

Introduzione alla Fisica Quantistica (2/2)

Andrea Macchi

CNR, Istituto Nazionale di Ottica, sez. Adriano Gozzini, Pisa, Italy

Dipartimento di Fisica Enrico Fermi, Università di Pisa, Italy



CNR-INO
ISTITUTO NAZIONALE DI OTTICA
CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE



Percorso per le Competenze Trasversali e l'Orientamento
"Tecnologie Quantistiche", 07/09/2023

Principi generali dedotti dagli esperimenti:

In fisica **classica**

osservabile = misurabile

- possiamo “misurare” univocamente lo **stato** di un sistema associando un valore univoco a ogni sua caratteristica.

In fisica **quantistica**

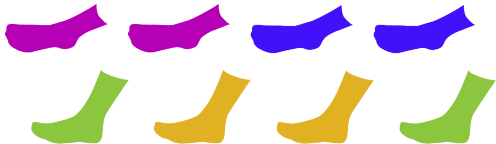
osservabile \neq misurabile

- a ogni caratteristica misurabile non è associato un valore univoco ma una **probabilità** di ottenerlo
- ogni misura **cambia** lo stato del sistema
- i risultati di misure successive **dipendono dall'ordine** in cui vengono eseguite.

I Calzini di Bertlmann

Il Prof. **Reinhold A. Bertlmann**
(Università di Vienna)

Indossa *sempre* calzini di colore *diverso*



homepage.univie.ac.at/reinhold.bertlmann

John S. Bell (1928-1990)

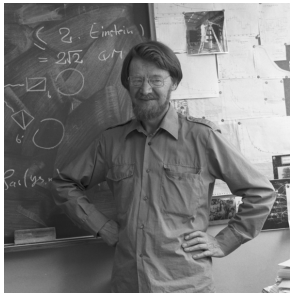
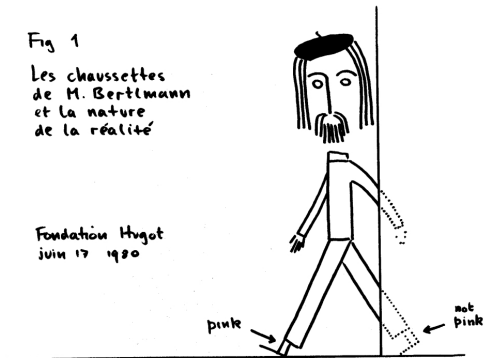


Fig 1

Les chaussettes
de M. Bertlmann
et la nature
de la réalité

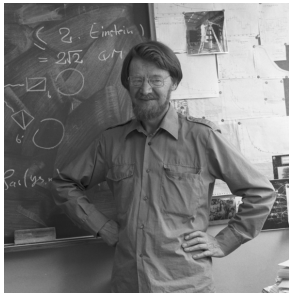
Fondation Huyot
juin 17 1980



“Il dottor Bertlmann ama indossare calzini di colore diversi per il piede destro e per il piede sinistro. È impossibile prevedere quale colore avrà a un dato piede in un dato giorno, ma quando vediamo che il primo calzino è rosa, siamo già certi che il secondo avrà un colore diverso.”

(“Bertlmann’s Socks & the Nature of Reality”, 1980)

John S. Bell (1928-1990) The Nobel Prize in Physics 2022



© Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh

Alain Aspect



© Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh

John F. Clauser



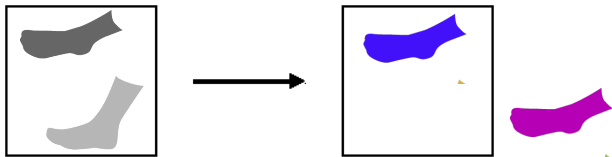
© Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh

Anton Zeilinger

Nobel per la Fisica 2022 “per i loro esperimenti con l'*entanglement* dei fotoni, che hanno permesso di stabilire la violazione delle *diseguaglianze di Bell* e per i lavori pionieristici nel campo della scienza dell'informazione quantistica”

In un sistema a due parti (es. due calzini) con due stati possibili (colore **rosa** o **blu**) e “**correlati**” (i due calzini sono scelti di colore diverso) la misura su una parte (es. estrazione di un calzino) fornisce informazione sull’altra parte:

