



UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore



CRITTOGRAFIA QUANTISTICA

Stefania Pagliara

Dipartimento di Matematica e Fisica

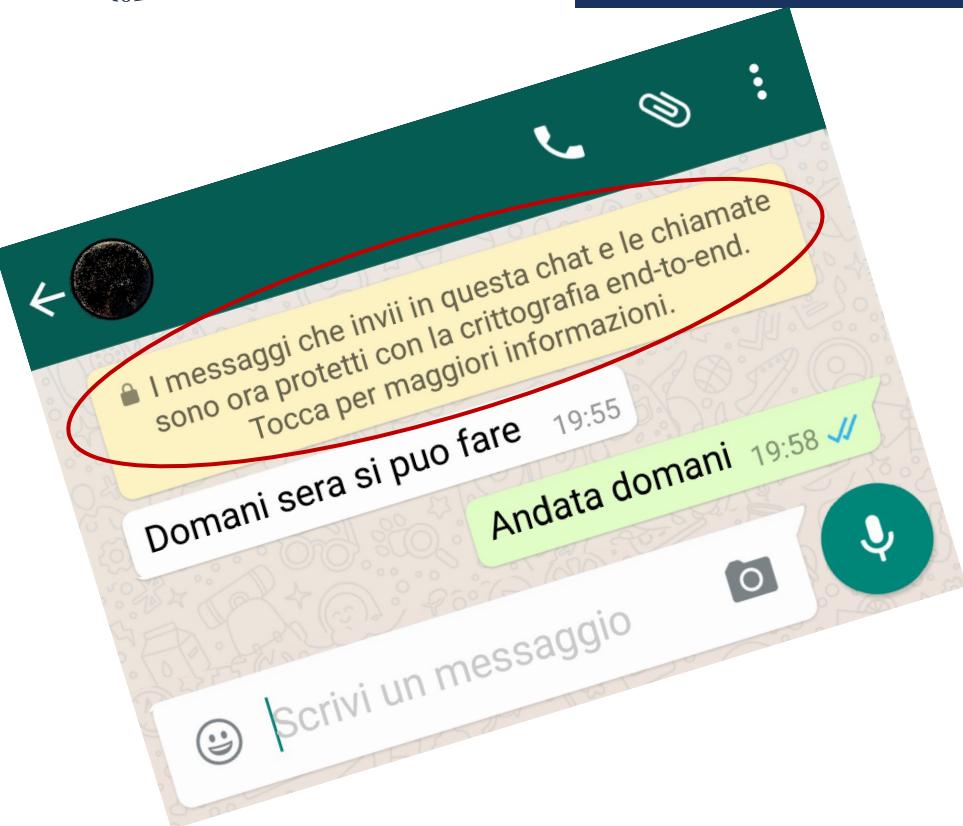


COS'È LA CRITTOGRAFIA QUANTISTICA?

La crittografia quantistica è una forma avanzata di crittografia che si serve dei principi della meccanica quantistica per garantire la sicurezza delle comunicazioni.

Essa sfrutta la trasmissione di bit tramite emissione e rilevamento di singoli fotoni con diversa polarizzazione.



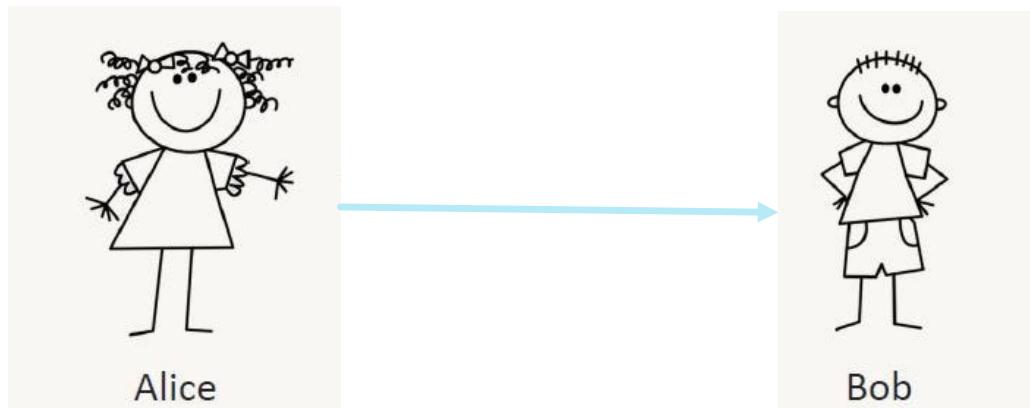


QUALI SONO I VANTAGGI?

Con l'avvento dei computer quantistici è emersa la necessità di ideare un nuovo metodo crittografico, perché pratiche come la **fattorizzazione in numeri primi** potrebbero essere violate da algoritmi quantistici. Il vantaggio di questo nuovo metodo è che consente di rilevare qualsiasi tentativo di intercettazione delle informazioni trasmesse.



COME FUNZIONA?



Alice trasforma il testo in chiaro in un testo cifrato mediante un algoritmo di codifica

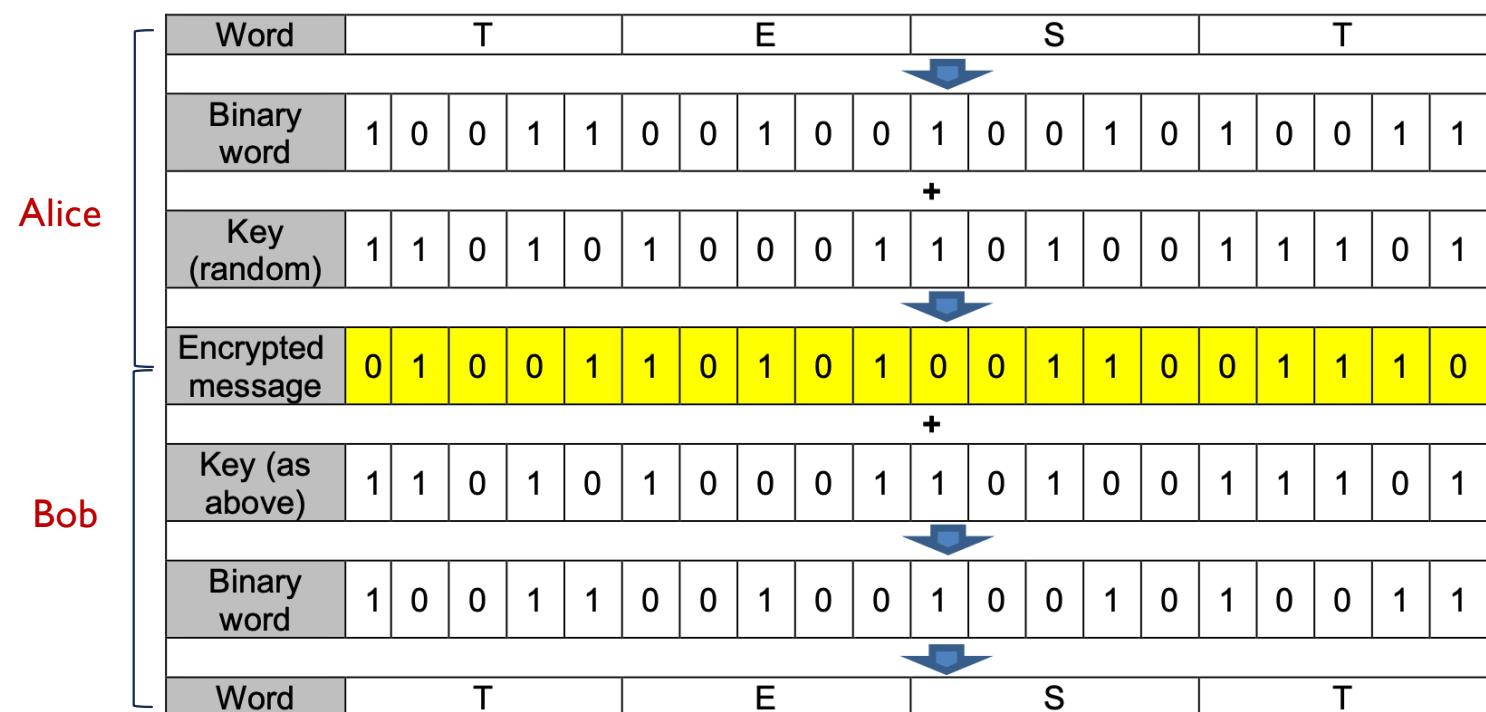
Bob estrae il testo in chiaro mediante un algoritmo di decodifica

Gli algoritmi di codifica e decodifica usano un'informazione segreta nota come chiave

CRITTOGRAFIAMO UNA PAROLA

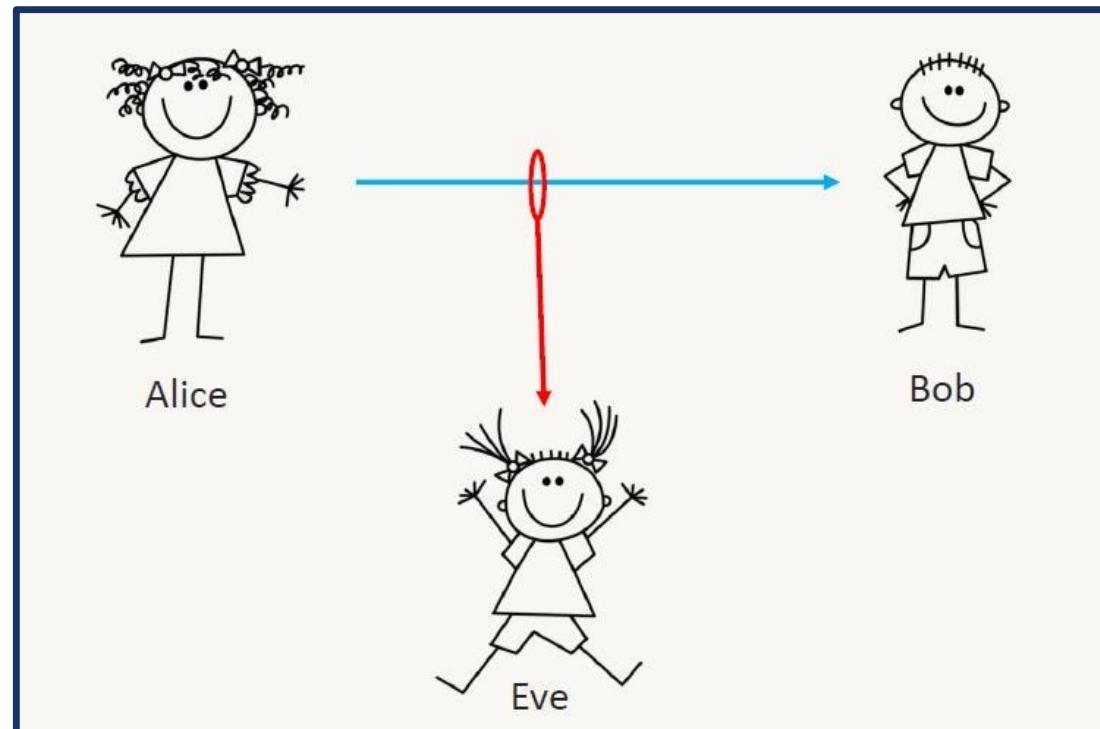
Regole:

- $0 + 0 = 0$
- $1 + 0 = 1$
- $0 + 1 = 1$
- $1 + 1 = 0$





QUANTUM KEY DISTRIBUTION



Protocollo BB84

(Charles H. Bennett e Gilles Brassard - 1984)

