

Bertoldo in corte



LA MECCANICA QUANTISTICA VISTA DA UNO SPERIMENTALE – 3

Applicazioni & Interpretazioni

Tentativo ingenuo di risposta alla domanda:

A cosa serve la meccanica quantistica?...

Tentativo, ancora più ingenuo, di spiegare perché l'altra domanda

...E, già che ci siamo, cosa vuol dire esattamente?

non ha mai avuto una risposta semplice

Settori di applicazione

Fisica
della materia

Fisica atomica
Fisica molecolare
Fisica dei solidi
Fisica dei materiali

Laser
Optoelettronica
Superconduttori
Semiconduttori
Calcolo quantistico

Fisica delle
interazioni
fondamentali

Fisica nucleare
Fisica delle particelle

Energetica
Diagnostica medica
Radioterapia

Astrofisica

Evoluzione stellare
Cosmologia

Fisica atomica

Studio dettagliato della struttura degli atomi:
livelli energetici e funzioni d'onda

Di grande interesse per un'infinità di applicazioni, in primis in chimica

Studio dettagliato delle transizioni elettromagnetiche negli atomi

Ottica quantistica

Optoelettronica

LASER

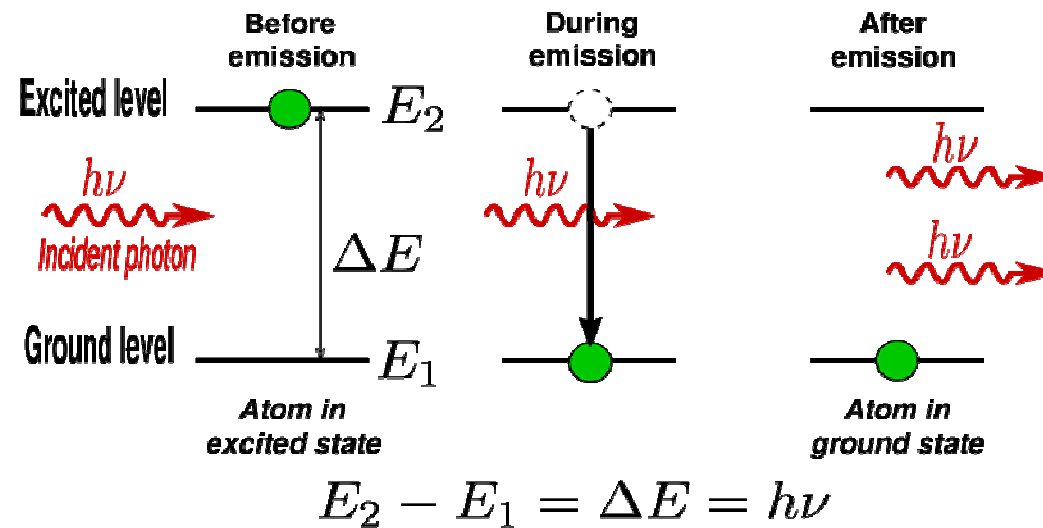
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Tecnica di produzione di luce coerente e monocromatica

Basato su emissione stimolata di luce (Einstein, 1915):

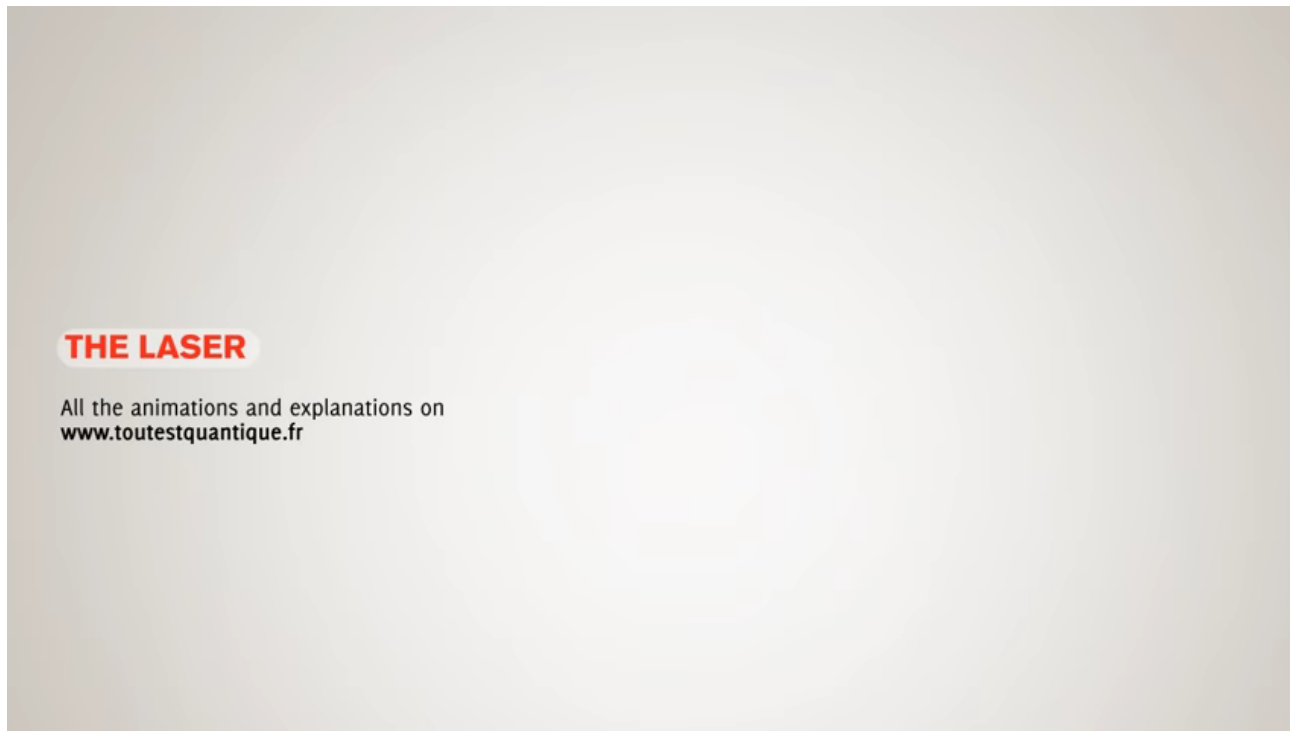
Processo quantistico di transizione per un sistema a due livelli energetici
Se il livello superiore è più popolato di quello inferiore, radiazione incidente di frequenza $\nu = \Delta E/\hbar$ oltre a attivare la transizione dal livello più basso a quello più alto (assorbimento), attiva anche quella opposta (emissione)