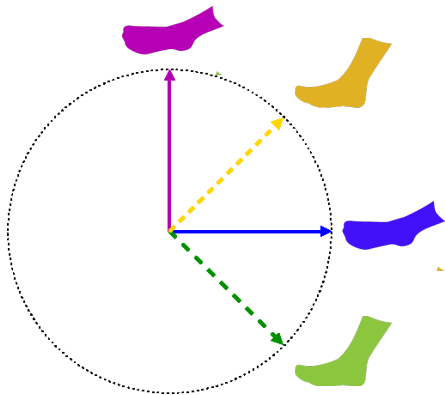
se ho “preparato” una scatola con un calzino **rosa** e uno **blu**, se il primo che prendo è **rosa** allora il secondo sarà necessariamente **blu** (e viceversa)



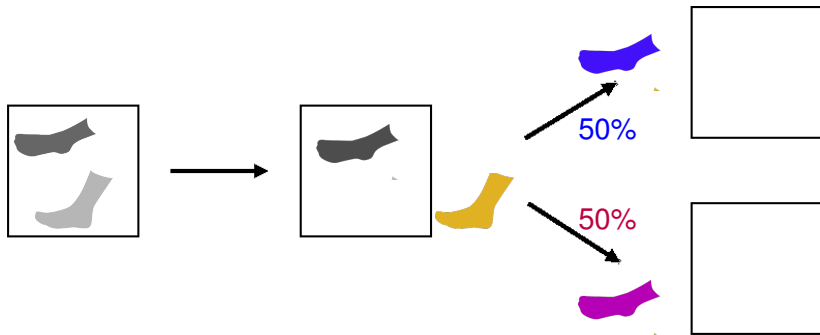
Le due “misure” (estrazione dei calzini) sono **correlate** al 100%: effettuata la prima il risultato della seconda è certo (e fin qui niente di strano ...)

...ma se avessimo calzini
“quantistici” dove il **rosa** e il **blu**
sono una *sovrapposizione* di
arancio e **verde**?

(analogia con gli stati di
polarizzazione dei fotoni
misurati lungo direzioni
diverse)



Se preparata una scatola con calzini **rosa** e **blu** *scelgo* poi di “misurare” i colori **arancio** o **verde**, una seconda misura di colore **rosa** o **blu** darà risultati casuali equiprobabili ovvero totalmente **scorrelati** dalla prima misura.



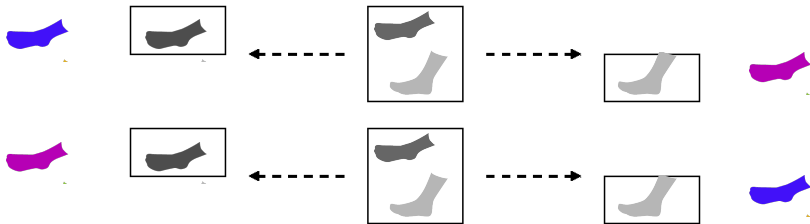
La correlazione tra le misure dipende dalla *sceita* di quale colore misurare

Misure di correlazione a distanza:

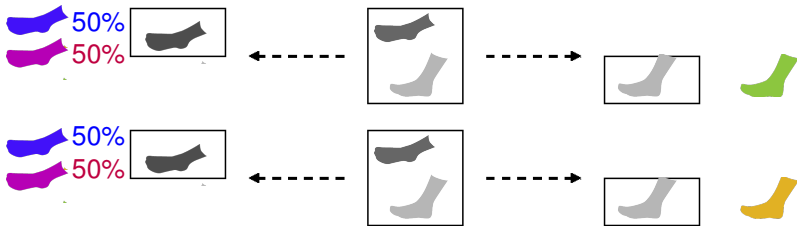
- dividiamo la scatola in due parti (ognuna con un calzino)
- allontaniamo le parti
- due osservatori (**Alice** e **Bob**) misurano indipendentemente il colore del calzino nella “mezza” scatola



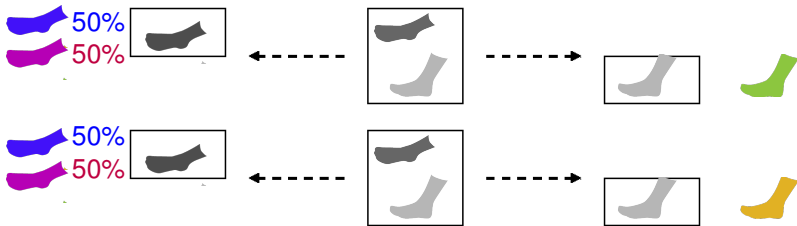
Se Alice e Bob sono d'accordo di misurare i colori **rosa** e **blu**, troveranno sempre colori diversi: misure **correlate al 100%**



Ma se Bob decide invece di misurare **arancio** e **verde** ...
Alice osserverà **rosa** e **blu** casualmente e con eguale probabilità:
misure interamente **scorrelate**



Ma se Bob decide invece di misurare **arancio** e **verde** ...
Alice osserverà **rosa** e **blu** casualmente e con eguale probabilità:
misure interamente **scorrelate**



Alice e Bob sono d'accordo per effettuare misure *simultanee* ma a distanza così che non possano influenzarsi!