PRINCIPIO DI KERCKHOFF

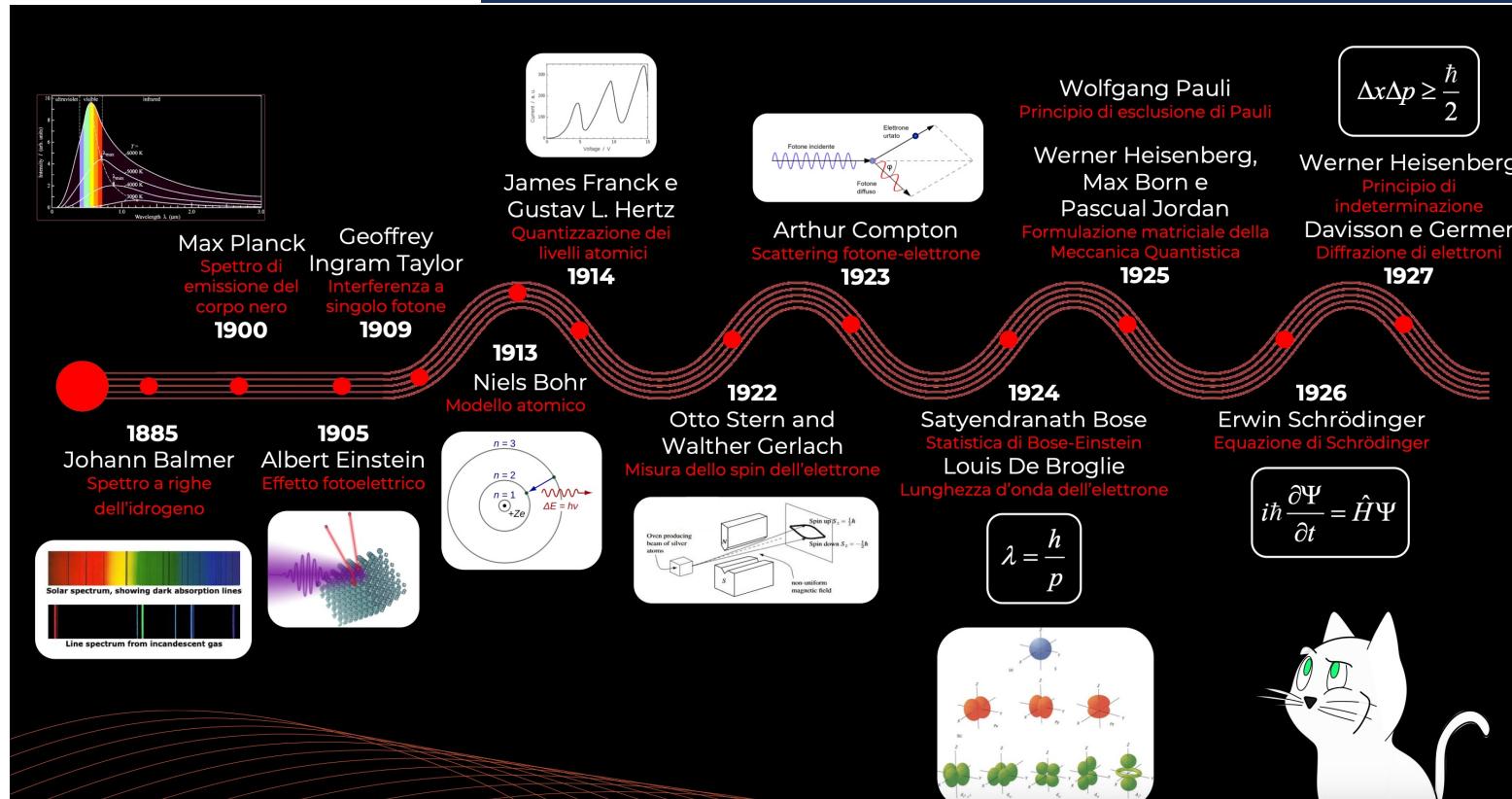
la sicurezza di un sistema crittografico non dipende dalla segretezza dell'algoritmo, ma solo da quella della sua chiave.

Come può la meccanica quantistica garantire la sicurezza della chiave?



UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

VIAGGIO NELLA MECCANICA QUANTISTICA



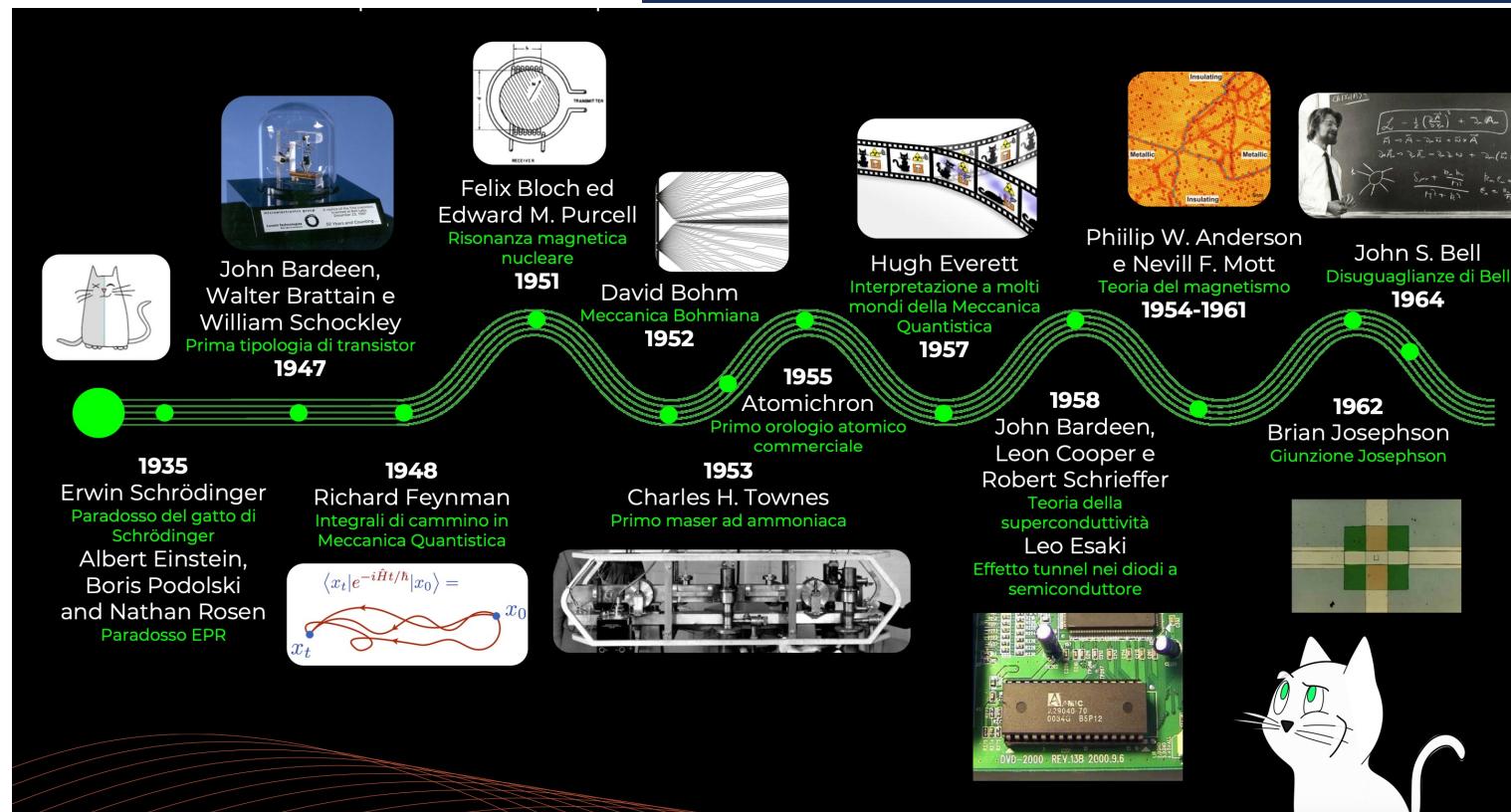
ITALIAN QUANTUM WEEKS

stefania.pagliara@unicatt.it



UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

VIAGGIO NELLA MECCANICA QUANTISTICA



LA PRIMA RIVOLUZIONE QUANTISTICA

ITALIAN QUANTUM WEEKS

stefania.pagliara@unicatt.it



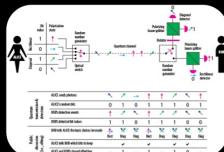
UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

VIAGGIO NELLA MECCANICA QUANTISTICA



Klaus von
Klitzing
Effetto Hall
Quantistico
1980

Richard Feynman
Simulazioni quantistiche
1981

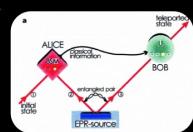


Charles Bennett e
Gilles Brassard
Protocollo crittografico BB84
1984

Charles Bennett,
Gilles Brassard,
Claude Crepeau,
Richard Jozsa,
Asher Peres,
William Wootters
Prima proposta teorica di
teletrasporto quantistico
1993



Eric Cornell,
Wolfgang Ketterle, Anton Zeilinger e
Carl Wieman
Condensati di Bose
1995

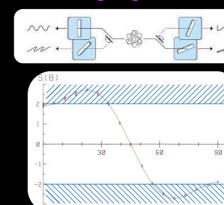


Quantum Manifesto
IBM-Quantum
experience
2016

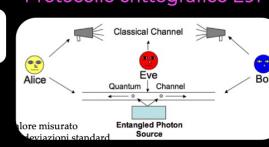
D-Wave
2011



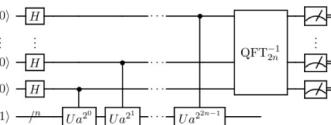
1980-93
Moungi G. Bawendi,
Louis E. Brus e
Alexei I. Ekimov
Quantum dots
(punti quantici)



1982
Alain Aspect
Violazione sperimentale
delle disugualanze di Bell



1991
Artur Ekert
Protocollo crittografico E91



1994
Peter Shor
Algoritmo di
fattorizzazione
1996

Lov Grover
Algoritmo quantistico
di ricerca



2022
John Clauser,
Alain Aspect
e Anton Zeilinger
Premio Nobel per
l'entanglement e i
lavori pionieristici sulle
tecniche quantistiche

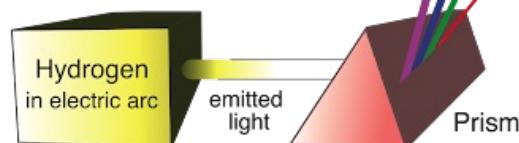
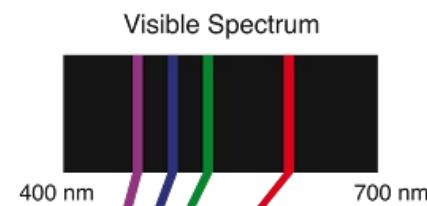
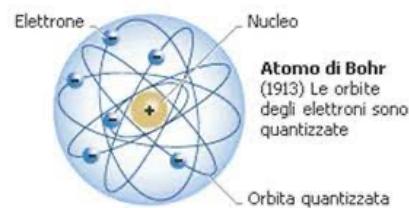
LA SECONDA RIVOLUZIONE QUANTISTICA

ITALIAN QUANTUM WEEKS

stefania.pagliara@unicatt.it



VIAGGIO NELLA MECCANICA QUANTISTICA



Dai primi esperimenti si capisce subito che:

I **corpi microscopici**, gli atomi, le molecole, gli elettroni, si comportano in modo completamente diverso da quanto previsto da tutte le leggi fisiche sino ad allora conosciute e da qualunque altra cosa si avesse esperienza.

Leggi nuove ma anche di tipo nuovo, non deterministiche nel senso classico.

