

Un'introduzione alla fisica quantistica

Marco Panero

Università di Torino & INFN, Torino

marco.panero@unito.it

Hackmeeting 0x14

Venaus, Val di Susa, 15.-18.06.2017

Indice

Introduzione

Formulazione in termini di vettori e matrici

Formulazione in termini di funzioni e di derivate

La relazione tra fisica classica e fisica quantistica

Applicazioni della fisica quantistica

Indice

Introduzione

Formulazione in termini di vettori e matrici

Formulazione in termini di funzioni e di derivate

La relazione tra fisica classica e fisica quantistica

Applicazioni della fisica quantistica

Motivazione e ambito di applicabilità

Questo seminario è una breve introduzione alla *fisica quantistica*

- ▶ Fu introdotta agli inizi del XX secolo, per risolvere alcune inconsistenze della fisica "classica" (cioè "non quantistica"), in cui tutte le grandezze fisiche hanno valori ben definiti, che possono essere previsti con esattezza (*determinismo* della fisica classica)
- ▶ La fisica quantistica è il formalismo scientifico necessario per descrivere i *fenomeni microscopici* (atomi e particelle subatomiche)
- ▶ Vale *anche* per i fenomeni macroscopici, ma solitamente in questi ultimi gli aspetti tipicamente quantistici non sono evidenti e quindi possono essere descritti usando solo la fisica classica
- ▶ Il fatto che solitamente nella vita quotidiana non "vediamo" effetti quantistici è uno dei motivi per cui la fisica quantistica è molto controintuitiva
- ▶ Uno degli aspetti più importanti della fisica quantistica è l'*indeterminazione quantistica*; essa implica, in particolare, che *misurare* (oppure *calcolare*) una grandezza fisica di un oggetto ne modifichi lo stato. Quindi, misurando due diverse grandezze in un ordine o nell'ordine inverso, in generale *non* si ottengono gli stessi risultati
- ▶ Esistono vari modi di formulare la fisica quantistica: essi sono tutti equivalenti, ma utilizzano diversi tipi di oggetti matematici (che permettono una trattazione più o meno semplice per i vari problemi)
- ▶ In questa presentazione si introdurranno solo alcuni concetti, sacrificando il rigore scientifico a favore della chiarezza

Motivazione e ambito di applicabilità

Questo seminario è una breve introduzione alla *fisica quantistica*

- ▶ Fu introdotta agli inizi del XX secolo, per risolvere alcune inconsistenze della fisica “classica” (cioè “non quantistica”), in cui tutte le grandezze fisiche hanno valori ben definiti, che possono essere previsti con esattezza (*determinismo* della fisica classica)
- ▶ La fisica quantistica è il formalismo scientifico necessario per descrivere i *fenomeni microscopici* (atomi e particelle subatomiche)
- ▶ Vale *anche* per i fenomeni macroscopici, ma solitamente in questi ultimi gli aspetti tipicamente quantistici non sono evidenti e quindi possono essere descritti usando solo la fisica classica
- ▶ Il fatto che solitamente nella vita quotidiana non “vediamo” effetti quantistici è uno dei motivi per cui la fisica quantistica è molto controintuitiva
- ▶ Uno degli aspetti più importanti della fisica quantistica è l'*indeterminazione quantistica*; essa implica, in particolare, che *misurare* (oppure *calcolare*) una grandezza fisica di un oggetto ne modifichi lo stato. Quindi, misurando due diverse grandezze in un ordine o nell'ordine inverso, in generale *non* si ottengono gli stessi risultati
- ▶ Esistono vari modi di formulare la fisica quantistica: essi sono tutti equivalenti, ma utilizzano diversi tipi di oggetti matematici (che permettono una trattazione più o meno semplice per i vari problemi)
- ▶ In questa presentazione si introdurranno solo alcuni concetti, sacrificando il rigore scientifico a favore della chiarezza

Motivazione e ambito di applicabilità

Questo seminario è una breve introduzione alla *fisica quantistica*

- ▶ Fu introdotta agli inizi del XX secolo, per risolvere alcune inconsistenze della fisica "classica" (cioè "non quantistica"), in cui tutte le grandezze fisiche hanno valori ben definiti, che possono essere previsti con esattezza (*determinismo* della fisica classica)
- ▶ La fisica quantistica è il formalismo scientifico necessario per descrivere i *fenomeni microscopici* (atomi e particelle subatomiche)
- ▶ Vale *anche* per i fenomeni macroscopici, ma solitamente in questi ultimi gli aspetti tipicamente quantistici non sono evidenti e quindi possono essere descritti usando solo la fisica classica
- ▶ Il fatto che solitamente nella vita quotidiana non "vediamo" effetti quantistici è uno dei motivi per cui la fisica quantistica è molto controintuitiva
- ▶ Uno degli aspetti più importanti della fisica quantistica è l'*indeterminazione quantistica*; essa implica, in particolare, che *misurare* (oppure *calcolare*) una grandezza fisica di un oggetto ne modifichi lo stato. Quindi, misurando due diverse grandezze in un ordine o nell'ordine inverso, in generale *non* si ottengono gli stessi risultati
- ▶ Esistono vari modi di formulare la fisica quantistica: essi sono tutti equivalenti, ma utilizzano diversi tipi di oggetti matematici (che permettono una trattazione più o meno semplice per i vari problemi)
- ▶ In questa presentazione si introdurranno solo alcuni concetti, sacrificando il rigore scientifico a favore della chiarezza

