROCCIO DI FEYNMAN (2013-2021)

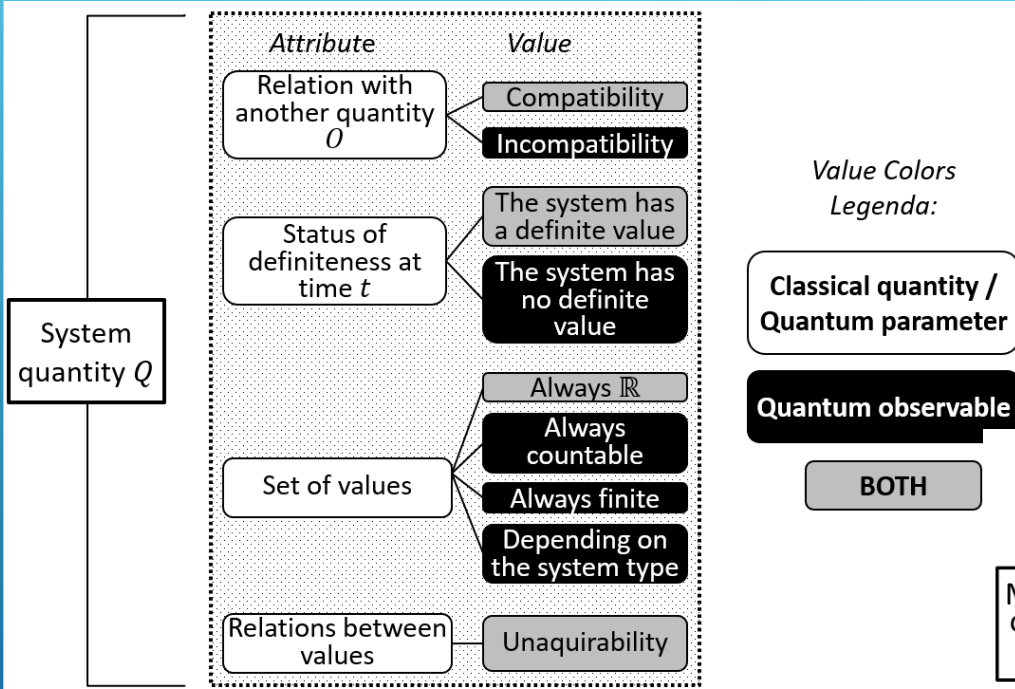
- Abbiamo recuperato ed esteso la tradizione dell'approccio di Feynman della somma sui cammini (con A. De Ambrosis e P. Onorato)
- Approccio concettuale, con un focus molto forte sulla chiarificazione delle caratteristiche di dualità dell'oggetto quantistico
- Passi avanti significativi nell'ampiezza e nella profondità della ricostruzione didattica con questo approccio (es. sistemi legati, effetto tunnel, chiarimenti sulle rappresentazioni tempo / energia)
- L'approccio è oggi adottato in alcuni corsi di formazione insegnanti in servizio, introdotto nell'indirizzo didattico della LM in fisica e nei corsi PF-60 per le classi A020 e A027.



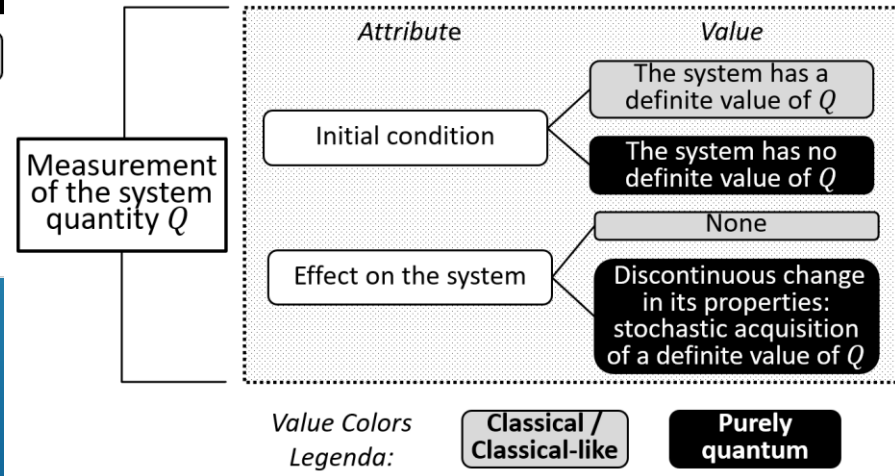
DIDATTICA DELLE TECNOLOGIE QUANTISTICHE (2021-2026)

- Ricerca sulla ricostruzione didattica dell'informazione e comunicazione quantistica, nell'ambito prima della Quantum Flagship, poi di NQSTI e con il supporto del nuovo ciclo PLS (con G. Zuccarini, C. Sutrin, C. Macchiavello). La ricerca nasce, fin dall'inizio, come una collaborazione con il gruppo di informazione quantistica del Dipartimento.
- Fondata in parte su un modello del cambiamento concettuale tra meccanica classica e quantistica costruito con G. Zuccarini. In questo lavoro, utilizzando la teoria delle categorie, abbiamo analizzato e classificato le trasformazioni dei concetti, tra la meccanica classica e quella quantistica, necessarie per l'apprendimento della nuova teoria
- Adotta inizialmente un approccio a due stati, ma l'esperienza sull'approccio di Feynman viene recuperato con la doppia codifica dei Qbit necessaria per la costruzione di circuiti a 2 Qbit; 1) codifica sugli stati di polarizzazione 2) codifica sugli stati spaziale (possibili cammini alternativi)
- Adottato nella summer school annuale per studenti del quarto anno della scuola secondaria di secondo grado, e nella formazione degli insegnanti in servizio.

ESEMPI DI PATTERN – GENERALIZZAZIONE DI CATEGORIE

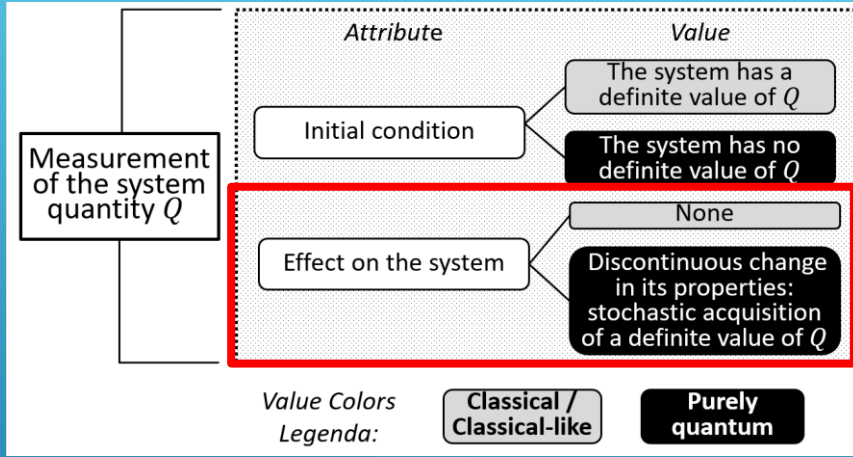


In questo caso, i valori degli attributi della versione classica del concetto sono un sottoinsieme di quelli della versione quantistica quantistico. Qui, gli attributi possono assumere nuovi valori oltre a quelli classici.



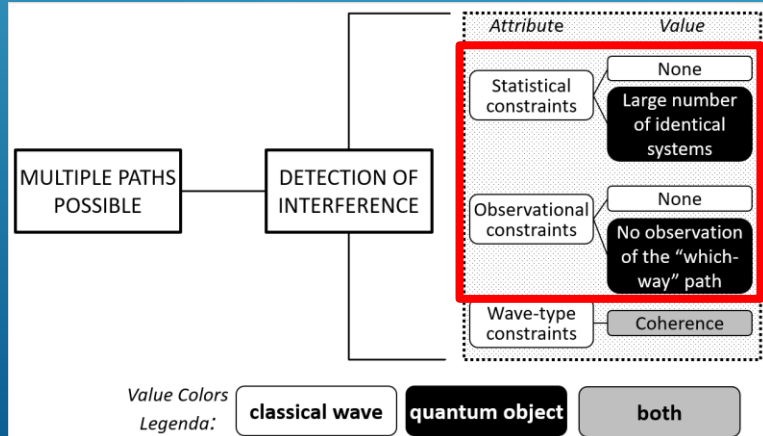
Zuccarini, G., & Malgieri, M. (2024). *Modeling and representing conceptual change in the learning of successive theories: The case of the classical-quantum transition*. *Science & Education*, 33(3), 717-761.

