



UNIVERSITÀ DI PAVIA



# Sperimentazioni con studenti e insegnanti sulle tecnologie quantistiche nell'ambito della Quantum Flagship: il contributo di Pavia.

Massimiliano Malgieri, Claudio Sutrini, Giacomo Zuccarini, Chiara Macchiavello  
Dipartimento di Fisica, Università di Pavia



107° congresso della Società Italiana di Fisica, 13-17 settembre 2021

# Chi siamo



Massimiliano Malgieri, RTDA, precedentemente insegnante per circa 10 anni, dottorato di ricerca in fisica sulla didattica della meccanica quantistica.

Claudio Sutrini, dottorando in fisica sulle tecnologie quantistiche con taglio didattico, laurea in matematica, insegnante, musicista.



Giacomo Zuccarini, assegnista a UNIPV dopo una lunga esperienza all'Università di Udine, dottorato di ricerca sulla didattica della meccanica quantistica, esperto nell'approccio a due stati.

Chiara Macchiavello, professore ordinario, esperta di computazione e computazione quantistica, responsabile per il ramo education della Quantum Flagship.



107° congresso della Società Italiana di Fisica, 13-17 settembre 2021

# La Quantum Technologies Flagship



- La quantum technologies flagship è un'iniziativa istituzionale dell'Unione Europea con un budget di oltre un miliardo di euro che si propone di accelerare la transizione verso la produzione e l'utilizzo diffuso di tecnologie derivanti dalla "seconda rivoluzione quantistica", ossia la possibilità di manipolare e controllare singoli oggetti quantistici.
- Lanciata nel 2018, avrà una durata di 10 anni o più; ha una controparte nella National Quantum Initiative adottata contemporaneamente dal parlamento degli Stati Uniti.
- Le aree di ricerca su cui i progetti della QF si concentrano sono raggruppati in quattro aree: computazione quantistica, simulatori quantistici, comunicazione quantistica, sensori e metrologia.

## Qtedu: educazione alle tecnologie quantistiche



- Qtedu è una **azione di coordinazione e supporto per l'educazione alle tecnologie quantistiche** inserita nella Strategic Research Agenda della quantum Flagship per rispondere all'esigenza di coordinare gli sforzi di educazione e outreach della comunità a tutti i livelli (scuole, università, cittadinanza).
- Nelle sue fasi iniziali, vi è stata una forte chiamata a raccolta verso la comunità dei ricercatori in didattica della fisica per contribuire a realizzare la visione generale della QF, riassunta dallo slogan "The future is Quantum".
- I suoi obiettivi nell'immediato sono:
  - Costruzione di una comunità e di infrastrutture
  - Avvio di progetti pilota pan-europei riguardanti studenti di scuola e università, per i lavoratori e la cittadinanza
  - Costruzione dal basso di una roadmap verso una forza lavoro quantistica pan-Europea.

## Fisica a UNIPV e QTedu



- Il dipartimento di Fisica dell'Università di Pavia è incluso fra i "dipartimenti di eccellenza" individuati dal MIUR nel 2018, e una delle due aree coinvolte nel suo progetto di sviluppo è proprio quella di *Fisica Quantistica: fondamentali e tecnologie*. Le ricerche del dipartimento in questo campo contribuiscono in modo sostanziale all'avanzamento degli obiettivi scientifici della Flagship.
- Il dipartimento ha anche una lunga tradizione di ricerca in didattica della Fisica, che in anni recenti si è concentrata proprio sul terreno della didattica della fisica quantistica nella scuola secondaria.
- La collaborazione di questi due filoni di ricerca apre per Pavia la possibilità di offrire un contributo fondamentale alla QTedu CSA.



## La ricerca in didattica e la quantum flagship

- L'iniziativa della flagship sta, fornisce nuovo impulso alla ricerca sulla didattica della fisica quantistica, nonostante gli evidenti arretramenti del MIUR sull'insegnamento della meccanica quantistica nelle classi quinte.
- Sono partiti progetti di dottorato basati su una collaborazione tra ricercatori in QT e ricercatori in didattica; all'Università di Pavia, Bologna, dell'Insubria.
- Il carattere interdisciplinare della flagship ripropone con forza anche il problema dell'insegnamento della meccanica quantistica ai non fisici, tema da lungo tempo presente alla ricerca in didattica.
- L'urgenza di trovare vie percorribili per l'introduzione di temi come la comunicazione e la computazione quantistica ha aperto però sfide difficili.

