

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
"Giochiamo con la Crittografia Quantistica", 08/09/2022

Due **calzini** identici possono essere indossati ciascuno indifferentemente su un piede destro o sinistro.

Dal punto di vista quantistico, lo stato di entrambi i calzini *prima che uno di essi sia indossato* è una **sovrapposizione** di “**destro**” e “**sinistro**”.



Nel momento in cui il primo calzino viene indossato su un piede (ad esempio il destro), diventano univocamente definiti sia lo stato del primo calzino (“destro”) che del secondo (“sinistro”).

Lo stato dei calzini è univocamente definito solo **dopo** che **uno** di essi ha “interagito” con un piede.

Esempio creato da Marco Fulvio Barozzi (keespoppinga.blogspot.com)

Se i calzini fossero **quantistici** . . .

Regalate uno dei calzini ad un'amica o un amico prima di separarvi per un lunghi viaggi in direzioni opposte.

Concordate di indossare ognuno un calzino su un piede "a caso" una volta a destinazione a un istante concordato.

Quando l'amico/a è arrivato/a indossate il vostro calzino su un piede a scelta, ad esempio il sinistro.



Tokyo



New York

Se avete scelto il **sinistro**, il/la vostro/a amico/a sceglierà **necessariamente** il **destro** (o viceversa) . . .

- ▶ Spin: un altro osservabile per studiare la misura quantistica
- ▶ Misure di correlazione di spin: l'*entanglement*
- ▶ Altre stranezze quantistiche (e relative tecnologie)
 - Principio di indeterminazione
 - QuBit: informazione quantistica (e computers)
 - Disordine quantistico (ovvero: che cos'è il tempo?)

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.

Spin: un osservabile “molto” 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](#))

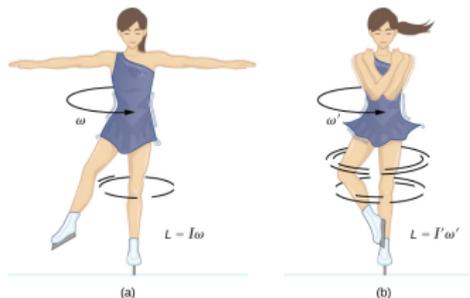
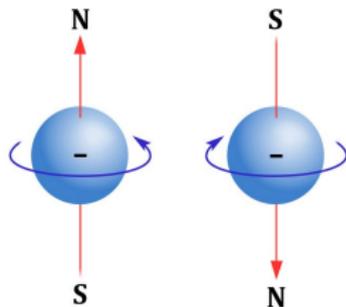
Spin: un osservabile “molto” quantistico

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)

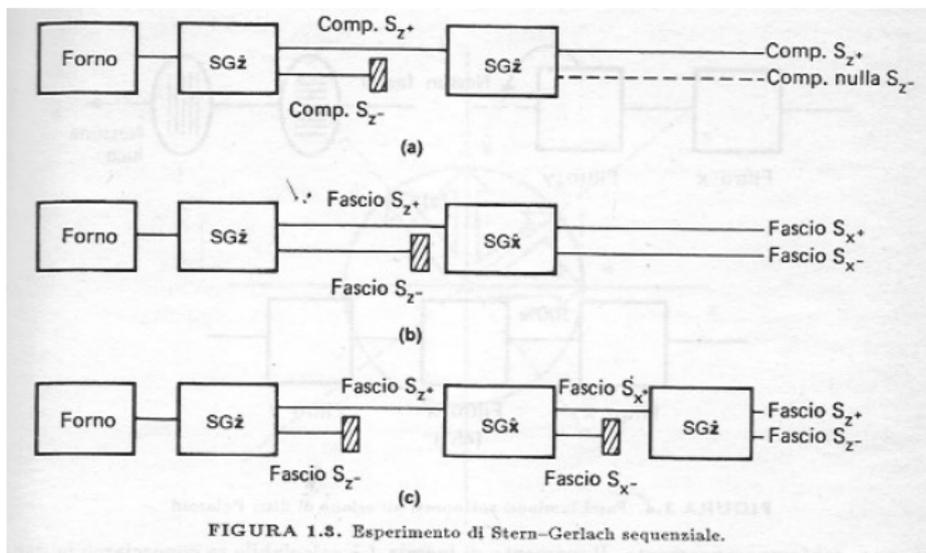
Per una particella **carica** (elettrone, protone, ...) classicamente la proprietà deriverebbe da una **rotazione** attorno ad un asse (da qui “spin”)



(credit:courses.lumenlearning.com)

Lo spin contribuisce al “momento angolare” di un oggetto che è una quantità conservata (come fanno pattinatricæ 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!)