ESEMPI DI PATTERN: CAMBIAMENTO RADICALE



Il caso speciale in cui il valore "nessuno" appare come unico valore per un attributo, nel caso classico.

Ciò significa essenzialmente che la scelta di preservare la continuità tra le strutture concettuali ha qui un carattere fittizio: le due strutture concettuali in realtà non si mappano una sull'altra



COME SI RIFLETTE SULLE STRATEGIE

- Per il caso della generalizzazione di categorie, partiamo da situazioni quantistiche corrispondenti a valori comuni ad entrambe le teorie, interpretabili classicamente e poi le estendiamo a casi corrispondenti a valori esclusivamente quantistici. In questo caso, quindi, costruiamo le categorie quantistiche come estensione di quelle classiche
 - Ad esempio, per introdurre la misura di stati di polarizzazione partiamo dal caso in cui vengono inviati al dispositivo di misura miscele casuali di fotoni la cui polarizzazione corrisponde all'uno o all'altro autovalore dell'osservabile misurato (misura ideale classica), favorendo l'interpretazione dell'interazione di un fotone con il polarizzatore come misura
 - Di seguito, generalizziamo al caso di fotoni con polarizzazioni diverse
- Nel caso di cambiamento radicale, al contrario:
 - E' necessario sviluppare con gli studenti la consapevolezza dei presupposti impliciti della vecchia teoria che devono essere resi espliciti prima di essere messi in discussione; ad esempio, il presupposto che la misurazione non produca alcun effetto sul sistema.
 - Potrebbero essere i punti del percorso in cui la discussione di dibattiti storici o in corso sui fondamenti della nuova teoria può essere più produttiva, essendo collegata a elementi autentici di cambiamento radicale dalla vecchia teoria alla nuova.

VERSO UNA RICOSTRUZIONE EDUCATIVA DELL'INFORMAZIONE QUANTISTICA

Data la ricchezza dei contenuti e la novità dell'area di ricerca della computazione quantistica, molti sforzi sono stati dedicati alla conversione della struttura dei contenuti scientifici in una struttura dei contenuti per la didattica.

Una serie fondamentale di lavori è quella di Satanassi et al. (2020, 2022) in cui la riconcettualizzazione delle tre fasi principali degli esperimenti quantistici (preparazione di uno stato - trasformazione dello stato - misurazione) in termini di computazione (informazioni in input - elaborazione - informazioni in output) è identificata come il principio base della progettazione.

Una tale interpretazione delle informazioni dei processi quantistici è chiaramente produttiva dal punto di vista didattico, ma abbiamo ritenuto che ci fosse altro lavoro da fare per chiarire la struttura degli algoritmi quantistici. In particolare, era necessario stabilire se la fase centrale e più variabile - l'elaborazione delle informazioni - avesse anche una struttura interna e, in tal caso, se il suo esame potesse aiutare gli studenti a costruire un quadro chiaro degli elementi che conferiscono agli algoritmi quantistici la loro forma distintiva e i loro vantaggi operativi.

IL LAVORO DI PROGETTAZIONE

In accordo con il Model of Educational Reconstruction e la tradizione pavese sulla progettazione di Teaching-Learning Sequences, il Lavoro preparatorio è stato articolato e ha compreso:

ANALISI DELLA LETTERATURA SCIENTIFICA

- identificare un insieme di algoritmi che possono essere affrontati a livello introduttivo
- analizzarne la struttura alla ricerca di caratteristiche comuni nella fase di elaborazione delle informazioni

VALUTAZIONI PRELIMINARI DI VERSIONI INIZIALI DELLA TLS

- Test con gli insegnanti nell'ambito di un Corso di formazione (20 ore + 20 ore follow-up)
- Test pilota con gli studenti (25 ore, 8 student auto-selezionati, a distanza)
- Entrambi i test erano su piccoli campioni e sono stati analizzati soprattutto con metodi qualitativi

RISULTATI DELL'ANALISI DELLA LETTERATURA

ALGORITMI ADATTI:

- Consentono un'introduzione significativa alla computazione quantistica utilizzando due soli qubit: algoritmi di Deutsch e Grover

CARATTERISTICHE COMUNI NELLA FASE DI ELABORAZIONE DELL'INFORMAZIONE

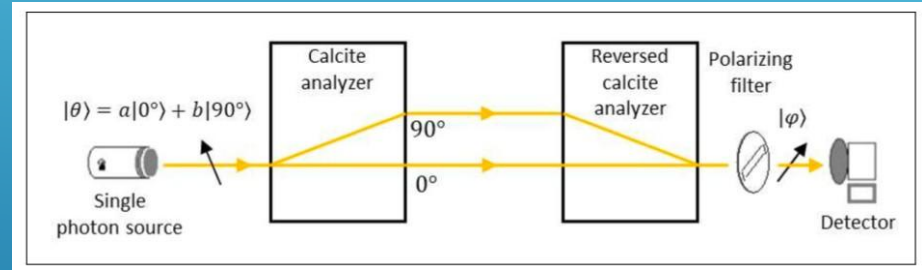
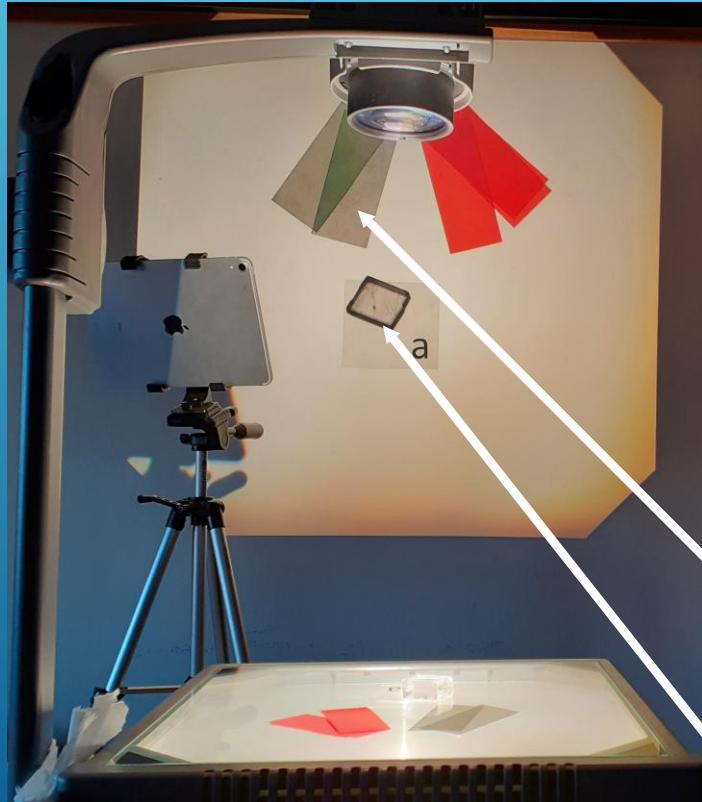
Un algoritmo quantistico si può generalmente suddividere in tre fasi sequenziali:

1. L'attivazione del parallelismo (sovrapposizione quantistica)
2. Il trasferimento dell'informazione codificata da un registro ad un altro, spesso sfruttando la struttura moltiplicativa degli stati quantistici
3. L'attivazione dell'interferenza, per ottenere lo stato desiderato sul registro sul quale sarà poi effettuata la misura.

Questa schematizzazione può costituire il nucleo centrale di una "elementarizzazione" (nel senso del MER) della computazione quantistica.