«Chi non resta sbalordito dalla meccanica quantistica evidentemente non la capisce»

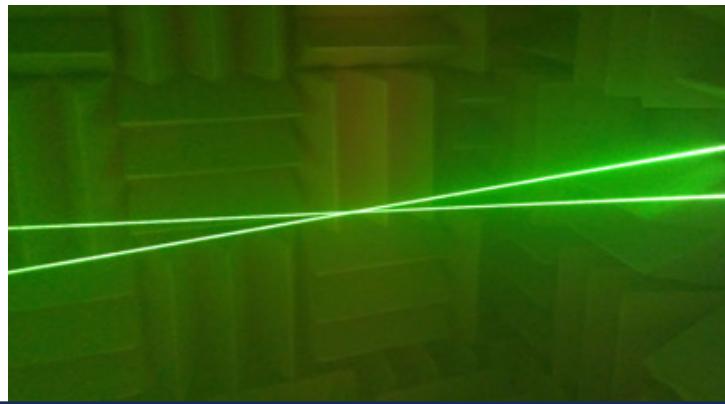
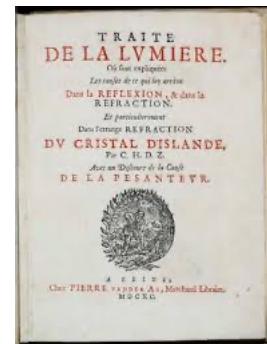
Niels Bohr, 1927



UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

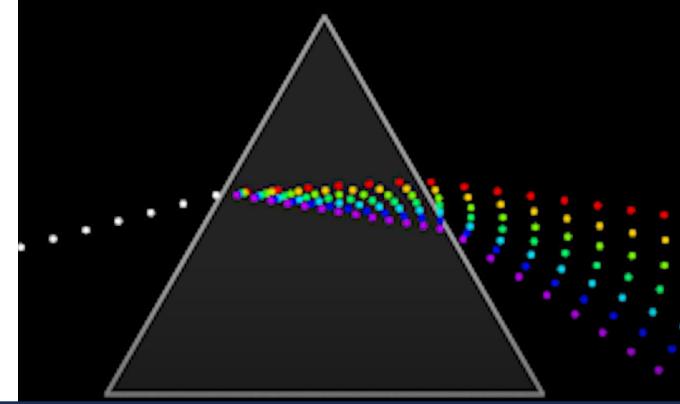
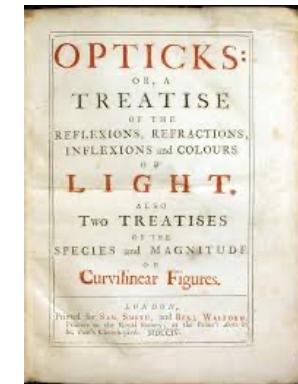
Onda

Christiaan
Huygens
1690



Particella

Isaac
Newton
1704

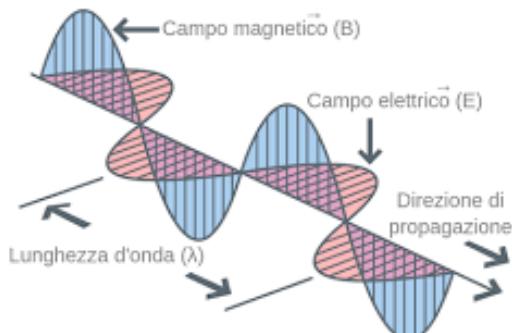


LA NATURA ONDULATORIA DELLA LUCE

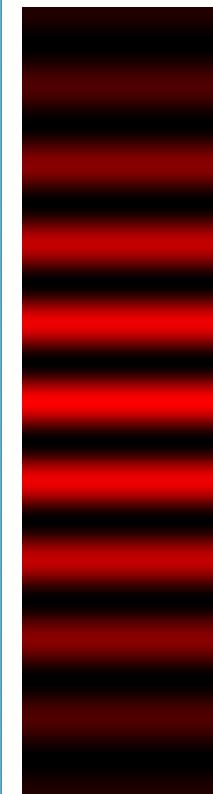
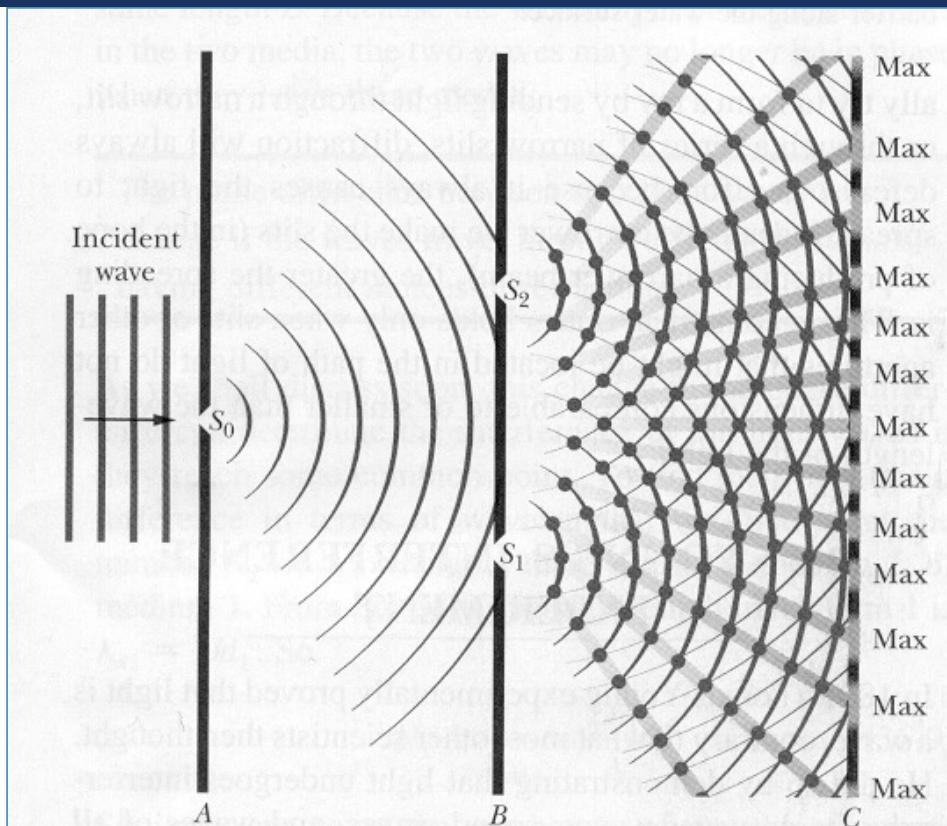
Onda

INTERFERENZA

Thomas Young
1804

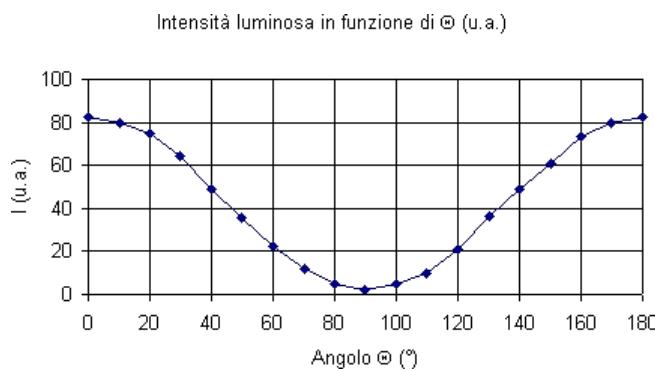
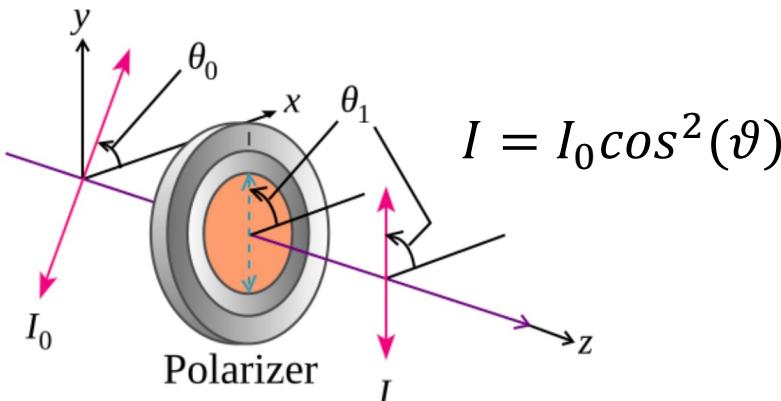


Equazioni di Maxwell, 1865

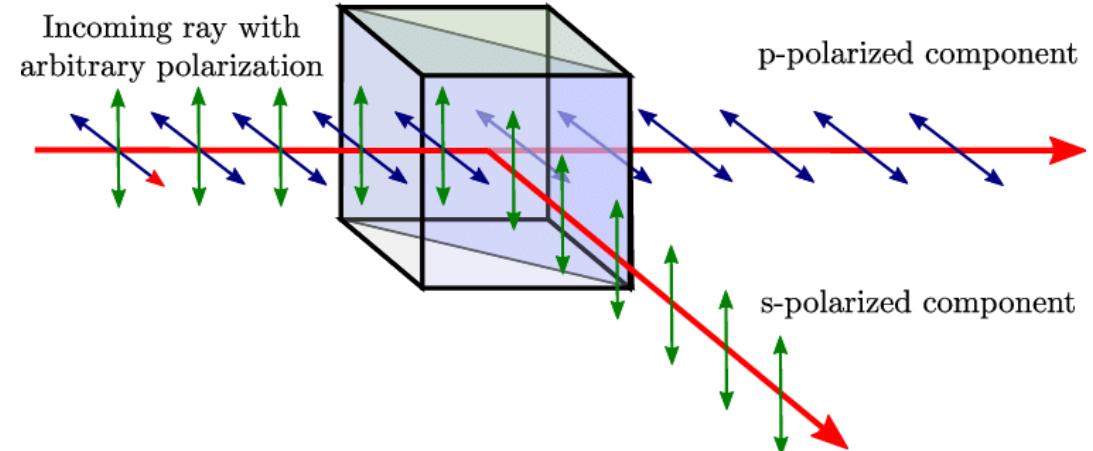




POLARIZZAZIONE DELLA LUCE



Fisica Classica:
La legge di Malus (1809)





Fotoni

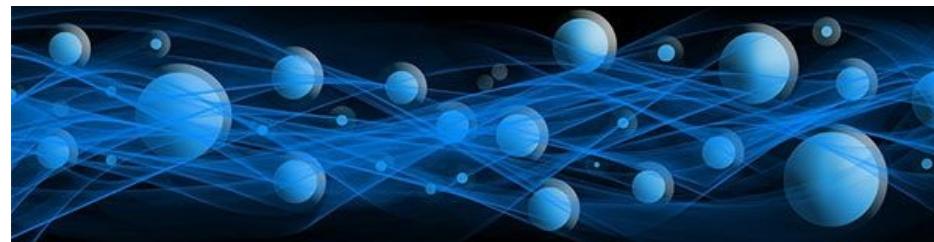
$$E = h\nu$$

$$p = \frac{h\nu}{c}$$

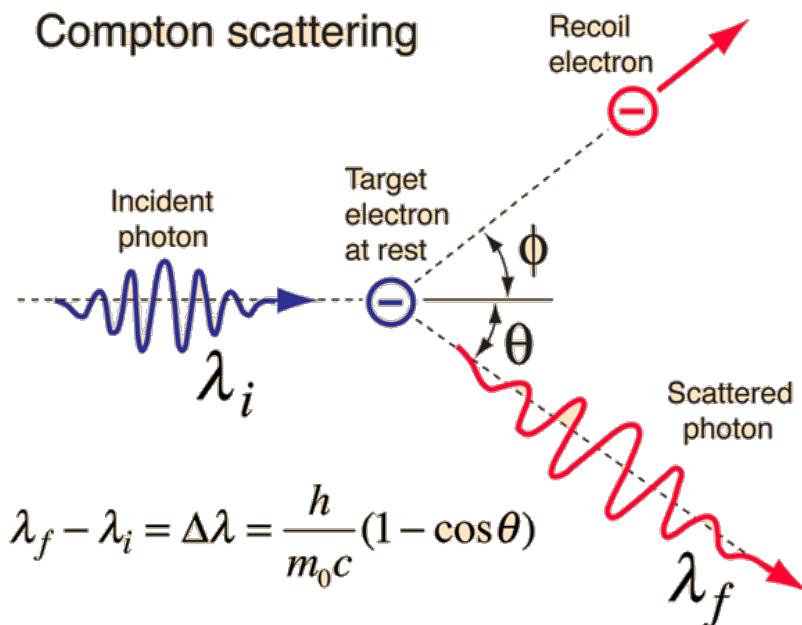
Costante di Planck

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

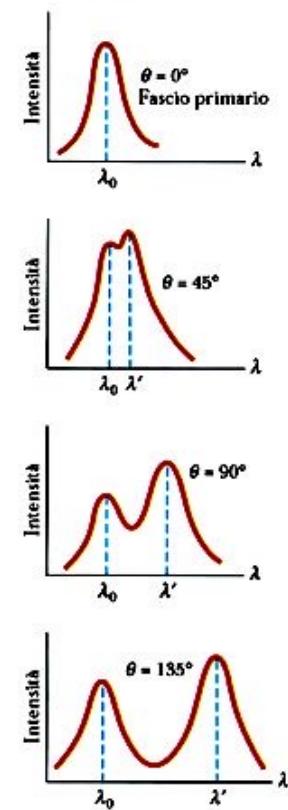
Natura corpuscolare della luce



Compton scattering



$$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta)$$





Onda e corpuscolo



Fotone

Effetto fotoelettrico,
Diffusione Compton



Natura corpuscolare della luce



$$E = h\nu$$

$$p = \frac{h\nu}{c}$$



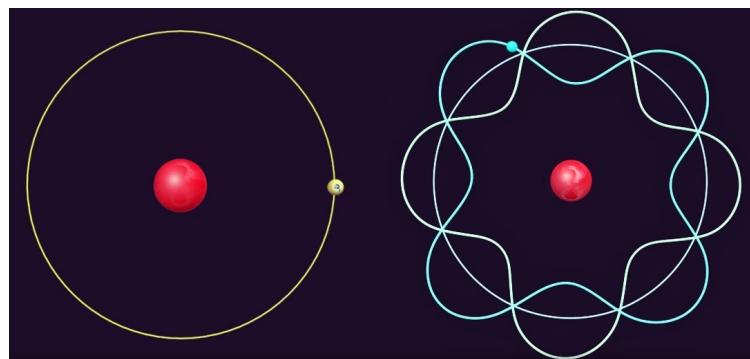
Esperimento di Young
Interferometro



Natura ondulatoria della luce



Elettroni come onde



Relazione di
de Broglie, 1923

lunghezza d'onda di de Broglie

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

Costante di Planck

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$$



Nel 1923 Louis de Broglie postulò che la materia ordinaria può avere proprietà ondulatorie, con lunghezza d'onda λ legata alla quantità di moto p come nel caso della luce:



