

breve riassunto di un secolo di meccanica quantistica

THE OLD QUANTUM THEORY (1900-1925)

Gli antefatti: le nuove scoperte e la nascita della fisica quantistica

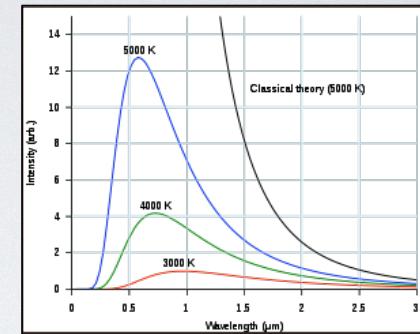
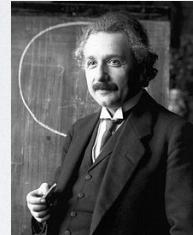


Corpo nero: il quanto di luce

Planck
(1858-1943)



Einstein
(1879-1955)



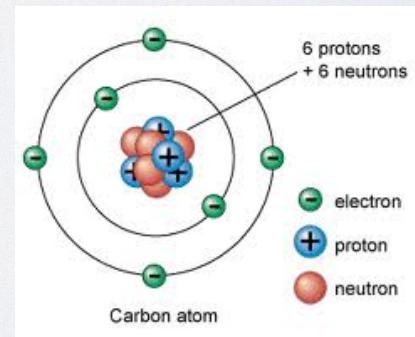
Corpo (ideale) che assorbe tutta la radiazione e.m. incidente (no riflessione). Ha uno spettro di emissione caratteristico, che dipende solo dalla temperatura T.

- ✓ Planck (1900) riesce a spiegare lo spettro del corpo nero partendo dall'ipotesi che: l'energia della radiazione e.m. che può essere emessa/assorbita da un corpo non può assumere un valore qualunque ma solo certi valori discreti. L'**energia scambiata è quantizzata** in unità di $h\nu$, essendo ν la frequenza della radiazione e h una costante, denominata di Planck.
- ✓ Einstein (1905) riprende lo studio del corpo nero e studia l'effetto fotoelettrico: propone che la radiazione e.m. sia composta da **corpuscoli che trasportano un'energia $E = h\nu$** , detti *quanti di luce* (nel 1926 verranno denominati foton).



L'atomo: ... una lunga storia ...

- ✓ Democrito (V sec. a.ac.) sistematizza l'idea che la materia sia fatta da *atomi* = particelle di materia che non possono essere frazionate (Idee soppiantate presto dal concetto dei quattro elementi: aria, acqua, terra e fuoco)
- ✓ R. Boyle (1661): la materia è composta da combinazioni di diversi tipi di corpuscoli
- ✓ A. Lavoisier (1789): “elemento” che non può essere ulteriormente divisa mediante procedimenti chimici
- ✓ J. Dalton (1805): concetto di atomo per descrivere le reazioni chimiche; ogni elemento è composto da un unico tipo di atomo
- ✓ D. Mendeleev (1869) pubblica la prima tavola periodica
- ✓ Nella seconda metà del XIX sec. l'esistenza degli atomi è ancora dibattuta.
Evidenze di moti di particelle microscopiche, moto browniano (Perrin, Einstein,...).
Un chiaro riconoscimento da parte della comunità scientifica si ha solo a cavallo del nuovo secolo.
- ✓ Quasi contemporaneamente si scopre che l'atomo non è indivisibile:
 - “modello a panettone” di Thomson background di carica positiva e minuscole particelle con carica negativa
 - “modello planetario” di Rutherford



MA: la meccanica classica combinata con la teoria e.m. non è in grado di spiegare

- la stabilità dell'atomo (gli elettroni che ruotano irridiano energia e spiraleggiano verso il nucleo, cadendoci dentro)
- gli spettri di assorbimento/emissione a righe

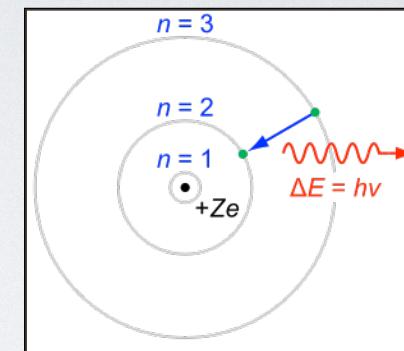
Modello fenomenologico di Bohr-Sommerfeld: **quantizzazione dell'energia e del raggio delle orbite**

$$E \propto -1/n^2$$

Sommerfeld
(1868-1951)



Bohr
(1885-1962)



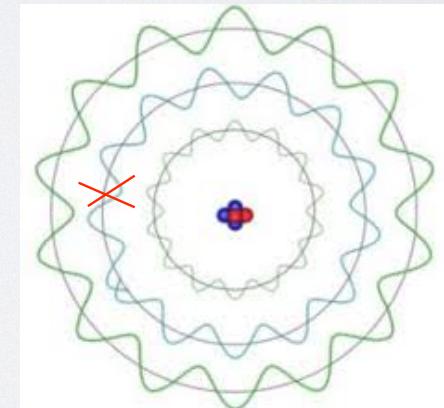
Onde di materia:

De Broglie
(1892-1987)



$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

Nella sua tesi di Dottorato (1924), avanza l'ipotesi:
così come la radiazione e.m. si manifesta a volte come corpuscoli (fotoni),
così le particelle materiali (es. elettroni) possono comportarsi come onde.



LA MECCANICA QUANTISTICA o I RIVOLUZIONE QUANTISTICA (>1925)

Lo sviluppo di una teoria della fisica quantistica



Meccanica quantistica ondulatoria (1926)

Schroedinger
(1887-1961)



Meccanica quantistica delle matrici (1925)

Heisenberg
(1901-1976)

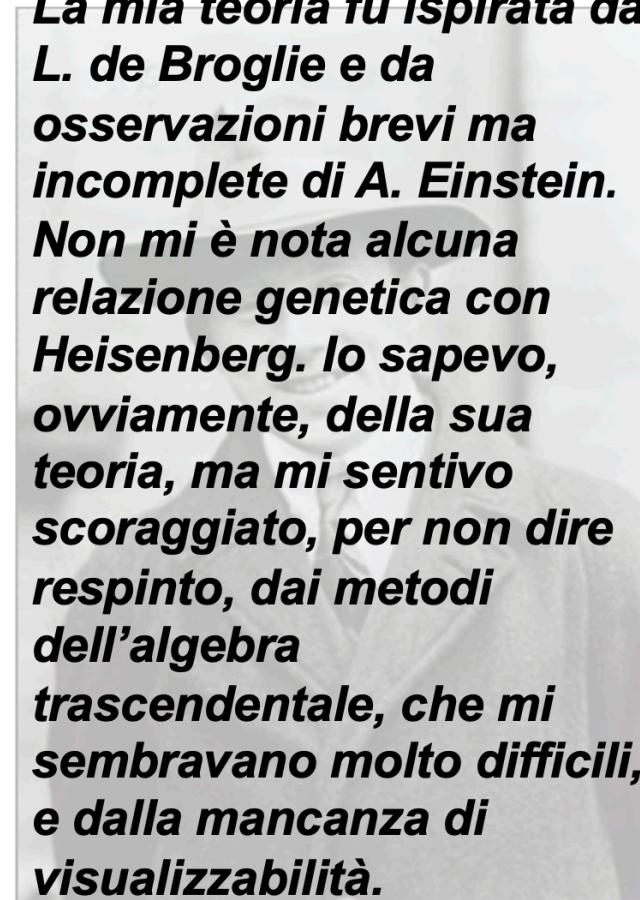


“La fotografia degli scienziati riuniti al quinto Congresso Solvay su “Elettroni e fotoni”, tenuto a Bruxelles dal 24 al 29 ottobre 1927, offre uno scorci sul periodo più drammatico della storia della fisica. Con i suoi ventinove inviati, dei quali diciassette avevano o avrebbero ricevuto il premio Nobel, il congresso fu uno dei più spettacolari incontri di menti mai avvenuti. Segnò la fine di un’età dell’oro della fisica, di un’era di creatività scientifica ineguagliata fin dai tempi della rivoluzione scientifica del XVII secolo guidata da Galileo e Newton.” (Kumar, Quantum, 2008, Mondadori, p.3)



'Più penso alla parte fisica della teoria di Schrödinger e più la trovo abominevole. Ciò che Schrödinger scrive sulla "visualizzabilità" [Anschaulichkeit] non ha alcun senso. In altre parole è spazzatura [Mist]. Il più grande risultato della sua teoria è il calcolo degli elementi di matrice.'

Heisenberg (8 giugno 1926).



La mia teoria fu ispirata da L. de Broglie e da osservazioni brevi ma incomplete di A. Einstein. Non mi è nota alcuna relazione genetica con Heisenberg. Io sapevo, ovviamente, della sua teoria, ma mi sentivo scoraggiato, per non dire respinto, dai metodi dell'algebra trascendentale, che mi sembravano molto difficili, e dalla mancanza di visualizzabilità.

Schrödinger (primavera 1926)

“Fu un periodo di paziente lavoro nei laboratori, di esperimenti cruciali e di arditi tentativi, di molti spunti errati e di molte ipotesi insostenibili. Fu un periodo di intensa e approfondita corrispondenza epistolare e di frettolose conferenze, un periodo di dibattiti, di critiche e di brillanti improvvisazioni matematiche. Per tutti gli interessati fu un periodo creativo che con le sue nuove nozioni li colmava insieme di sgomento e di entusiasmo” (Oppenheimer in Kumar 2008, p.6)

5 relazioni

- 24 mattina: **Bragg**, sull'intensità della riflessione dei raggi X e su come i raggi X potessero portare ad una migliore comprensione della struttura dei cristalli;
- 24 pomeriggio: **Compton** sulle discrepanze tra esperimento e teoria elettromagnetica della radiazione (aveva ricevuto il Nobel su questo poche settimane prima);
- 25 mattina: ricevimento alla Libera Università di Bruxelles.
- 25 pomeriggio: **de Broglie** sulla dinamica dei quanti, in cui viene proposta la “teoria dell'onda pilota”, sottoposta a diversi attacchi (Einstein in silenzio).
- 26 mattina: **Born-Heisenberg**, relazione congiunta che iniziò così: “La meccanica quantistica si basa sull'intuizione che la differenza essenziale tra fisica atomica e fisica classica è la presenza di discontinuità”. Sul significato della costante di Planck: “la misura universale dell'indeterminazione che entra nelle leggi di natura tramite il dualismo di onde e particelle”. Terminarono con: “Riteniamo che la meccanica quantistica sia una teoria chiusa, i cui presupposti fisici e matematici non sono più suscettibili di alcuna modifica”.
- 26 pomeriggio: **Schrodinger** sulla meccanica ondulatoria, in cui veniva messo in discussione il concetto di salto quantico e proponeva di interpretare le onde in meccanica quantistica come distribuzione della carica e della massa.