ELEMENTI FONDAMENTALI DELLA TLS

Introduzione alla MQ con un approccio a due stati basato sulla polarizzazione (cosiddetto "approccio di Udine")

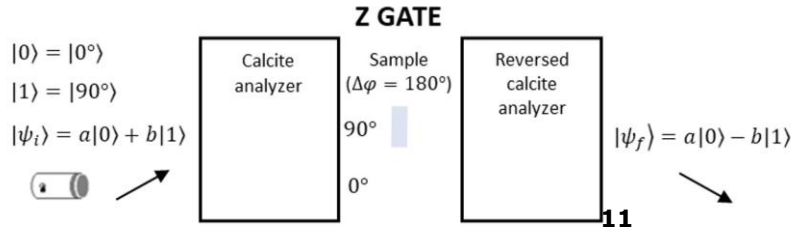


Filtri polarizzatori

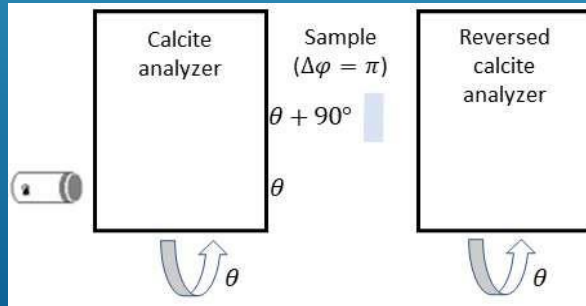
Cristallo di calcite

INTRODUZIONE DELLE PORTE LOGICHE QUANTISTICHE

Nella rappresentazione di polarizzazione i gate quantistici sono costruiti usando cristalli di calcite e sfasatori, poi rimpiazzati da lamine a mezza onda che svolgono entrambe le funzioni insieme.



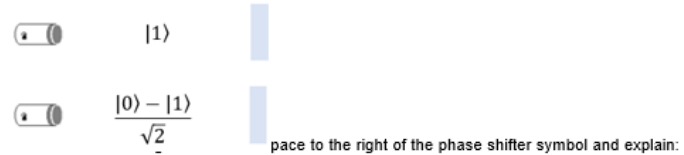
Progetto di una porta Z su un qubit codificato in polarizzazione



S2 Polarization gates

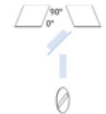
A. Implementation of a qubit on the linear polarization of the photon

- Determine the action of a phase shifter of π on the state vector of prepared photons as follows



- Propose an implementation of Z logical gate using one or more of the following devices:

- two calcite crystals, direct and reverse, with channels at 0° e 90°
- non-phase mirror
- a phase-shifter
- a filter can be directed as desired



Represent the apparatus to the right of the single-photon source, explaining its functioning:



- Propose a realization of the X and H gates on the polarization of a photon, specifying the devices used and the conditions of their use.

RAPPRESENTAZIONE GEOMETRICA DELLE PORTE LOGICHE

I gate quantistici sono rappresentati come simmetrie nello spazio degli stati di polarizzazione

LOGIC GATE	GEOMETRICAL INTERPRETATION: AXIAL SYMMETRY	TRUTH TABLE	CIRCUIT REPRESENTATION				
I IDENTITY		<table border="1"> <tr> <td>$0\rangle$</td> <td>$0\rangle$</td> </tr> <tr> <td>$1\rangle$</td> <td>$1\rangle$</td> </tr> </table>	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$						
$ 1\rangle$	$ 1\rangle$						
X NOT		$\alpha = \pi/4$ <table border="1"> <tr> <td>$0\rangle$</td> <td>$1\rangle$</td> </tr> <tr> <td>$1\rangle$</td> <td>$0\rangle$</td> </tr> </table>	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$						
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$						
H HADAMARD		$\alpha = \pi/8$ <table border="1"> <tr> <td>$0\rangle$</td> <td>$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle + 1\rangle)$</td> </tr> <tr> <td>$1\rangle$</td> <td>$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle - 1\rangle)$</td> </tr> </table>	$ 0\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle + 1\rangle)$	$ 1\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle - 1\rangle)$	
$ 0\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle + 1\rangle)$						
$ 1\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle - 1\rangle)$						
Z FLIP		$\alpha = 0$ <table border="1"> <tr> <td>$0\rangle$</td> <td>$0\rangle$</td> </tr> <tr> <td>$1\rangle$</td> <td>$- 1\rangle$</td> </tr> </table>	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$- 1\rangle$	
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$						
$ 1\rangle$	$- 1\rangle$						

CENTRALITA' DELLE RAPPRESENTAZIONI MULTIPLE

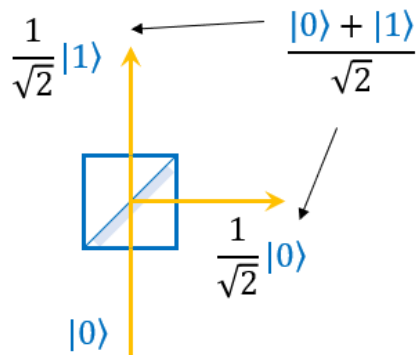
- Lo svolgimento delle attività è caratterizzato dall'interazione di **molteplici rappresentazioni**, come il costante interplay tra i circuiti logici e la rappresentazione di una loro possibile realizzazione sperimentale mediante circuiti ottici: molte attività richieste agli studenti consistono nel richiedere di ricavare una possibile rappresentazione come circuito ottico di un certo circuito logico, o viceversa di riconoscere quale circuito logico viene rappresentato da un certo circuito ottico.



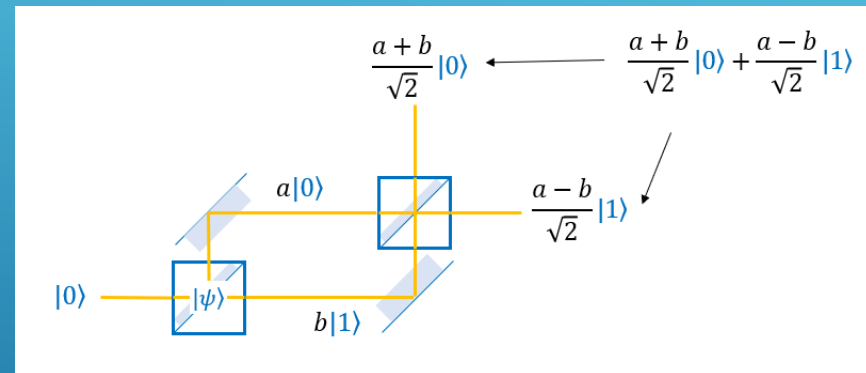
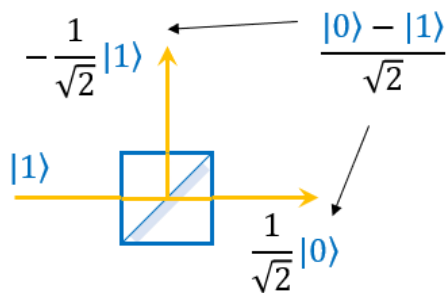
- Un altro esempio di utilizzo di rappresentazioni multiple è il passaggio dalla rappresentazione algebrica a quella geometrica per le porte logiche nella codifica in polarizzazione.

CODIFICA SUI CAMMINI

Al fine di favorire l'introduzione di circuiti significativi nel modo più semplice possibile, introduciamo un secondo tipo di codifica del qubit, anch'esso realmente utilizzato nella letteratura scientifica e nelle applicazioni pratiche: la codifica sugli stati spaziali (cammini alternativi)





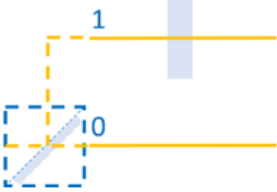


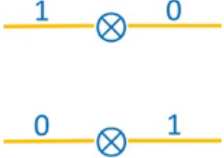


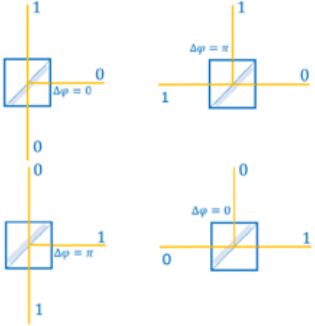
Gate di Hadamard



Mach Zehnder (doppio Hadamard), base per l'algoritmo di Deutsch

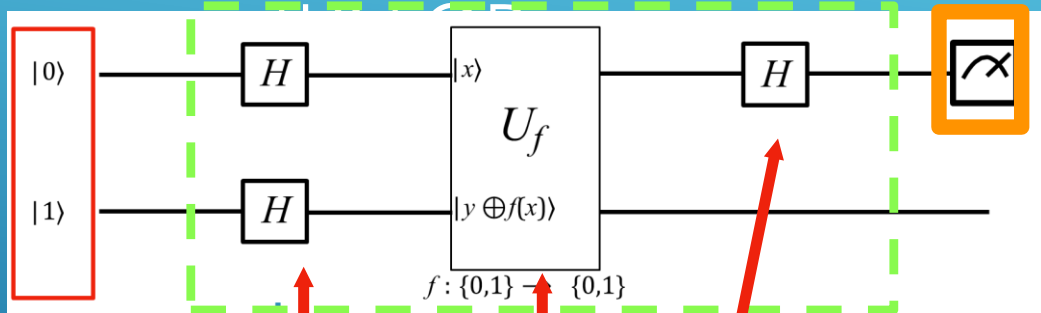
CONFRONTO TRA LE CODIFICHE

Confronto tra le realizzazioni dei principali gate con codifica del qubit sulla polarizzazione, o sui cammini alternativi