## La ricerca in didattica e la quantum flagship

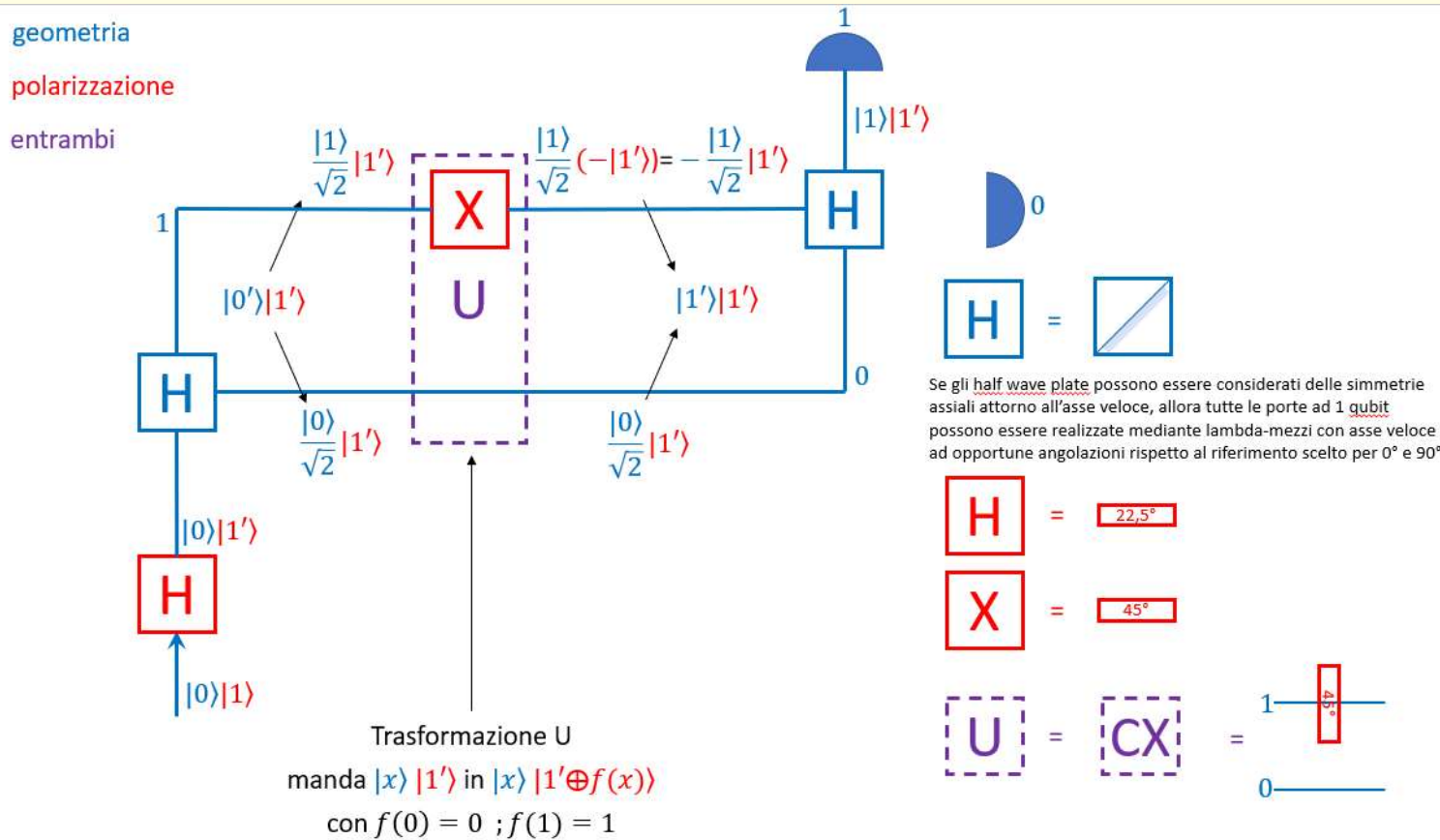
- Emerge la necessità di intraprendere una ricostruzione didattica dei contenuti della computazione e computazione quantistica, ricostruzione di cui in letteratura si trovano solo alcuni elementi iniziali. In particolare, le seguenti domande appaiono rilevanti:
  - Comprendere in che modo le rappresentazioni formali di processi coinvolti nella computazione e comunicazione quantistica possano essere integrate nella comprensione concettuale della teoria, e anzi facilitare la costruzione dei concetti stessi e, più in generale, l'acquisizione di una consapevolezza quantistica adeguata alla comprensione delle relative tecnologie;
  - Individuare gli strumenti di visualizzazione che possano essere di supporto a questo processo di acquisizione, tenuto conto dell'impossibilità di visualizzare direttamente enti e processi quantistici;
  - Individuare possibili processi epistemici atti a costituire un ecosistema di apprendimento autentico per l'appropriazione delle forme e delle pratiche di conoscenza specifiche della FQ e delle tecnologie emergenti basate su di essa.

## *Elementarizzazione* della computazione quantistica?

- Come è ben noto, elementarizzare nel modello di Duit et al. non significa semplificare, ma ricondurre ai concetti principali, agli elementi, ai principi fondamentali che sono compresi in un dominio teorico complesso.
- Cosa significa *elementarizzare* la computazione quantistica? Significa cercare di chiarire quali principi fondamentali e generali permettono agli algoritmi quantistici di operare, e di fornire vantaggi rispetto a quelli classici. Tentare di entrare nei dettagli del significato di manipolazioni formali che, talvolta, possono apparire puri stratagemmi per ottenere il risultato voluto.
- Solo a questo punto, almeno in teoria, è possibile cominciare a elaborare la struttura contenuta per l'istruzione, cioè la forma che potrebbero avere interventi e proposte didattiche che si propongano di introdurre gli studenti al dominio scientifico in questione.



- Un lavoro allo stadio iniziale: chiarificazione e ricostruzione didattica degli algoritmi di Deutsch e Grover.