“I lavori ripresero il 28 pomeriggio: prima sessione della discussione generale, introdotta da Lorentz con l'intento di far concentrare l'attenzione sulle questioni della causalità, del determinismo e della probabilità: “**Non si potrebbe mantenere il determinismo facendone un articolo di fede? E' indispensabile elevare l'indeterminismo a principio?**” Poi Lorentz invitò Bohr a intervenire. Bohr illustrò la sua convinzione che il dualismo onda-particella fosse una caratteristica intrinseca della natura, spiegabile soltanto nel quadro della complementarità, e che la complementarità stesse alla base del principio di indeterminazione che portava alla luce i limiti di applicabilità dei concetti classici.”

(Kumar, Quantum, 2008)

“Tutti gli invitati sapevano che il congresso era destinato ad affrontare il problema più urgente del momento, di carattere più filosofico che fisico: il significato della meccanica quantistica. *Che cosa rivelava la nuova fisica in merito alla natura della realtà?*”

(Kumar, Quantum, 2008)



Più tardi Bohr avrebbe espresso così la sua posizione: “Non vi è un mondo quantistico. Vi è solo una descrizione astratta in termini di fisica quantistica. E’ sbagliato pensare che il compito della fisica sia scoprire come è la natura. La fisica si occupa di ciò che possiamo dire della natura... Da cosa dipendiamo noi umani? Dipendiamo dalla nostre parole. Il nostro compito è comunicare esperienze e idee ad altri. Siamo sospesi nel linguaggio”.

(da Pais, Ritratti di scienziati geniali, 2012)

“La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del gran Vecchio. In ogni caso, sono convinto che questi non gioca a dadi col mondo”.

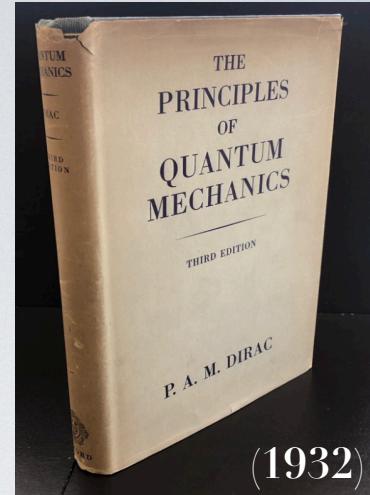
(A. Einstein, 1926. Lettera a Max Born)

DISCUSSIONE

- Qual è per voi l'aspetto principale che distingue la fisica classica da quella quantistica?
- Qual è per voi l'aspetto più sorprendente della fisica quantistica (in negativo o in positivo)?
- Qual è per voi l'aspetto più difficile da comprendere della fisica quantistica?



von Neumann
(1903-1957)



La meccanica quantistica:

- è descritta da una teoria che ha oramai un secolo di vita, ed è ben compresa
- ha avuto più verifiche sperimentali nella storia di ogni altra disciplina, senza mai essere smentita
- ha portato applicazioni tecnologiche nei campi più disparati fisica quantistica:

-> teoria quantistica dei campi che descrive la fisica della materia (particelle e stringhe)

-> teoria della materia e dello stato solido (con le sue applicazioni: sensori, elettronica, ...)

... anche se tutte le applicazioni che usiamo al momento si basano su fenomeni quantistici

ma sfruttano sempre una logica classica:

- *transistors e chips funzionano grazie alle proprietà quantistiche dei semiconduttori*
- *un apparecchio elettronico (come un computer) usa solo "proprietà classiche", per esempio delle correnti che lo attraversano e codifica tutto in termini di una logica classica binaria (BIT: "0"=ON-accesso, "1"=OFF-spento)*

TUTTAVIA la teoria meccanica quantistica rimane

- controversa: dibattiti senza fine

dualità onda-particella

collasso della funzione d'onda

paradosso del gatto di Schrodinger

paradosso Einstein-Podolsky-Rosen

teoria delle variabili nascoste

- difficile: si insegna solo a livello universitario e nelle facoltà scientifiche

- contro-intuitiva, “misteriosa”



13

R. Feynman:

"... I think I can safely say that
nobody understands quantum
mechanics..."

LA II RIVOLUZIONE QUANTISTICA (XXI secolo)



The first quantum revolution – understanding and applying physical laws in the microscopic realm – resulted in groundbreaking technologies such as the transistor, solid-state lighting and lasers, and GPS. Today, our ability to use previously untapped quantum effects in customised systems and materials is paving the way for a second revolution. With quantum theory now fully established, we are required to look at the world in a fundamentally new way: objects can be in different states at the same time (superposition) and can be deeply connected without any direct physical interaction (entanglement).

nuovi sviluppi tecnologici sono basati su un cambio di paradigma di pensiero:

- le “stranezze” della meccanica quantistica non sono un problema ma una risorsa
- bisogna appropriarsi della nuova logica su cui si basa la meccanica quantistica

“I fisici [...] hanno capito che il punto essenziale non è se una teoria piaccia o non piaccia, ma se fornisca previsioni in accordo con gli esperimenti. La ricchezza filosofica, la facilità, la ragionevolezza di una teoria sono tutte cose che non interessano” (Feynman)

“No new idea, whatever its domain, is born fully grown. Initial formulations of novel conceptions, being still tributary to the old views they are to replace, of necessity are **awkward and inappropriate**. Any scientific theory, following its inception, then has to undergo a recasting process through which its notions are clarified and its terms improved.”

JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND, On the Nature of Quantons, 2003, *Science & Education*

l'esperimento più bello della fisica

L'ESPERIMENTO DELLA DOPPIA FENDITURA A SINGOLO ELETTRONE

- esperimento mentale (gedanken) introdotto negli anni '30 da Einstein per discutere le proprietà quantistiche
- Feynman's Book: "We shall tackle immediately the basic element of the mysterious behavior in its most strange form. We choose to examine a phenomenon which is impossible, *absolutely* impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the *only* mystery."



Da sinistra: Giulio Pozzi, Gian Franco Missiroli e Pier Giorgio Merli. Ai tre fisici bolognesi si deve il primo resoconto su rivista internazionale dell'esperimento, che fu realizzato nel 1974 e pubblicato nel 1976.

CRITICAL POINT

Sep 1, 2002

The most beautiful experiment

The most beautiful experiment in physics, according to a poll of Physics World readers, is the interference of single electrons in a Young's double slit. Robert P Crease reports.

1. Interferenza a singolo elettrone, Pozzi/Missiroli/Merli 1976
2. Caduta dei gravi, Galileo fine 1500
3. Carica elettrone, Millikan 1909
4. Scomposizione luce con prisma, Newton ~1670
5. Interferenza luce, Young 1803
6. Costante gravitazione, Cavendish 1797
7. Circonferenza della Terra, Eratostene ~200a.c.
8. Piano inclinato, Galileo ~1500
9. Nucleo Atomico, Rutherford 1911
10. Rotazione terra, Foucault 1951

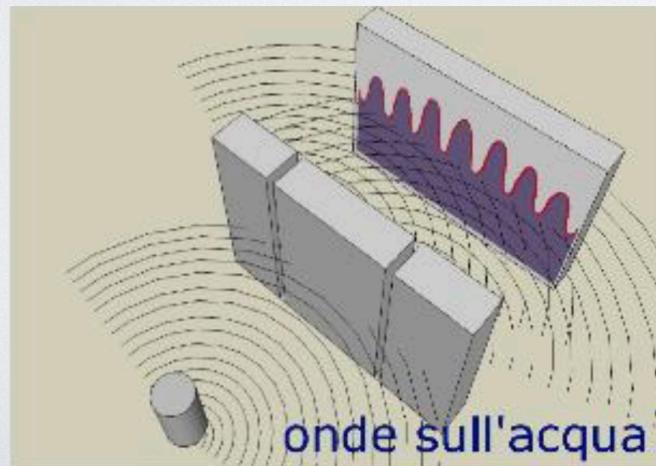
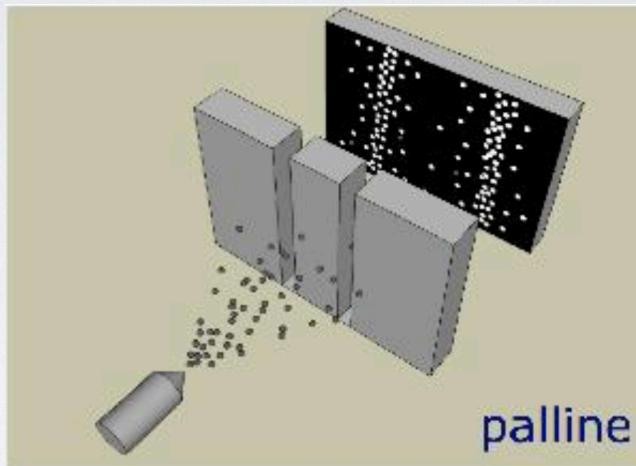
l'esperimento più bello della fisica

<http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/>

Interferenza di Young della doppia fenditura

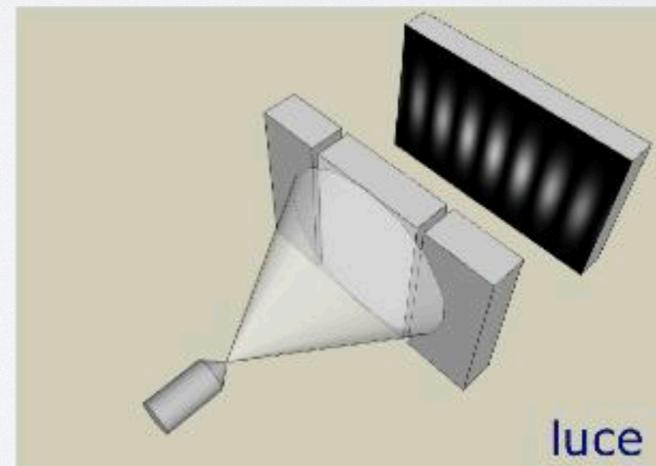
- PARTICELLE

localizzate
numerabili
indivisibili



- ONDE

estese
continue
divisibili



- FASCIO di ELETTRONI?

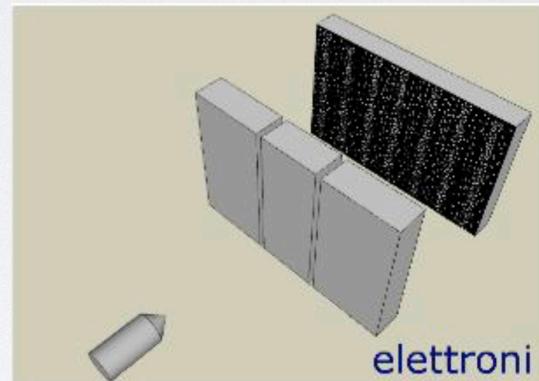
“particella” quantistica (puntiforme e indivisibile), ma mostrano anche un comportamento da onde:

- diffrazione

Davisson-Germer (1927) e G.P.Thomson (1928), fascio di elettroni attraverso cristalli (di Bragg)

- interferenza

Mollenstedt-Jonson, Faget-Fert (1956-1961), fascio di elettroni con fili elettrici (biprisma di Fresnel) e poi anche fenditure



gli elettroni sono particelle o onde?