$$P_{12} = P_1 + P_2$$

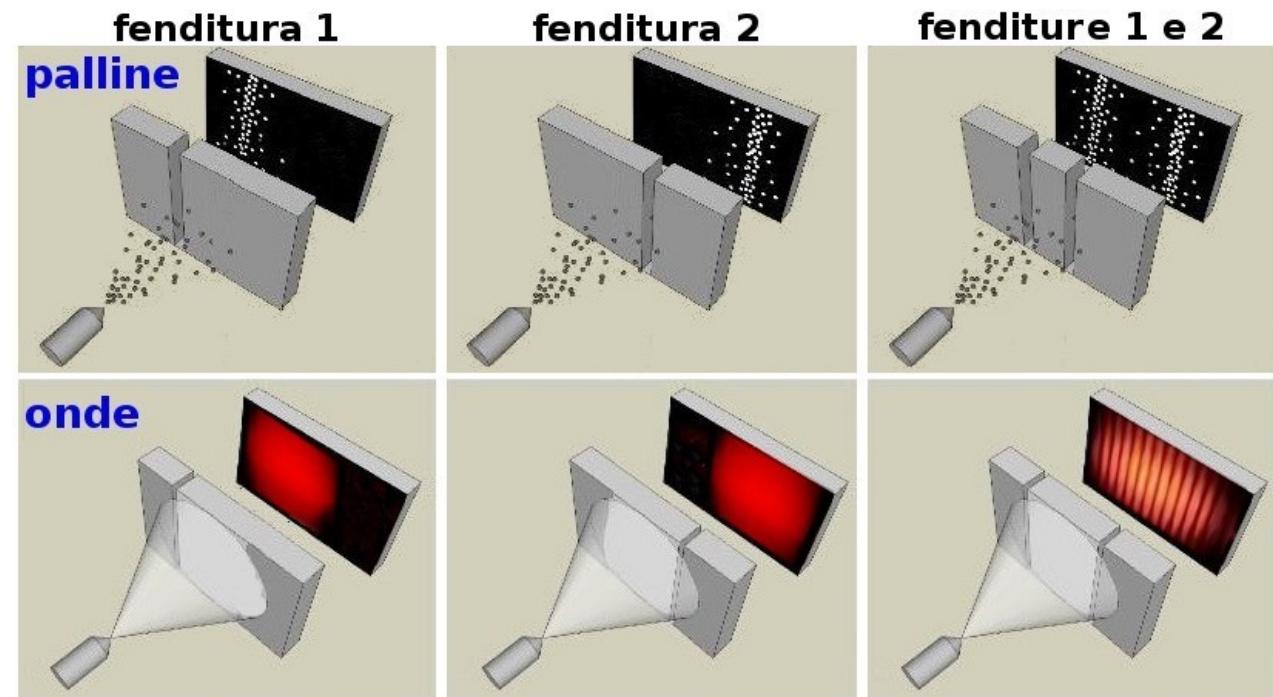
No Interferenza

$$P_{12} \neq P_1 + P_2$$

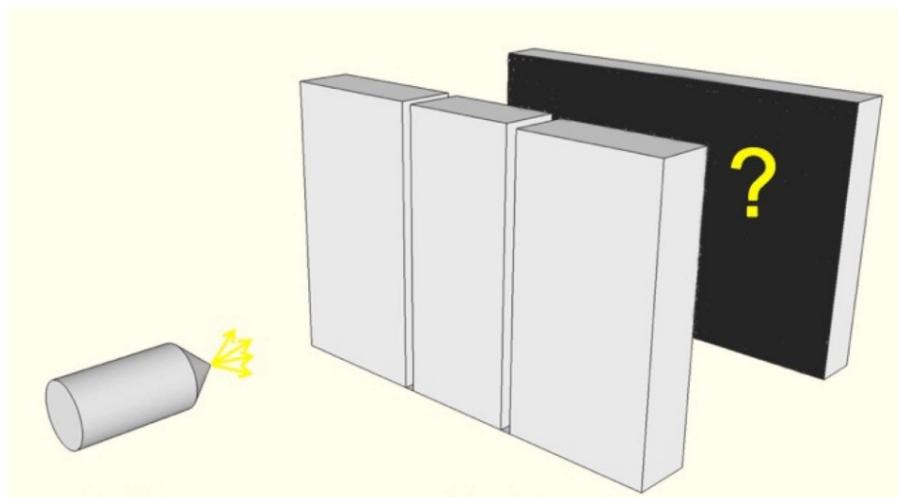
Interferenza

Domanda:

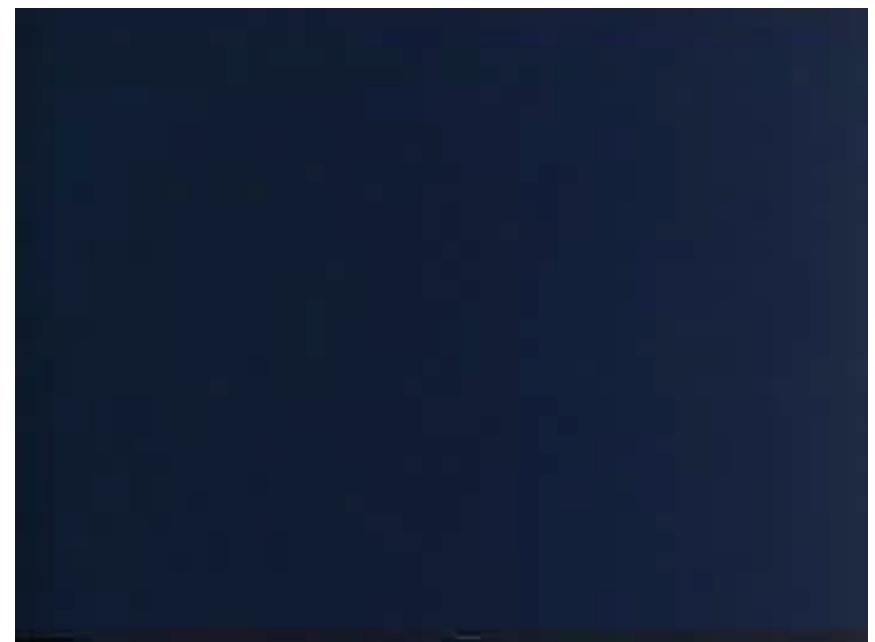
Posso utilizzare lo stesso esperimento per studiare il comportamento onda-corpuscolo?



Interferenza quantistica



Singolo elettrone-fotone

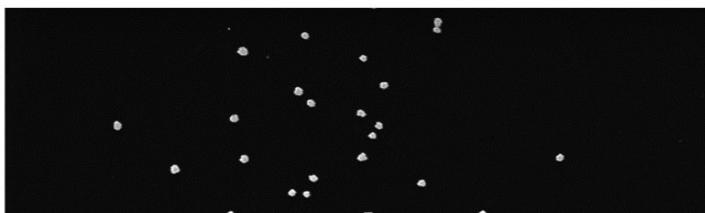


-Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli
e Giulio Pozzi (1976)
- Tonomura (1989)

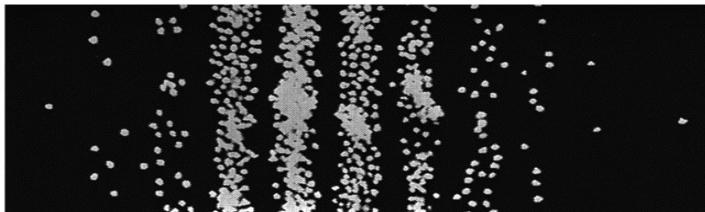


UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

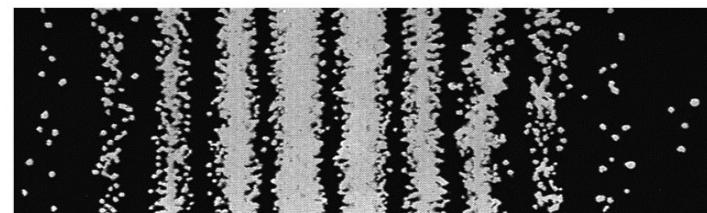
Figure di diffrazione/interferenza formate da una serie di elettroni
che attraversano due fenditure



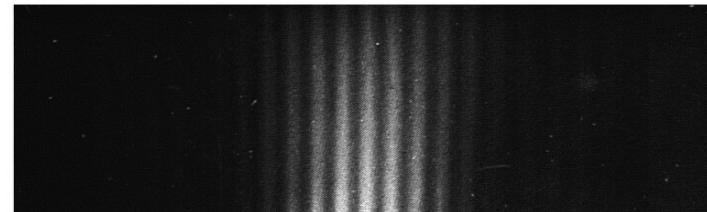
(a)



(b)



(c)



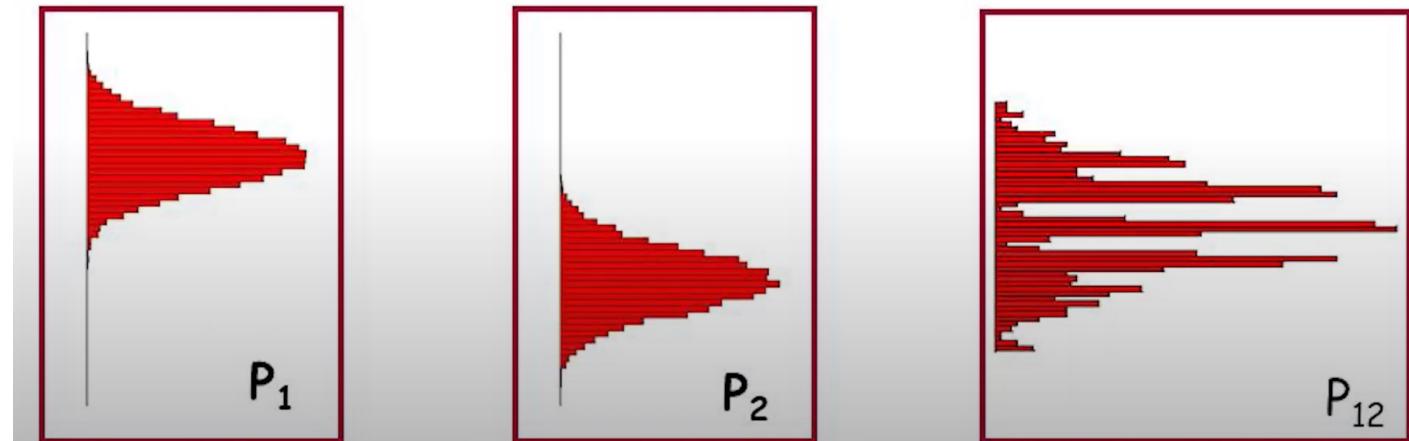
(d)

- Ciascun punto indica un elettrone che colpisce lo schermo collocato dietro le fenditure.
- Sequenza di elettroni che arriva “costruisce” la figura di interferenza.



$$P_{12} \neq P_1 + P_2$$

Interferenza



Alcune osservazioni:

- Cosa accade nella posizione dei minimi o del massimo centrale?
- Non esiste alcuna traiettoria complicata quanto si vuole che può spiegare il percorso di questi elettroni/fotoni

Tutto quello che possiamo dire è che l'elettrone, una volta emesso, colpirà lo schermo con una certa probabilità. **Non possiamo più prevedere con certezza dove esso andrà, cade il determinismo classico.**

La vera domanda è:
che giro fanno questi
elettroni/fotoni?