That's Entanglement!

Due oggetti quantistici sono *entangled* se una misura su uno di essi determina lo stato dell'altro *simultaneamente* anche se *separati spazialmente*.

"Collins Italian Dictionary Complete and Unabridged" © HarperCollins Publishers

en·tan·gle·ment [ɪntæŋɡlmənt]

NOUN

(*figurative*)

1. (*gen*) coinvolgimento
2. (*romantic*) relazione *f* sentimentale

Altre traduzioni possibili: legame, groviglio, intreccio, ginepraio, *gliuommero*, ...

That's not Amore!

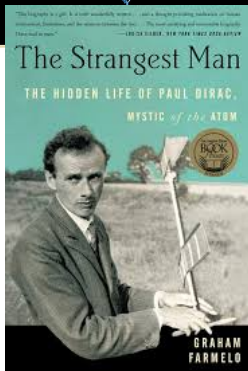
Immagine: greenme.it

“Grazie a questa equazione, detta dell'amore, si descrive il fenomeno dell'entanglement quantistico: se due sistemi interagiscono tra loro per un certo periodo di tempo e poi vengono separati, non possiamo più descriverli come due sistemi distinti . . . Quello che accade a uno di loro continua ad influenzare l'altro, anche se distanti chilometri o anni luce”



Non è altro che l'equazione di Dirac (scritta in modo sbagliato) che di per sè non spiega l'entanglement (figurarsi l'amore . . .)

$$(\partial + m)\psi = 0$$



Paul A. M. Dirac (1902-1984)

That's Entanglement!



VS



Due oggetti quantistici sono *entangled* se una misura su uno di essi determina lo stato dell'altro *simultaneamente* anche se *separati spazialmente*.

Einstein rifiutò l'idea di misure che si influenzano con "*una inquietante azione a distanza*" (più veloce della luce?).
"*La situazione fattuale del sistema A è indipendente da quanto accade al sistema B quando A e B sono spazialmente separati*"
(principio di località di Einstein)

"Collins Italian Dictionary Complete and Unabridged" © HarperCollins Publishers
en·tan·gle·ment [ɪntæŋɡləmənt]

NOUN
(*figurative*)

1. (*gen*) coinvolgimento
2. (*romantic*) relazione *f* sentimentale

Altre traduzioni possibili: legame, groviglio, intreccio, ginepraio, *gliuommero*, ...

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

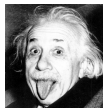
Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

New York Times, 1935

That's Entanglement!



VS



Bell ha dimostrato che il principio di località è *incompatibile* con la fisica quantistica “ortodossa” proponendo delle relazioni (**diseguaglianze di Bell**) misurabili e discriminanti
→ la realtà fisica è “**non locale**”.

Ma ciò *non* consente lo scambio di informazioni “superluminali”:
nel nostro esempio le correlazioni possono essere verificate solo *dopo* che Alice e Bob comunicano fra loro per confrontare le misure.

“Collins Italian Dictionary Complete and Unabridged” © HarperCollins Publishers
en·tan·gle·ment [ɪntæŋɡlɪmənt]

NOUN

(*figurative*)

1. (*gen*) coinvolgimento
2. (*romantic*) relazione *f* sentimentale

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

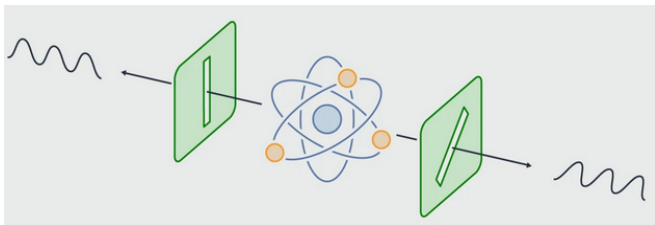
SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

New York Times, 1935

Altre traduzioni possibili: legame, groviglio, intreccio, ginepraio, *gliuommero*, ...