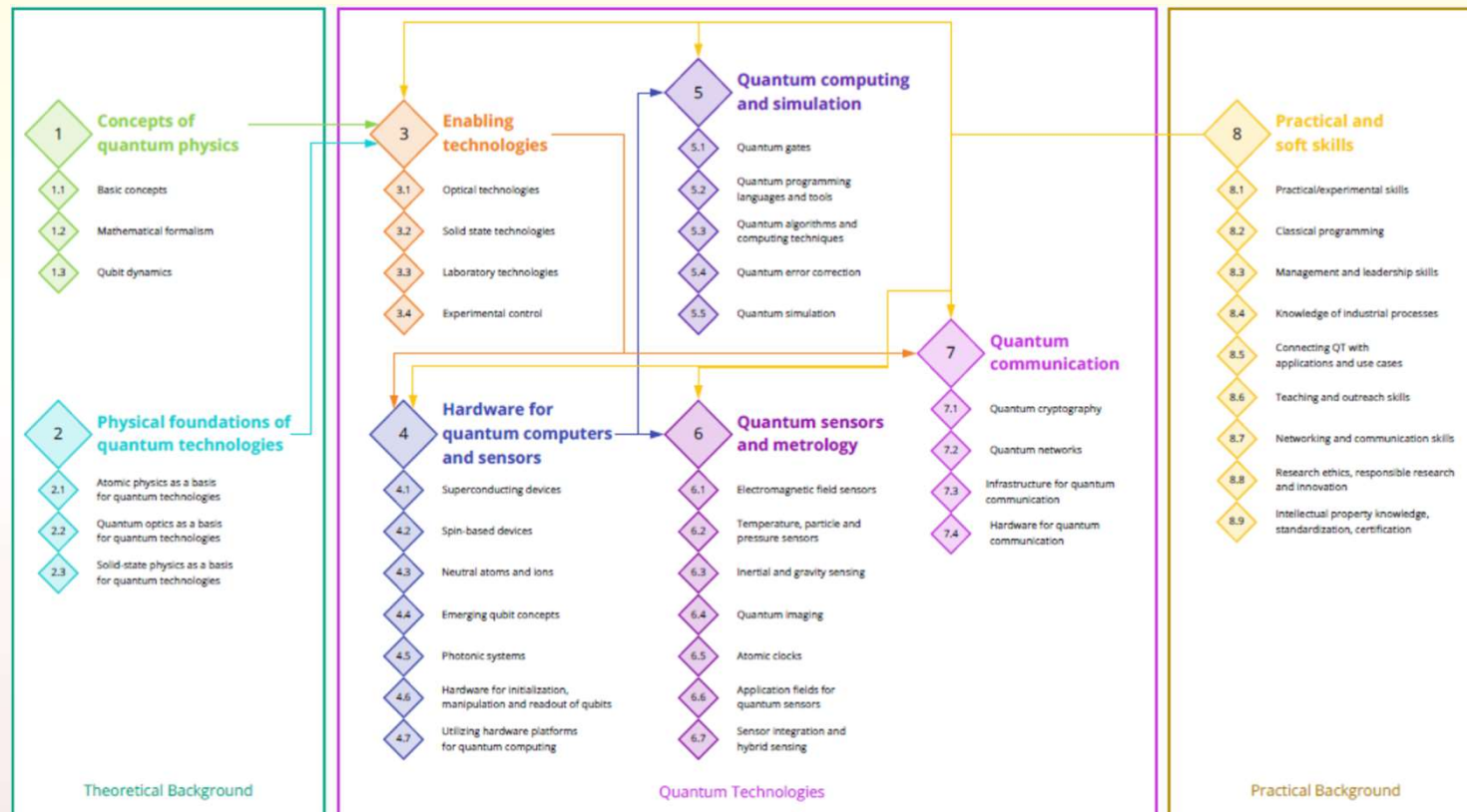


## La ricerca in didattica e l'urgenza dei tempi

- La quantum flagship procede con tempi stringenti, cui occorre adattarsi.
- Non vi è una chiara distinzione tra le iniziative propriamente didattiche e quelle di outreach, e corrispondentemente rimane vago il confine tra una reale comprensione concettuale dei temi proposti, e una più generica 'consapevolezza' della seconda rivoluzione quantistica in atto.
- Il bisogno della comunità di ricerca in didattica, di una elaborazione e progettazione preliminare, comprendente l'elaborazione di strumenti di indagine, analisi di contenuti, riflessioni comuni con i docenti, si è riversato nella nascita di progetti pilota che procedono, però parallelamente a sperimentazioni già in atto.

# 1. Partecipazione a progetti pilota della QTedu CSA

- Un punto di partenza è stata la creazione del Framework delle competenze per le tecnologie quantistiche (lavoro diretto da Rainer Müller and Franziska Greinert con la collaborazione di tutta la comunità QTedu nella forma di uno studio tipo Delphi).



107° congresso della Società Italiana di Fisica, 13-17 settembre 2021

- Fra i progetti pilota cui Pavia collabora, vi è quello per la creazione di un nuovo Quantum Concept Inventory, uno strumento per misurare l'apprendimento della meccanica quantistica con uno sguardo alle tecnologie quantistiche.



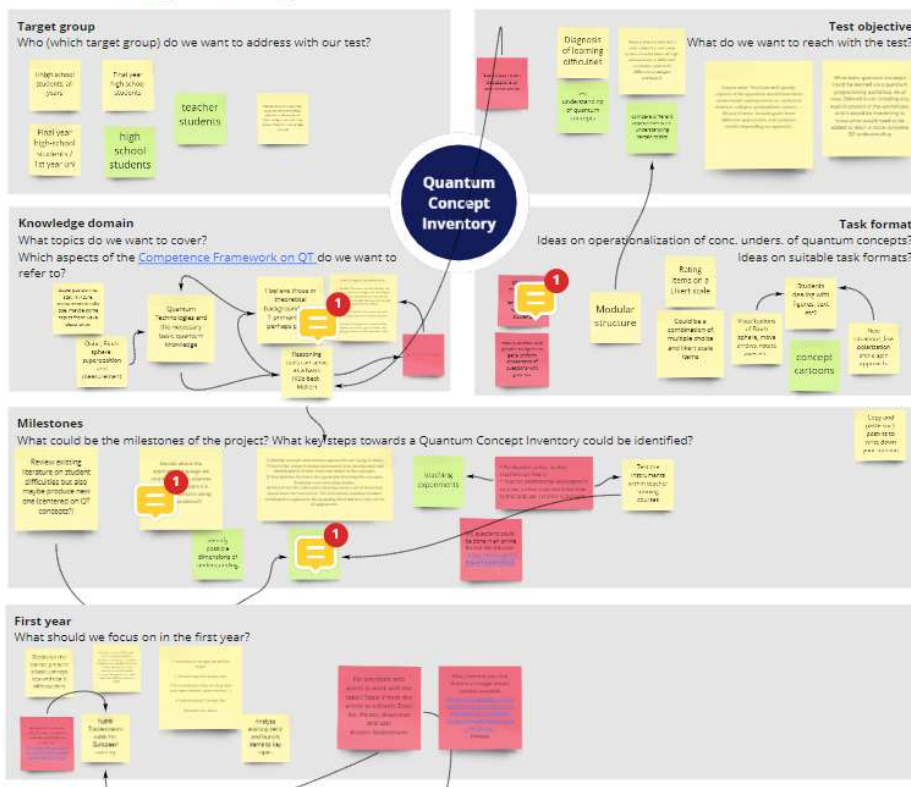
- Il progetto è diretto da P. Bitzenbauer e K. Krijtenburg-Lewerissa, e ha fra i partner italiani anche le università di Trento e dell'Insubria.