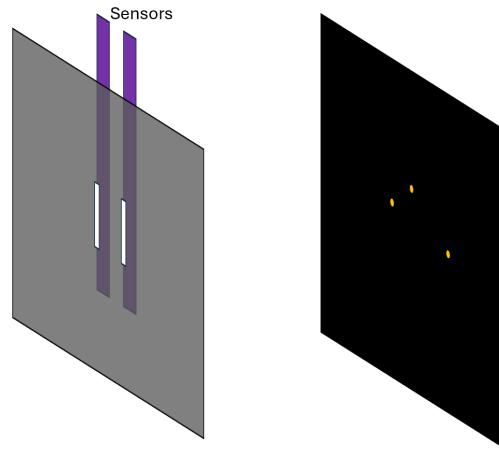
UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

$$P_{12} = P_1 + P_2$$

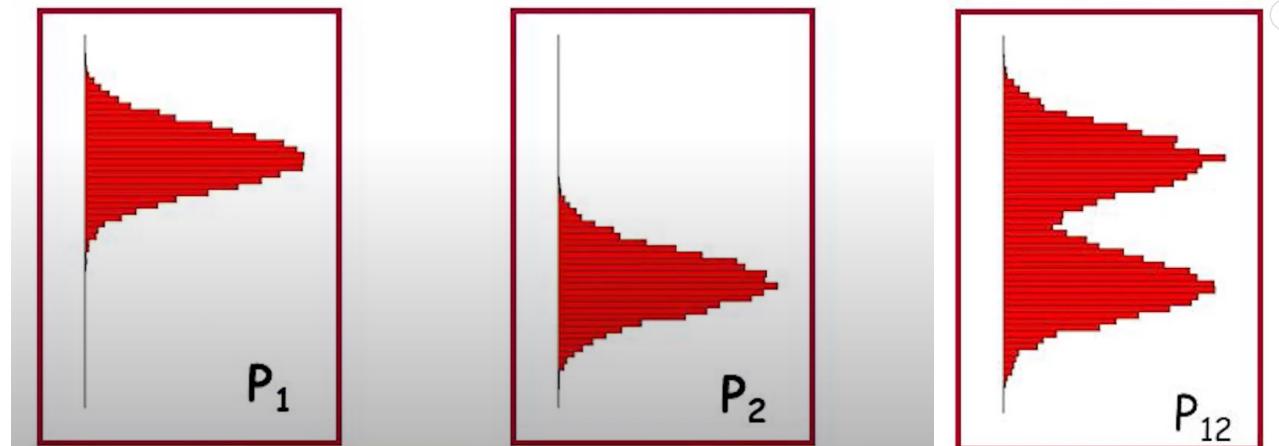
No Interferenza

Andando ad osservare gli elettroni abbiamo modificato il risultato dell'esperimento

Due concetti parziali e complementari, che non possono manifestarsi contemporaneamente



Vedo gli elettroni che passano o dalla fenditura 1 o dalla fenditura 2





PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Werner Karl
Heisenberg
1927



Nell'esperimento di interferenza non si può misurare con precisione la posizione dell'elettrone senza alterarne lo stato.

Attenzione: il principio non esprime un limite legato alla misura, ma ad una proprietà intrinseca dei sistemi fisici!



I risultati dell'esperimento delle due fenditure sono sorprendenti
ma la matematica per fortuna è la stessa delle onde classiche!

Onde classiche

$$I = |h|^2$$

h : Ampiezza dell'onda

I : Intensità

$$I_{12} = |h_1 + h_2|^2$$

Elettroni

$$P = |\varphi|^2$$

φ : Aampiezza di probabilità

P : Probabilità

$$P_{12} = |\varphi_1 + \varphi_2|^2$$

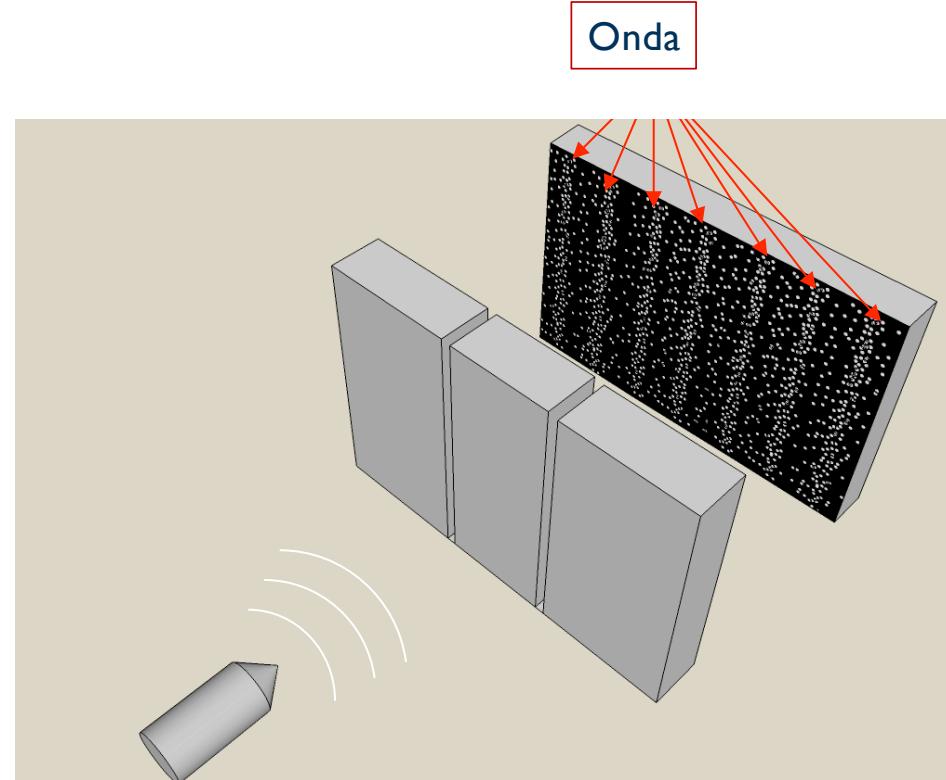


$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$$

L'ampiezza di probabilità è la somma delle due ampiezze.

L'elettrone passa simultaneamente attraverso le due fenditure.

Senza spezzarsi mai, l'elettrone arriva sullo schermo come particella.



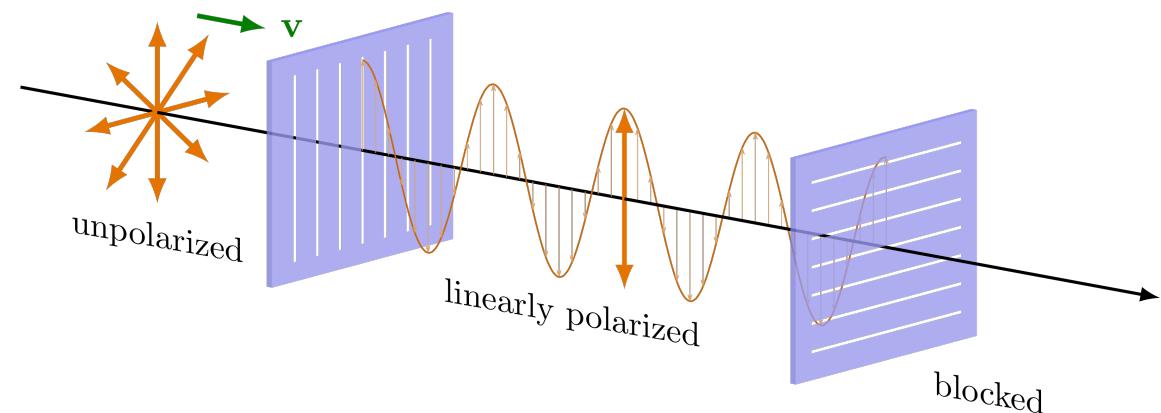
Questa è l'idea della sovrapposizione quantistica!



La sovrapposizione quantistica vale per qualunque proprietà fisica di qualunque sistema quantistico

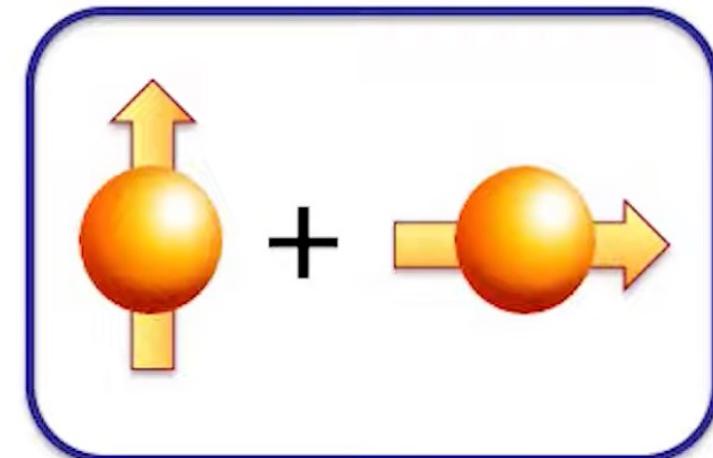
POLARIZZAZIONE DELLA LUCE

Se considero un **SINGOLO FOTONE** polarizzato orizzontalmente nel suo percorso incontra un polarizzatore verticale ha il 100% di probabilità di essere fermato. Se il polarizzatore è inclinato orizzontalmente invece esso sarà trasmesso al 100%.





Se l'angolo tra la polarizzazione del fotone e quella del polarizzatore è di 45° ci sarà **una probabilità del 50%** che esso venga trasmesso. Il risultato della misura è deterministico solo se l'angolo tra le polarizzazioni è di 0° o 90° .

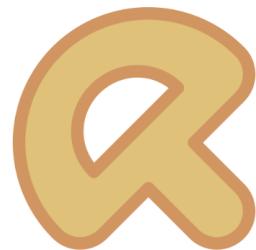


**LO STATO DI POLARIZZAZIONE DI UN FOTONE
VIENE DEFINITO IN TERMINI DI AMPIEZZA DI
PROBABILITÀ.**

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$$



UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore



TiqTaqToe

Looking for more quantum game content?

Visit [QuantumPlayed.com!](https://QuantumPlayed.com)

Quick Match

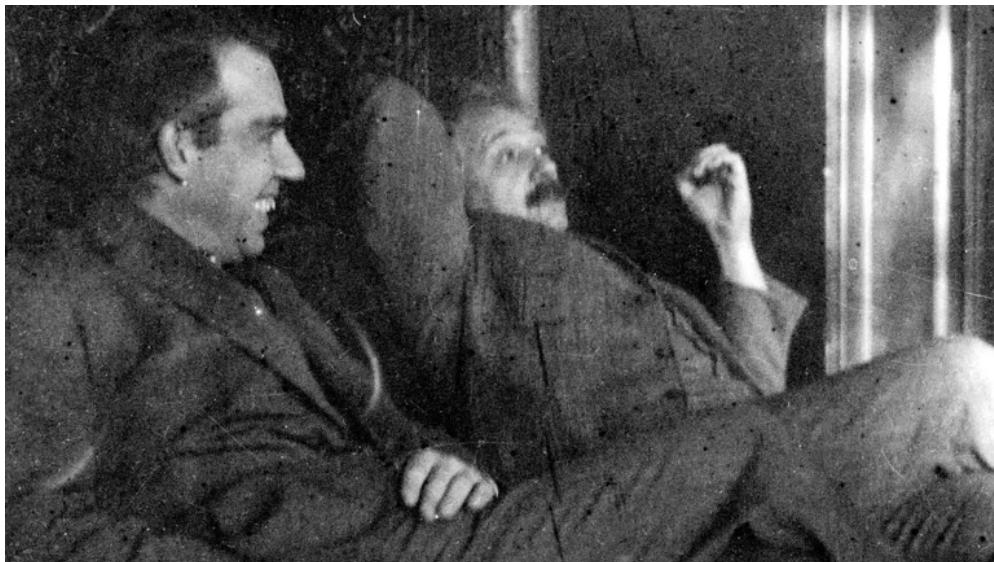
Ongoing Matches

Local Tournaments



<https://tiqtaqtoe.com/>

Goff, Allan (2006). "Quantum tic-tac-toe: A teaching metaphor for superposition in quantum mechanics". *American Journal of Physics*. 74 (11): 962–973.