In assenza di calzini quantistici, esperimenti per verificare entanglement e diseguaglianze di Bell hanno sfruttato **coppie di fotoni** con **polarizzazioni correlate** (si sa a priori che i due fotoni emessi in direzioni diverse hanno polarizzazione parallela). Queste coppie vengono emesse da particolari atomi eccitati.



Adattata da: Johan Jarnestad, Accademia Reale Svedese delle Scienze

... et ce n'est qu'un debut ...

INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

université PARIS-SACLAY

cnr

alain aspect

From Einstein's LichtQuanten to Wheeler's delayed choice experiment: wave-particle duality for a single photon

Introduction to QUANTUM OPTICS

EINSTEIN AND THE QUANTUM A. DOUGLAS STONE

14/04/2021 : World Quantum Day
Journée mondiale de la Quantique

Alain Aspect, Institut d'Optique Graduate School, Palaiseau, France

<http://www.lcf.institutoptique.fr/Alain-Aspect-homepage>

MOOC: <https://www.coursera.org/learn/quantum-optics-single-photon>

4:03 / 1:26:29

World Quantum Day – Alain Aspect, From Einstein to Wheeler: Wave-Particle duality of a single photon

<https://youtu.be/R SXpeDgqUO4>

Spin: un altro osservabile quantistico

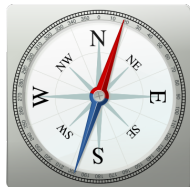
spin [spɪn] (*past tense spun or span, past participle spun*)

NOUN

1. (*revolution*) giro
 - **to give a wheel a spin** far girare una ruota
 - **to give sth a long/short spin** (*in washing machine*) fare una centrifuga completa/ridotta
 - **to be in a flat spin** (*informal*) essere in preda al panico
 - **to go into a flat spin** lasciarsi prendere dal panico
2. (*on ball*) effetto
 - **to put a spin on a ball** imprimere l'effetto a una palla
3. (*Aeronautics*)
 - **to go into a spin** discendere in avvitamento; (*Automobiles*) fare un testa-coda
4. (*ride*)
 - **to go for a spin** fare un girotto
5. (*Politics*) reinterpretazione *f*
 - **to put a new/different spin on sth** presentare qc da un'angolazione nuova/diversa

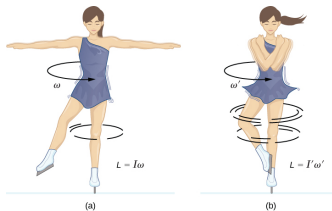
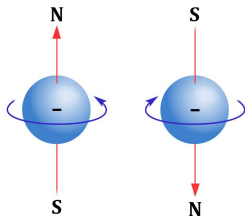
fonte: Collins dictionary (from [Word Reference](#))

Atomi e particelle elementari anche se prive di carica elettrica netta possono sentire l'azione di un **campo magnetico** come l'ago di una bussola



(credit: JayCanuck)

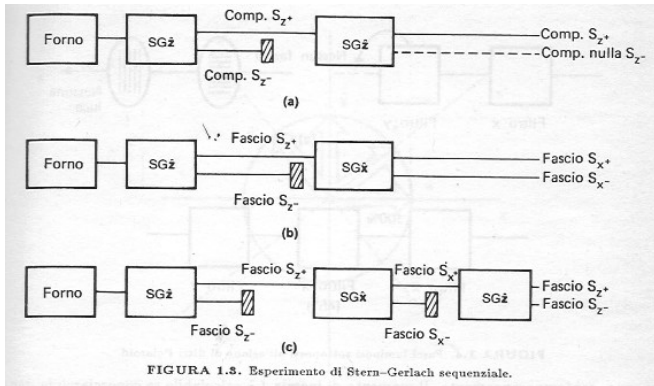
Per una particella **carica** (elettrone, protone, ...) classicamente la proprietà deriverebbe da una **rotazione** attorno ad un asse (da qui "spin")



(credit: courses.lumenlearning.com)

Lo spin contribuisce al "momento angolare" di un oggetto che è una quantità conservata (come fanno pattinatrici e ballerine)

Cambiando l'orientazione del magnete si possono fare misure sequenziali dello spin lungo direzioni ortogonali, analogamente alle misure di polarizzazione dei fotoni (e con risultati analoghi!)