<p>PORTA Z</p> 	$ 0\rangle \Rightarrow 0\rangle$ $ 1\rangle \Rightarrow - 1\rangle$		
<p>PORTA X</p> 	$ 0\rangle \Rightarrow 1\rangle$ $ 1\rangle \Rightarrow 0\rangle$		
<p>PORTA H</p> 	$ 0\rangle \Rightarrow \frac{ 0\rangle + 1\rangle}{\sqrt{2}} = 0'\rangle$ $ 1\rangle \Rightarrow \frac{ 0\rangle - 1\rangle}{\sqrt{2}} = 1'\rangle$		

L'ALGORITMO DI DEUTSCH

Crcuito logico



(Cleve, Macchiavello & al. 1998)

Parallelismo quantistico

Oracolo (sfrutta la struttura moltiplicativa dello stato quantistico)

Interferenza quantistica

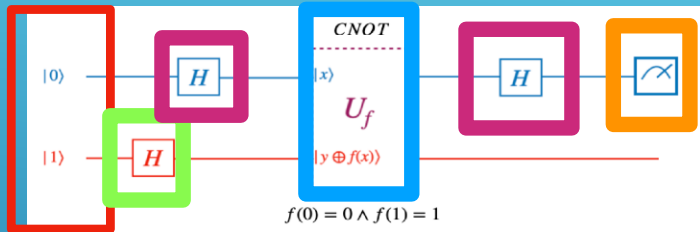
La suddivisione tripartita del processo di elaborazione dell'informazione è proposta agli studenti al livello del circuito logico

Sutrini, C., Zuccarini, G., Malgieri, M., Bondani, M., & Macchiavello, C. (2024). *An educational model of the Deutsch algorithm for secondary school*. European Journal of Physics, 45(2), 025302.

L'ALGORITMO DI DEUTSCH

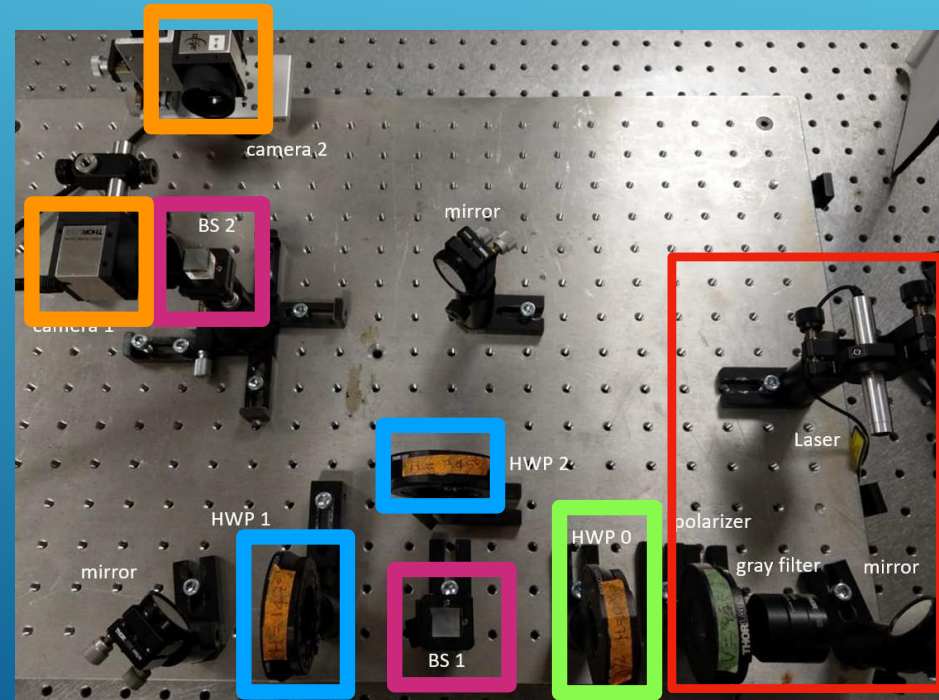
Circuito logico

Dal modello alla realtà

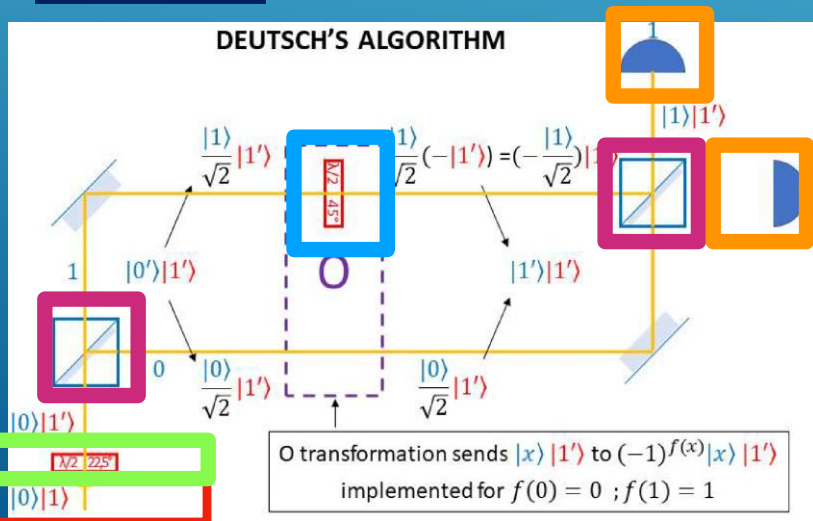


Implementazione ottica reale

(realizzata da M. Bondani)



Circuito ottico




SCHEDE CON MICRO-COMPITI

Durante l'intero percorso, le lezioni frontali sono intervallate da micro-compiti nella forma di domande concettuali, attività di modellizzazione guidate o di traduzione dall'una all'altra rappresentazione. Queste schede hanno il ruolo di:

- Favorire la comprensione concettuale
- Tenere alta l'attenzione degli studenti
- Offrire un'occasione di valutazione formativa (autovalutazione) e un feedback sull'andamento del percorso.

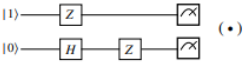
Si tratta di una caratteristica del percorso che in genere viene valutata molto positivamente dagli studenti come passo in avanti rispetto alla didattica tradizionale.

NGSTI  **SUMMER SCHOOL
QUANTUM TECHNOLOGIES
1-5 SETTEMBRE 2025**

S11 – "Circuiti logici-ottici"

Codice identificativo _____ Data _____

Si consideri il seguente circuito:



1. Sviluppare i due registri singolarmente in notazione di Dirac spiegando, all'atto della misurazione, quali bit classici si ottengono su ciascun registro, e con che probabilità (Inserire, sopra la freccia, la corrispondente porta logica. Nel caso della misurazione inserire l'icona corrispondente).

|1> → → → , con $p=$; con $p=$



|0> → → → , con $p=$; con $p=$

Complessivamente al termine del circuito otterremo la/e coppia/e di bit classici
(.) con $p=$

(.) con $p=$

Spiegare

2. Per ciascun registro, rappresentare nel piano il vettore di stato dopo ciascuna porta logica spiegando che trasformazione viene svolta.