Motivazione e ambito di applicabilità

Questo seminario è una breve introduzione alla *fisica quantistica*

- ▶ Fu introdotta agli inizi del XX secolo, per risolvere alcune inconsistenze della fisica “classica” (cioè “non quantistica”), in cui tutte le grandezze fisiche hanno valori ben definiti, che possono essere previsti con esattezza (*determinismo* della fisica classica)
- ▶ La fisica quantistica è il formalismo scientifico necessario per descrivere i *fenomeni microscopici* (atomi e particelle subatomiche)
- ▶ Vale *anche* per i fenomeni macroscopici, ma solitamente in questi ultimi gli aspetti tipicamente quantistici non sono evidenti e quindi possono essere descritti usando solo la fisica classica
- ▶ Il fatto che solitamente nella vita quotidiana non “vediamo” effetti quantistici è uno dei motivi per cui la fisica quantistica è molto controintuitiva
- ▶ Uno degli aspetti più importanti della fisica quantistica è l'*indeterminazione quantistica*; essa implica, in particolare, che *misurare* (oppure *calcolare*) una grandezza fisica di un oggetto ne modifichi lo stato. Quindi, misurando due diverse grandezze in un ordine o nell'ordine inverso, in generale *non* si ottengono gli stessi risultati
- ▶ Esistono vari modi di formulare la fisica quantistica: essi sono tutti equivalenti, ma utilizzano diversi tipi di oggetti matematici (che permettono una trattazione più o meno semplice per i vari problemi)
- ▶ In questa presentazione si introdurranno solo alcuni concetti, sacrificando il rigore scientifico a favore della chiarezza

Motivazione e ambito di applicabilità

Questo seminario è una breve introduzione alla *fisica quantistica*

- ▶ Fu introdotta agli inizi del XX secolo, per risolvere alcune inconsistenze della fisica “classica” (cioè “non quantistica”), in cui tutte le grandezze fisiche hanno valori ben definiti, che possono essere previsti con esattezza (*determinismo* della fisica classica)
- ▶ La fisica quantistica è il formalismo scientifico necessario per descrivere i *fenomeni microscopici* (atomi e particelle subatomiche)
- ▶ Vale *anche* per i fenomeni macroscopici, ma solitamente in questi ultimi gli aspetti tipicamente quantistici non sono evidenti e quindi possono essere descritti usando solo la fisica classica
- ▶ Il fatto che solitamente nella vita quotidiana non “vediamo” effetti quantistici è uno dei motivi per cui la fisica quantistica è molto controintuitiva
- ▶ Uno degli aspetti più importanti della fisica quantistica è l'*indeterminazione quantistica*; essa implica, in particolare, che *misurare* (oppure *calcolare*) una grandezza fisica di un oggetto ne modifichi lo stato. Quindi, misurando due diverse grandezze in un ordine o nell'ordine inverso, in generale *non* si ottengono gli stessi risultati
- ▶ Esistono vari modi di formulare la fisica quantistica: essi sono tutti equivalenti, ma utilizzano diversi tipi di oggetti matematici (che permettono una trattazione più o meno semplice per i vari problemi)
- ▶ In questa presentazione si introdurranno solo alcuni concetti, sacrificando il rigore scientifico a favore della chiarezza

Motivazione e ambito di applicabilità

Questo seminario è una breve introduzione alla *fisica quantistica*

- ▶ Fu introdotta agli inizi del XX secolo, per risolvere alcune inconsistenze della fisica “classica” (cioè “non quantistica”), in cui tutte le grandezze fisiche hanno valori ben definiti, che possono essere previsti con esattezza (*determinismo* della fisica classica)
- ▶ La fisica quantistica è il formalismo scientifico necessario per descrivere i *fenomeni microscopici* (atomi e particelle subatomiche)
- ▶ Vale *anche* per i fenomeni macroscopici, ma solitamente in questi ultimi gli aspetti tipicamente quantistici non sono evidenti e quindi possono essere descritti usando solo la fisica classica
- ▶ Il fatto che solitamente nella vita quotidiana non “vediamo” effetti quantistici è uno dei motivi per cui la fisica quantistica è molto controintuitiva
- ▶ Uno degli aspetti più importanti della fisica quantistica è l'*indeterminazione quantistica*; essa implica, in particolare, che *misurare* (oppure *calcolare*) una grandezza fisica di un oggetto ne modifichi lo stato. Quindi, misurando due diverse grandezze in un ordine o nell'ordine inverso, in generale *non* si ottengono gli stessi risultati
- ▶ Esistono vari modi di formulare la fisica quantistica: essi sono tutti equivalenti, ma utilizzano diversi tipi di oggetti matematici (che permettono una trattazione più o meno semplice per i vari problemi)
- ▶ In questa presentazione si introdurranno solo alcuni concetti, sacrificando il rigore scientifico a favore della chiarezza