107° congresso della Società Italiana di Fisica, 13-17 settembre 2021

- Il progetto prevede una review degli item di tutti i questionari finora proposti nella letteratura, uno studio Delphi che includa docenti di scuola secondaria, universitari, ricercatori in didattica ed esperti in tecnologie quantistiche, e infine la creazione di uno strumento modulare.

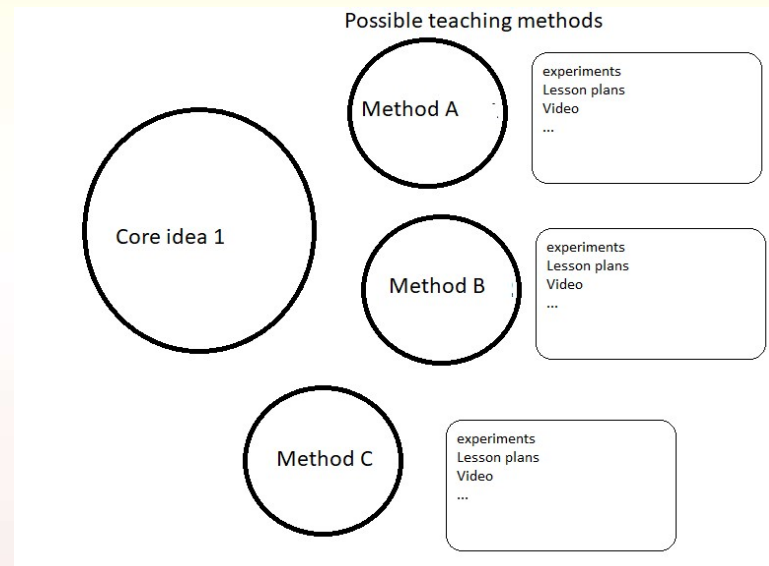
### QP Concept Test

*Brainstorming for the Pilot application*



- Attualmente il progetto si trova nella fase di review.
- Parte del lavoro viene svolto collaborativamente su piattaforma MIRO (vedi [https://miro.com/app/board/o9J\\_l8HbENg=/](https://miro.com/app/board/o9J_l8HbENg=/))
- La roadmap del progetto prevede la presentazione di una prima versione del concept inventory a luglio 2022.

- Un altro progetto pilota cui Pavia collabora è quello centrato sulla formazione insegnante sulle tecnologie quantistiche nella prospettiva della creazione di una "Quantum PCK". Il progetto è guidato da Erica Andreotti e Renaat Frans, e vi partecipa anche l'Università dell'Insubria.
- Il progetto si propone di fine di ottenere una mappatura della Conoscenza Pedagogica dei Contenuti (PCK) nell'insegnamento-apprendimento della meccanica quantistica attraverso metodi di indagine qualitativa (interviste semi-strutturate, produzione di lezioni simulate e mappe concettuali).
- Il campione di riferimento sarà costituito da insegnanti di Fisica, sia in formazione sia in servizio.



- Il terzo progetto pilota cui Pavia ha aderito è relativo al progetto di un diploma universitario "minor" in tecnologie quantistiche, coordinato da Alexandru Paler e Maria Bondani, cui collabora in Italia anche l'Università di Trento.
- Il progetto si propone di costruire e sperimentare la struttura modulare di un percorso universitario sulle tecnologie quantistiche, parallelo e aggiuntivo rispetto al corso di laurea principale dello studente (formato sperimentato in Italia dall'Università di Venezia - Ca' Foscari) accessibile, in linea di principio a studenti di corsi di laurea come chimica, informatica, ingegneria, e eventualmente altri, nella prospettiva di accelerare la formazione di una workforce quantistica.
- E' previsto il lancio di un prototipo di "minor" universitario basato sui risultati del pilot all'Università dell'Insubria nell'A.A. 2022-23.



## 2. Corso di formazione sulle tecnologie quantistiche per insegnanti in servizio

(C. Sutrini, con supporto di C. Macchiavello, G. Zuccarini, M. Malgieri)



107° congresso della Società Italiana di Fisica, 13-17 settembre 2021

## Premesse

- Nell'approcciarci alla progettazione di un percorso per insegnanti sulle tecnologie quantistiche, ci siamo resi conto immediatamente che esso non poteva essere proposto come una pura e semplice aggiunta al programma curricolare previsto nella scuola secondaria
- Infatti, il programma di Fisica dell'ultimo anno è già molto vasto, e molto difficilmente i docenti riescono ad inserirvi anche quei pochi elementi di fisica dei quanti che sono, almeno formalmente, richiesti.
- In questo senso, la richiesta di portare avanti un approfondimento del formalismo della meccanica quantistica, e aggiungervi un trattamento di temi di informazione e comunicazione quantistica poteva apparire velleitario.
- La strada che abbiamo scelto è quella di un percorso longitudinale, che possa essere iniziato anche molto prima del quinto anno del Liceo, il cui tema unificante sono le connessioni e le sovrapposizioni tra il discorso sulla fisica e il discorso sulla computazione.