Massimiliano Malgieri, Giacomo Zuccarini, Claudio Sutrini, Chiara Macchiavello

LA SCUOLA ESTIVA ALL'UNIVERSITÀ DI PAVIA

La TLS descritta è stata testata con gli studenti in diversi ambiti:

- Nella didattica curriculare, in due sperimentazioni gestite o co-gestite da insegnanti formati nei nostri corsi di formazione (campioni “tipici” di studenti del Liceo Scientifico)
- Come PCTO svolto nelle scuole, in corsi gestiti dai ricercatori (3 sperimentazioni, campioni autoselezionati)
- L’ambito di sperimentazione principale è tuttavia la scuola di fine estate sulle tecnologie quantistiche per studenti della scuola secondaria di secondo grado si è tenuta all’università di Pavia per quattro edizioni (settembre 2022-2025), sempre finanziate dal **PLS**. Le ultime due edizioni sono state anche finanziate da **NQSTI - Spoke 9**. Le prime tre edizioni si sono svolte al Dipartimento di Fisica, l’ultima in Centrale (palazzo S.Tommaso)

SUMMER SCHOOL
QUANTUM TECHNOLOGIES
TERZA EDIZIONE
PER STUDENTI DEL QUINTO ANNO DI SCUOLA SUPERIORE
Università degli studi di Pavia,
Dipartimento di Fisica

MALGIERI MASSIMILIANO
ZUCCARINI GIACOMO
SUTRINI CLAUDIO
BONDANI MARIA
MACCHIAVELLO CHIARA

2-6 SETTEMBRE 2024

La manipolazione di singoli **sistemi quantistici** e le nascenti **tecnologie** richiedono lo studio della meccanica quantistica non più solo a fisici ma anche a matematici, informatici, ingegneri, chimici e biologi. La scuola si basa su un **approccio integrato e multidisciplinare** che conduca gli studenti a comprendere la dialettica tra fisica, matematica, logica, probabilità e informatica, orientandoli verso un nuovo modo di pensare il mondo.

NQSTI
Ministero dell'Università e della Ricerca
Università degli studi di Pavia

Zuccarini, G., Sutrini, C., Bondani, M., Macchiavello, C., & Malgieri, M. (2024). *Teaching quantum information science to secondary school students with photon polarization and which-path encoding*. EPJ Quantum Technology, 11(1), 74.

LA RACCOLTA DI DATI

I dati sono stati raccolti attraverso diversi strumenti:

- **In termini di comprensione concettuale**, attraverso le schede di lavoro per gli studenti e un test finale.
- **Per quanto riguarda la persistenza di credenze pseudoscientifiche**, attraverso il questionario PSEUDO-QM che sarà discusso in seguito
- **In termini di approvazione e soddisfazione**, tramite un altro questionario.

Malgieri, M., Sutrin, C., Zuccarini, G., & Macchiavello, C. (2025). *First Outcomes of a Teaching-Learning Sequence on Quantum Information and Computation*. In *Advancing Physics Education: Innovations from Early Learning to Higher Education* (pp. 161-175). Cham: Springer Nature Switzerland.

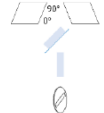


PORTA Z

$$\begin{array}{l} |1\rangle \Rightarrow -|1\rangle \\ |0\rangle \Rightarrow |0\rangle \end{array} \quad \text{per la linearità} \quad a|0\rangle + b|1\rangle \Rightarrow a|0\rangle - b|1\rangle$$

A.2 Proponi un'implementazione della porta utilizzando uno o più dei seguenti dispositivi a disposizione

- due cristalli di calcite, diretto e inverso, con canali a 0° e 90°
- uno specchio senza sfasamento
- uno sfasatore
- un filtro orientabile a piacere



Rappresenta l'apparato a destra della sorgente a singolo fotone, spiegandone il funzionamento

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$

$$|\psi\rangle = a|0\rangle - b|1\rangle$$

Diagram showing a source (represented by a dot) and a detector (represented by a circle with a vertical line) connected by a path. Below the diagram are three horizontal lines for writing the answer.

ESEMPIO: CODIFICA IN POLARIZZAZIONE

L'item a destra richiede di saper passare dalla rappresentazione algebrica dello stato in termini di Ket a quella geometrica nello spazio degli stati di polarizzazione, determinare l'azione di uno sfasamento di π in questa rappresentazione, per poi tornare alla descrizione algebrica

A. Implementation of a qubit on the linear polarization of the photon

A.1 Determine the action of a phase shifter of π on the state vector of prepared photons as follows

$|1\rangle$

$\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$

Write the resulting vector in the space to the right of the phase shifter symbol and explain:

A.1 Determina l'azione di uno sfasatore di π sul vettore di stato di fotoni preparati come segue

$|1\rangle$ $|1\rangle$

$\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$ $\frac{|1\rangle - |0\rangle}{\sqrt{2}}$

Scrivi il vettore risultante nello spazio a destra del simbolo dello sfasatore e spiega:

SARANDEE di π → I MASSIMI DIFFERENZA INIZIALI DELL'ONDA → POSSIBILE A CAMBIARE DUE I SENSI DELL'EMERGENTE di STATO.

A seconda dei campioni, tra il 70% e il 90% degli studenti fornisce una risposta corretta a questo item, evidenziando l'interplay positivo tra le diverse rappresentazioni

ESEMPIO: PORTE LOGICHE NELLA CODIFICA IN POLARIZZAZIONE

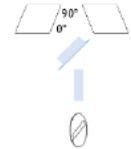
Anche in questa domanda, che riguarda la progettazione di una porta logica Z con dispositivi ottici, emerge la produttività dell'utilizzo di rappresentazioni multiple.

Nel campione auto-selezionato della summer school, questa domanda ha risultati molto alti in termini di risposte corrette. Meno buoni ma comunque superiori al 50%, nei campioni curriculare.

Un'analisi approfondita del linguaggio utilizzato dagli studenti può tuttavia lasciare qualche perplessità, in quanto non molti si riferiscono allo stato del singolo fotone, ma possono esprimersi al contrario in termini di un "flusso" o un "raggio".

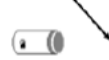
A.2 Propose an implementation of Z logical gate using one or more of the following devices:

- two calcite crystals, direct and reverse, with channels at 0° e 90°
- non-phase mirror
- a phase-shifter
- a filter can be directed as desired



Represent the apparatus to the right of the single-photon source, explaining its functioning:

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$



$$|\psi\rangle = a|0\rangle - b|1\rangle$$



Rappresenta l'apparato a destra della sorgente a singolo fotone, spiegandone il funzionamento

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$



$$|\psi\rangle = a|0\rangle - b|1\rangle$$



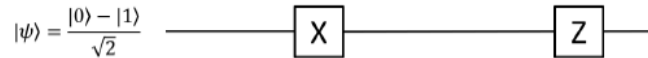
IL PRIMO CRISTALLO DIVIDE IL FOTONE IN $|0\rangle$ E $|1\rangle$. LO SFASATORE AGISCE SU $|1\rangle$ E LO RENDE $-|1\rangle$. IL SECONDO CRISTALLO RIUNISCE I 2 STATI.

ESEMPIO: PORTE LOGICHE NELLA CODIFICA SUI CAMMINI

Gli studenti mostrano difficoltà leggermente superiori con il secondo tipo di codifica, quella sui cammini alternativi. Domande di questo tipo hanno risultati poco superiori al 50% nei campioni curriculari, e intorno al 70% in quello auto-selezionato della summer school.

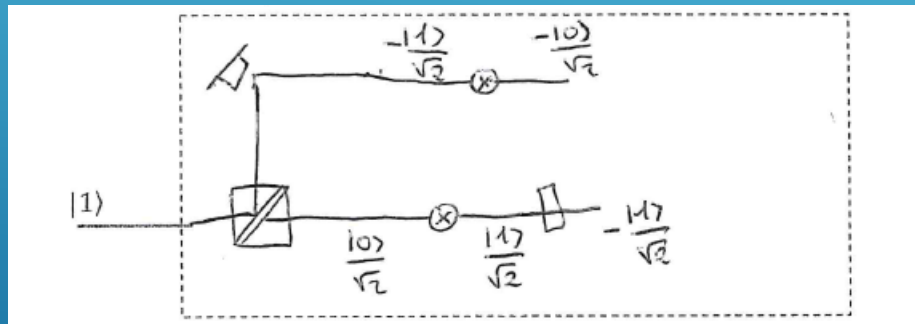
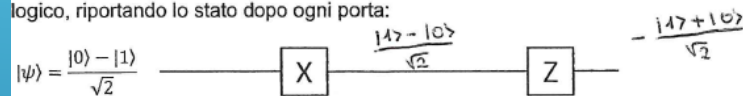
Oltre alle difficoltà specifiche di questo tipo di codifica, abbiamo evidenza che in alcuni casi gli studenti possano confondere gli elementi dei due tipi di codifica (es. scambiare beam splitter per cristalli birifrangenti o viceversa).