Motivazione e ambito di applicabilità

Questo seminario è una breve introduzione alla *fisica quantistica*

- ▶ Fu introdotta agli inizi del XX secolo, per risolvere alcune inconsistenze della fisica “classica” (cioè “non quantistica”), in cui tutte le grandezze fisiche hanno valori ben definiti, che possono essere previsti con esattezza (*determinismo* della fisica classica)
- ▶ La fisica quantistica è il formalismo scientifico necessario per descrivere i *fenomeni microscopici* (atomi e particelle subatomiche)
- ▶ Vale *anche* per i fenomeni macroscopici, ma solitamente in questi ultimi gli aspetti tipicamente quantistici non sono evidenti e quindi possono essere descritti usando solo la fisica classica
- ▶ Il fatto che solitamente nella vita quotidiana non “vediamo” effetti quantistici è uno dei motivi per cui la fisica quantistica è molto controintuitiva
- ▶ Uno degli aspetti più importanti della fisica quantistica è l'*indeterminazione quantistica*; essa implica, in particolare, che *misurare* (oppure *calcolare*) una grandezza fisica di un oggetto ne modifichi lo stato. Quindi, misurando due diverse grandezze in un ordine o nell'ordine inverso, in generale *non* si ottengono gli stessi risultati
- ▶ Esistono vari modi di formulare la fisica quantistica: essi sono tutti equivalenti, ma utilizzano diversi tipi di oggetti matematici (che permettono una trattazione più o meno semplice per i vari problemi)
- ▶ In questa presentazione si introdurranno solo alcuni concetti, sacrificando il rigore scientifico a favore della chiarezza

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri reali x
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri reali x

- ★ Rappresentabili come punti su una *retta*

- ★ Complesso coniugato: $z^* = x - iy$

- ★ Ad ogni numero complesso $z = x + iy$ possiamo associare il suo modulo quadro $|z|^2 = z \cdot z^* = x^2 + y^2$, che è un numero *reale* e *non negativo*

- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro

- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri reali x

- ★ Rappresentabili come punti su una *retta*



- ★ Complesso coniugato: $z^* = x - iy$

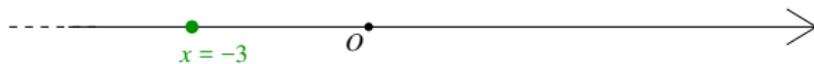
- ★ Ad ogni numero complesso $z = x + iy$ possiamo associare il suo modulo quadro $|z|^2 = z \cdot z^* = x^2 + y^2$, che è un numero *reale* e *non negativo*

- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri reali x

- ★ Rappresentabili come punti su una *retta*



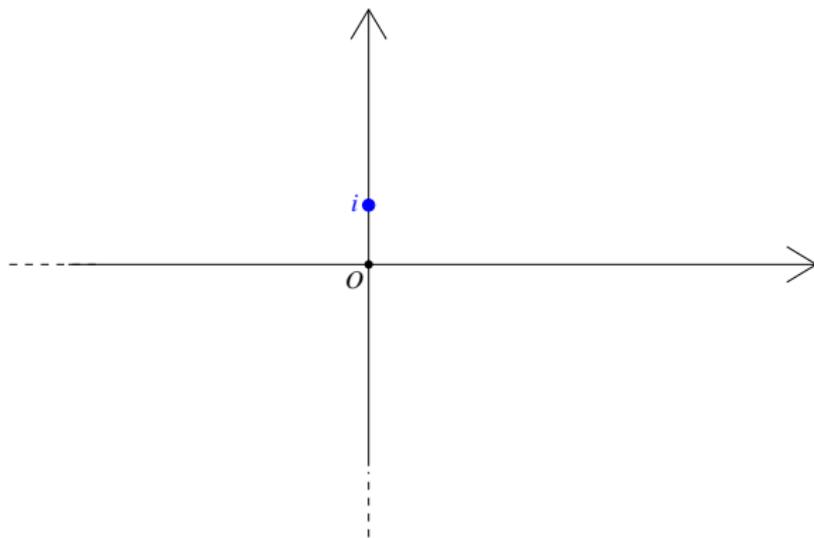
- ★ Complesso coniugato: $z^* = x - iy$

- ★ Ad ogni numero complesso $z = x + iy$ possiamo associare il suo modulo quadro $|z|^2 = z \cdot z^* = x^2 + y^2$, che è un numero *reale* e *non negativo*

- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

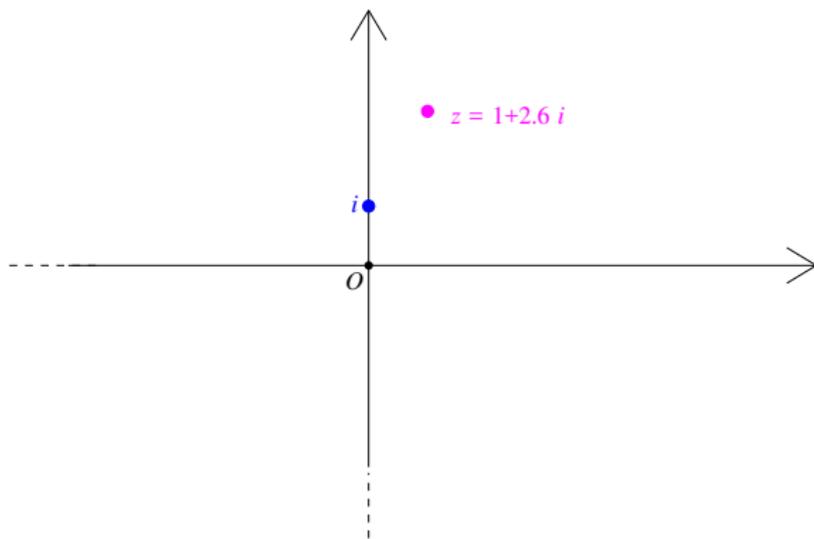
- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
 - ★ Rappresentabili come punti su un *piano*



- ★ Complesso coniugato: $z^* = x - iy$
- ★ Ad ogni numero complesso $z = x + iy$ possiamo associare il suo modulo quadro $|z|^2 = z \cdot z^* = x^2 + y^2$, che è un numero *reale e non negativo*
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

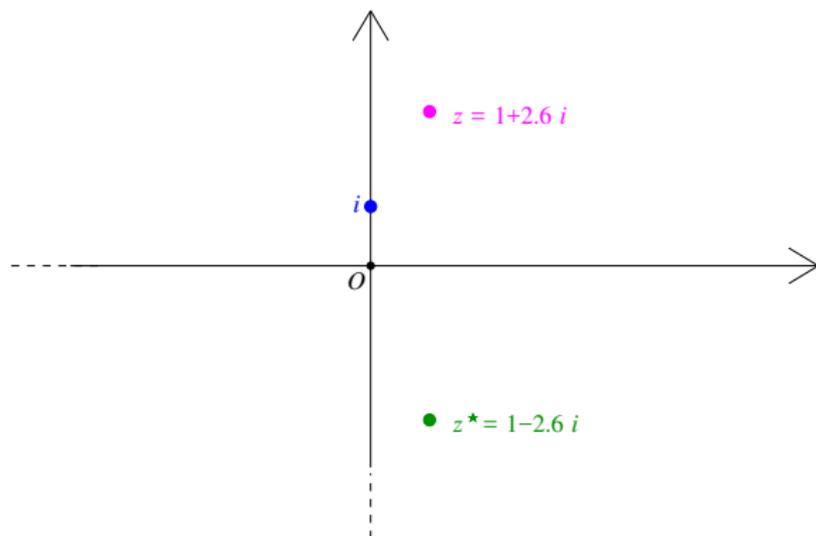
- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
 - ★ Rappresentabili come punti su un *piano*



- ★ Complesso coniugato: $z^* = x - iy$
- ★ Ad ogni numero complesso $z = x + iy$ possiamo associare il suo modulo quadro $|z|^2 = z \cdot z^* = x^2 + y^2$, che è un numero *reale e non negativo*
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

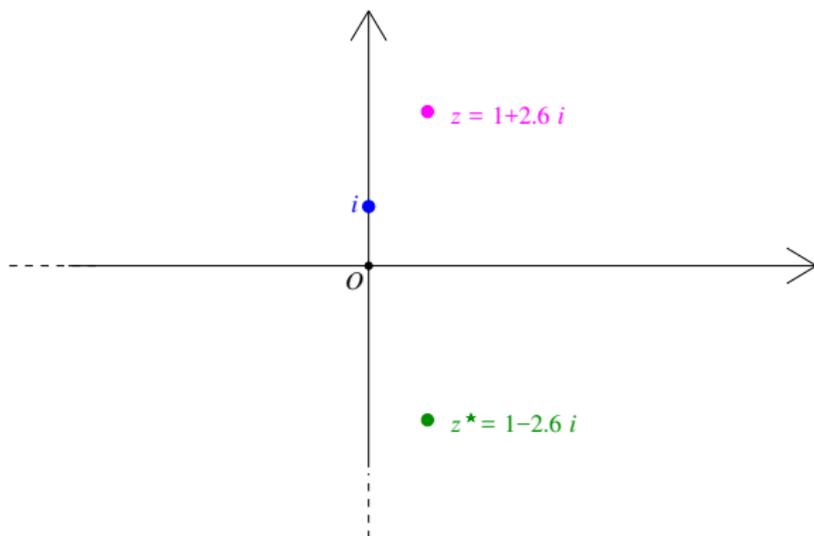
- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
 - ★ Rappresentabili come punti su un *piano*
 - ★ Complesso coniugato: $z^* = x - iy$