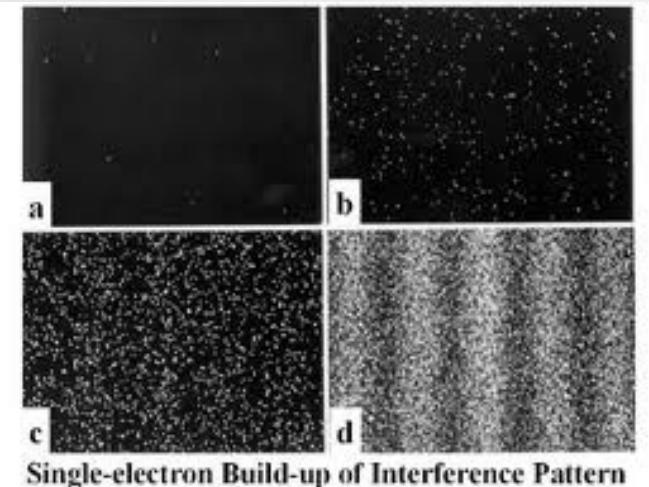
Curiosità:

Il Premio Nobel per la Fisica 1937 è attribuito a Davisson e G.P.Thomson per la scoperta che gli elettroni si comportano come onde:
“for their discovery of the interference phenomena arising when crystals are exposed to electronic beams”.

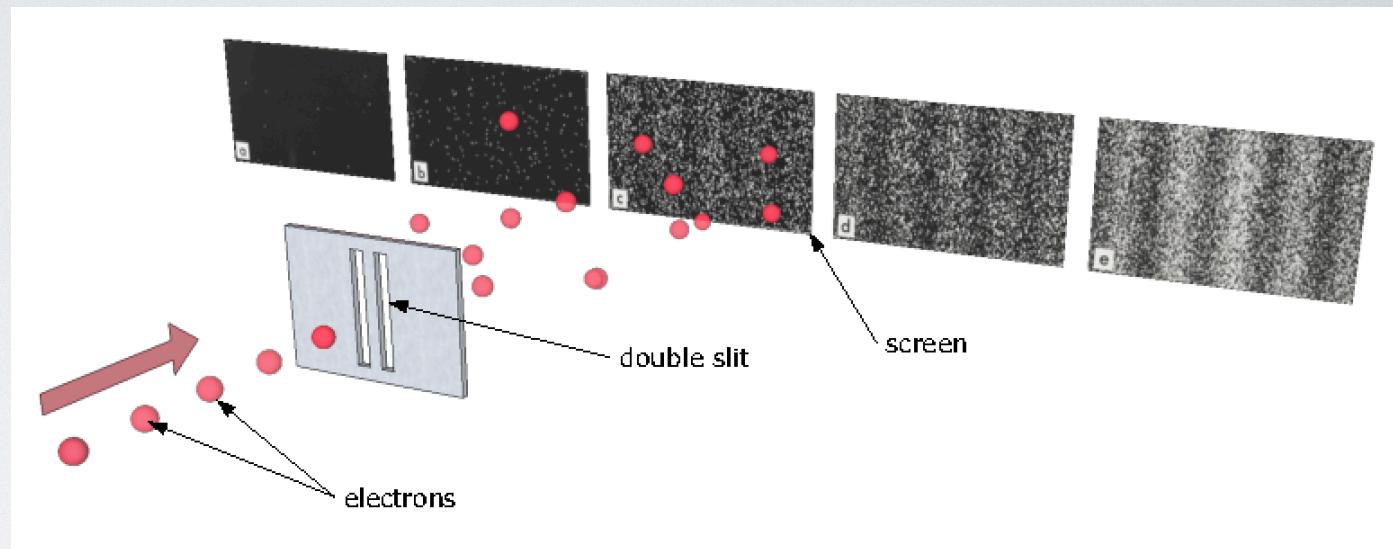
Nel 1906, suo padre J.J.Thomson era stato insignito del premio Nobel per avere scoperto l'elettrone come particella e averne misurato massa e carica.

Interferenza di singolo elettrone

sullo schermo arriva un elettrone per volta;
l'elettrone successivo parte solo dopo che quello precedente sia arrivato



Single-electron Build-up of Interference Pattern



Problema intrinsecamente *probabilistico*:

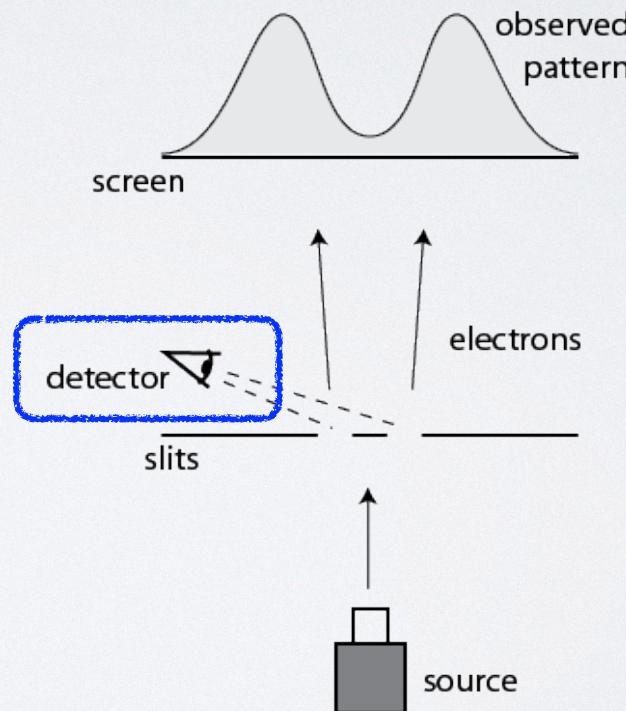
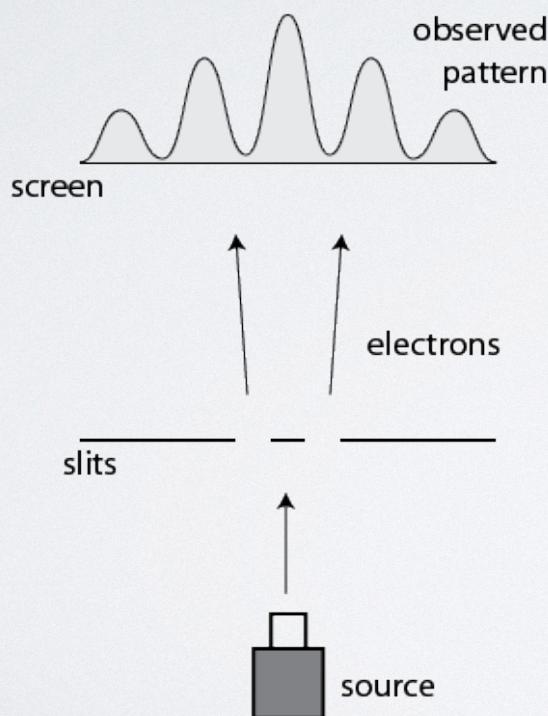
- ✿ non possiamo prevedere a priori dove arriva il singolo elettrone
- ✿ la figura d'interferenza si ricostruisce all'arrivo di molti elettroni

Attenzione: i pallini rossi sono una rappresentazione!
Noi possiamo solo sapere che un elettrone è emesso dalla sorgente
e noi lo misuriamo/osserviamo solo quando arriva sullo schermo

Aggiungiamo un detector:

che è in grado di determinare da quale fenditura l'elettrone passa

Ancora una volta arriva un elettrone alla volta, apparentemente in posizioni casuali e comunque non prevedibili.
Ma ora NON si forma più la figura di interferenza!



DOMANDA

l'elettrone è un'onda o una particella?

- non è ammessa la risposta “non so”
- è ammessa la risposta: “non posso rispondere perchè”

Neither Waves, Nor Particles, but Quantons!

That the true nature of quantum objects has long been misunderstood is proved by their still all too common description in terms of an alleged “wave-particle duality”. It must be remarked first of all that this formulation is at best ambiguous. For it may be understood as meaning either that a quantum object **is at once a wave and a particle**, or that **it is sometimes a wave and sometimes a particle**. Neither one of these interpretations in fact make sense. “Wave” and “particle” are not things but concepts, and incompatible ones; as such, they definitely cannot characterise the same entity. While it is true that quantum objects may in some cases **look like** waves, and in other cases like particles, **it is truer still that in most situations, particularly the ones explored by the elaborate modern experiments, they resemble neither one nor the other**. The situation here is reminiscent of that encountered by the first **explorers of Australia**, when they discovered strange animals dwelling in brooks. Viewed from the forefront, they exhibited a duckbill and webbed feet, while, seen from behind, they showed a furry body and tail. They were then dubbed **“duckmoles”**. It was later discovered that this **“duck-mole duality”** was of limited validity, and that the zoological specificity of these beasts deserved a proper naming, which was chosen as **“platypus”**. Bunge’s proposal to call them “quantons”, building on the common terminology (electrons, photons, nucleons, etc.) and extending it to a common categorisation, is most to the point, and it is to be hoped that this terminology gradually gains ground.

JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND, On the Nature of Quantons, 2003,
Science & Education

DOMANDA
l'elettrone è un'onda o una particella?

- non è ammessa la risposta “non so”
- è ammessa la risposta: “non posso rispondere perchè”

... ma questo è?

TALPA
(particella)



OCA
(onda)

ORNITORINCO
(un oggetto quantistico)

DOMANDA

da quale fenditura è passato l'elettrone?

secondo la Fisica/Logica Classica ci sono solo tre possibili risposte, nessuna accettabile

☞ è passato attraverso **ENTRAMBE**

non è un'alternativa accettabile poichè tutti gli esperimenti ci dicono che un elettrone non si spezza in due

☞ non è passato da **NESSUNA** parte

non è un'alternativa accettabile poichè tutti gli esperimenti ci dicono che l'elettrone non si perde per strada

☞ è passato a destra **OPPURE** a sinistra

non è un'alternativa accettabile poichè non si vedrebbe la figura di interferenza, come nel caso dei proiettili

Come si può uscire da questa empasse logica?