Einstein dice a Niels Bohr:

“Davvero crede che la luna
non sia là quando non c'è
nessuno ad osservarla?”

I fotoni sono stati gli oggetti quantistici più utilizzati negli esperimenti dagli anni 2000 ad oggi. In modo perfetto, come mai era successo ad altre teorie nella storia della fisica, la meccanica quantistica si accorda con i dati sperimentali: in un certo senso è più vera della nostra intuizione (A. Zeilinger).



LA CRITTOGRAFIA QUANTISTICA?

La crittografia quantistica è una forma avanzata di crittografia che si serve dei principi della meccanica quantistica per garantire la sicurezza delle comunicazioni.

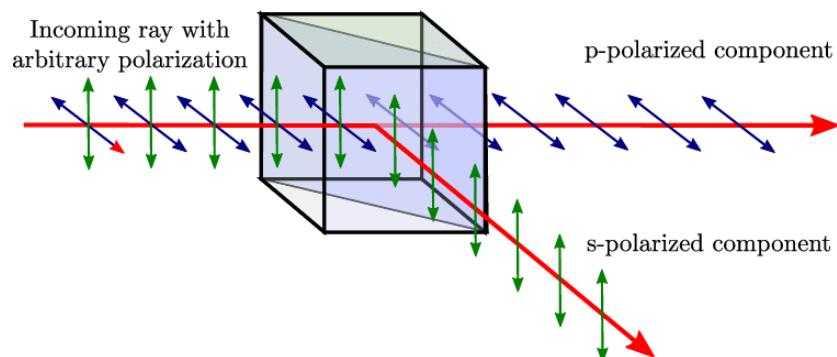
Essa sfrutta la trasmissione di bit tramite emissione e rilevamento di singoli fotoni con diversa polarizzazione.





**LO STATO DI POLARIZZAZIONE DI UN FOTONE VIENE
DEFINITO IN TERMINI DI AMPIEZZA DI PROBABILITÀ.**

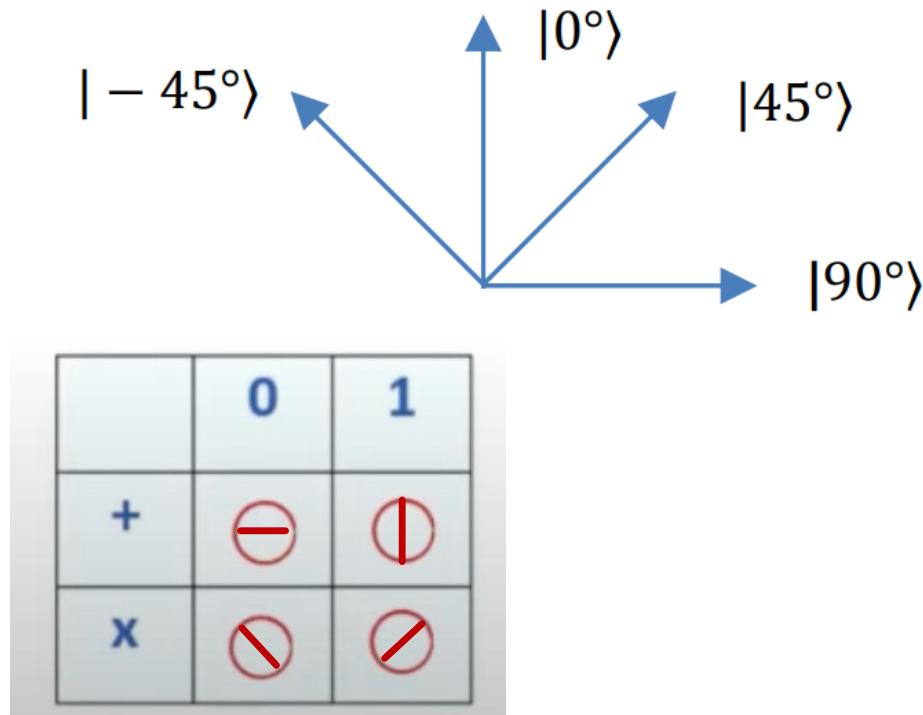
$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$$



$$|45^\circ\rangle = (|H\rangle + |V\rangle)/\sqrt{2}; \quad |-45^\circ\rangle = (|H\rangle - |V\rangle)/\sqrt{2}$$
$$|H\rangle = (|45^\circ\rangle + |-45^\circ\rangle)/\sqrt{2}; \quad |V\rangle = (|45^\circ\rangle - |-45^\circ\rangle)/\sqrt{2}$$



COME FUNZIONA: INTRODUZIONE



Mittente (Alice) e destinatario del messaggio (Bob) scelgono una base randomica ($0^\circ, 90^\circ; -45^\circ, 45^\circ$) per ogni bit che il primo intende trasmettere. Se si vuole generare una chiave crittografica anche i bit scelti dal mittente saranno casuali.

I bit sono determinati dal vettore della base della polarizzazione del fotone che si seleziona: 0 se si sceglie 0° o -45° e 1 se si sceglie 90° o 45° .

Per i principi della meccanica quantistica il risultato di una misura del bit fatta dal ricevitore è deterministico solo se la base scelta è uguale a quella del mittente. Se Alice e Bob scelgono la stessa base allora il bit mandato sarà uguale a quello ricevuto al 100% (si fa notare che le basi sono note in quanto pubbliche).

La chiave crittografica sarà composta da questi bit.



SIMULAZIONE CON APPARATO **THORLABS**

L'esperimento è una semplice simulazione del processo effettivo, perché utilizza luce classica invece dei singoli fotoni. Il setup è composto da 3 unità principali: Alice, Bob e Eve. Alice invia il messaggio, Bob lo riceve e Eve lo intercetta.

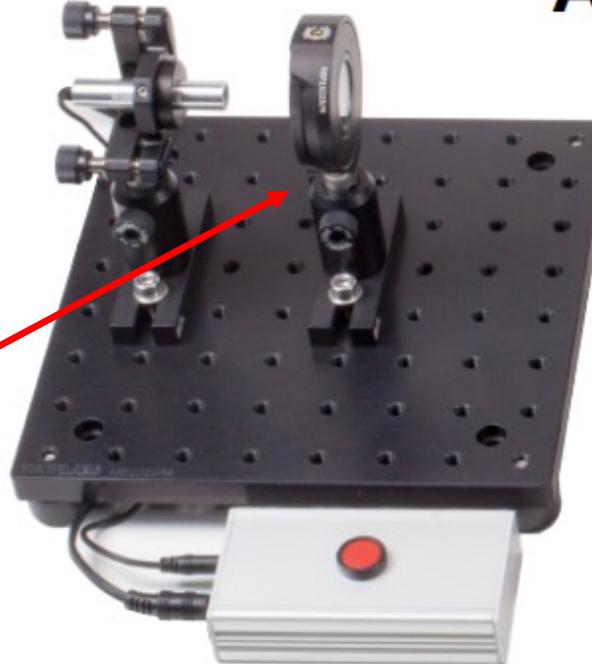
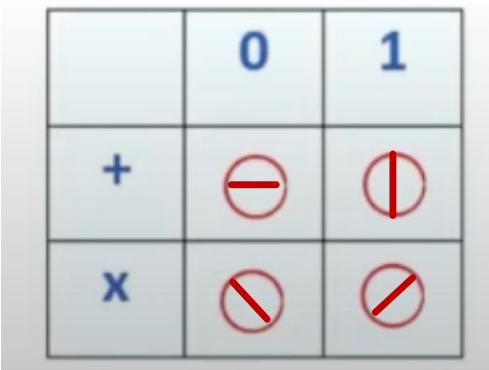
Le principali componenti dell'apparato sono $\lambda/2$ -plate, polarizing beamsplitter, laser e sensori.





ALLESTIMENTO: ALICE

L'unità Alice è composta da un laser ed una $\lambda/2$ -plate graduata da -45° a 90° , come rappresentato in figura.

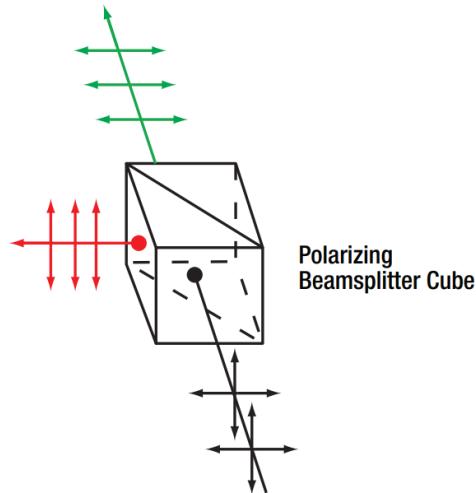


Alice

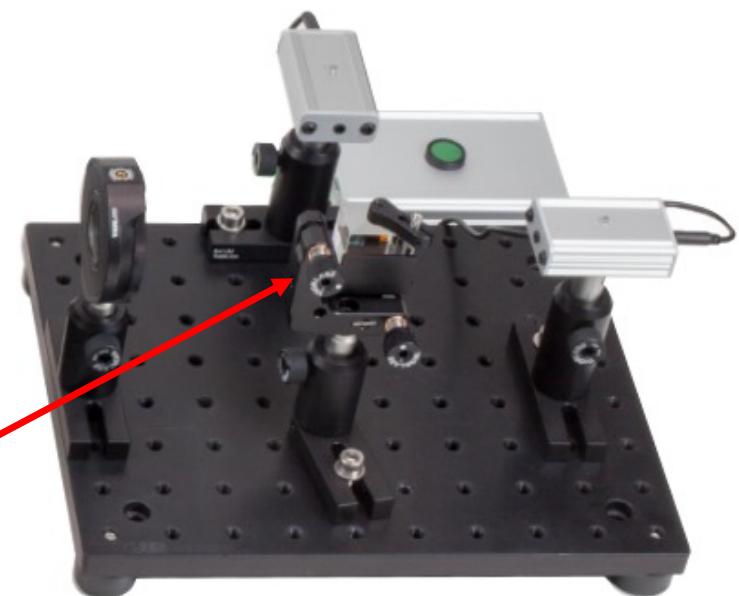


L'unità Bob è composta una $\lambda/2$ -plate graduata da 0° a 45° , un polarizing beamsplitter e due sensori, come rappresentato in figura.

Il polarizing beamsplitter riflette di 90° la luce incidente polarizzata verticalmente, e lascia passare quella polarizzata orizzontalmente.