Emissione stimolata



Fotone emesso *coerente* con quello incidente: stessa frequenza, direzione, ...
→ Forte amplificazione dell'intensità di radiazione
Conseguenza della natura quantistica della radiazione e della materia

Il laser animato



Fisica molecolare

Comprensione dettagliata della struttura molecolare

Base quantistica per la comprensione dell'origine e natura del legame chimico

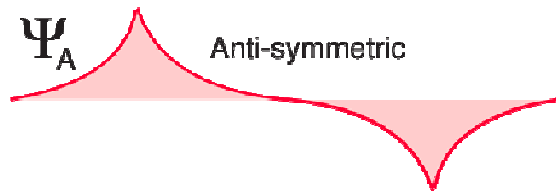
Definitivo inquadramento della chimica come parte della fisica ;-)

Comprensione di molti dettagli nella chimica organica

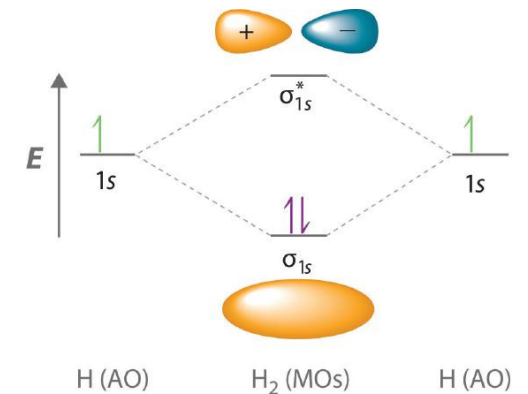
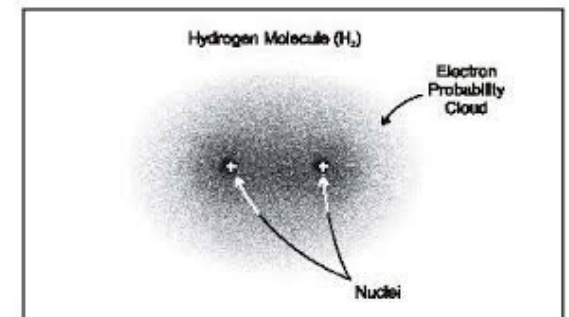
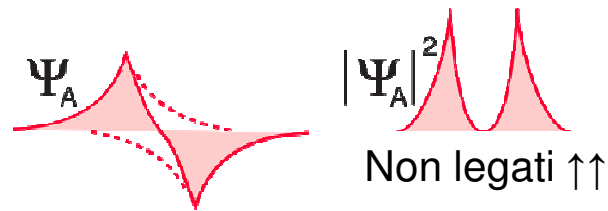
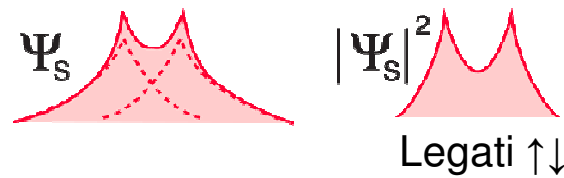
Innumerevoli applicazioni

Legame covalente: H₂

Atomi lontani



Atomi vicini



Funzione d'onda di due elettroni: Antisimmetrica per scambio
Prodotto della parte spaziale e di quella di spin

Fisica dei solidi

Soggetto estremamente vasto, alla base di un'infinità di applicazioni

MQ applicata alla struttura cristallina: Problema a molti corpi

Proprietà:

Termiche

Meccaniche

Elettriche

Magnetiche

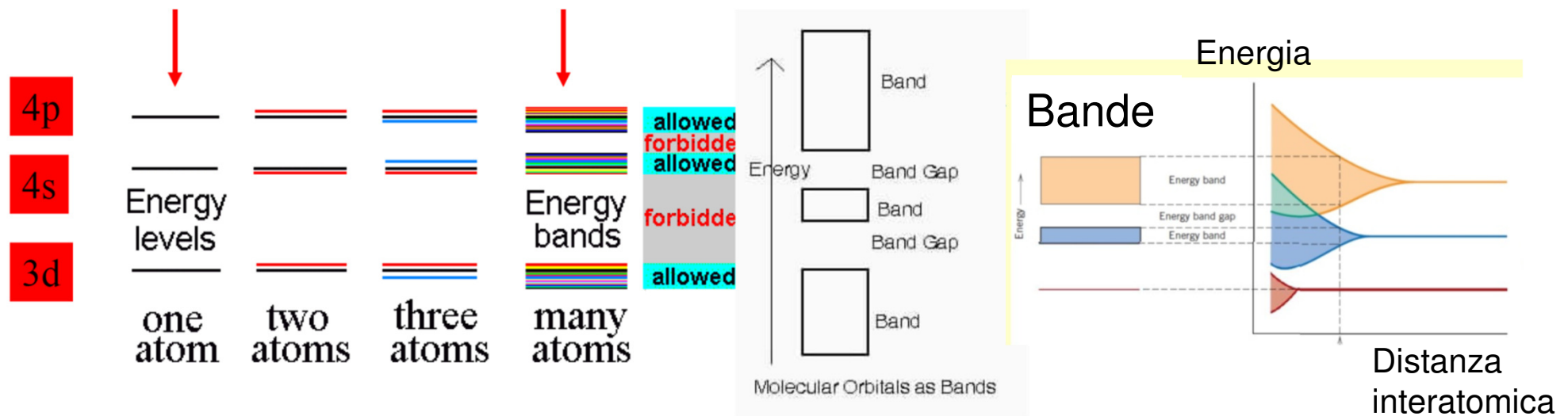
Ottiche

.....