SOVRAPPOSIZIONE

Lo STATO dell'elettrone prima di essere rivelato non è ben definito in termini delle alternative classiche (passare nella fenditura 1 o nella 2), che indicheremo con $|0\rangle$ e $|1\rangle$, ma è in uno stato di **SOVRAPPOSIZIONE**:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$$

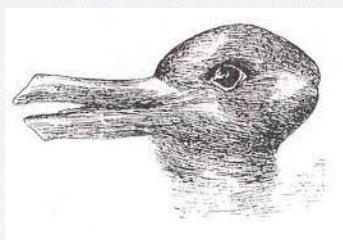
che descrive il fatto che, *prima della misura*, le due alternative classiche sono entrambe possibili mentre l'elettrone “sceglie” di essere $|0\rangle$ ovvero $|1\rangle$ solo quando viene *misurato*

Chiariamo questo concetto in termini probabilistici
l'atomo è nello stato *è equivalente a* **dopo la misura, l'atomo ha probabilità**

$$|0\rangle$$

$|1\rangle$

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



1 di essere $|0\rangle$

1 di essere | 1>

1/2 di essere $|0\rangle$ oppure $||1\rangle$

L'elettrone è un oggetto che soddisfa regole diverse da quelle della logica classica (binaria o aristotelica).

PROBABILITÀ

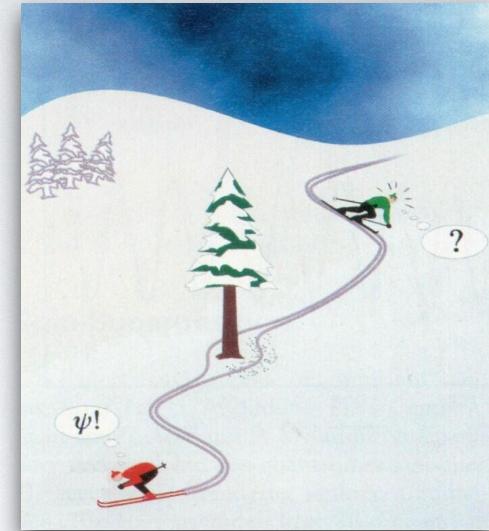
Contrariamente a ciò che succede in un esperimento di fisica classica, nel mondo quantistico non possiamo rispondere con un semplice SÌ/NO alla domanda:

<< si realizzerà un certo evento? >>

Un enunciato: <<l'elettrone è passato a destra>> può essere in fisica classica VERO o FALSO
e queste due possibilità sono mutualmente escludentesi

In fisica quantistica invece l'enunciato può essere contemporaneamente vero e falso, con una certa probabilità di essere vero e una certa probabilità di essere falso.
Solo ripetendo l'esperimento molte volte, possiamo predire con quale probabilità l'evento si verifica/non si verifica.

La fisica quantistica introduce una nuova logica,
intrinsecamente (*ontologicamente*) legata al concetto di probabilità.



PROPRIETÀ

Questo significa anche che non possiamo attribuire a priori una certa proprietà a un oggetto quantistico: non possiamo dire che È 0 o 1 (bianco/nero, acceso/spento, ...).
Questo accade solo dopo che ho effettuato una misura, e in maniera probabilistica.

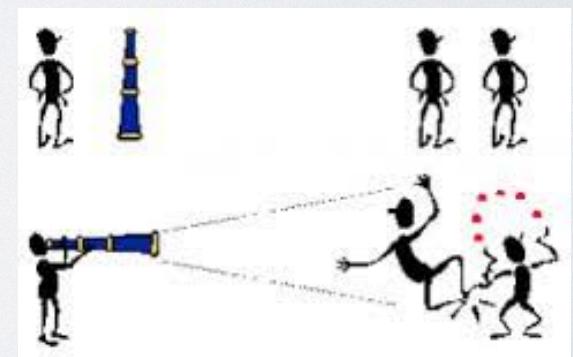
La logica che sottende la fisica quantistica, non è solo probabilistica, ma lo è anche in un modo diverso rispetto alla probabilità classica.

OSSERVATORE

La presenza di un osservatore/apparato di misura cambia l'esito di un esperimento.

Non esiste un OSSERVATORE “esterno” al sistema, che non lo perturba.

Chi è allora l'OGGETTO e chi è il SOGGETTO?



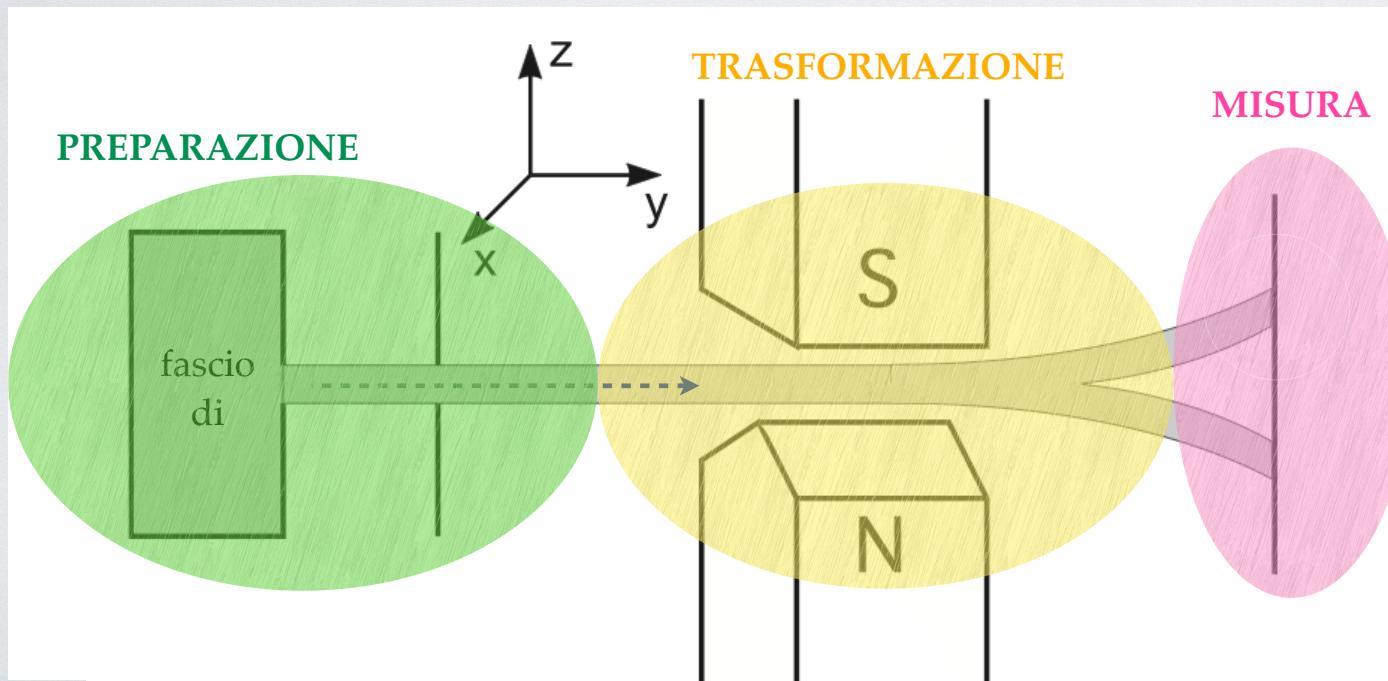
**The Young-Feynman two-slits experiment with single electrons:
Build-up of the interference pattern
and arrival-time distribution using a fast-readout pixel detector**

S. Frabboni, A. Gabrielli , G. Gazzadi,
F. Giorgi, G. Matteucci, G. Pozzi,
N. Semprini Cesari, M. Villa, A. Zoccoli

gli esperimenti di Stern-Gerlach

L'esperimento di Stern-Gerlach

- ha permesso di scoprire una **proprietà** nuova dei costituenti elementari della materia, una sorta di momento magnetico intrinseco, detto SPIN, che può assumere, a seguito di una misura, solo due valori; ma non è una variabile binaria classica, segue le leggi quantistiche
- fornisce un metodo sperimentale per manipolare oggetti quantistici come gli atomi, attraverso l'interazione dello spin con un campo magnetico.



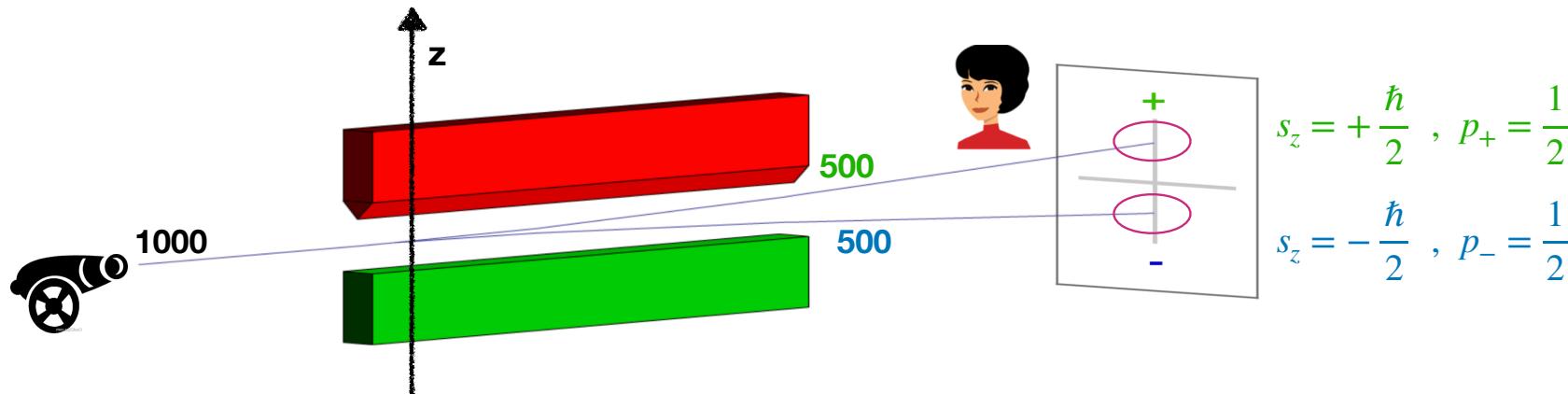
SORGENTE: di atomi, con uno *spin* completamente casuale

CAMPO MAGNETICO: che interagisce con lo spin degli atomi, deviando la loro traiettoria in maniera differente a seconda del valore dello spin; il campo magnetico può essere orientato lungo una direzione a piacere

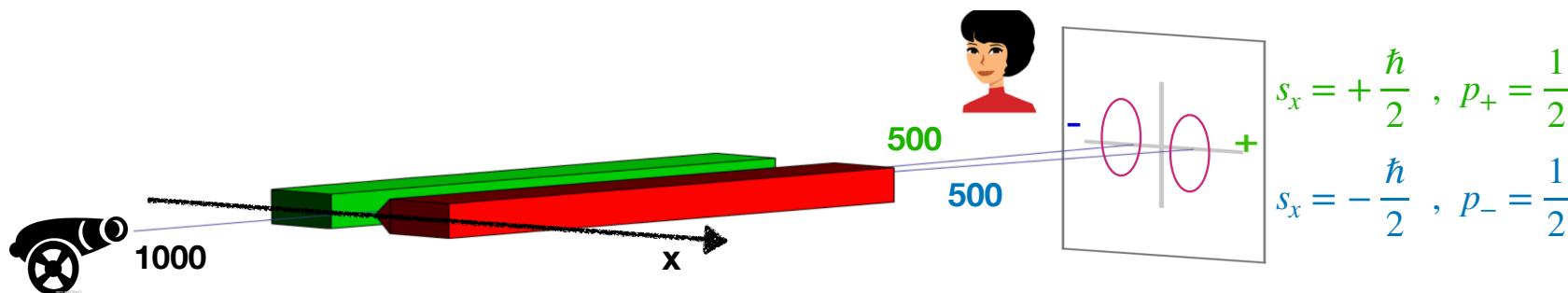
SCHERMO: fluorescente, che si illumina quando viene colpito da un atomo