- ★ Ad ogni numero complesso $z = x + iy$ possiamo associare il suo modulo quadro $|z|^2 = z \cdot z^* = x^2 + y^2$, che è un numero *reale e non negativo*
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
 - ★ Rappresentabili come punti su un *piano*
 - ★ Complesso coniugato: $z^* = x - iy$



- ★ Ad ogni numero complesso $z = x + iy$ possiamo associare il suo modulo quadro $|z|^2 = z \cdot z^* = x^2 + y^2$, che è un numero *reale e non negativo*
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
 - ★ *Vettore*: una lista ordinata (riga o colonna) di numeri
 - ★ *Prodotto riga-per-colonna*: somma degli elementi di un vettore-riga per i corrispondenti elementi di un vettore-colonna
 - ★ *Matrice*: schiera bidimensionale di numeri
 - ★ *Prodotto tra matrici*: si calcola moltiplicando ogni riga della prima matrice per ciascuna colonna della seconda
 - ★ Il prodotto di matrici dipende dall'ordine dei fattori, cioè *non è commutativo*: $AB \neq BA$
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
 - ★ **Vettore**: una lista ordinata (riga o colonna) di numeri

$$\begin{pmatrix} 2 & -1 \end{pmatrix}$$

- ★ *Prodotto riga-per-colonna*: somma degli elementi di un vettore-riga per i corrispondenti elementi di un vettore-colonna
- ★ *Matrice*: schiera bidimensionale di numeri
- ★ *Prodotto tra matrici*: si calcola moltiplicando ogni riga della prima matrice per ciascuna colonna della seconda
- ★ Il prodotto di matrici dipende dall'ordine dei fattori, cioè *non è commutativo*: $AB \neq BA$
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
 - ★ **Vettore**: una lista ordinata (riga o colonna) di numeri

$$\begin{pmatrix} 3 \\ 7 \end{pmatrix}$$

- ★ *Prodotto riga-per-colonna*: somma degli elementi di un vettore-riga per i corrispondenti elementi di un vettore-colonna
 - ★ *Matrice*: schiera bidimensionale di numeri
 - ★ *Prodotto tra matrici*: si calcola moltiplicando ogni riga della prima matrice per ciascuna colonna della seconda
 - ★ Il prodotto di matrici dipende dall'ordine dei fattori, cioè *non è commutativo*: $AB \neq BA$
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
 - ★ *Vettore*: una lista ordinata (riga o colonna) di numeri
 - ★ *Prodotto riga-per-colonna*: somma degli elementi di un vettore-riga per i corrispondenti elementi di un vettore-colonna
 - ★ *Matrice*: schiera bidimensionale di numeri
 - ★ *Prodotto tra matrici*: si calcola moltiplicando ogni riga della prima matrice per ciascuna colonna della seconda
 - ★ Il prodotto di matrici dipende dall'ordine dei fattori, cioè *non è commutativo*: $AB \neq BA$
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
 - ★ *Vettore*: una lista ordinata (riga o colonna) di numeri
 - ★ *Prodotto riga-per-colonna*: somma degli elementi di un vettore-riga per i corrispondenti elementi di un vettore-colonna

$$\begin{pmatrix} 2 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \end{pmatrix} = (2 \cdot 3) + (-1 \cdot 7) = 6 - 7 = -1$$

- ★ *Matrice*: schiera bidimensionale di numeri
 - ★ *Prodotto tra matrici*: si calcola moltiplicando ogni riga della prima matrice per ciascuna colonna della seconda
 - ★ Il prodotto di matrici dipende dall'ordine dei fattori, cioè *non è commutativo*: $AB \neq BA$
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
 - ★ *Vettore*: una lista ordinata (riga o colonna) di numeri
 - ★ *Prodotto riga-per-colonna*: somma degli elementi di un vettore-riga per i corrispondenti elementi di un vettore-colonna
 - ★ *Matrice*: schiera bidimensionale di numeri

$$\begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 4 & 0 \end{pmatrix}$$