Base della scienza dei materiali

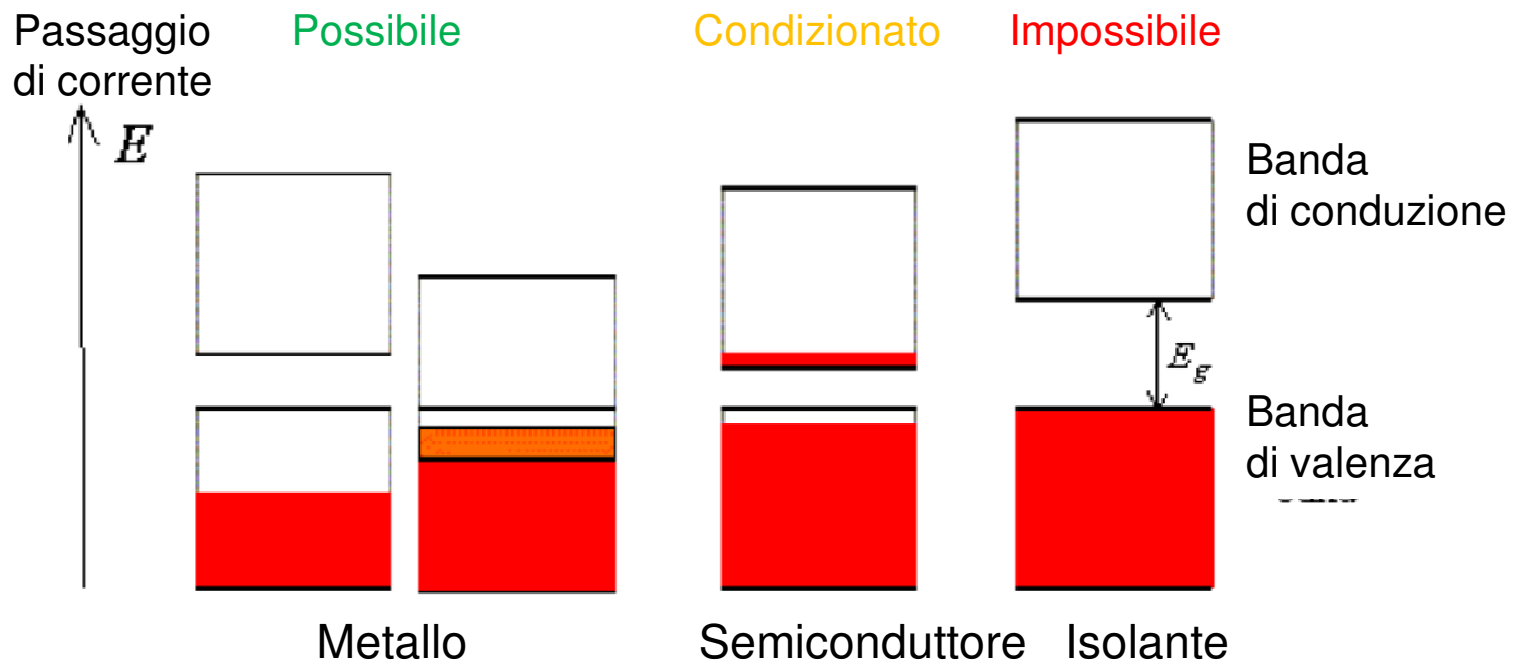
Bande di energia nei solidi cristallini

Conseguenza del principio di Pauli: con molti atomi ravvicinati (cristallo) i livelli si spostano e si raggruppano in bande



Solidi elettricamente diversi

Collocamento degli elettroni nelle bande realizzato in modo diverso in cristalli diversi, secondo la struttura dei livelli atomici e del cristallo



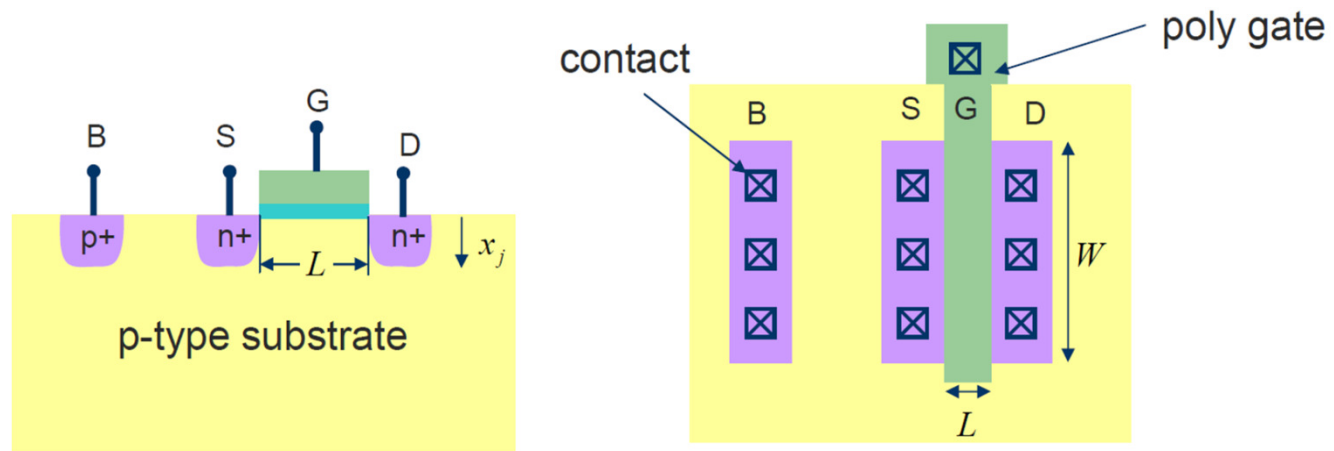
Semiconduttori e tecnologia

Misura
Controllo
Calcolo
Visualizzazione
Comunicazioni
Trasporti
Conversione energia
Illuminazione
.....