ESPERIMENTO #1

PREPARAZIONE (NIZIALIZZAZIONE) DELLO STATO



valore misurato dello spin s_z , in direzione z, e relativa probabilità

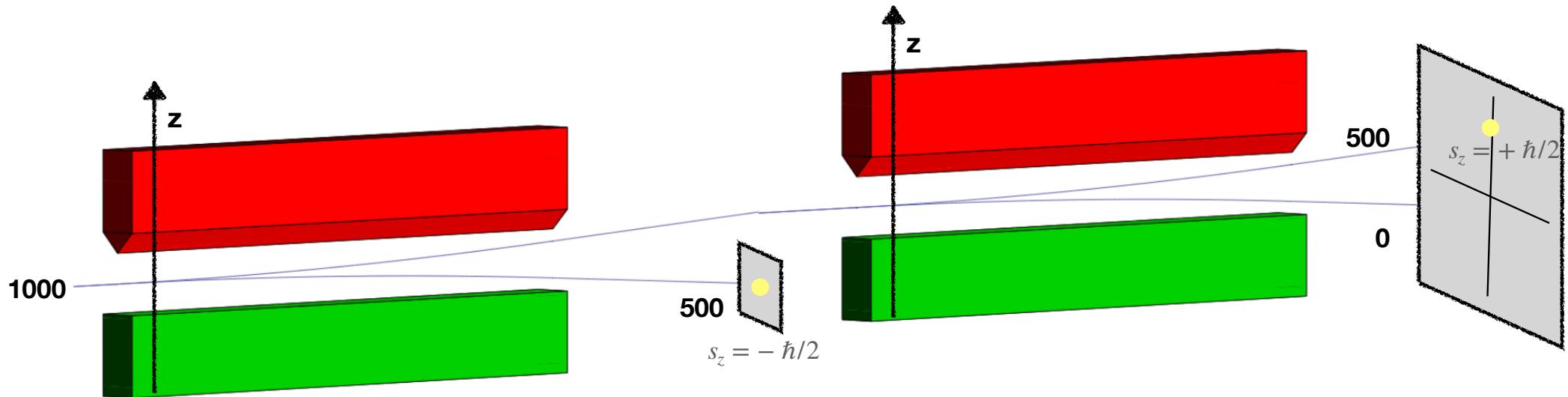


valore misurato dello spin s_x , in direzione x, e relativa probabilità

$$(\hbar = h/2\pi, \text{ costante di Planck : } h = 6.63 \times 10^{-34} m^2 kg/s)$$

ESPERIMENTO #2

VERIFICA DELLO STATO PREPARATO



- Il secondo apparato conferma che tutti gli atomi del fascio superiore sono preparati nello stato con $s_z = +\frac{\hbar}{2}$
Una cosa simile succede se blocco gli atomi con $s_z = +\frac{\hbar}{2}$: tutti gli atomi del fascio superiore sono preparati nello stato con $s_z = -\frac{\hbar}{2}$
- La stessa cosa succede se uso due apparati con il campo nella direzione x:
si conferma che posso preparare tutti gli atomi con $s_x = -\frac{\hbar}{2}$ o $s_x = +\frac{\hbar}{2}$

Osservazione 1.

Usando l'esperienza comune o della fisica classica, possiamo riassumere questi comportamenti dicendo che gli atomi possiedono delle **proprietà** specifiche (che chiamiamo spin lungo l'asse z oppure spin lungo l'asse x).

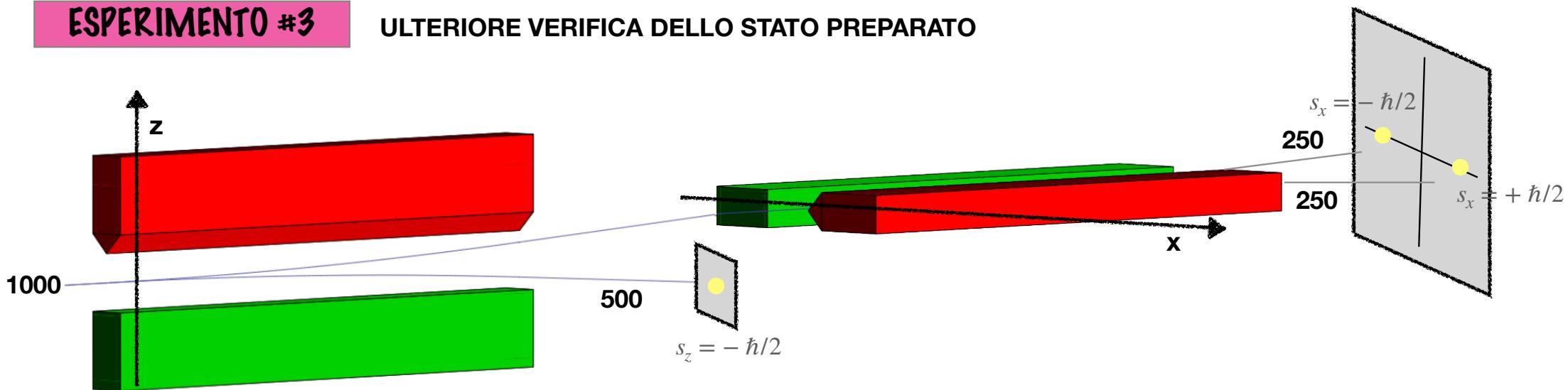
Ciascuna di esse può assumere solo due **valori misurati** ($\pm \hbar/2$) -come si vede dagli esperimenti.

Quindi: lo **stato** fisico che descrive l'atomo -e che quindi deve poter descrivere anche tali proprietà dell'atomo - può essere rappresentato con una variabile che può assumere solo i due valori che otteniamo negli esperimenti.

Questi esperimenti suggeriscono che, guardando una certa direzione, gli atomi prodotti dalla sorgente sono costituiti da una **miscela** di due popolazioni che corrispondono ai diversi valori dello spin ($\pm \hbar/2$) in quella direzione (x o z).

ESPERIMENTO #3

ULTERIORE VERIFICA DELLO STATO PREPARATO



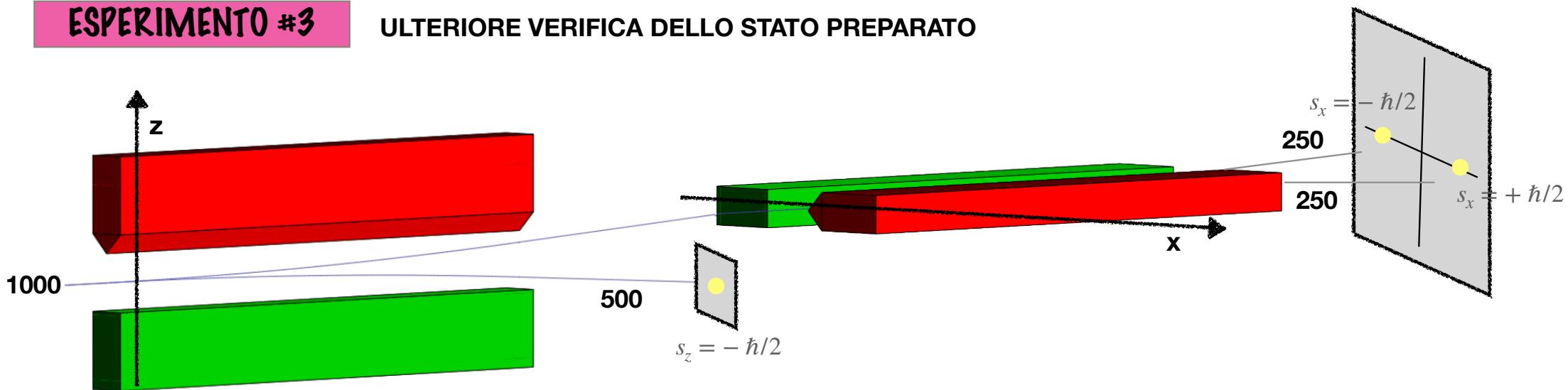
Questo ci dice che gli atomi del fascio superiore non hanno un valore definito dello spin lungo la direzione x:

lo stato con $s_z = + \hbar/2$ sembra essere costituito in egual misura da stati con $s_x = \pm \hbar/2$.

Una cosa analoga succede se si scambia l'ordine dei due apparati: lo stato con $s_z = + \hbar/2$ sembra essere costituito in egual misura da stati con $s_x = \pm \hbar/2$. La stessa cosa succede anche se, dopo il primo apparato, si misura il fascio superiore.

ESPERIMENTO #3

ULTERIORE VERIFICA DELLO STATO PREPARATO



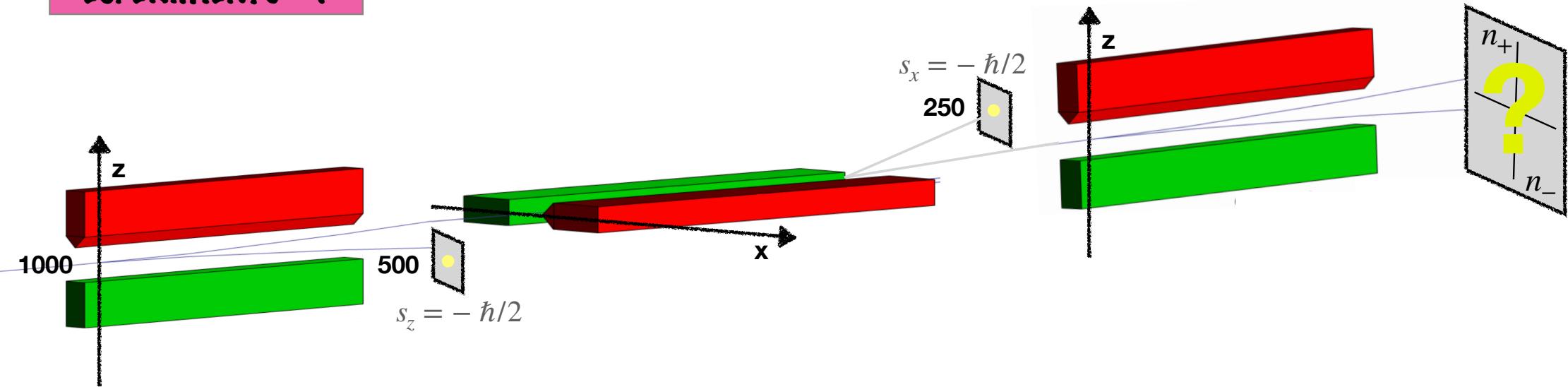
Questo ci dice che gli atomi del fascio superiore non hanno un valore definito dello spin lungo la direzione x:

lo stato con $s_z = + \hbar/2$ sembra essere costituito in egual misura da stati con $s_x = \pm \hbar/2$.