- ★ *Prodotto tra matrici*: si calcola moltiplicando ogni riga della prima matrice per ciascuna colonna della seconda
- ★ Il prodotto di matrici dipende dall'ordine dei fattori, cioè *non è commutativo*: $AB \neq BA$
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
 - ★ *Vettore*: una lista ordinata (riga o colonna) di numeri
 - ★ *Prodotto riga-per-colonna*: somma degli elementi di un vettore-riga per i corrispondenti elementi di un vettore-colonna
 - ★ *Matrice*: schiera bidimensionale di numeri
 - ★ *Prodotto tra matrici*: si calcola moltiplicando ogni riga della prima matrice per ciascuna colonna della seconda

$$\begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 4 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 5 & 7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3 & -1 \\ 4 & 12 \end{pmatrix}$$

- ★ Il prodotto di matrici dipende dall'ordine dei fattori, cioè *non è commutativo*: $AB \neq BA$
- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
 - ★ *Vettore*: una lista ordinata (riga o colonna) di numeri
 - ★ *Prodotto riga-per-colonna*: somma degli elementi di un vettore-riga per i corrispondenti elementi di un vettore-colonna
 - ★ *Matrice*: schiera bidimensionale di numeri
 - ★ *Prodotto tra matrici*: si calcola moltiplicando ogni riga della prima matrice per ciascuna colonna della seconda

$$\begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 4 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 5 & 7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3 & -1 \\ 4 & 12 \end{pmatrix}$$

★ Il prodotto di matrici dipende dall'ordine dei fattori, cioè *non è commutativo*: $AB \neq BA$

- ▶ Funzioni e derivate

Premessa: nozioni matematiche

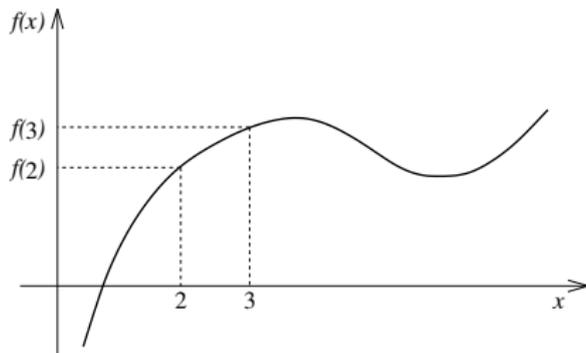
- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
 - ★ *Vettore*: una lista ordinata (riga o colonna) di numeri
 - ★ *Prodotto riga-per-colonna*: somma degli elementi di un vettore-riga per i corrispondenti elementi di un vettore-colonna
 - ★ *Matrice*: schiera bidimensionale di numeri
 - ★ *Prodotto tra matrici*: si calcola moltiplicando ogni riga della prima matrice per ciascuna colonna della seconda
 - ★ Il prodotto di matrici dipende dall'ordine dei fattori, cioè *non è commutativo*: $AB \neq BA$
- ▶ Funzioni e derivate
 - ★ Una funzione f è un oggetto matematico che, dato un numero (x) come argomento, restituisce un altro numero ($f(x)$) come risultato

Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
- ▶ Funzioni e derivate
 - ★ Una funzione f è un oggetto matematico che, dato un numero (x) come argomento, restituisce un altro numero ($f(x)$) come risultato
 - ★ Data una funzione $f(x)$, la sua *derivata* è un'altra funzione $\frac{df}{dx}$, che esprime "quanto f sta cambiando" in un punto: $\frac{df}{dx} > 0$ significa che, nel punto x , la funzione f sta crescendo, ecc.
 - ★ Osservazione: in generale, derivare una funzione e poi moltiplicarla per un'altra funzione *non* è equivalente a moltiplicare e poi derivare: $x \cdot \frac{df}{dx} \neq \frac{d}{dx} (x \cdot f(x))$
 - ★ Le derivate compaiono molto spesso nelle equazioni della fisica; in particolare l'equazione che descrive le onde sulla superficie di un liquido mette in relazione le variazioni dell'altezza del liquido da punto a punto nello spazio con le sue variazioni nel tempo

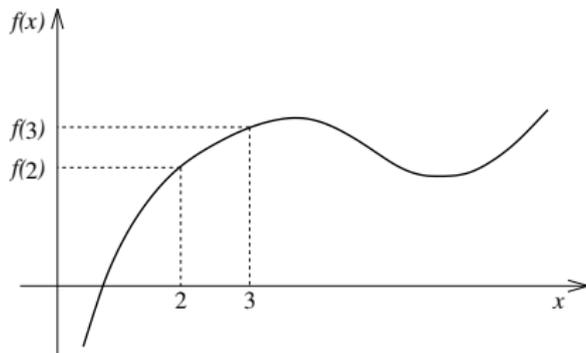
Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
- ▶ Funzioni e derivate
 - ★ Una funzione f è un oggetto matematico che, dato un numero (x) come argomento, restituisce un altro numero ($f(x)$) come risultato
 - ★ Data una funzione $f(x)$, la sua *derivata* è un'altra funzione $\frac{df}{dx}$, che esprime "quanto f sta cambiando" in un punto: $\frac{df}{dx} > 0$ significa che, nel punto x , la funzione f sta crescendo, ecc.
 - ★ Osservazione: in generale, derivare una funzione e poi moltiplicarla per un'altra funzione *non* è equivalente a moltiplicare e poi derivare: $x \cdot \frac{df}{dx} \neq \frac{d}{dx} (x \cdot f(x))$
 - ★ Le derivate compaiono molto spesso nelle equazioni della fisica; in particolare l'equazione che descrive le onde sulla superficie di un liquido mette in relazione le variazioni dell'altezza del liquido da punto a punto nello spazio con le sue variazioni nel tempo