## Domande di ricerca

1. I contenuti e i temi della seconda rivoluzione quantistica appaiono sufficientemente fruttuosi per gli insegnanti perché sviluppino una motivazione personale verso un'innovazione curricolare longitudinale e interdisciplinare indirizzata verso i temi dell'informazione e della computazione quantistica?
2. Quali sono gli ambienti e i metodi più appropriati per la costruzione di una comunità di pratica di insegnanti, distribuita e interconnessa attraverso la rete, riunita intorno ai temi della seconda rivoluzione quantistica?

## Il percorso didattico



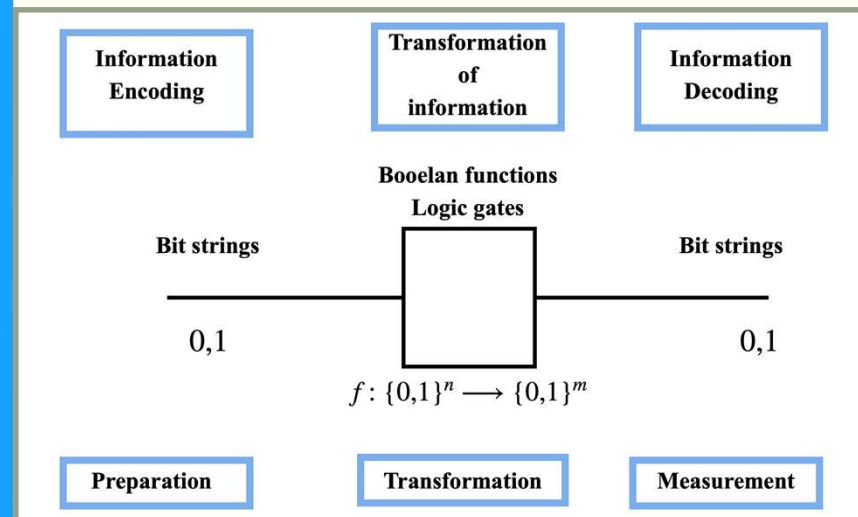
First four meetings (10 h, Oct-Nov)		Second four meetings (10 h, Feb-Mar)
<b>Introduction</b>	<b>Building</b>	<b>Development</b>
Physics problem of computation	Quantum Physics Stern - Gerlach	Entanglement
	From bit to qubit Quantum circuits	Bell's inequalities No-cloning theorem
	Quantum algorithms	Quantum protocols Dense-coding, quantum teleportation
		Cryptography

- Costruire la storia ragionata della nascita di una disciplina e delle sue applicazioni (ricerca sull'"archeologia" della computazione quantistica, anche nei lavori sulla termodinamica della computazione di Bennett, Landauer, Feynman...)
- Fornire agli insegnanti contenuti culturalmente stimolanti.
- Operare un continuo confronto tra ciò che viene proposto e i contenuti dell'insegnamento tradizionale, a partire da molto prima del quinto anno.

# Il percorso didattico



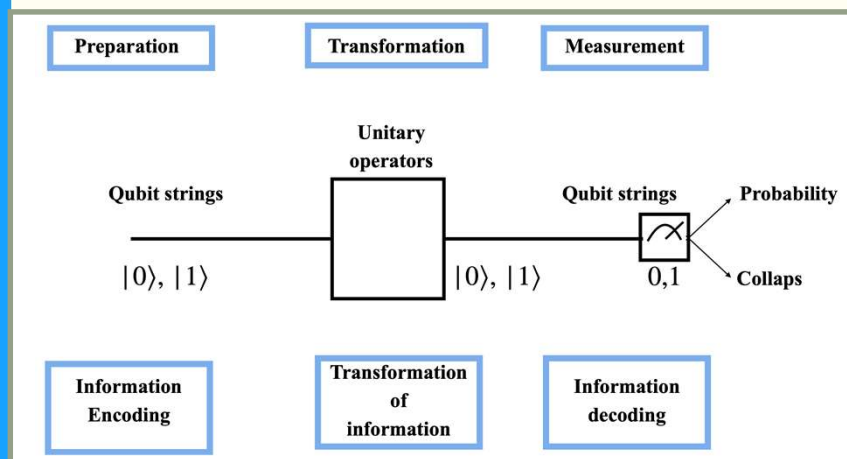
First four meetings (10 h, Oct-Nov)		Second four meetings (10 h, Feb-Mar)
<b>Introduction</b>	<b>Building</b>	<b>Development</b>
Physics problem of computation	Quantum Physics Stern - Gerlach	Entanglement
	From bit to qubit Quantum circuits	Bell's inequalities No-cloning theorem
	Quantum algorithms	Quantum protocols Dense-coding, quantum teleportation
		Cryptography



# Il percorso didattico



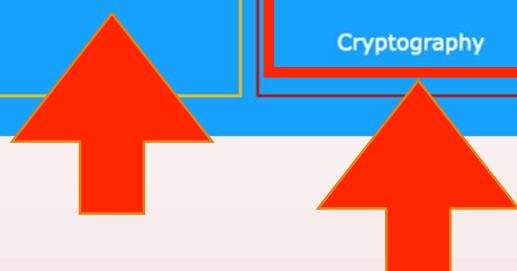
First four meetings (10 h, Oct-Nov)		Second four meetings (10 h, Feb-Mar)
<b>Introduction</b>	<b>Building</b>	<b>Development</b>
Physics problem of computation	Quantum Physics Stern - Gerlach	Entanglement
	From bit to qubit Quantum circuits	Bell's inequalities No-cloning theorem
	Quantum algorithms	Quantum protocols Dense-coding, quantum teleportation
		Cryptography