**Quasi tutto quel che è fatto dall'uomo
oggi contiene parti elettroniche
realizzate con circuiti a semiconduttore**

MOS

Transistor MOS



2020:

$W \sim 1 \mu m$

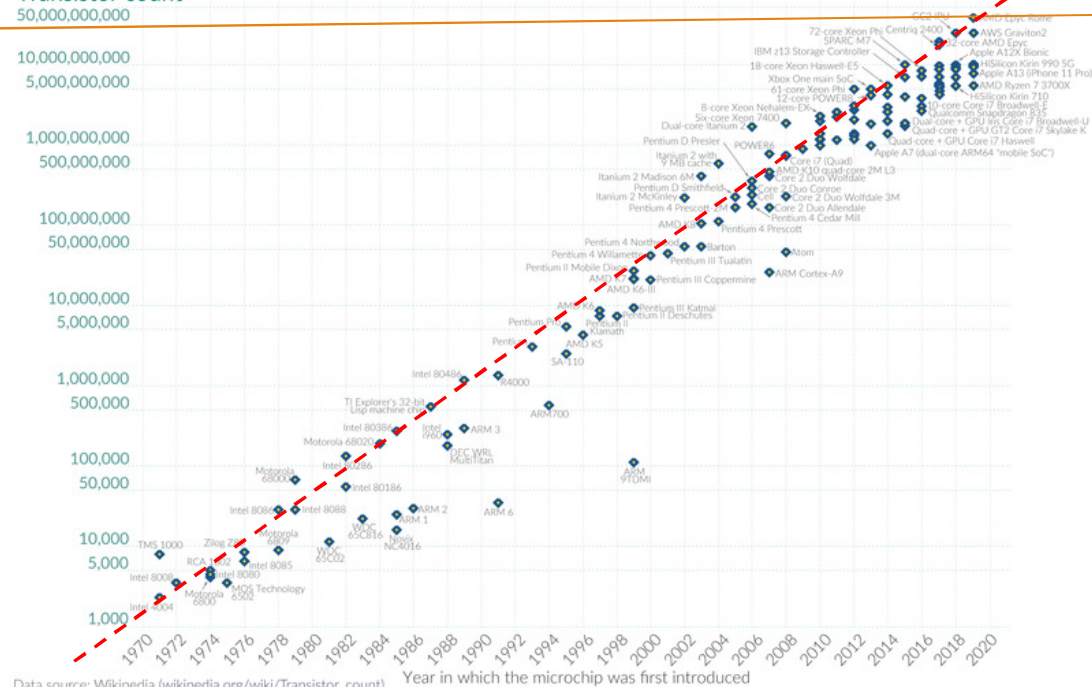
$L \sim 10 nm$

Dove arriveremo?

Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years Our World in Data

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.

Transistor count



Record 2020:
40 miliardi
di transistor
in un chip

In 50 anni:
X 40000000

La meccanica quantistica è....

.....

RE *Questa è stata una bellissima invenzione,
ed è riuscita molto bene.*

BERTOLDO *Ben vada la capra zoppa, fin
che nel lupo ella s'intoppa!*

.....

....zoppa o no?



Questioni interpretative

Osservazioni preliminari:

La MQ non ha bisogno di interpretazioni

Una teoria fisica non deve essere necessariamente intuitiva

Nondimeno:

Approfondimento del 'significato' della funzione d'onda: utile

Chiarimento (?) sul carattere indeterministico in MQ: indispensabile

Collasso

Stato di un sistema: descritto da una funzione d'onda

Es: Stato a impulso definito $\psi(x) = Ae^{i(kx-\omega t)}$, onda piana

→ Posizione non definita, densità di probabilità costante per ogni x

Cosa succede se eseguiamo una misura di posizione?

L'osservabile x 'precipita' in uno dei suoi valori possibili, p es $x = 3 \text{ cm}$

→ La funzione d'onda 'collassa' in uno stato a posizione definita (e impulso indefinito)

Processo interamente probabilistico, non deterministico

Meccanismo alla base del collasso della ψ : *Non noto* → Ignorato

Ipotesi parte dell'insieme di assunzioni prese come base della MQ



Indeterminismo

Ripensandoci:

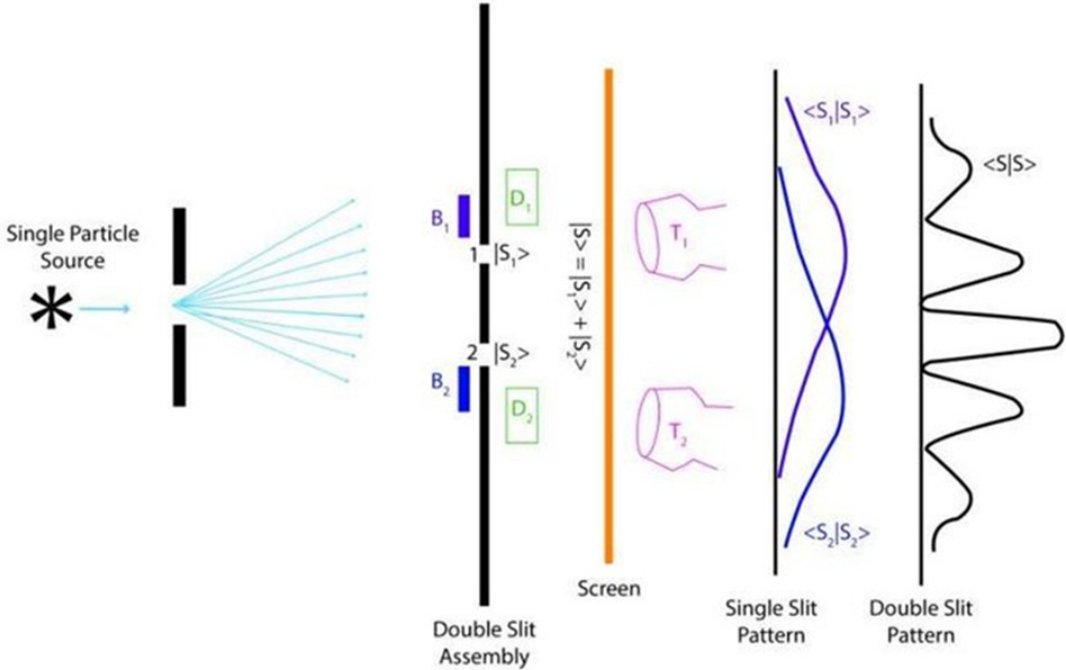
la parte non deterministica è *solo* quella relativa al collasso

Evoluzione nel tempo della funzione d'onda:
perfettamente deterministica

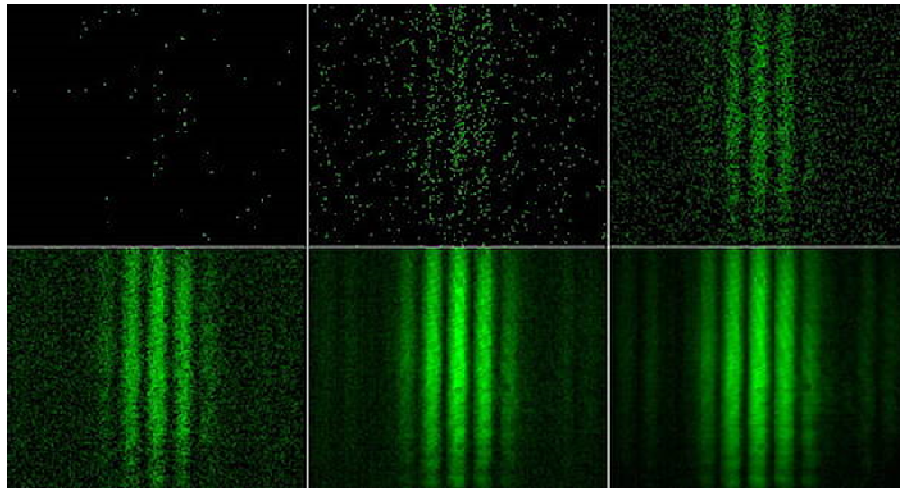
In MQ il determinismo è perduto solo nel momento dell'osservazione

Come osservazione dobbiamo intendere, in senso generale, qualsiasi interazione del nostro sistema fisico quantistico con un sistema classico, come un essere umano, un gatto, un rivelatore,...

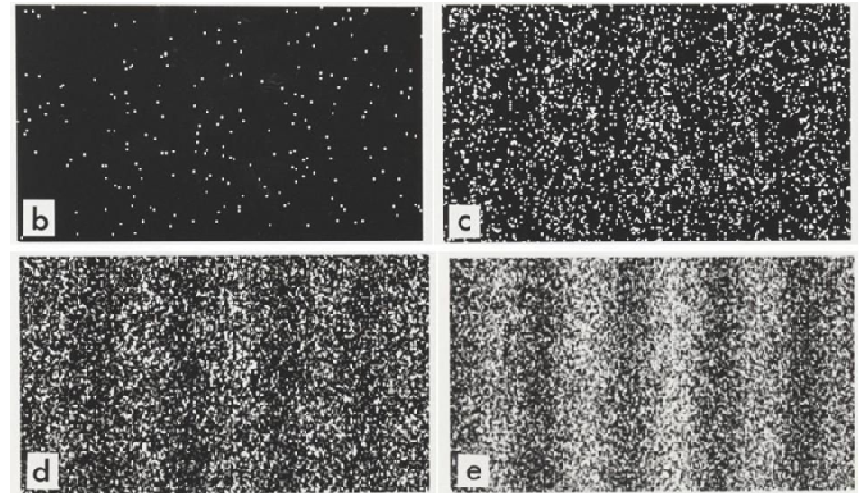
Doppia fenditura...



...con singole particelle !!!