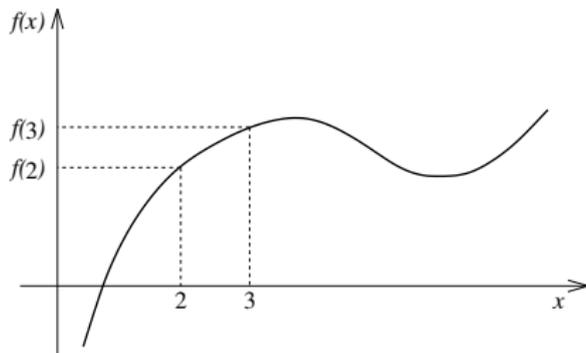
Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
- ▶ Funzioni e derivate
 - ★ Una funzione f è un oggetto matematico che, dato un numero (x) come argomento, restituisce un altro numero ($f(x)$) come risultato
 - ★ Data una funzione $f(x)$, la sua *derivata* è un'altra funzione $\frac{df}{dx}$, che esprime "quanto f sta cambiando" in un punto: $\frac{df}{dx} > 0$ significa che, nel punto x , la funzione f sta crescendo, ecc.
 - ★ Osservazione: in generale, derivare una funzione e poi moltiplicarla per un'altra funzione *non* è equivalente a moltiplicare e poi derivare: $x \cdot \frac{df}{dx} \neq \frac{d}{dx} (x \cdot f(x))$
 - ★ Le derivate compaiono molto spesso nelle equazioni della fisica; in particolare l'equazione che descrive le onde sulla superficie di un liquido mette in relazione le variazioni dell'altezza del liquido da punto a punto nello spazio con le sue variazioni nel tempo



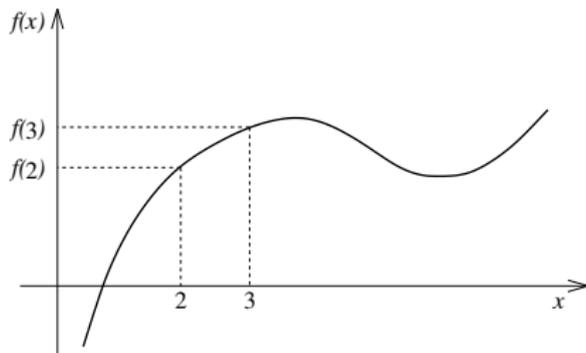
Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
- ▶ Funzioni e derivate
 - ★ Una funzione f è un oggetto matematico che, dato un numero (x) come argomento, restituisce un altro numero ($f(x)$) come risultato
 - ★ Data una funzione $f(x)$, la sua *derivata* è un'altra funzione $\frac{df}{dx}$, che esprime "quanto f sta cambiando" in un punto: $\frac{df}{dx} > 0$ significa che, nel punto x , la funzione f sta crescendo, ecc.
 - ★ Osservazione: in generale, derivare una funzione e poi moltiplicarla per un'altra funzione *non* è equivalente a moltiplicare e poi derivare: $x \cdot \frac{df}{dx} \neq \frac{d}{dx}(x \cdot f(x))$
 - ★ Le derivate compaiono molto spesso nelle equazioni della fisica; in particolare l'equazione che descrive le onde sulla superficie di un liquido mette in relazione le variazioni dell'altezza del liquido da punto a punto nello spazio con le sue variazioni nel tempo



Premessa: nozioni matematiche

- ▶ Numeri complessi $z = x + iy$
- ▶ Vettori, matrici e moltiplicazione tra di loro
- ▶ Funzioni e derivate
 - ★ Una funzione f è un oggetto matematico che, dato un numero (x) come argomento, restituisce un altro numero ($f(x)$) come risultato
 - ★ Data una funzione $f(x)$, la sua *derivata* è un'altra funzione $\frac{df}{dx}$, che esprime "quanto f sta cambiando" in un punto: $\frac{df}{dx} > 0$ significa che, nel punto x , la funzione f sta crescendo, ecc.
 - ★ Osservazione: in generale, derivare una funzione e poi moltiplicarla per un'altra funzione *non* è equivalente a moltiplicare e poi derivare: $x \cdot \frac{df}{dx} \neq \frac{d}{dx}(x \cdot f(x))$
 - ★ Le derivate compaiono molto spesso nelle equazioni della fisica; in particolare l'equazione che descrive le onde sulla superficie di un liquido mette in relazione le variazioni dell'altezza del liquido da punto a punto nello spazio con le sue variazioni nel tempo