A3.1 Solve the logic circuit, reporting the state after each gate:



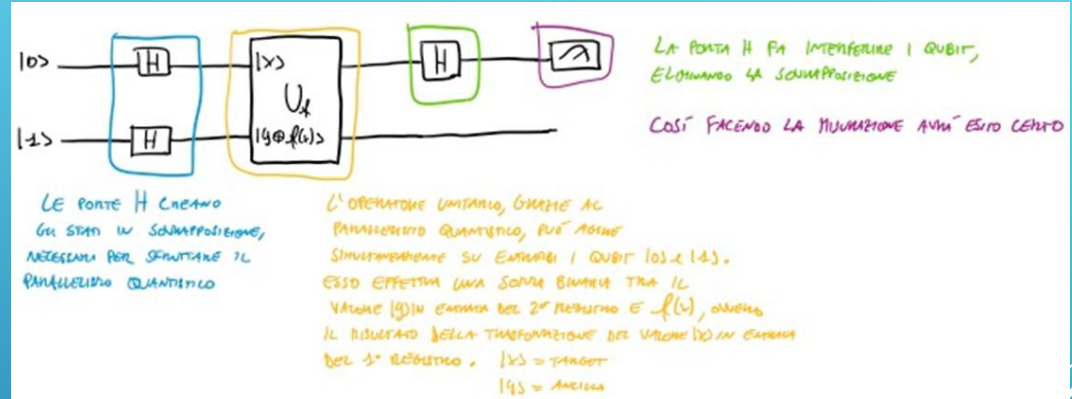
A3.2 Design the corresponding optical circuit with encoding dual rail. Explain each step:

logico, riportando lo stato dopo ogni porta:



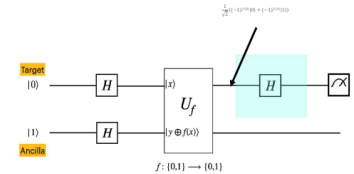
ESEMPIO: ALGORITMO DI DEUTSCH

Le domande relative all'algoritmo di Deutsch hanno fornito risultati particolarmente soddisfacenti. Quasi tutti gli studenti sono in grado di "mappare" le fasi della computazione quantistica introdotte nelle lezioni alla struttura dell'algoritmo di Deutsch (a destra la risposta di uno studente)



Ad un livello più formale, una delle domande (a destra) richiedeva di scrivere esplicitamente lo stato del sistema prima e dopo l'ultima porta di Hadamard, per tutti i possibili stati dell'oracolo. Questa tabella viene tipicamente completata in modo corretto da una larga maggioranza degli studenti, tanto nei campioni curriculari quanto in quelli autoselezionati, senza rivelare particolari criticità.

Interference: We know that the Hadamard gate on a superposition state creates interference phenomena such that $|0\rangle \rightarrow |0\rangle$ and $|1\rangle \rightarrow |1\rangle$.



Question C1. Knowing that the final state before the last Hadamard is $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}((-1)^{f(0)}|0\rangle + (-1)^{f(1)}|1\rangle)$, complete the table

Boolean function	State after the Oracle	State after the last Hadamard	Classic bit after measurement and probability
$f(0) = 0 \wedge f(1) = 0$	$ \psi\rangle = \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}}$	$ \psi\rangle_{fin} = \underline{\hspace{1cm}}$	\dots , $p = \underline{\hspace{1cm}}$
$f(0) = 0 \wedge f(1) = 1$	$ \psi\rangle = \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}}$	$ \psi\rangle_{fin} = \underline{\hspace{1cm}}$	\dots , $p = \underline{\hspace{1cm}}$
$f(0) = 1 \wedge f(1) = 0$	$ \psi\rangle = \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}}$	$ \psi\rangle_{fin} = \underline{\hspace{1cm}}$	\dots , $p = \underline{\hspace{1cm}}$
$f(0) = 1 \wedge f(1) = 1$	$ \psi\rangle = \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}}$	$ \psi\rangle_{fin} = \underline{\hspace{1cm}}$	\dots , $p = \underline{\hspace{1cm}}$

ALCUNE CONCLUSIONI SULL'APPRENDIMENTO CONCETTUALE

- Complessivamente, i dati mostrano che il formalismo non rappresenta la sfida principale per gli studenti quando affrontano i concetti di base dell'informazione e della computazione quantistica. La strategia di utilizzare rappresentazioni multiple può essere molto produttiva nel supportare il ragionamento degli studenti.
- I dati sulla comprensione degli algoritmi quantistici da parte degli studenti, soprattutto nelle domande a risposta aperta, mostrano che la suddivisione tripartita della fase di elaborazione dell'informazione quantistica è utile per supportare il pensiero degli studenti e dare significato al funzionamento interno dell'algoritmo quantistico.
- Tuttavia, alcuni dati suggeriscono che molti studenti mantengano una visione classica di fondo, e questo si manifesta quando vengono richieste spiegazioni concettuali, soprattutto per quanto riguarda i concetti di stato e sovrapposizione.
- Da un lato, queste difficoltà richiedono una maggiore attenzione a queste questioni concettuali nell'introduzione iniziale alla teoria quantistica. Dall'altro lato, tuttavia, è possibile che nella nostra TLS il concetto di interferenza di singoli oggetti quantistici non sia sufficientemente centrale o evidenziato.

MISCONCEZIONI E PSEUDOSCIENZA

Sugli aspetti concettuali della meccanica
quantistica

A decorative graphic consisting of several parallel white lines of varying lengths, slanted diagonally from the bottom right towards the top right, set against a blue gradient background.

MISCONCEZIONI E PSEUDOSCIENZA

- Mentre la ricerca in didattica ha studiato a fondo misconcezioni e nodi concettuali nell'insegnamento-apprendimento della meccanica quantistica, le concezioni pseudoscientifiche che possono essere propagate a partire da distorsioni dei concetti quantistici hanno ricevuto meno attenzione.
- Il problema è però ben presente agli esperti, che in una recente survey hanno menzionato il contrasto alla diffusione di idee pseudoscientifiche basate sulla meccanica quantistica come uno dei motivi principali per insegnare questa teoria nella scuola secondaria di secondo grado.
- Inoltre, tra le misconcezioni classiche e le idee pseudo-scientifiche vi è una relazione non banale, perché talvolta, queste idee possono fondarsi proprio su incomprensioni comuni di concetti della teoria.
- Per questi motivi ci siamo recentemente dedicati, in collaborazione con altre sedi, allo studio delle idee pseudo-scientifiche basate sulla teoria quantistica.

PSEUDOSCIENZA QUANTISTICA: ESEMPI

- L'interpretazione errore-disturbo delle relazioni di indeterminazione (basata sul 'microscopio di Heisenberg') e la discussione fondazionale sul problema della misura, possono essere utilizzate strumentalmente per argomentare che 'l'osservatore può modificare la realtà'. Queste affermazioni fuorvianti possono costituire un appoggio per filosofie sincretistiche in stile new age (mind over matter, etc.).
- Al principio di indeterminazione possono essere date interpretazioni iper-estensive del tipo 'è impossibile per l'uomo conoscere fino in fondo la natura', da cui possono seguire affermazioni ancora meno fondate come 'nessun esperimento può dare risultati non ambigui' o 'la scienza non consente di avere alcuna certezza' che possono giustificare ogni tipo di posizione anti-scientifica o di negazione della scienza.
- Sia il cosiddetto 'dualismo onda-particella' sia gli aspetti quantistici della struttura della materia possono essere evocati per giustificare posizioni pseudo-scientifiche, specialmente nella categoria delle medicine alternative, fondandosi in particolare su fraintendimenti lessicali. Per esempio, sulla base dell'affermazione vaga che 'ogni cosa è anche un'onda' si potrebbe affermare che il nostro corpo, o particolari suoi organi, risuonano a particolari frequenze 'positive', che possono permettere guarigioni miracolose.
- L'entanglement è tra gli argomenti di fisica quantistica più spesso evocati a giustificazione di teorie pseudo-scientifiche. Molto spesso queste teorie hanno a che fare con la telepatia, la psicocinesi e specialmente la guarigione a distanza. Un sito web, riportato in Gazzola (2019) vendeva 'medicinali quantistici' scaricabili da internet sotto forma di codice che si sarebbe poi teletrasportato, naturalmente grazie all'entanglement quantistico, dal cellulare al corpo della persona malata.