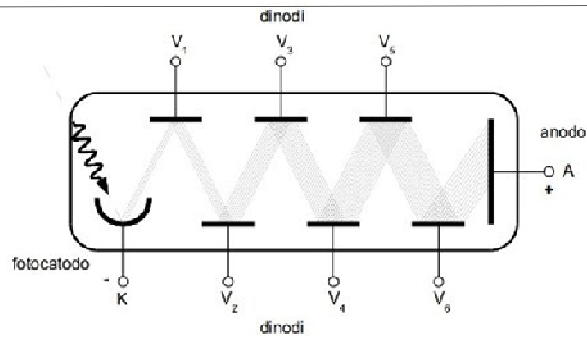


Fotoni



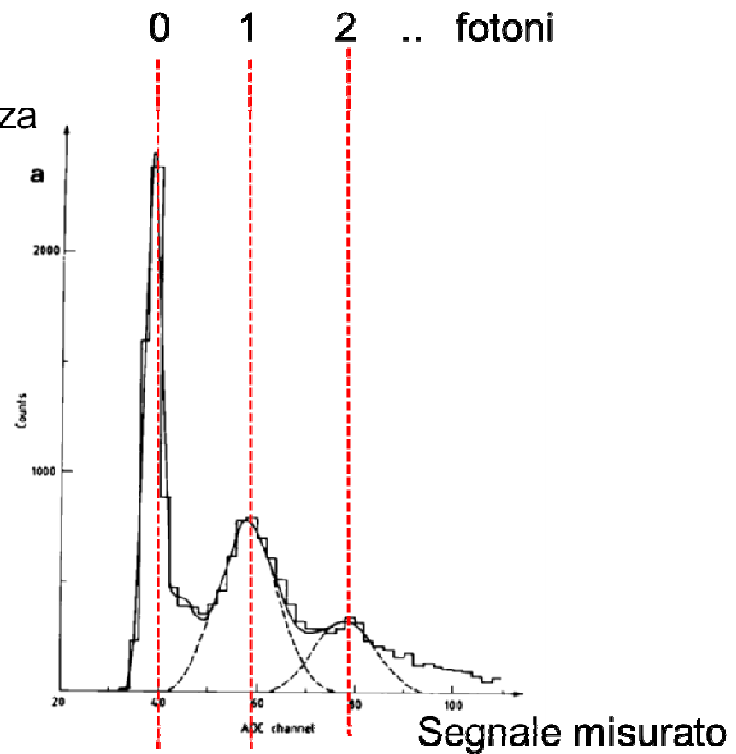
Elettroni

Contatori di fotoni

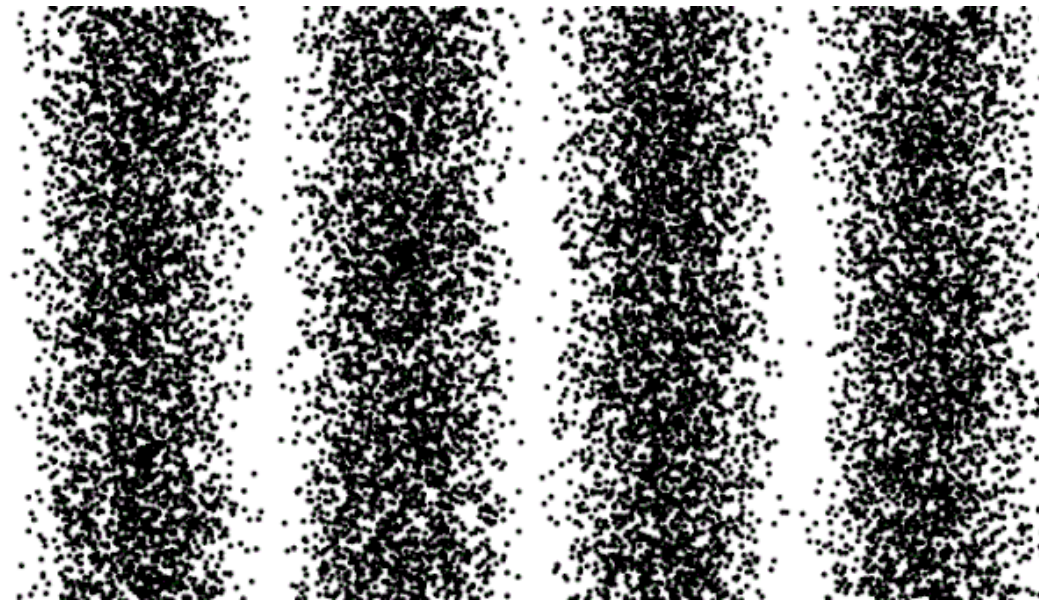


Burle dynode-type quantacon QE

Frequenza



...Ed è vero!



Questione centrale

In uno stesso esperimento coesistono due nature opposte, sia per fotoni sia per elettroni:

Figura di interferenza + diffrazione con molte particelle

Rivelazione individuale di singole particelle

Fascio di fotoni e fascio di elettroni non sono né un'onda, né un getto di particelle

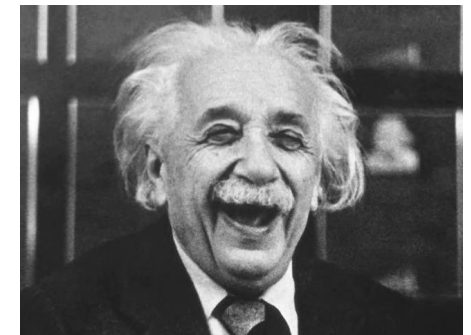
Copenhagen

Bohr, Heisenberg, Pauli e molti altri:

Funzione d'onda = Ampiezza di probabilità

Osservazione → Collasso della funzione d'onda

Tutto OK?



Non tutti sono d'accordo...

Domandina innocente



Ma quando arriva un solo elettrone, quale fenditura attraversa ?