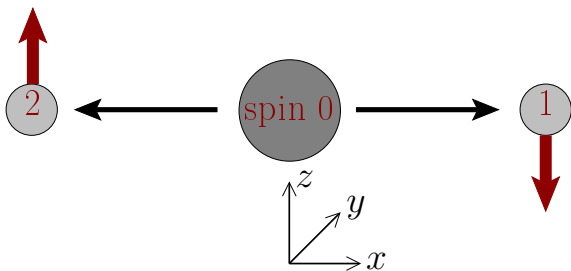


fonte: J. J. Sakurai, *Meccanica Quantistica Moderna* (Zanichelli)

Misure di correlazione di spin

Una particella priva di spin (**0**) decade in due particelle (**1**, **2**) dotate di spin. Poichè lo spin totale è conservato **1** e **2** devono avere spin **opposti** (**1**=su & **2**=giù oppure **1**=giù & **2**=su)

Una misura di S_z su **1** consente di predire con certezza il risultato di una misura successiva di S_z su **2** anche se le misure sono fatte da osservatori a grande distanza (“correlazione 100%”)



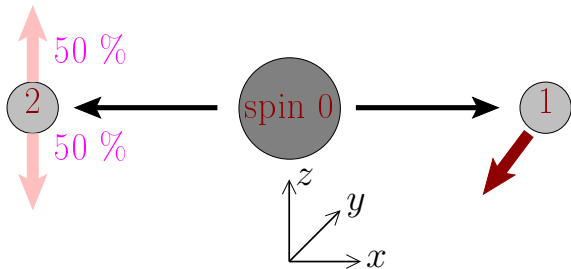
Misure di correlazione di spin

Se però l'osservatore di **1** decide di misurare S_x ...

... ora la particella **1** non ha più uno stato definito di S_z .

Quindi se l'osservatore di **2** misura S_z trova "su" e "giù" con eguale probabilità e nessuna correlazione con **1**.

*I risultati delle misure di **2** dipendono da cosa sceglie di fare **1** (anche se troppo lontano per influenzare **2** !)*



Principio di Indeterminazione (W. Heisenberg)



non si possono misurare osservabili diversi
con precisione arbitraria.

Questo vale per osservabili “discreti” (spin, polarizzazione) ma anche “continui” come la posizione (x) e la quantità di moto (p).
Se una particella si trova nella regione $[x - \Delta x/2, x + \Delta x/2]$
con quantità di moto compresa in $[p - \Delta p/2, p + \Delta p/2]$
(ovvero Δx e Δp sono le incertezze sulla misura) si ha:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$$

h : costante di Planck

Se “so” dov'è la particella con precisione infinita ($\Delta x = 0$)
non ho alcuna informazione sulla sua quantità di moto ($\Delta p = \infty$)

Informazione quantistica: QuBit

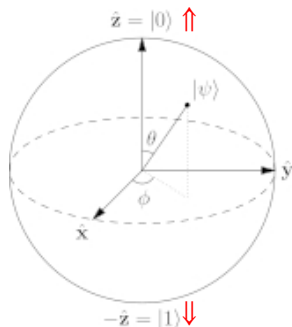
Il costituente elementare dell'informazione in un computer è il **bit**: un oggetto che può assumere valori **0** e **1** (quindi con una sequenza di bit costruiamo **numeri binari** come 100110101)

Si può pensare di usare come bit la polarizzazione di un fotone ($\vec{\epsilon}_x \equiv 0$, $\vec{\epsilon}_y \equiv 1$) o lo spin di un atomo ($\uparrow \equiv 0$, $\downarrow \equiv 1$) ...

... ma questo **quantum bit (QuBit)** può essere in una **sovrapposizione** di **0** e **1**!

La sfera rappresenta la sovrapposizione dei "vettori di stato" in 3D

(ovvero la "somma di vettori" usando numeri **complessi** ...)



credit: [Glosser.ca](#) (Wikimedia)

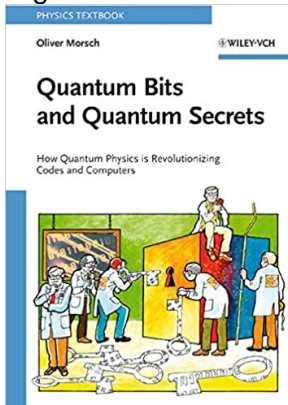
Computazione quantistica

Grazie alla sovrapposizione di stati un **QuBit** contiene “più informazione” di un bit classico.