PSEUDO-QM (CON UNINA, UNITN, INSUBRIA)

PSEUDO-QM è un questionario diagnostico sulle concezioni pseudo-scientifiche che ruotano intorno alla meccanica quantistica.

Alla base di PSEUDO-QM vi è una concettualizzazione della pseudo-scienza quantistica basata sulle seguenti dimensioni:

- A. **Magia/Misticismo:** Il legame tra MQ e magia/misticismo affonda le sue radici in libri popolari della fine del XX secolo in cui le caratteristiche non causali e non deterministiche della meccanica quantistica venivano viste come possibili spiegazioni per fenomeni metafisici e paranormali. La successiva comparsa del mondo quantistico nella letteratura New Age ha ulteriormente rafforzato questa tendenza, tentando di conciliare la fisica quantistica con dottrine religiose e filosofie olistiche. Ad esempio, il problema della misurazione in meccanica quantistica può essere descritto come l'idea che "la realtà dipenda dall'osservatore", promuovendo credenze di predominio della mente sul corpo o della mente sulla realtà.
- B. **Teorie del complotto:** La teoria quantistica può essere vista come un potente corpus di conoscenze circondato da un'aura di elitarismo. Ciò può indurre a credere che la teoria contenga informazioni nascoste, potenzialmente utili all'intera popolazione, ma che siano invece tenute segrete e accessibili solo a "eletti".
- C. **Negazione della scienza:** Il rapporto tra teoria quantistica e negazione scientifica si basa spesso su interpretazioni metaforiche inappropriate di alcuni aspetti della teoria. Ad esempio, se il principio di indeterminazione viene interpretato, in modo metaforico, come un "limite alla conoscenza umana", questo può essere utilizzato come una "backdoor" per la negazione della scienza.
- D. **Disinformazione:** Per disinformazione intendiamo il tentativo di promuovere punti di vista che non coinvolgono nessuna delle tre dimensioni sopra menzionate, ma che tuttavia si discostano da quelli che hanno legittimità scientifica in un dato momento. La disinformazione riguarda principalmente affermazioni ambigue e fuorvianti sulla teoria quantistica che promuovono conclusioni che si rivelano false o inaccettabili per la comunità scientifica. Ad esempio, affermazioni non ortodosse sull'entanglement possono riferirsi o suggerire implicitamente una comunicazione istantanea tra sistemi di particelle.

PSEUDO-QM: PUBBLICAZIONI E APPLICAZIONI

PSEUDO-QM è stato testato e validato su un campione significativo di studenti e insegnanti di scuola secondaria, dimostrando proprietà psicometriche adeguate e confermando l'adeguatezza della concettualizzazione utilizzata per la pseudo-scienza quantistica.

E' stato inoltre utilizzato a UNIPV come pre-post test per gli studenti partecipanti all'annuale scuola di fine estate sulle tecnologie quantistiche.

I risultati che discutiamo nel seguito riguardano due campioni combinati di studenti di scuola secondaria di 17-18 anni, provenienti principalmente dal Liceo scientifico che hanno partecipato alla scuola per propria scelta. Pertanto, i campioni sono autoselezionati e composti da studenti con un interesse particolare per la fisica quantistica e/o l'informatica. I campioni del 2024 e del 2025 sono composti rispettivamente da 27 e 30 studenti, quindi per il campione combinato N=57, con 46 studenti maschi e 11 femmine.

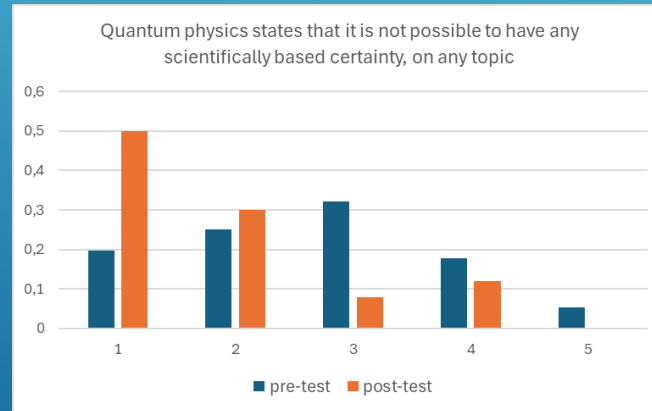
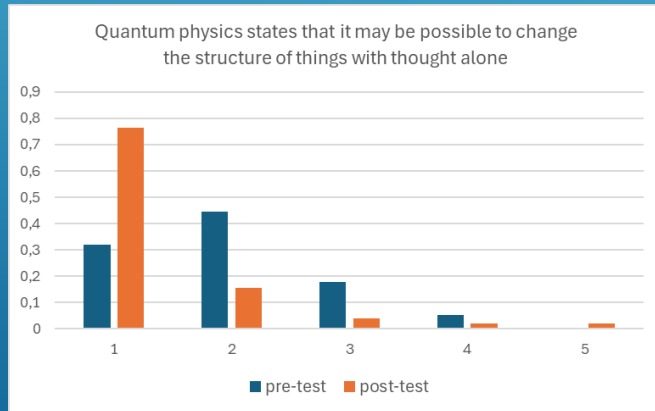
Le domande ammettono risposte in scala di Likert a 5 valori (da "per niente d'accordo" a "molto d'accordo")

Bondani, M., Galano, S., Malgieri, M., Onorato, P., Sciarretta, W., & Testa, I. (2025). *Development and use of an instrument to measure pseudoscientific beliefs in quantum mechanics: the PSEUDO-QM scale*. Research in Science & Technological Education, 43(4), 1330-1351.

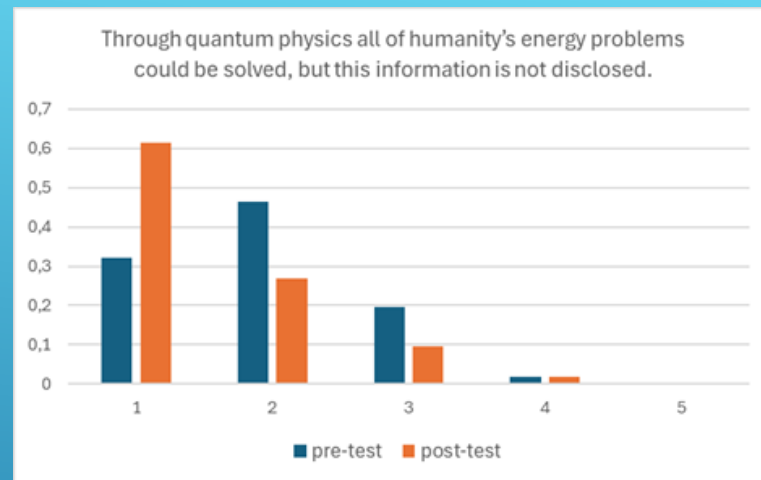
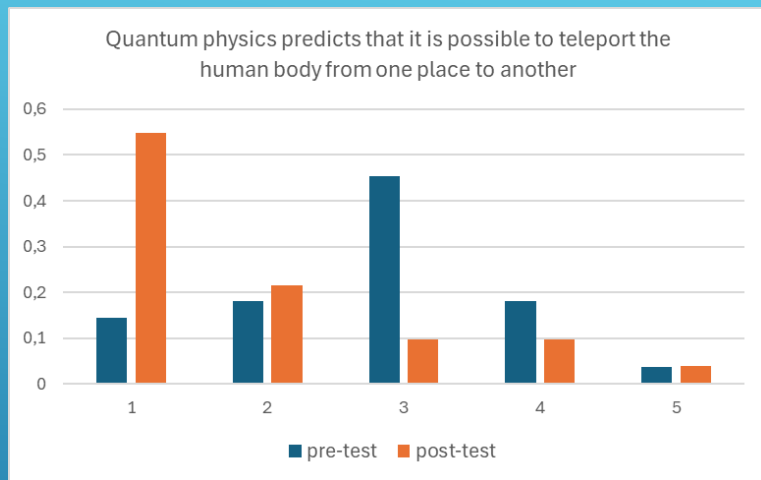
Sciarretta, W., Bondani, M., Galano, S., Malgieri, M., Onorato, P., & Testa, I. (2024). *Analysis of pseudoscientific beliefs in quantum mechanics of high school students and teachers*. Physical Review Physics Education Research, 20(2), 020145.