Meditazione trascendentale:

Se gli elettroni passano sempre attraverso una delle due fenditure:

Supponiamo di selezionare quelli che passano attraverso la fenditura A;
allora la fenditura B può essere chiusa

Viceversa, se selezioniamo quelli che passano attraverso la fenditura B,
possiamo tenere chiusa la fenditura A

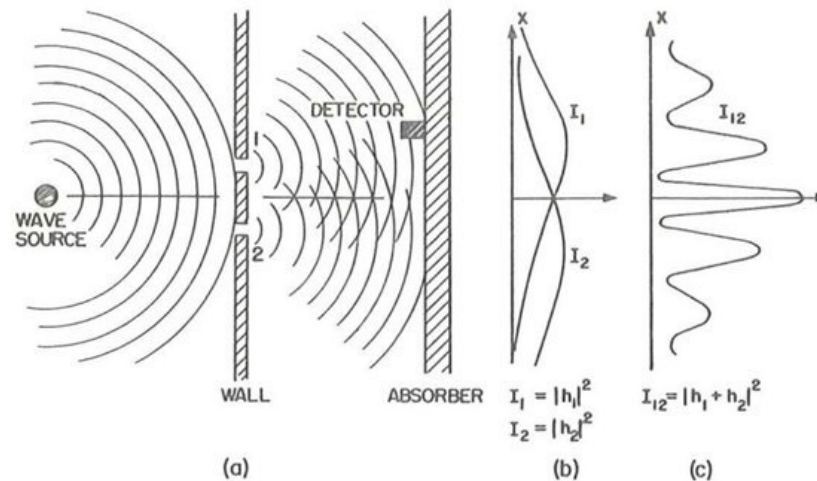
Nei due casi, dovremmo osservare sempre la stessa figura di interferenza

Incredibile ma vero



Invece la figura di interferenza scompare!

Rimangono, nei due casi, le immagini di diffrazione delle due fenditure



Quindi, elettrone o fotone sono passati attraverso tutte e due le fenditure ?!

Conclusioni stupefacenti...

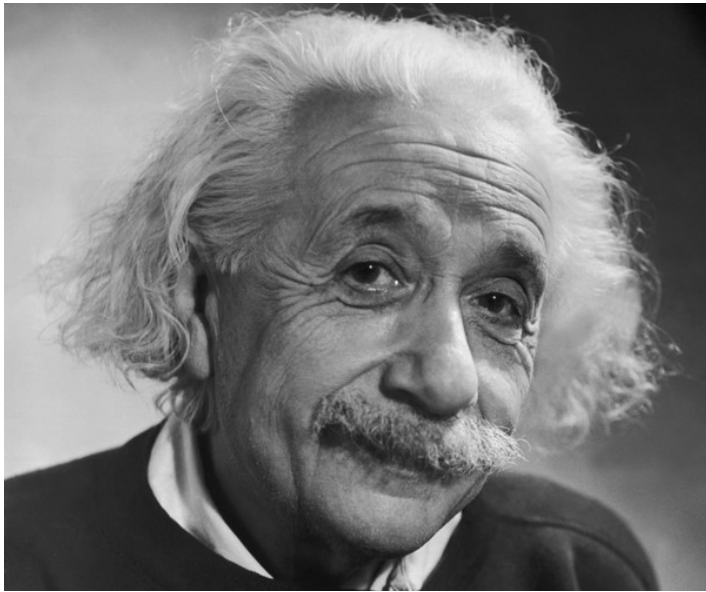
...ma inevitabili (o no , come alcuni continuano a pensare?):

Elettroni e fotoni *non* hanno una posizione definita finchè non li osserviamo

Generalizzando:

Gli oggetti microscopici non hanno sempre proprietà indipendenti dall'osservazione

Scettici illustri



Einstein



Schrodinger

Altra faccia della medaglia

Come si ricorderà:

Per un elettrone $s = \hbar/2$: in unità adatte $s = 1/2$ e $s_z = \pm 1/2$, $s_x = \pm 1/2$

s_x e s_z non compatibili: se è noto uno, non è noto l'altro

Se è noto s_z , una misura di s_x troverà $+1/2$ e $-1/2$ al 50 %, e viceversa

Stati di s_z di due elettroni: $\psi_{++}, \psi_{--}, \psi_{+-}, \psi_{-+}$

Decadimenti

π^0 : 'pione neutro', particella instabile con $spin = 0$,

prodotta copiosamente nelle collisioni fra particelle di energia elevata

Modo di decadimento, raro ma osservato: $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^-$

Si dimostra che lo stato di s_z di elettrone e positrone è

$$\psi(s_z) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{+-} - \psi_{-+})$$

Anche lo stato di s_x è dello stesso tipo: $\psi'(s_x) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi'_{+-} - \psi'_{-+})$

Conseguenza delle proprietà dell'osservabile *spin*

Entanglement

Particolare tipo di stato quantistico, detto entangled:

Lo stato complessivo *non* è il prodotto degli stati dei componenti e^+ e e^-

Non esiste un analogo per i sistemi classici:

Mentre è possibile trattare statisticamente i sistemi con molte particelle, come un gas o un solido, la probabilità di trovarli in un dato stato dinamico non è *mai* quella che corrisponde a uno stato entangled in MQ

Magia nera ?



Se si misura $+1/2$ per e^- , si trova con certezza $-1/2$ per e^+ e viceversa

Assumiamo di aver trovato per e^- $s_z = +1/2$

→ Sappiamo che lo stato di s_z per e^+ è $-1/2$

→ Se facciamo una misura di s_x per e^+ o e^- troviamo 50% $-1/2$ e 50% $+1/2$

Se ora misuriamo s_x per e^- e troviamo $+1/2$,

sappiamo con certezza che s_x per e^+ è $-1/2$!

Ma prima della nostra misura su e^- , s_x per e^+ era $\pm 1/2$ al 50 ciascuno % !

E nessuno ha compiuto misure di s_x su e^+ , che può essere lontanissimo da e^-

Cos'è la realtà?