Una opportuna “misura” può agire da operazione logica sul QuBit: una sequenza di operazioni può eseguire un calcolo

Operare sulla sovrapposizione di stati è simile a un **calcolo parallelo** e quindi più efficiente dei computer tradizionali (con risultati ben determinati nonostante l'**indeterminazione** intrinseca nei processi quantistici!)

Per i dettagli: chiedete a Oliver o leggete il suo libro!



Freccia del Tempo e Entropia

Le leggi “elementari” della fisica sono (*quasi*) **simmetriche** rispetto all’**inversione del tempo** (il film di un moto girato all’indietro descrive un moto fisicamente possibile)

Secondo principio della termodinamica: il **disordine dell’Universo (Entropia) aumenta sempre**

L’aumento di entropia determina la **freccia del tempo** che percepiamo

(vedi ad esempio: A. M., “La fisica del tempo e il tempo in fisica”, *In Pensiero* **9** (2015) pp.72-80)



www.mammafelice.it “Insegnare l'ordine ai bambini”

Entropia e Tempo Quantistici

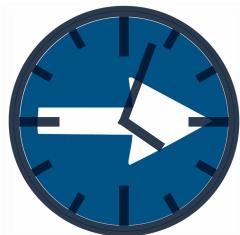
L'aumento di entropia è un effetto puramente **macroscopico** o avviene anche a livello (sub)atomico? Cos'è il “disordine” di un **atomo** o di una **particella**?

Se interpretiamo la sovrapposizione quantistica in più stati come “**possibilità**”, ogni **misura** (o in generale ogni **interazione** del sistema con altri) porta a uno stato definito e **riduce le alternative possibili**.

Secondo alcune interpretazioni moderne entropia e freccia del tempo in un sistema quantistico “elementare” sono il “**restringersi delle possibilità**”

“Il tempo non esiste”

(C. Rovelli, *La realtà non è come ci appare*, Cortina Ed., 2014)



Funzione d'onda

Indicata generalmente con Ψ è una funzione a valori complessi della posizione che contiene tutta l'informazione misurabile di un sistema quantistico.

Ad esempio per gli elettroni atomici il suo modulo quadrato $|\Psi|^2$ fornisce la distribuzione probabilistica di trovare l'elettrone intorno a una certa posizione per un stati atomici dati (**orbitali**), rappresentabile come in figura

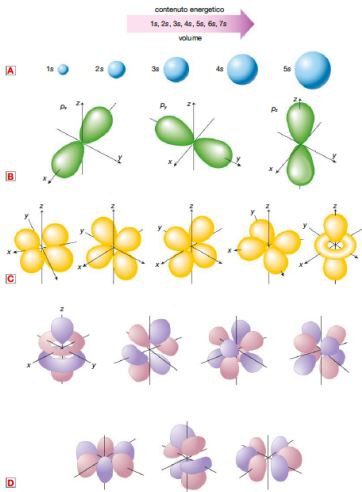
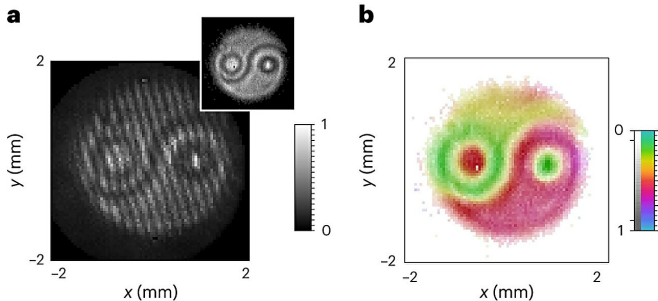


Figura da: Simonetta Klein, "Il racconto della Chimica" (Zanichelli, 2018)

Funzione d'onda di un sistema *entangled*

“Immagine” ottenuta sperimentalmente della funzione d’onda di una coppia di fotoni entangled:



Danilo Zia et al., *Nature Photonics*, August 14, 2023.



Niels Bohr –
“padre” dell’interpretazione
“di Copenhagen” od “ortodossa”
della Fisica Quantistica
e il suo stemma nobile con motto
“Contraria Sunt Complementa”
e simbolo dello Yin & Yang (*Taijitu*)

Mina (dx) & Orsa (sx) –
due gatte che avevano capito tutto

andrea.macchi@ino.cnr.it
andreamacchi.eu