CAMBIAMENTI NELLE CONCEZIONI PSEUDOSCIENTIFICHE DI STUDENTI DI SCUOLA SECONDARIA DOPO UNA SCUOLA ESTIVA SULL'INFORMAZIONE QUANTISTICA

Dei 22 item del questionario, 21 hanno un cambiamento nella direzione desiderata, cambiamento che è statisticamente significativo (t-test a due campioni, $p < 0.05$) per 15 item.



Malgieri, M., Sutrini, C., Zuccarini, G., Macchiavello, C. 'Changes in secondary students' pseudoscientific conceptions of quantum mechanics after a summer school on quantum information science'. Accepted for presentation at IEEE EDUCON 2026, Cairo, April 27-30 2026



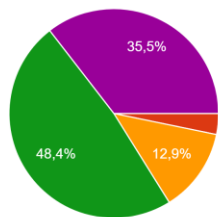
Nonostante questi temi non vengano esplicitamente affrontati nella TLS, un'istruzione significativa sulle tecnologie quantistiche appare efficace nel ridurre l'incidenza della maggior parte delle concezioni pseudo-scientifiche basate sulla meccanica quantistica.

Item	Pre mean	Post mean	p-value
Quantum physics explains the difference between life and non-life	2.25	1.63	6.1×10^{-4}
Quantum physics explains how our consciousness is connected to the universe	2.42	2.12	0.19
Quantum computers will never work, as it is impossible to build such a perfect hardware	1.56	1.25	0.0067
Quantum physics can explain what happens to the soul after death	1.56	1.35	0.27
Quantum physics states that it may be possible to change the structure of things with thought alone	1.96	1.37	7.7×10^{-4}
Quantum physics proves that excessive faith in human reason, born with the Enlightenment, was misleading	2.70	2.35	0.16
Quantum physics states that it is not possible to have any scientifically based certainty, on any topic	2.64	1.82	2.6×10^{-4}
Quantum physics solves the problems of human consciousness and free will	2.07	1.44	0.0051
Quantum physics, with wave-particle duality, predicts that every organ of the human body has a fundamental frequency, which when excited allows to heal severe illnesses.	2.63	1.60	1.9×10^{-4}
True quantum physics is not taught in Universities, but in restricted circled, reserved to personalities of the highest level	1.37	1.14	0.37
Through quantum physics all of humanity's energy problems could be solved, but this information is not disclosed.	1.91	1.52	0.0080
Quantum physics explains the structure and behaviour of metals (reverse coded)	3.61	3.09	0.30
Quantum physics states that there are infinite multiverses, namely all the realities that could have existed if a choice of a human being had been different, really exist	2.78	2.12	0.0049
Quantum physics predicts that it is possible to teleport the human body from one place to another	2.78	1.86	6.4×10^{-5}
Quantum physics has solid scientific foundations (reverse coded)	4.07	4.14	0.0030
Quantum physics, with the concept of entanglement, has scientifically proven that we can have information about every particle in the universe	2.96	2.26	0.042
In quantum superposition, a particle appears to be in two places at once	3.68	3.04	0.17
Quantum physics is founded on writings by Nikola Tesla which nowadays are kept secret by some governments	1.89	1.40	0.034
The quantum energy inside our body is not destroyed after death but returns to the universe	3.09	1.95	1.6×10^{-4}
Quantum physics is nowadays the basis of much technological progress (reverse coded)	4.09	4.23	0.0051
Quantum physics agrees with traditional Chinese medicine that we can correct the energy flows of our body	2.02	1.37	0.0033
Quantum physics, through the uncertainty principle, states that every event can happen, and it is not possible to make any predictions	2.67	1.95	0.033

ALCUNE DELLE DOMANDE DI COINVOLGIMENTO/GRADIMENTO

1. Penso di aver imparato molto da questa scuola

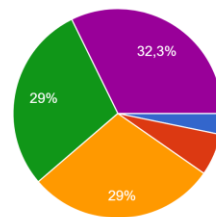
31 risposte



- 1. Per niente d'accordo
- 2. Poco d'accordo
- 3. Abbastanza d'accordo
- 4. Molto d'accordo
- 5. Completamente d'accordo

2. Il mio interesse per la fisica è aumentato dopo questa scuola

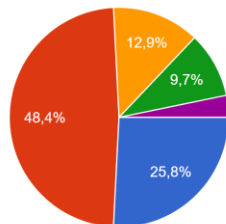
31 risposte



- 1. Per niente d'accordo
- 2. Poco d'accordo
| 3. Abbastanza d'accordo | 29% |
| 4. Molto d'accordo | 29% |
| 5. Completamente d'accordo | 32.3% |

11. Ho trovato la metodologia adottata nelle lezioni molto simile a quella delle lezioni curricolari che si svolgono in classe nella mia scuola.

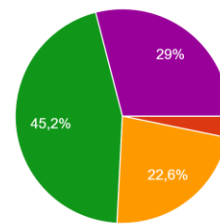
31 risposte



- 1. Per niente d'accordo
- 2. Poco d'accordo
- 3. Abbastanza d'accordo
- 4. Molto d'accordo
- 5. Completamente d'accordo

12. La metodologia utilizzata durante le lezioni, con la compilazione di schede, mi aiutava a comprendere gli argomenti trattati.


31 risposte



- 1. Per niente d'accordo
- 2. Poco d'accordo
- 3. Abbastanza d'accordo
- 4. Molto d'accordo
- 5. Completamente d'accordo

In conclusione...

Insegnare elementi di scienza e tecnologia quantistica a studenti della scuola secondaria di secondo grado, non solo è possibile, ma può anche essere una strategia molto efficace per ridurre l'incidenza di concezioni pseudo-scientifiche basate sulla meccanica quantistica, che gli studenti possono apprendere dalle fonti più disparate.



BIBLIOGRAFIA

Sum over paths

- Malgieri, M., Onorato, P., & De Ambrosis, A. (2017). Test on the effectiveness of the sum over paths approach in favoring the construction of an integrated knowledge of quantum physics in high school. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010101.
- Malgieri, M., Onorato, P., & 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., & Onorato, P. (2022). Recent progress on the sum over paths approach in quantum mechanics education. *Physics*, 4(3), 1012-1025..

Quantum technologies

- Sutrini, C., Malgieri, M., & Macchiavello, C. (2022, June). Quantum technologies: a course for teacher professional development. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2297, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.
- Zuccarini, G., Sutrini, C., Bondani, M., Macchiavello, C., & Malgieri, M. (2024). Teaching quantum information science to secondary school students with photon polarization and which-path encoding. *EPJ Quantum Technology*, 11(1), 4
- Sutrini, C., Zuccarini, G., Malgieri, M., Bondani, M., & Macchiavello, C. (2023). An educational model of the Deutsch algorithm for secondary school. *European Journal of Physics*, 45(2), 025302
- Zuccarini, G., & Malgieri, M. (2022). Modeling and Representing Conceptual Change in the Learning of Successive Theories. *Science & Education*, 1-45.

Pseudo-QM

- Bondani, M., Galano, S., Malgieri, M., Onorato, P., Sciarretta, W., & Testa, I. (2024). Development and use of an instrument to measure pseudoscientific beliefs in quantum mechanics: the PSEUDO-QM scale. *Research in Science & Technological Education*, 1-22..
- Sciarretta, W., Bondani, M., Galano, S., Malgieri, M., Onorato, P., & Testa, I. (2024). Analysis of pseudoscientific beliefs in quantum mechanics of high school students and teachers. *Physical Review Physics Education Research*, 20(2), 020145.
- Malgieri, M., Sutrini, C., Zuccarini, G., Macchiavello, C. Changes in secondary students' pseudoscientific conceptions of quantum mechanics after a summer school on quantum information science. Submitted to IEEE EDUCON 2026