Bob





Protocollo BB84

Bit inviato da Alice							
Base di Alice							
Alice invia							
Base di Bob							
Fotone ricevuto da Bob	.						
Bit ricevuto da Bob							
Stessa base?							
Alice conserva bit							
Bob conserva bit							
Bit di verifica (scelti arbitrariamente)							
CHIAVE							

	0	1
+	—	—
x	—	—

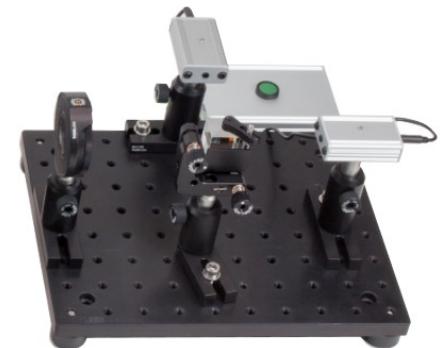


UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

Bit inviato da Alice	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1
Base di Alice	+	+	×	×	+	+	+	×	+	+	×	+
Alice invia	⊕	⊖	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕	⊖	⊖	⊖	⊖	⊕

	0	1
+	⊖	⊕
×	⊕	⊖

Bob





COME FUNZIONA: BIT E BASI, CASI POSSIBILI

Alice		Bob		
State	Basis, Bit	Chosen Basis	State	Measured Bit
$ 0^\circ\rangle$	$+, 0$	+	$\hat{M}_+ 0^\circ\rangle = 0^\circ\rangle$	0
		\times	$\hat{M}_x 0^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} 45^\circ\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} -45^\circ\rangle$	0 or 1
$ 90^\circ\rangle$	$+, 1$	+	$\hat{M}_+ 90^\circ\rangle = - 90^\circ\rangle$	1
		\times	$\hat{M}_x 90^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} 45^\circ\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} -45^\circ\rangle$	0 or 1
$ 45^\circ\rangle$	$\times, 1$	+	$\hat{M}_+ 45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} 0^\circ\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 90^\circ\rangle$	0 or 1
		\times	$\hat{M}_x 45^\circ\rangle = 45^\circ\rangle$	1
$ -45^\circ\rangle$	$\times, 0$	+	$\hat{M}_+ -45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} 0^\circ\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 90^\circ\rangle$	0 or 1
		\times	$\hat{M}_x -45^\circ\rangle = - -45^\circ\rangle$	0

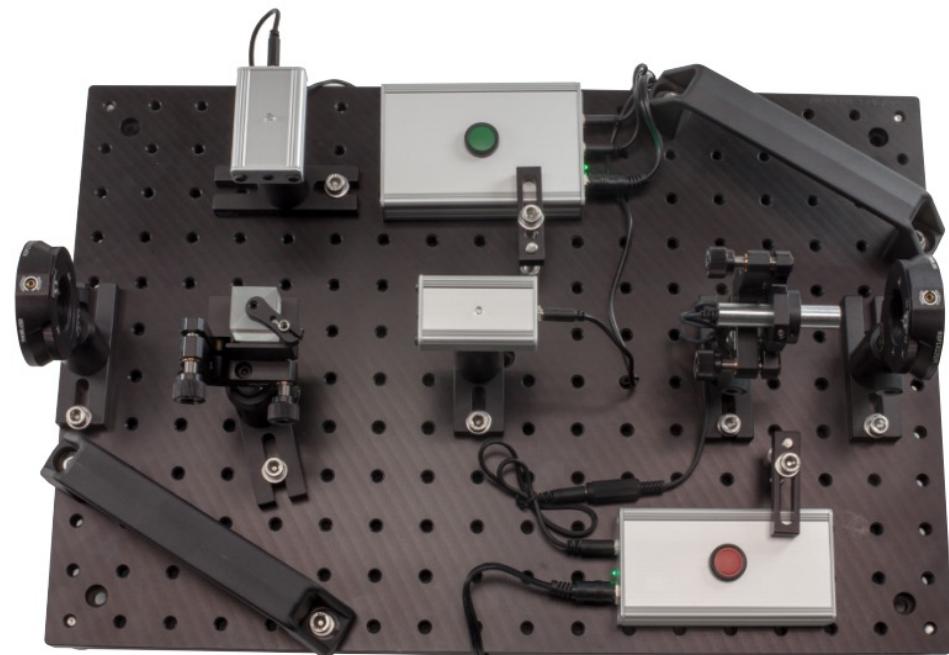
- Bases of Alice & Bob Identical \rightarrow Bit can be Used as Key Bit
- Bases of Alice & Bob Not Identical \rightarrow Measurement is Discarded



UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

ALLESTIMENTO: EVE

Eve è composta di due parti: la prima allestita come Bob e la seconda come Alice; come rappresentato in figura.



Eve



INTERCETTAZIONE DEL MESSAGGIO

A questo punto se un terzo (Eve) intercettasse il messaggio per la creazione della chiave, una volta ricevuto il bit, non saprebbe la base scelta dal mittente. Dovrebbe quindi selezionare casualmente una base e spedire nuovamente il bit ricevuto.

Esiste quindi una probabilità del 25% che Eve venga scoperta.

Alice		Eve			Bob		
Basis, Bit	State	Basis	State	State Sent	Basis	State	Measured Bit
+, 0	0°)	+	$\hat{M}_+ 0^\circ\rangle = 0^\circ\rangle$	0°)	+ $\hat{M}_+ 0^\circ\rangle = 0^\circ\rangle$	0	
		×	$\hat{M}_x 0^\circ\rangle = \frac{ 45^\circ\rangle}{\sqrt{2}} - \frac{ -45^\circ\rangle}{\sqrt{2}}$	45° or -45°)	×	$\hat{M}_x 0^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} 45^\circ\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} -45^\circ\rangle$	0 or 1
+, 1	90°)	+	$\hat{M}_+ 90^\circ\rangle = - 90^\circ\rangle$	90°)	+ $\hat{M}_+ 90^\circ\rangle = - 90^\circ\rangle$	1	
		×	$\hat{M}_x 90^\circ\rangle = \frac{ 45^\circ\rangle}{\sqrt{2}} + \frac{ -45^\circ\rangle}{\sqrt{2}}$	45° or -45°)	×	$\hat{M}_x 90^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} 45^\circ\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} -45^\circ\rangle$	0 or 1



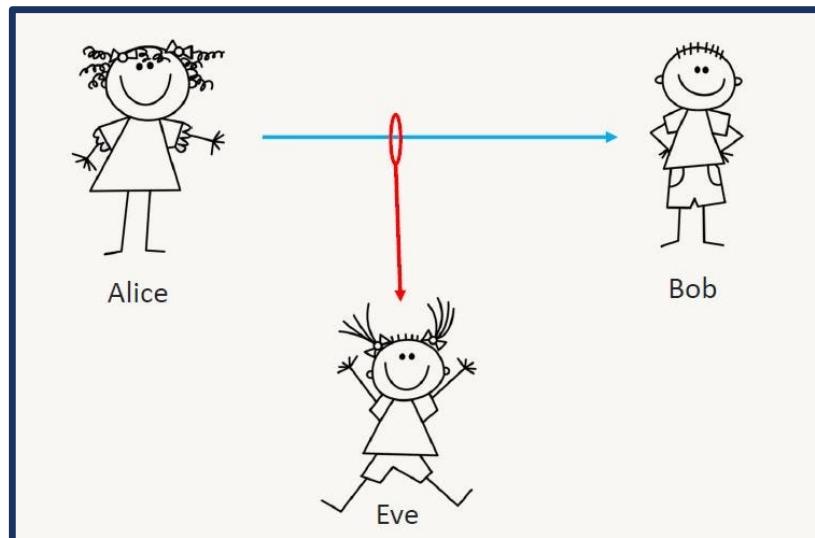
INTERCETTAZIONE DEL MESSAGGIO

- Bases of Alice & Bob & Eve Identical → Eve is Not Noticed
- Bases of Alice & Bob Not Identical → Measurement is Discarded Anyway
- 0/1 Bases of Alice & Bob Identical; Bits are Incidentally Identical, Eve is Not Noticed
- 0/1 Bases of Alice & Bob Identical; Bits Incidentally Differ → Eve is Uncovered

x, 1	45°)	+	$\hat{M}_+ 45^\circ\rangle = \frac{ 0^\circ\rangle}{\sqrt{2}} - \frac{ 90^\circ\rangle}{\sqrt{2}}$	0° or 90°)	+ x	$\hat{M}_+ 0^\circ\rangle = 0^\circ\rangle$ or $\hat{M}_+ 90^\circ\rangle = - 90^\circ\rangle$	0 1
						$\hat{M}_x 0^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} 45^\circ\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} -45^\circ\rangle$ or $\hat{M}_x 90^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} 45^\circ\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} -45^\circ\rangle$	0 or 1 0 or 1
x, 0	-45°)	x	$\hat{M}_x 45^\circ\rangle = 45^\circ\rangle$	45°)	+ x	$\hat{M}_+ 45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} 0^\circ\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 90^\circ\rangle$	0 or 1
					$\hat{M}_x 45^\circ\rangle = 45^\circ\rangle$	1	
	-45°)	+	$\hat{M}_+ -45^\circ\rangle = \frac{ 0^\circ\rangle}{\sqrt{2}} + \frac{ 90^\circ\rangle}{\sqrt{2}}$	0° or 90°)	+ x	$\hat{M}_+ 0^\circ\rangle = 0^\circ\rangle$ or $\hat{M}_+ 90^\circ\rangle = - 90^\circ\rangle$	0 1
						$\hat{M}_x 0^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} 45^\circ\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} -45^\circ\rangle$ or $\hat{M}_x 90^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} 45^\circ\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} -45^\circ\rangle$	0 or 1 0 or 1
	-45°)	x	$\hat{M}_x -45^\circ\rangle = - -45^\circ\rangle$	-45°)	+ x	$\hat{M}_+ -45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} 0^\circ\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 90^\circ\rangle$	0 or 1
					$\hat{M}_x -45^\circ\rangle = - -45^\circ\rangle$	0	



QUANTUM KEY DISTRIBUTION



PROBABILITÀ CHE BOB RICEVA IL BIT CORRETTO:

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{3}{4}$$

Probabilità che
EVE indovini la
base

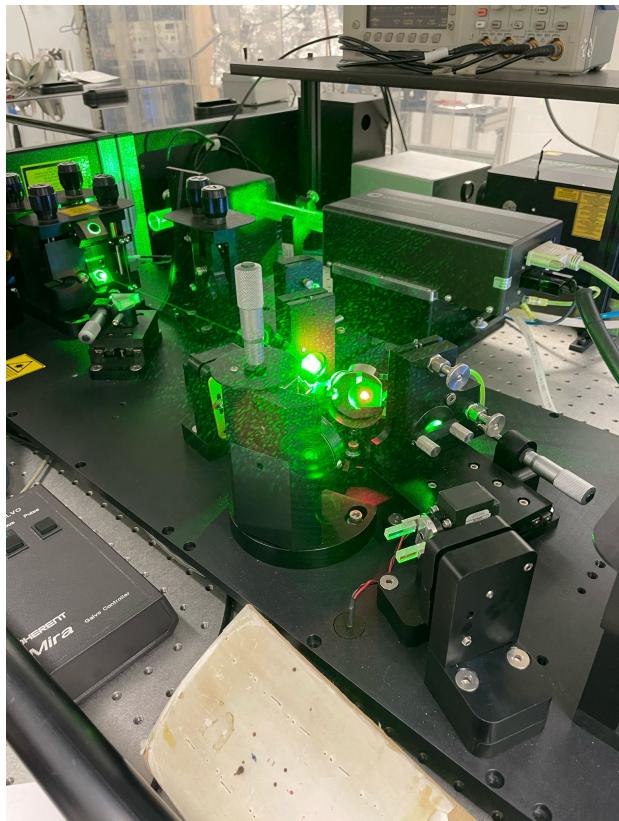
Probabilità che
EVE non
indovini la base

C'è una probabilità del 75% che Alice e Bob non si accorgano della presenza di Eve e quindi una probabilità di registrare un errore del 25%.