Una cosa analoga succede se si scambia l'ordine dei due apparati: lo stato con $s_x = + \hbar/2$ sembra essere costituito in egual misura da stati con $s_z = \pm \hbar/2$. La stessa cosa succede anche se, dopo il primo apparato, si misura il fascio superiore.

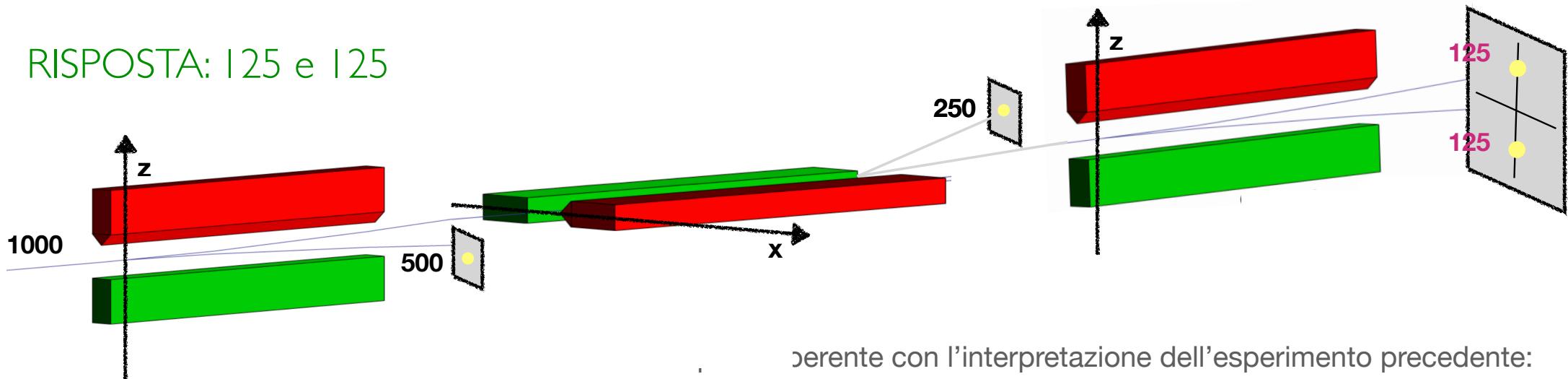
Osservazione 2. Questi esperimenti suggeriscono che, gli atomi prodotti dalla sorgente sono costituiti da una *miscela* di quattro popolazioni che corrispondono ai diversi valori dello spin lungo z e x: $s_z = \pm \hbar/2$, $s_x = \pm \hbar/2$

ESPERIMENTO #4



ESP. #4	QUANTI ATOMI VANNO NELLO SPOT IN ALTO/BASSO?
A.	$n_+ = 125, n_- = 125$
B.	$n_+ = 250, n_- = 0$
C.	$n_+ = 0, n_- = 250$

RISPOSTA: 125 e 125



corrente con l'interpretazione dell'esperimento precedente:

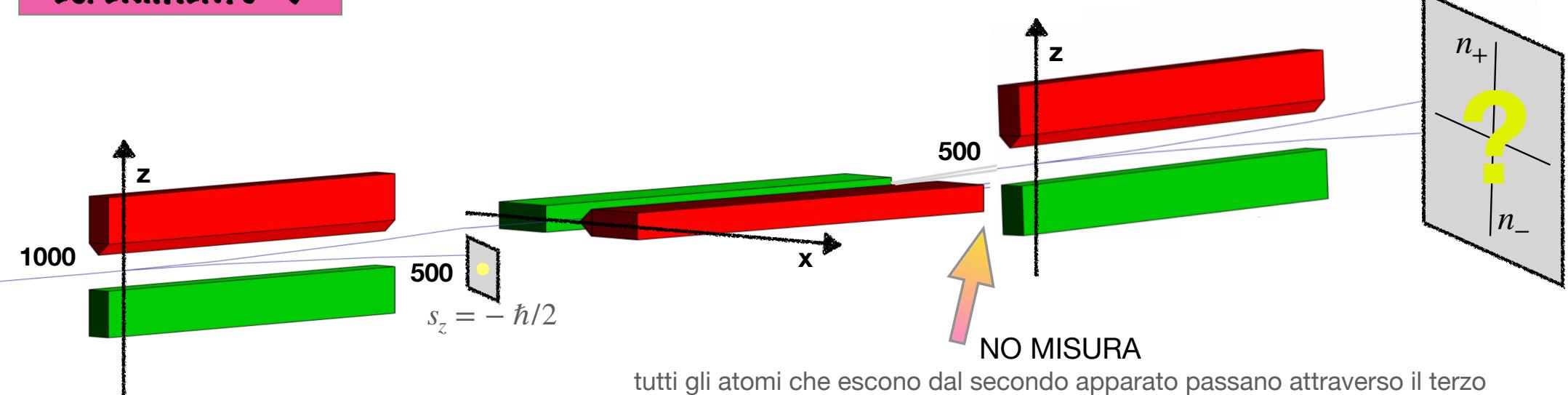
- anche qui, sembra che lo stato con $s_x = -\hbar/2$ sia costituito in egual misura da stati con $s_z = \pm \hbar/2$,
- ma, dopo essere passati attraverso il secondo apparato lungo x, gli atomi sembrano “essersi dimenticati” di essere stati preparati dal primo apparato tutti nello stato con $s_z = +\hbar/2$

In altre parole,

non è possibile che sia lo spin lungo z che lo spin lungo x abbiano *simultaneamente* un valore ben definito: quando uno è esattamente definito l'altro è completamente indeterminato, perché una misura ci dà una probabilità del 50% di trovare ciascuno dei suoi possibili valori di quest'ultimo.

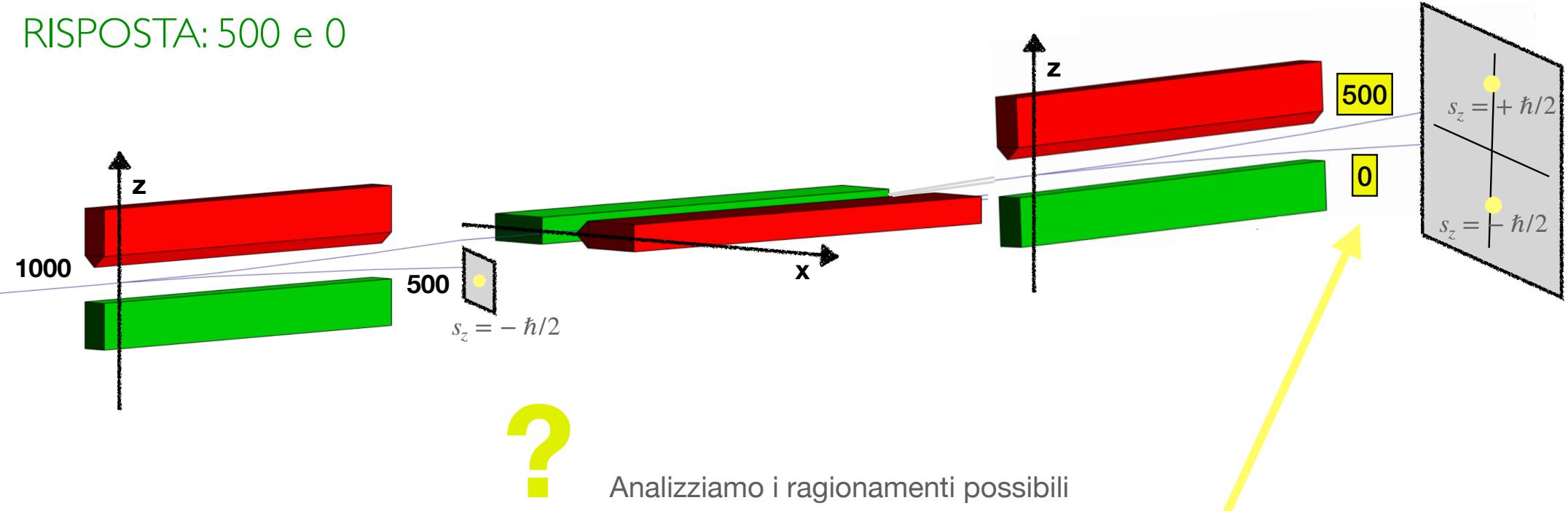
→ lo spin lungo x e lo spin lungo z sono variabili *incompatibili*
→ non possiamo parlare di una miscela di popolazioni identificate da valori specifici delle variabili

ESPERIMENTO #5



ESP. #5	QUANTI ATOMI VANNO NELLO SPOT IN ALTO/BASSO?
A.	$n_+ = 250, n_- = 250$
B.	$n_+ = 500, n_- = 0$
C.	$n_+ = 0, n_- = 500$

RISPOSTA: 500 e 0



Ragionamento 1. (MISCELA di proprietà classiche)

Dopo l'apparecchio lungo x, un atomo ha uguale probabilità di essere nel fascio sinistro/destro (da esperimento 3); per ciascuno di questi due casi la probabilità di essere deviato verso l'alto o verso il basso dopo l'ultimo apparato è pari a $\frac{1}{2}$ (da esperimento 4).

Di conseguenza ci saranno
250 atomi in alto e 250 in basso.

Ragionamento 2. (OGGETTO QUANTISTICO)

Dopo l'apparecchio lungo x, non faccio la misura e quindi l'atomo continua trovarsi nello stato con cui è uscito dal primo apparato, lungo l'asse z, e quindi non ha un valore lungo x definito (da esperimento 4). Di conseguenza l'ultimo apparato devierà tutti gli atomi verso l'alto (da esperimento 2).

Di conseguenza ci saranno
500 atomi in alto e 0 in basso.

I calzini di Erwin

Erwin aveva una collezione di calzini molto semplice:

- rossi o blu, per andare a scuola o per giocare a pallone
- corti o lunghi, per i pantaloni o i pantaloncini.

Erwin teneva i calzini in due cassetti.

In uno teneva i calzini rossi e nell'altro quelli blu.

Riteneva di poter capire se erano lunghi e corti semplicemente toccandoli.

Ma, ogni volta che dal cassetto “dei calzini rossi”, estraeva due calze lunghe o due calze corte, c’era una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse rosso o blu. I risultati dal cassetto “blu” erano gli stessi.

I calzini sembravano aver dimenticato la proprietà che Erwin aveva determinato precedentemente di essere rossi o blu.