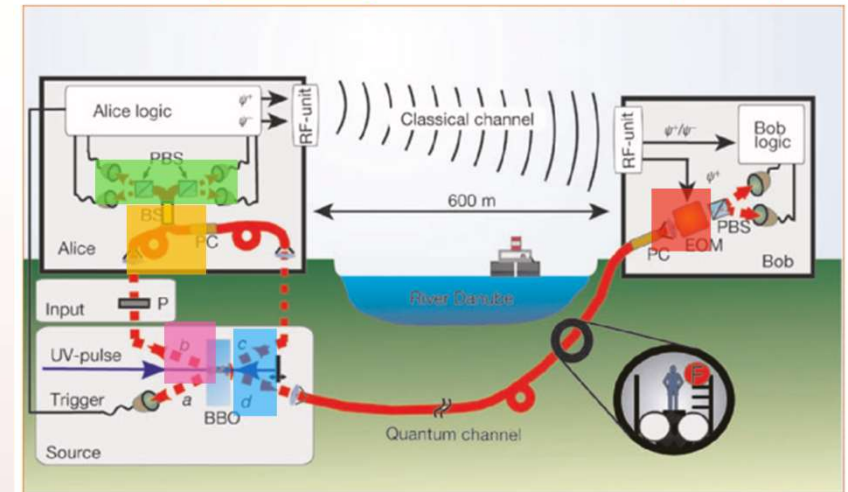
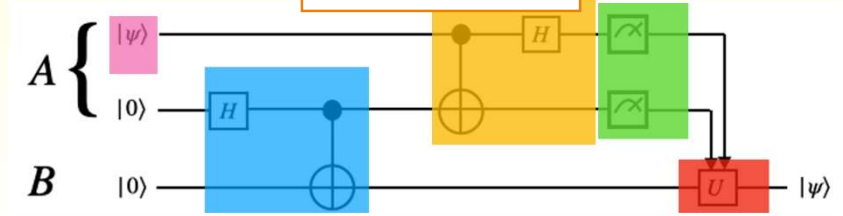
# Il percorso didattico



First four meetings (10 h, Oct-Nov)		Second four meetings (10 h, Feb-Mar)
<b>Introduction</b>	<b>Building</b>	<b>Development</b>
Physics problem of computation	Quantum Physics Stern - Gerlach	Entanglement
	From bit to qubit Quantum circuits	Bell's inequalities No-cloning theorem
	<b>Quantum algorithms</b>	Quantum protocols Dense-coding, quantum teleportation
		Cryptography



## Teleportation

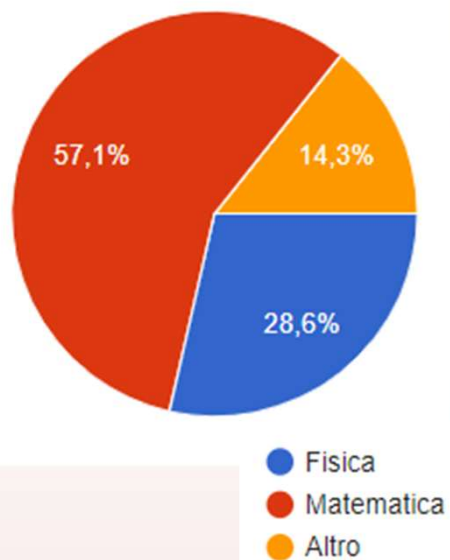


107° congresso della Società Italiana di Fisica, 13-17 settembre 2021

## Il contesto e la raccolta dei dati



Background dei partecipanti (laurea)



Primi quattro incontri 25 docenti

Questionario iniziale



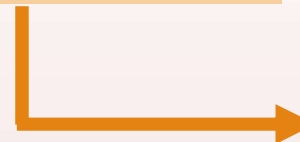
Ulteriori quattro incontri 17 docenti

Interviste ad alcuni docenti



Incontri di progettazione 9 docenti

Questionario finale, esercizi risolti



Progettazione di proposte didattiche basate sul materiale proposto affidata agli insegnanti

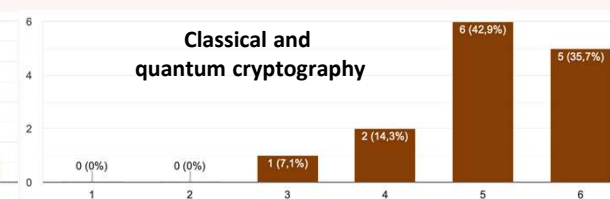
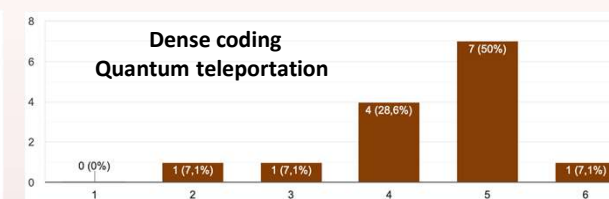
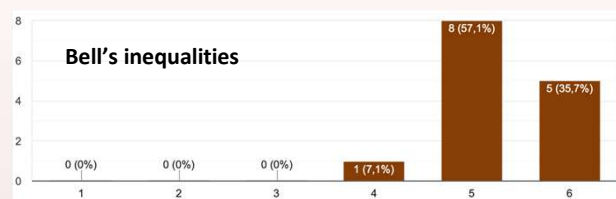
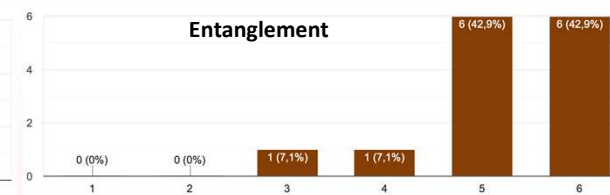
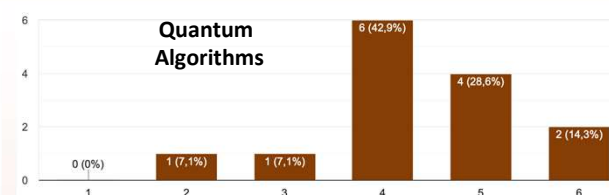
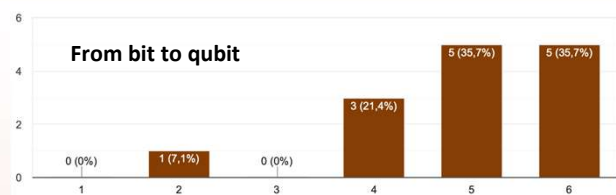
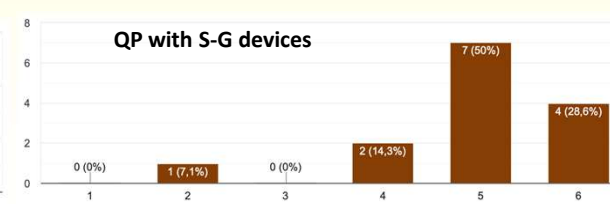
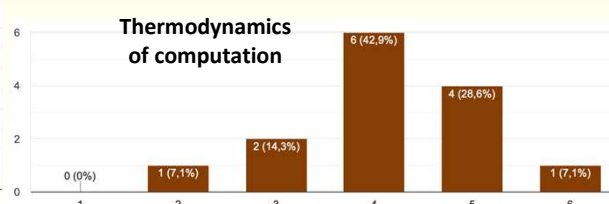
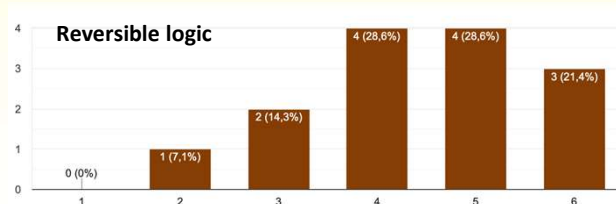
107° congresso della Società Italiana di Fisica, 13-17 settembre 2021