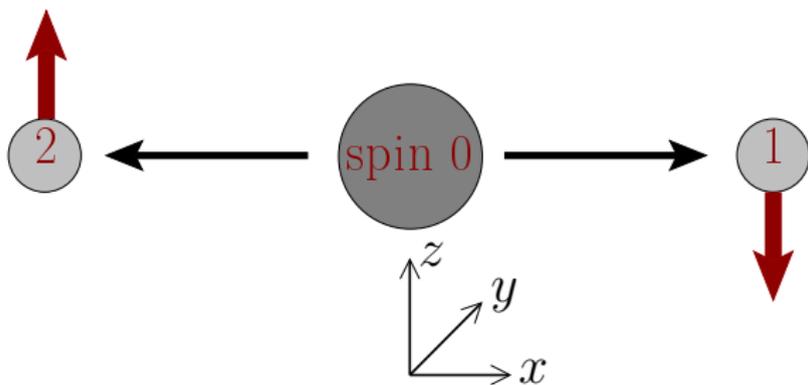


fonte: J. J. Sakurai, *Meccanica Quantistica Moderna* (Zanichelli)

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%”)



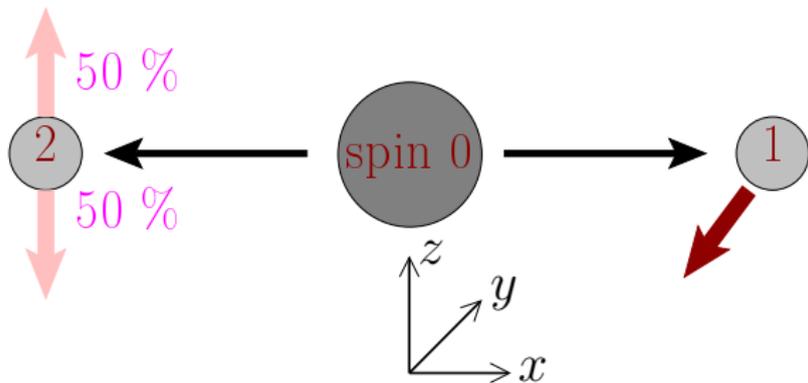
Misure di correlazione di spin

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** !)



Entanglement



Due (o più) oggetti quantistici il cui stato *non* è indipendente mantengono questa relazione anche a distanza (tali che per comunicare dovrebbero scambiarsi segnali più veloci della luce) Ma questo *non* consente lo scambio di informazioni “superluminali”: nel nostro esempio le correlazioni tra **1** e **2** possono essere verificate solo *dopo* che gli osservatori comunicano (uno non si accorge “in diretta” di cosa l’altro decide di misurare)

“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*, ...

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

... 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/RSXpeDgqUO4>

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:

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

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

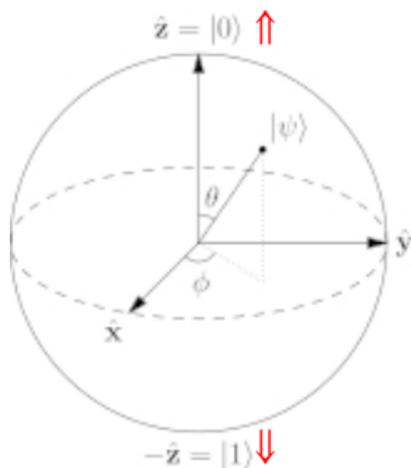
Il costituente elementare dell'informazione in un computer è il **bit**: un oggetto che può assumere valori **0** e **1** (quindi con una sequenza di bit costruiamo **numeri binari** come 100110101)

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)

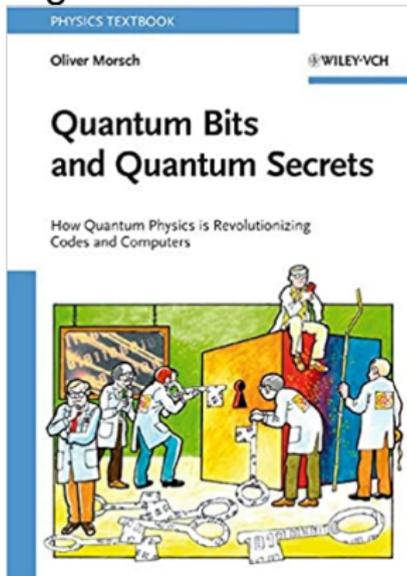
Computazione quantistica

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** (esempio: il film di un moto girato all’indietro è ancora un moto 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:

“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)





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