(La stessa cosa succedeva se Erwin organizzava i calzini nei cassetti a seconda della lunghezza.)



(liberamente tratto da McIntyre, Manogue, Tate “Paradigms in Physics: Quantum Mechanics”, Oregon State University)

SPUNTI di LETTURA (divulgativi, ma rigorosi)

G. Lulli, L'esperimento più bello, Apogeo Education

G.C. Ghirardi, Un'occhiata alle carte di Dio, Il saggiautore

A. Zeilinger, La danza dei fotoni, Codice Edizioni

C. Rovelli, Helgoland, Adelphi

N. Gisin, Quantum Chance, Springer

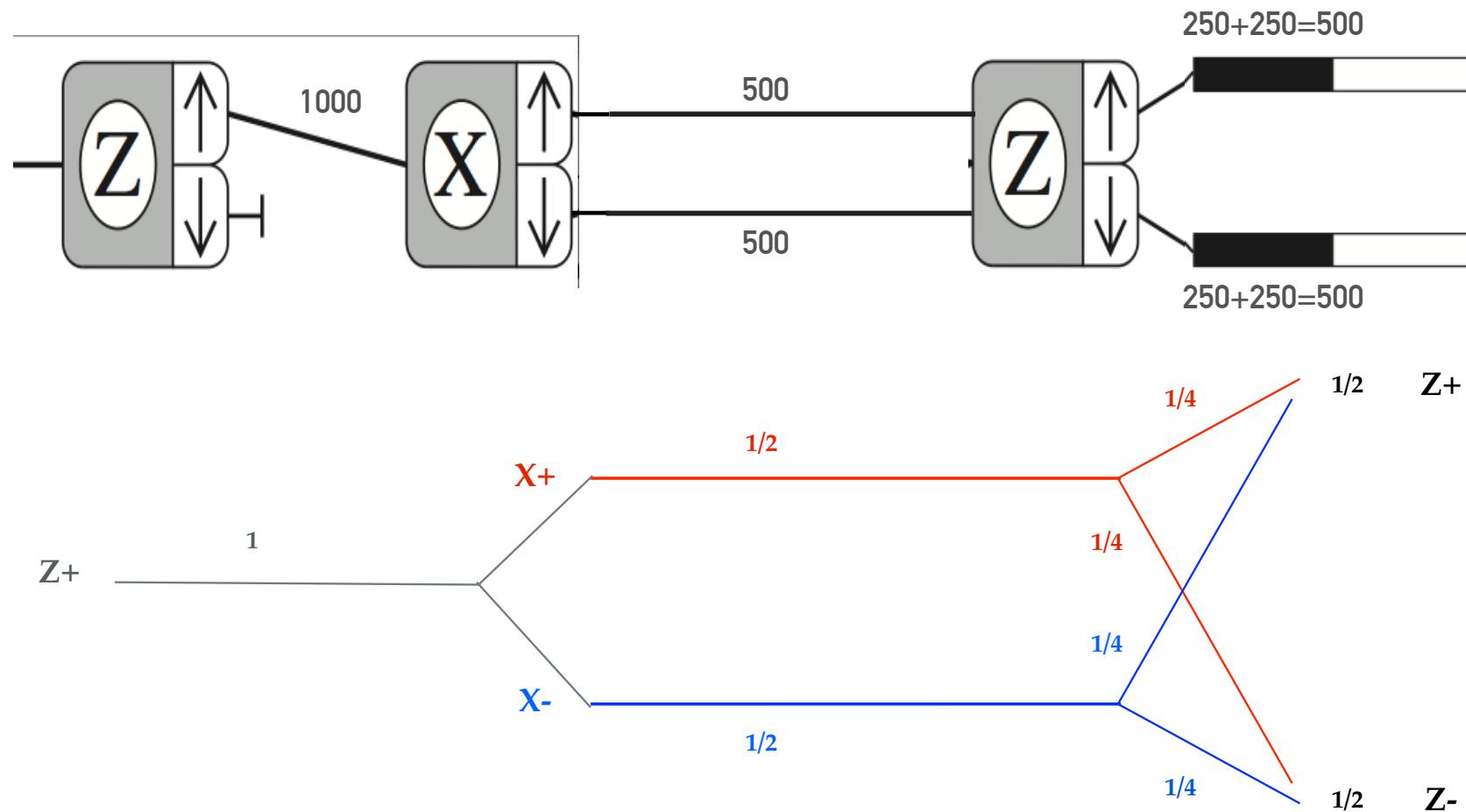
SIMULAZIONI

<http://toutestquantique.fr>

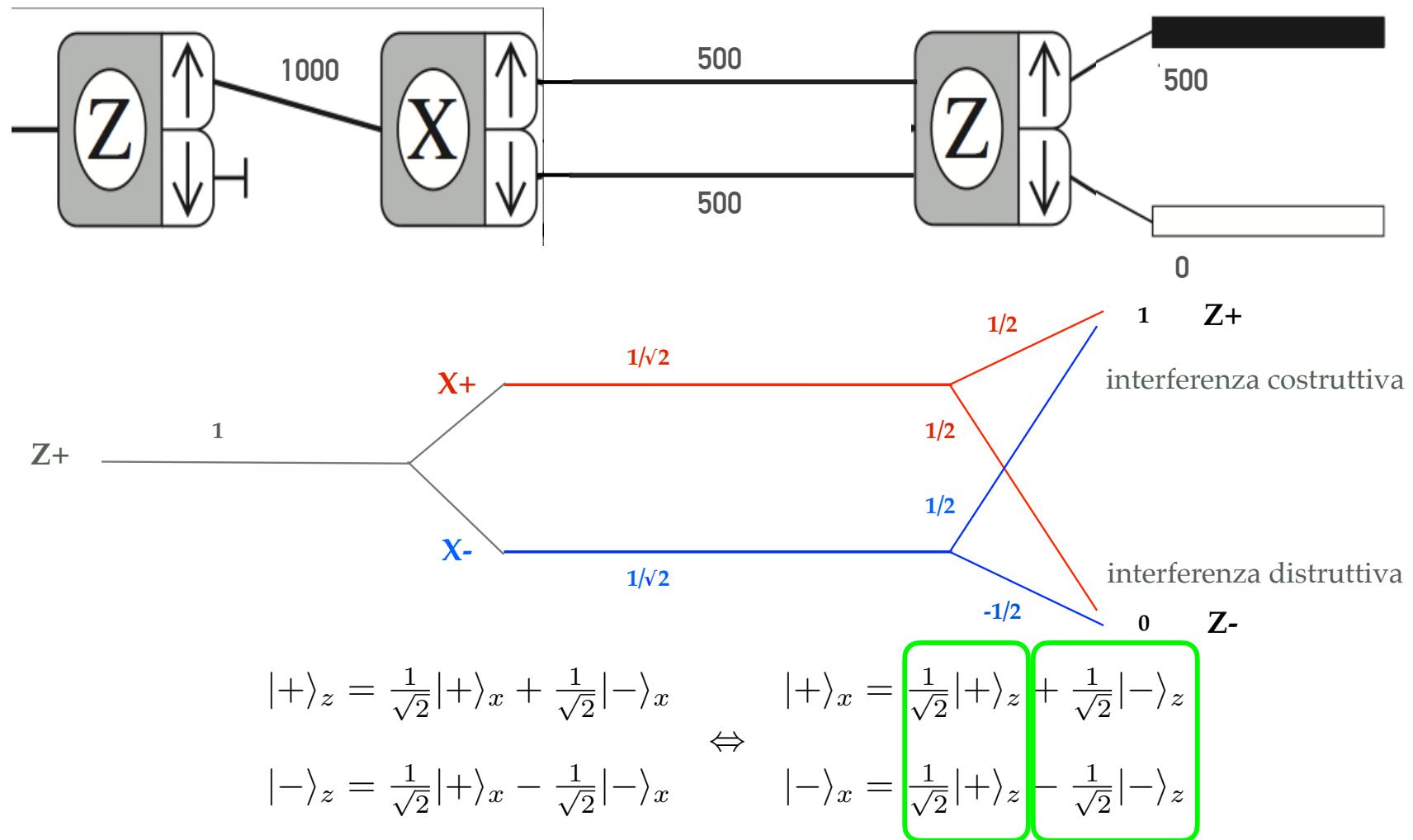
<https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/>

le regole della probabilità quantistica

STERN GERLACH - INTERPRETAZIONE CLASSICA



STERN GERLACH - INTERPRETAZIONE QUANTISTICA



✿ In Fisica Quantistica gli **STATI** sono descritti da dei vettori, detti "vettori di stato", tali che:

1. Un generico vettore si può scrivere come sovrapposizione di un certo numero di vettori "di base", che rappresentano le possibili alternative classiche.
2. I coefficienti di tale sovrapposizione (componenti del vettore) sono delle **AMPIEZZE DI PROBABILITÀ**, con le seguenti regole:

IN SUCCESSIONE, LE AMPIEZZE DI PROBABILITÀ SI MOLTIPLICANO

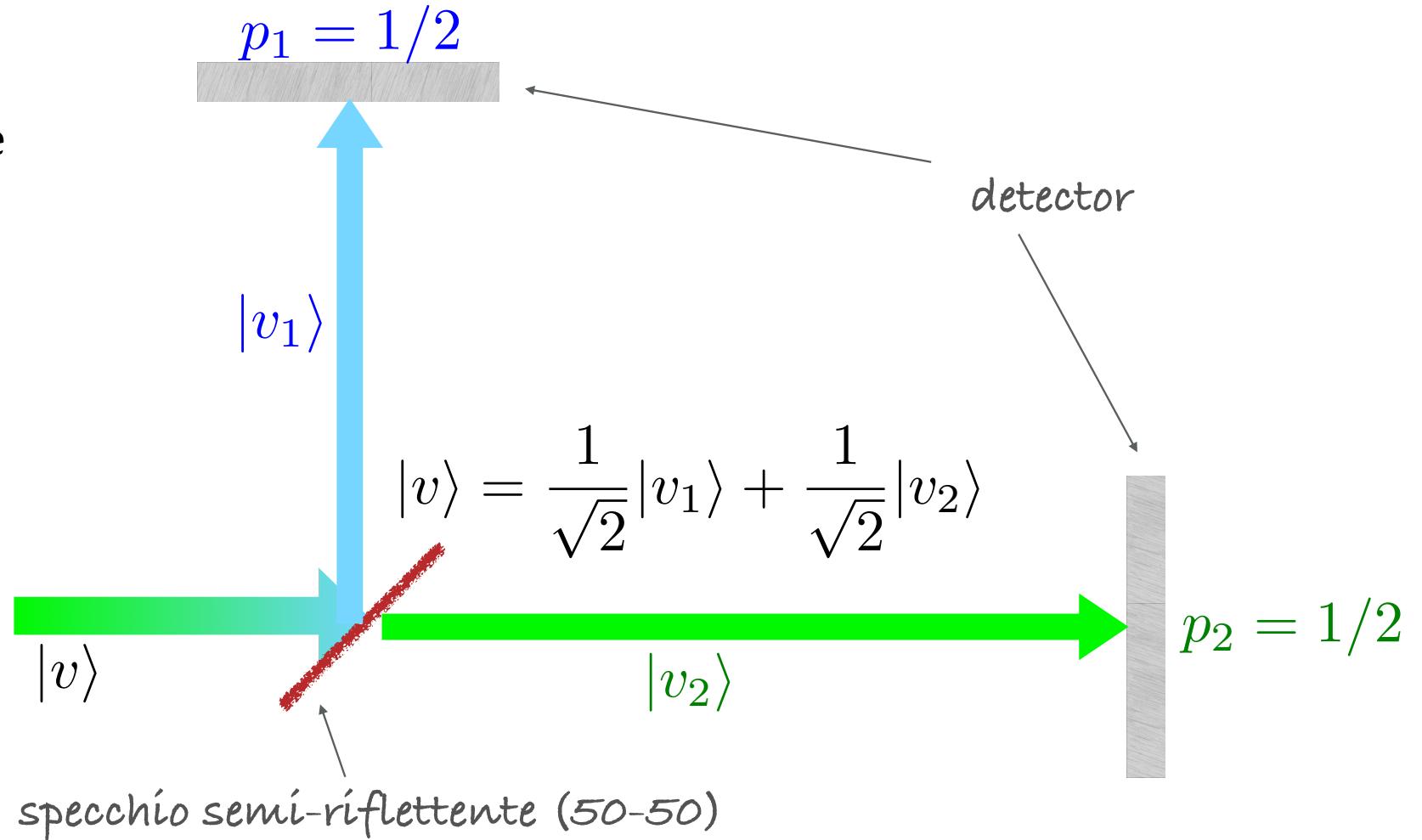
L'AMPIEZZA FINALE È LA SOMMA DELLE POSSIBILI ALTERNATIVE

LA PROBABILITÀ FINALE È IL QUADRATO DELLA AMPIEZZA FINALE

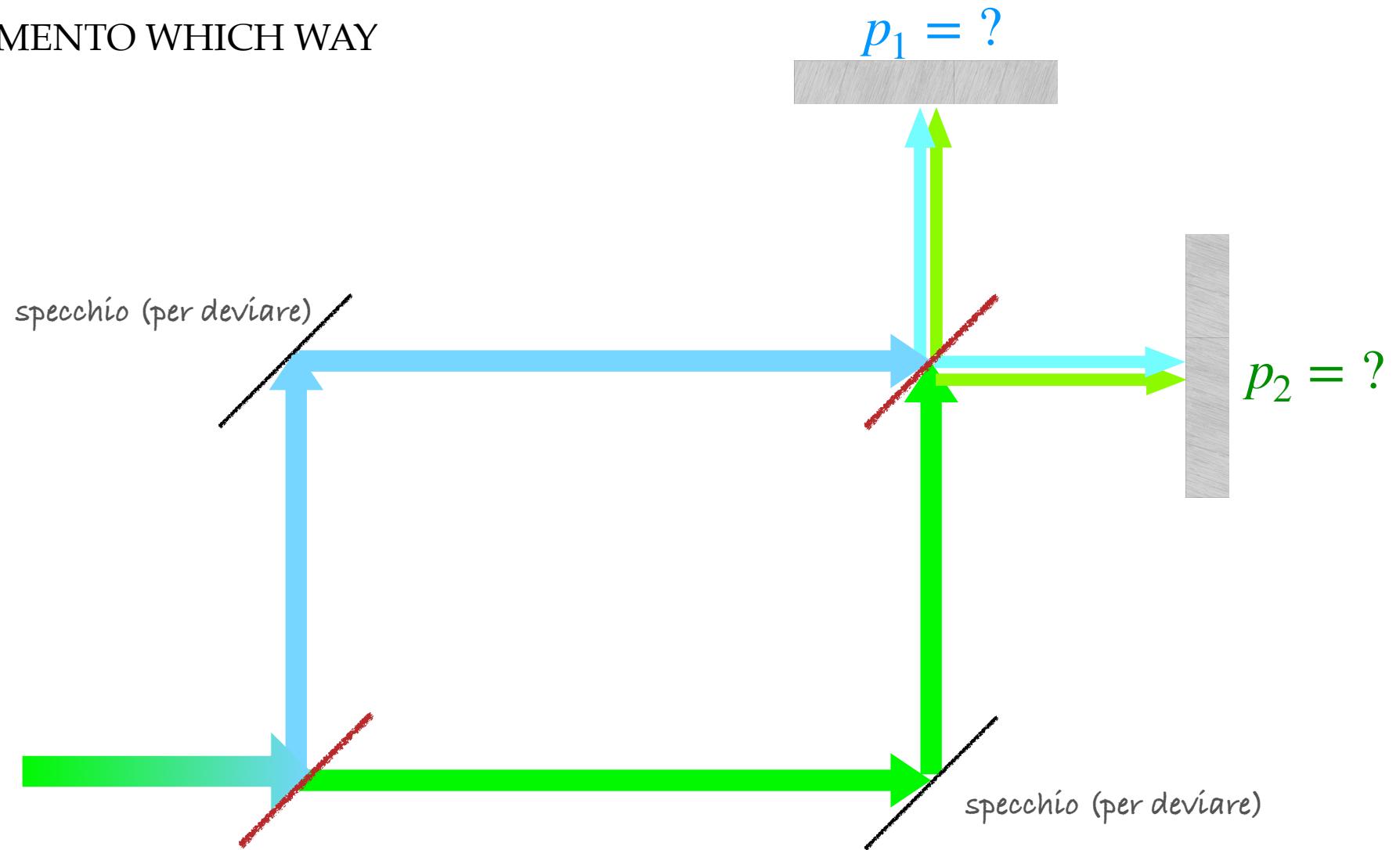
ESERCIZIO: BEAM SPLITTER

descrizione

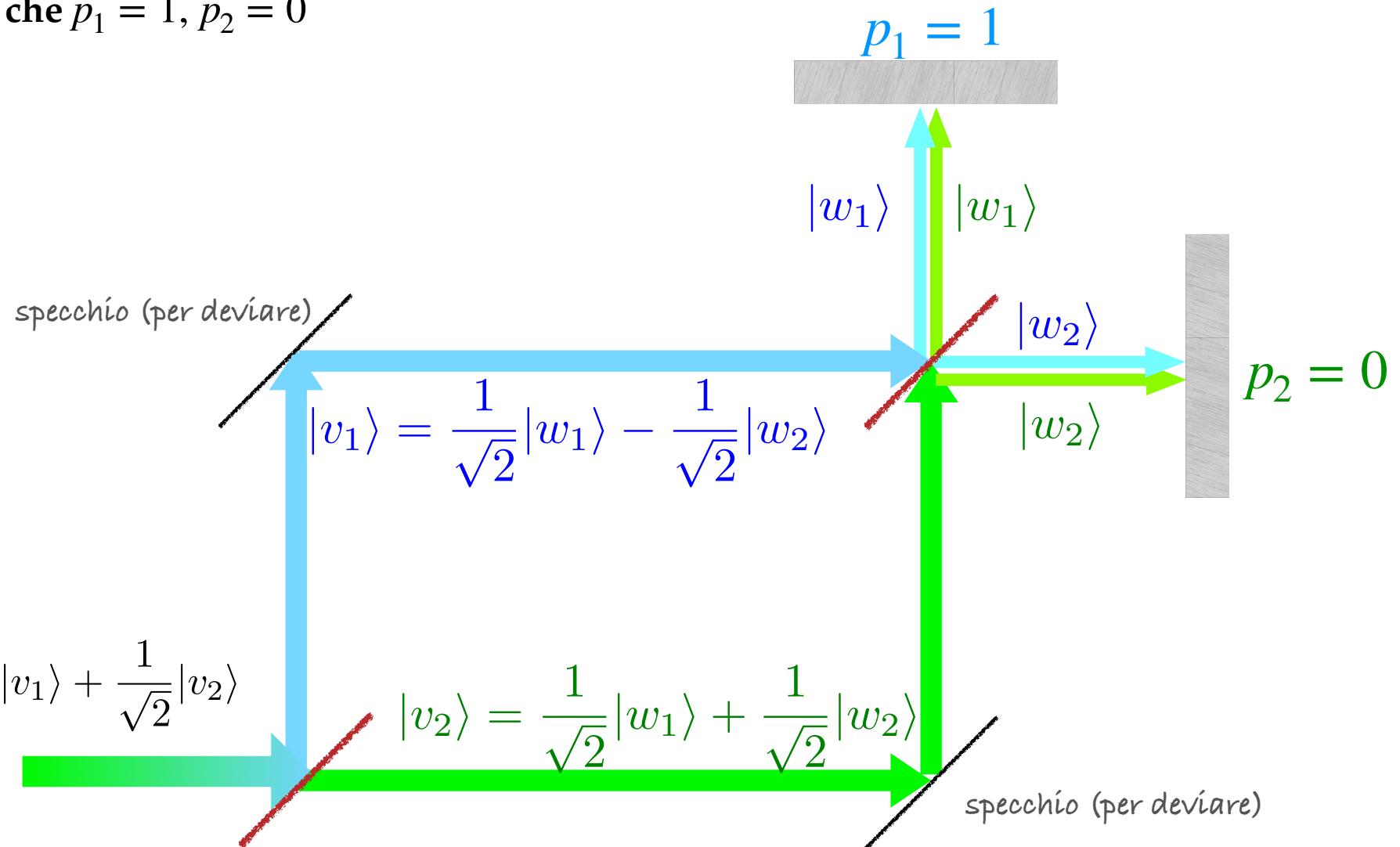
esperimento
con
singolo fotone



ESPERIMENTO WHICH WAY



Mostrare che $p_1 = 1$, $p_2 = 0$



ESERCIZIO: Il gioco della moneta

N.B. Alice e Bob non possono vedere la faccia della moneta o la mossa dell'altro/a giocatore/trice



Dimostrare che Alice/Bob hanno il 50% di probabilità di vincere



**Dimostrare che Q-Alice ha una mossa che le permette di vincere sempre
(considerare i gate elementari $\|, X, Y, Z, H, \dots$)**

il principio di indeterminazione

$$(\Delta A)(\Delta B) \geq \frac{1}{2} \langle [A, B] \rangle$$

per esempio: $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$

Nella fisica quantistica non sarà più possibile dire che:

- a) *l'oggetto possiede valori determinati di posizione e di velocità ad ogni istante,*
- b) *la misura rivela il valore della proprietà posseduta dall'oggetto,*
- c) *l'incertezza è di origine sperimentale.*

dove: (vedere nota per una dimostrazione) $\langle A \rangle = \langle \psi | A | \psi \rangle$ $(\Delta A)^2 = \langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2$