# Alcuni dati raccolti



## Livello di interesse per le attività



107° congresso della Società Italiana di Fisica, 13-17 settembre 2021

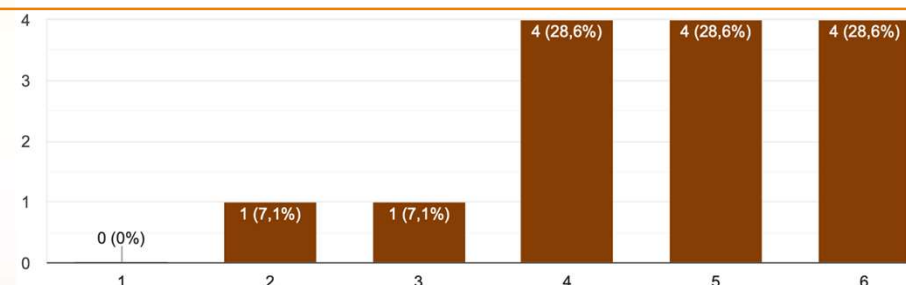
## Alcuni dati raccolti



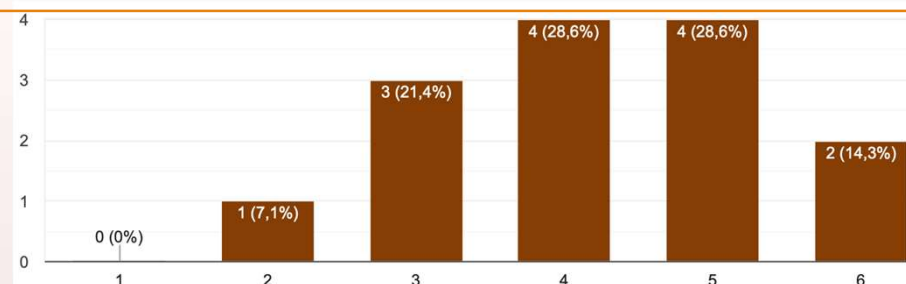
### Domanda di ricerca 1

1. I contenuti e i temi della seconda rivoluzione quantistica appaiono sufficientemente fruttuosi per gli insegnanti perché sviluppino una motivazione personale verso un'innovazione curriculare longitudinale e interdisciplinare indirizzata verso i temi dell'informazione e della computazione quantistica?

Quanto ritieni proficuo per la tua formazione aver approfondito durante il corso i temi legati alle tecnologie quantistiche?



Quanto ritieni teoricamente proficuo per la formazione dei tuoi studenti introdurre alcuni temi - trattati durante il corso - legati alle tecnologie quantistiche ?



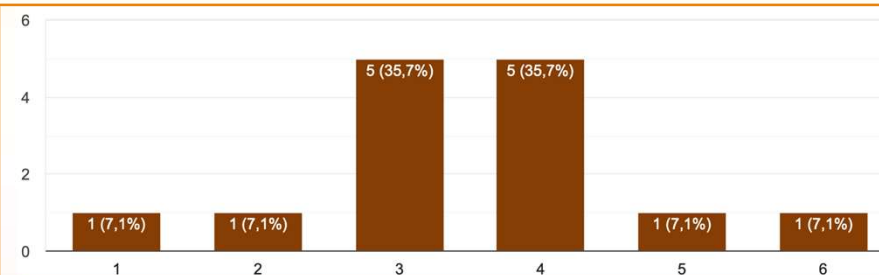
## Alcuni dati raccolti



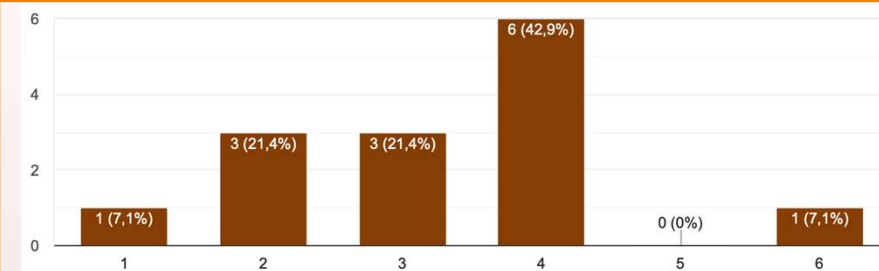
### Domanda di ricerca 1

1. I contenuti e i temi della seconda rivoluzione quantistica appaiono sufficientemente fruttuosi per gli insegnanti perché sviluppino una motivazione personale verso un'innovazione curriculare longitudinale e interdisciplinare indirizzata verso i temi dell'informazione e della computazione quantistica?