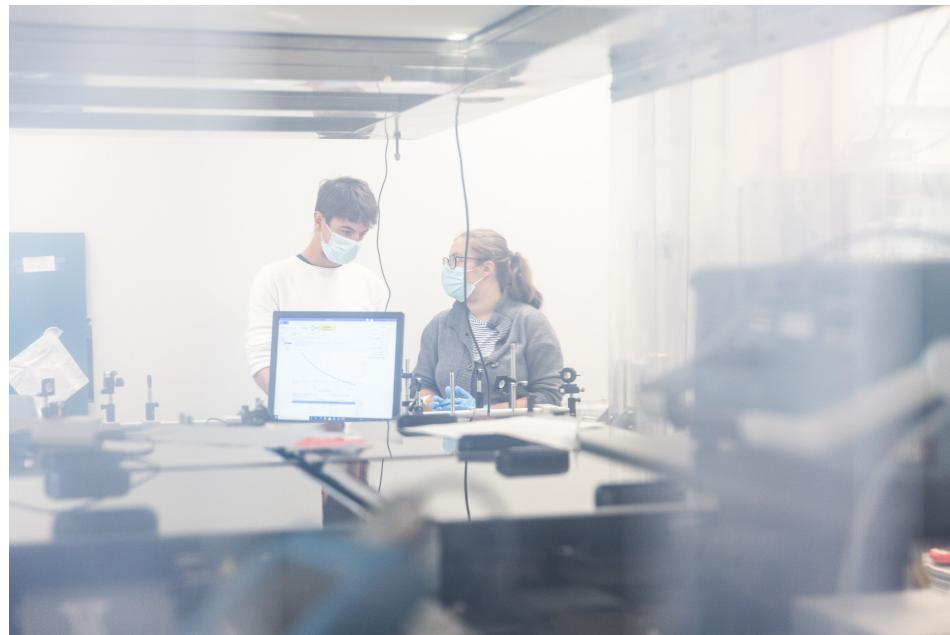


UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

LA NOSTRA RICERCA



LASER AL FEMTOSECONDO PER SPETTROSCOPIE ULTRAVELOCI

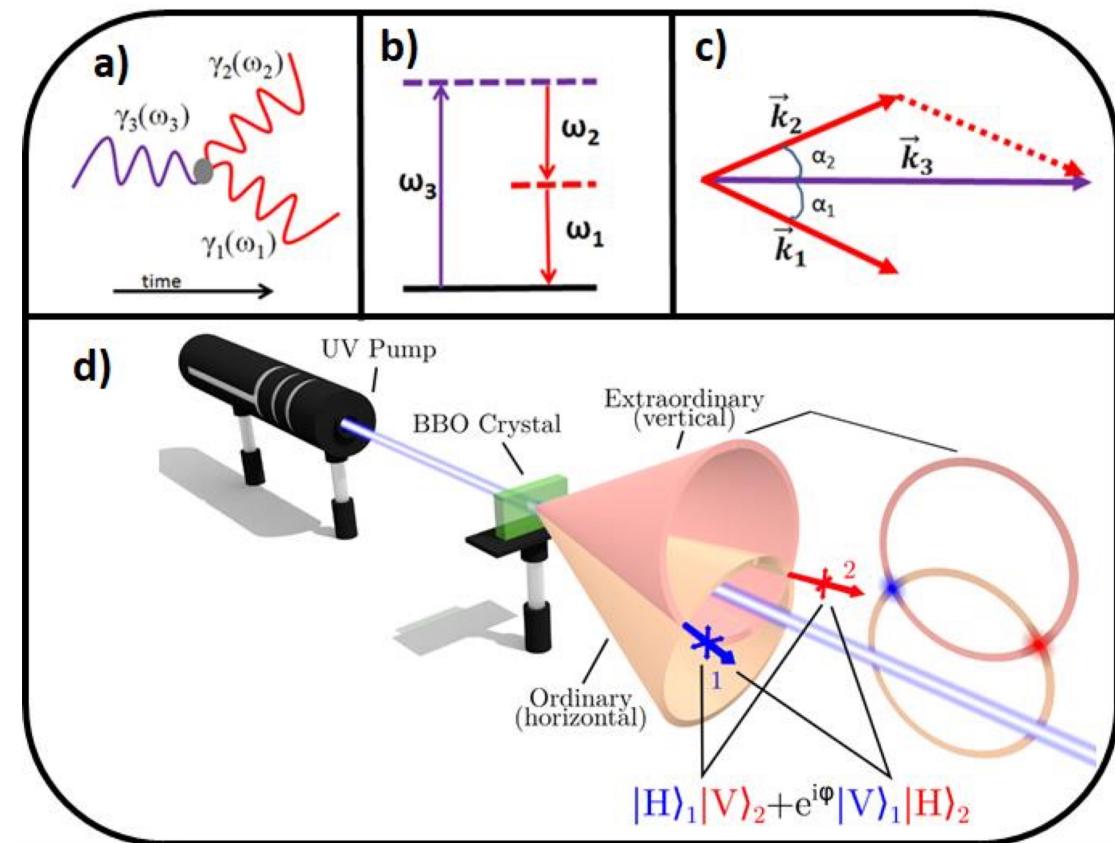




LA NOSTRA RICERCA

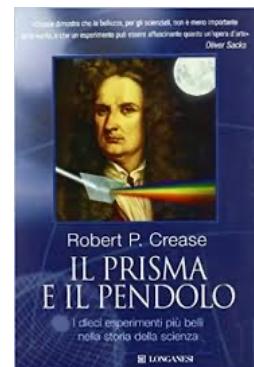
Come si generano sorgenti a singolo fotone?

Spontaneous Parametric Down
Conversion





UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore



- È un esperimento fondamentale
- È un esperimento concettualmente semplice
- È un esperimento convincente

Nel maggio 2002 lo storico e filosofo della scienza **Robert Crease** ha lanciato una singolare indagine.

Dalle pagine della rivista specializzata Physics World chiedeva ai suoi lettori, ricercatori di fisica di tutto il mondo, di segnalare candidati per ...l'esperimento più bello della fisica... e di spiegare in che cosa consistesse la bellezza di questi esperimenti.



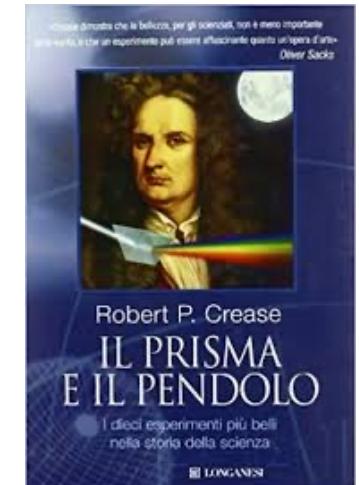
- Eratostene: la misurazione della circonferenza terrestre
- Galileo: la leggenda della caduta dei gravi dalla Torre di Pisa
- Galileo: l'esperimento del piano inclinato
- Newton: la scomposizione della luce con prismi
- Cavendish: la determinazione del peso della Terra
- Young: la scoperta del carattere ondulatorio della luce
- Foucault: la dimostrazione della rotazione terrestre col pendolo
- Millikan: l'esperimento della goccia d'olio
- Rutherford: la scoperta del nucleo atomico
- L'esperimento dell'interferenza quantistica di elettroni singoli

La classifica:

01 L'esperimento della doppia fenditura applicato all'interferenza da elettrone singolo

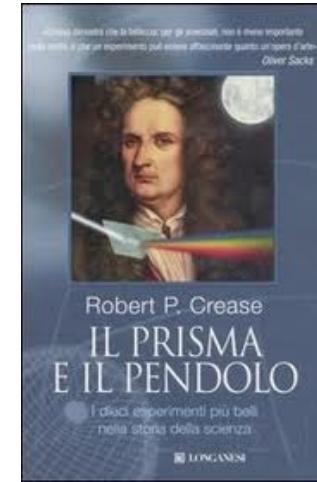
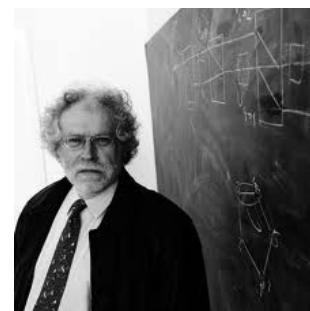
Robert Crease scrive...

esso contiene l'essenza della meccanica quantistica. Ha tutte le caratteristiche che permettono di definire un esperimento bello. È di importanza strategica nel senso che è capace di convincere anche il più scettico sui fondamenti della teoria dei quanti. È semplice, facile da capire nonostante i risultati siano rivoluzionari. (...) Il mondo della meccanica quantistica è e rimarrà assolutamente lontano dal senso comune indipendentemente da quanto si conosca la teoria. L'esperimento di interferenza di elettroni con elettroni singoli pone la realtà dinanzi ai nostri occhi in modo semplice, chiaro e coinvolgente. È quindi presumibile che rimarrà nel pantheon degli esperimenti meravigliosi per molti anni a venire....

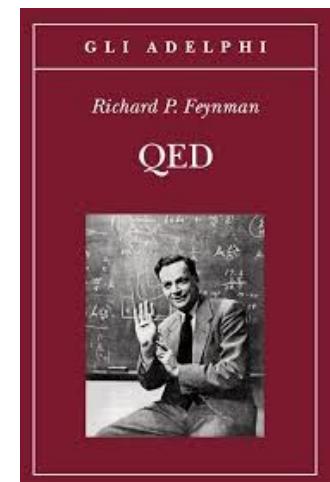




UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore



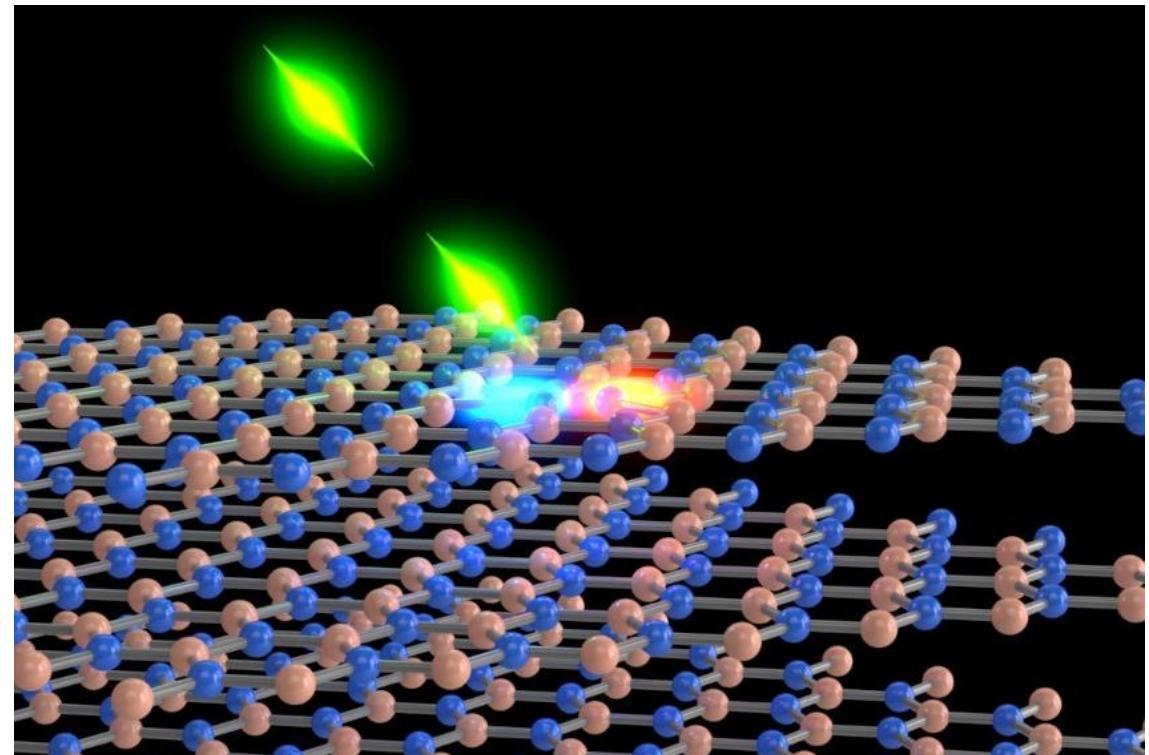
- Eratostene: la misurazione della circonferenza terrestre
- Galileo: la leggenda della caduta dei gravi dalla Torre di Pisa
- Galileo: l'esperimento del piano inclinato
- Newton: la scomposizione della luce con prismi
- Cavendish: la determinazione del peso della Terra
- Young: la scoperta del carattere ondulatorio della luce
- Foucault: la dimostrazione della rotazione terrestre col pendolo
- Millikan: l'esperimento della goccia d'olio
- Rutherford: la scoperta del nucleo atomico
- L'esperimento dell'interferenza quantistica di elettroni singoli





UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

**GRAZIE A
TUTTI PER
L'ATTENZIONE**



stefania.pagliara@unicatt.it



GRAZIE