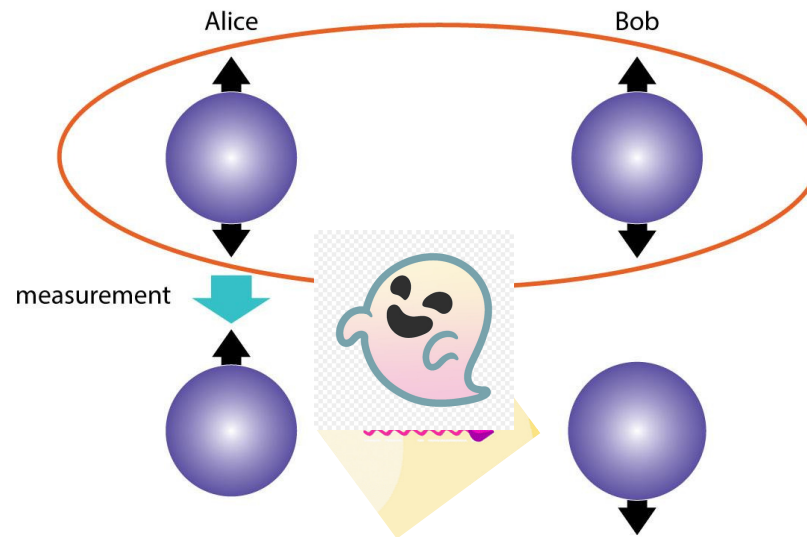
‘Paradosso’ scoperto da Einstein, Podolsky e Rosen nel 1935
Alla base c'è l'assunzione che (parafrasi)

‘....se possiamo predire con assoluta certezza il valore di un'osservabile essa è un elemento di realtà; e ogni elemento di realtà deve essere rispecchiato nella teoria. Se la MQ non prevede la possibilità di valori contemporaneamente definiti di s_z e s_x è incompleta...’

Assunzione in apparenza del tutto ragionevole, ma in contrasto con le osservazioni: *La realtà è razionale, ma non necessariamente sempre ragionevole*

Azioni a distanza?

Einstein pensava che l'unica descrizione possibile del collasso di stati entangled fosse un'azione a distanza, istantanea e 'fantasma', che trasmettesse da e^- a e^+ l'informazione su quale stato assumere, violando fra l'altro i principi della relatività → Inaccettabile



Non località

La funzione d'onda di un sistema composto non è una proprietà locale

Variazioni nello stato di una parte del sistema in seguito a osservazioni si riflettono 'istantaneamente' sullo stato delle altre parti, senza che questo necessiti di azioni a distanza

Lo 'spazio degli stati' di un sistema composto ignora, per così dire, l'esistenza di spazio e tempo per le sue parti:
il sistema preparato in un dato stato complessivo 'perde la memoria' di essere fatto di parti e della distanza eventuale fra le parti stesse

Variabili nascoste?

Stati entangled: escludono un'altra possibilità, evocata da Einstein e altri

La MQ è incompleta perché esistono 'variabili nascoste', inaccessibili all'osservazione, che sono all'origine delle correlazioni statistiche trovate fra le osservabili di parti separate di un sistema

Si può distinguere la MQ da una teoria classica con variabili nascoste?

Correlazioni...

Se le componenti dello spin delle due particelle sono variabili classiche, consideriamo +1 la componente lungo una direzione \mathbf{a} per la prima e lungo una direzione \mathbf{b} per la seconda, e -1 quelle nella direzione opposta

Supponendo che i due spin escano sempre in direzione opposta, la probabilità di avere proiezioni +ve o -ve sarà:

$$P_{++}, P_{--}, P_{+-}, P_{-+}$$

...e limite di Bell

Definendo la correlazione come

$$E = P_{++} + P_{--} - P_{+-} - P_{-+}$$

essa risulta funzione dell'angolo fra **a** e **b**

J.S.Bell, 1964:

Qualsiasi tipo di variabile nascosta porta a correlazioni che hanno un limite insuperabile, inferiore alla correlazione prevista dalla MQ

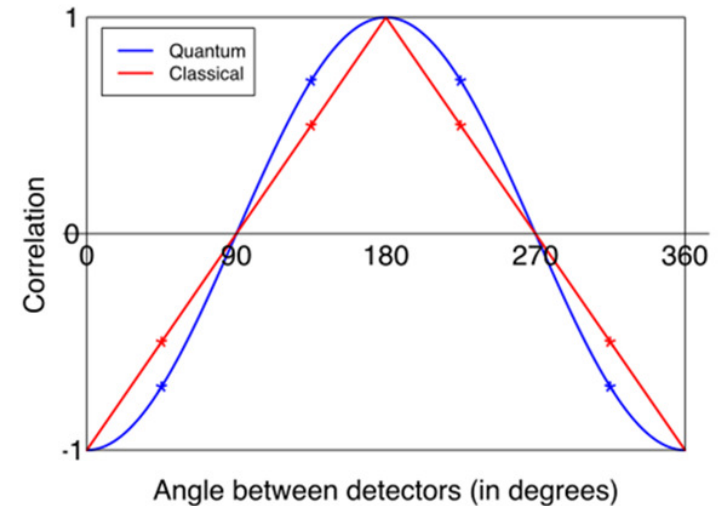
Risultato indipendente da come è fatta la variabile nascosta, purchè locale

Esempio

Linea rossa:
Un tipo di variabile nascosta

Linea blu: MQ

Molti test sperimentali dagli anni '70
ad oggi: 'Metafisica Sperimentale'



Il limite di Bell è sistematicamente oltrepassato dalle correlazioni osservate in molti modi diversi → Variabili nascoste KO

Conclusioni

La meccanica quantistica è internamente coerente e priva di contraddizioni

La meccanica quantistica spiega tutti i fenomeni a cui può essere applicata: quantitativamente, con grande, a volte straordinaria precisione

Ma: La meccanica quantistica è controintuitiva

I sistemi fisici non hanno proprietà indipendenti dall'osservazione

La funzione d'onda è una proprietà non locale dei sistemi fisici

Forse la capra è un po' zoppa, ma ha vinto alle Olimpiadi