Quanto ritieni concretamente realizzabile introdurre alcuni temi legati alle tecnologie quantistiche ai tuoi studenti?



Quanto ritieni praticabile, alla luce di quanto introdotto durante il corso, l'idea di un percorso multidisciplinare (fisica, matematica, informatica) e longitudinale (sviluppato lungo l'intero ciclo dei cinque anni) basato sugli aspetti fisici della computazione?



## Alcuni dati raccolti



### Domanda di ricerca 2

2. Quali sono gli ambienti e i metodi più appropriati per la costruzione di una comunità di pratica di insegnanti, distribuita e interconnessa attraverso la rete, riunita intorno ai temi della seconda rivoluzione quantistica?



Forum di discussione totalmente deserto



<http://www-5.unipv.it/dida-pls/Materiali.htm>

<http://www-5.unipv.it/dida-pls/Forum/>

107° congresso della Società Italiana di Fisica, 13-17 settembre 2021

### 3. Corso extracurricolare per studenti di scuola secondaria

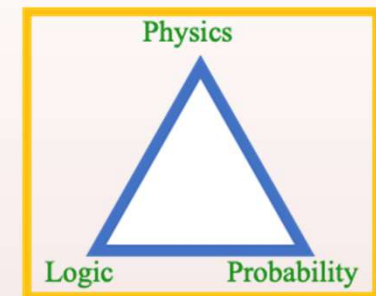
(C. Sutrini e G. Zuccharini, con supporto di C. Macchiavello, M. Malgieri)

## Scelte didattiche di base

- Percorso iniziale di meccanica quantistica basato su un approccio a due stati, già passato attraverso alcuni cicli DBR (approccio di Udine, e.g. Michelini, M. Ragazzon, R. Santi, L. and Stefanel, A. , 2004)
- Schede di lavoro con attività fondate sul tentativo di riprodurre le pratiche epistemiche degli scienziati (e.g. matematica per la modellizzazione, esperimenti mentali)
- Seconda parte sulla computazione quantistica, basata su una forte trasversalità (interplay fisica, informatica, probabilità) e il tentativo di mantenere una stretta corrispondenza fra gli oggetti fisici, le loro rappresentazioni formali, le operazioni algoritmiche in cui sono coinvolti.

## Domanda di ricerca

- E' possibile guidare gli studenti di scuola secondaria, attraverso una TLS basata sulla ricerca, a percepire sotto una prospettiva unificata la logica delle proposizioni, la fisica e la probabilità, prima dal punto di vista classico, poi da quello quantistico?



## Il contesto

- Corso svolto tra inverno e primavera 2021, interamente online
- 14 studenti per la prima parte del corso, 9 per la seconda, misti di classi quarta e quinta, liceo classico e scientifico (Galilei-Grattoni, Voghera)
- Campione autoselezionato (interesse personale per gli argomenti trattati nel Corso).
- Prima parte 10 ore, seconda parte 14 ore.

## Raccolta dati

- Test preliminare e verifica finale.
- Schede di lavoro individuali con problemi divisi in micro-passi.

## Risultati

1. La sequenza progettata si è rivelata appropriata per l'età degli studenti selezionati, sia dal punto di vista formale, sia da quello concettuale.
2. L'analisi dei problemi svolti rivela abilità significative acquisite dagli studenti, e la capacità di collegare il formalismo agli aspetti fisici.
3. Gli argomenti presentati sono stati molto apprezzati dagli studenti. Alcuni di essi hanno espresso il desiderio di entrare più in dettaglio negli aspetti applicativi.
4. Il collegamento diretto tra il qubit e lo stato quantistico di polarizzazione introdotto nell'ambito dell'approccio a due stati sembra supportare adeguatamente la comprensione di temi di computazione quantistica.
5. I risultati sono ancora in via di elaborazione ma comunque vanno intesi come preliminari, sia considerando la ristrettezza del campione, sia il fatto che si tratta di un campione autoselezionato.



## 4. Partecipazione al PCTO organizzato da Uninsubria

107° congresso della Società Italiana di Fisica, 13-17 settembre 2021

## Principali contributi del nostro gruppo al PCTO:

- Nell'organizzazione dei contenuti: porre l'attenzione su difficoltà note degli studenti e strategie efficaci per evitarle
- Nell'elaborazione degli strumenti di valutazione del percorso: proposta di item validati dalla ricerca, attenzione agli obiettivi di debunking e promozione di un modo di pensare scientifico, centralità dell'engagement in un percorso svolto solo online.
- Nella realizzazione pratica: sviluppo e svolgimento di un percorso di approfondimento sul paradosso della misura che utilizza elementi tratti dalla computazione quantistica per rappresentare lo schema di Von Neumann del processo di misura.

## Conclusioni e prospettive future

- La quantum flagship con il suo "braccio" didattico, QTedu, rappresenta la principale novità degli ultimi anni nella didattica della fisica moderna.
- E' importante lavorare come comunità perché l'orientamento delle azioni di tali progetti si mantenga vicino alla tradizione della ricerca in didattica, anziché scivolare verso obiettivi di puro e semplice outreach.
- Un ruolo centrale è giocato dalle azioni di formazione insegnante: la prospettiva di un'evoluzione della didattica nella scuola secondaria che includa aspetti legati alle tecnologie quantistiche diventerebbe velleitaria senza un sostanziale coinvolgimento di un numero significativo di insegnanti.