Principali caratteristiche della fisica quantistica

- ▶ La fisica quantistica assume che ogni sistema fisico sia descritto da un oggetto matematico (es. un vettore, oppure una funzione) che ne descrive lo “stato” e che contiene informazione sulle grandezze fisiche che lo caratterizzano
- ▶ Per calcolare il valore che una grandezza fisica assume in un certo sistema occorre eseguire una operazione matematica sull'oggetto che descrive il suo stato
- ▶ In generale, questa operazione può *modificare* lo stato di un sistema
- ▶ Calcolare teoricamente (oppure misurare sperimentalmente) due grandezze diverse in successione può dare risultati diversi, a seconda dell'ordine in cui vengono eseguite le due misure
- ▶ La differenza tra le due operazioni di misura eseguite nei due ordini diversi è proporzionale ad una *costante fondamentale della natura*, la *costante di Planck ridotta* $\hbar \simeq 1.05 \cdot 10^{-34}$ J·s, che ha un valore *piccolo ma diverso da zero*
- ▶ La costante di Planck esprime *un limite naturale fondamentale* alla precisione con cui è possibile conoscere lo stato di un sistema fisico: la fisica quantistica non è più *deterministica* (es. non ha più senso parlare di *traiettoria* di un oggetto), bensì *probabilistica*
- ▶ La fisica quantistica implica che, per alcuni sistemi fisici, certe grandezze possano assumere solo valori *discreti* (ovvero “quantizzati”), anziché continui
- ▶ La fisica quantistica prevede l'esistenza dell'*entanglement quantistico* (o “correlazione quantistica”), che non ha alcuna analogia nella fisica classica
- ▶ La fisica quantistica è una teoria che è stato difficile accettare (perché ricca di implicazioni controintuitive), ma che è stata *pienamente confermata* in *tutti* gli esperimenti che l'hanno testata

Principali caratteristiche della fisica quantistica

- ▶ La fisica quantistica assume che ogni sistema fisico sia descritto da un oggetto matematico (es. un vettore, oppure una funzione) che ne descrive lo “stato” e che contiene informazione sulle grandezze fisiche che lo caratterizzano
- ▶ Per calcolare il valore che una grandezza fisica assume in un certo sistema occorre eseguire una operazione matematica sull'oggetto che descrive il suo stato
- ▶ In generale, questa operazione può *modificare* lo stato di un sistema
- ▶ Calcolare teoricamente (oppure misurare sperimentalmente) due grandezze diverse in successione può dare risultati diversi, a seconda dell'ordine in cui vengono eseguite le due misure
- ▶ La differenza tra le due operazioni di misura eseguite nei due ordini diversi è proporzionale ad una *costante fondamentale della natura*, la *costante di Planck ridotta* $\hbar \simeq 1.05 \cdot 10^{-34}$ J·s, che ha un valore *piccolo ma diverso da zero*
- ▶ La costante di Planck esprime *un limite naturale fondamentale* alla precisione con cui è possibile conoscere lo stato di un sistema fisico: la fisica quantistica non è più *deterministica* (es. non ha più senso parlare di *traiettoria* di un oggetto), bensì *probabilistica*
- ▶ La fisica quantistica implica che, per alcuni sistemi fisici, certe grandezze possano assumere solo valori *discreti* (ovvero “quantizzati”), anziché continui
- ▶ La fisica quantistica prevede l'esistenza dell'*entanglement quantistico* (o “correlazione quantistica”), che non ha alcuna analogia nella fisica classica
- ▶ La fisica quantistica è una teoria che è stato difficile accettare (perché ricca di implicazioni controintuitive), ma che è stata *pienamente confermata* in *tutti* gli esperimenti che l'hanno testata

Principali caratteristiche della fisica quantistica

- ▶ La fisica quantistica assume che ogni sistema fisico sia descritto da un oggetto matematico (es. un vettore, oppure una funzione) che ne descrive lo “stato” e che contiene informazione sulle grandezze fisiche che lo caratterizzano
- ▶ Per calcolare il valore che una grandezza fisica assume in un certo sistema occorre eseguire una operazione matematica sull’oggetto che descrive il suo stato
- ▶ In generale, questa operazione può *modificare* lo stato di un sistema
- ▶ Calcolare teoricamente (oppure misurare sperimentalmente) due grandezze diverse in successione può dare risultati diversi, a seconda dell’ordine in cui vengono eseguite le due misure
- ▶ La differenza tra le due operazioni di misura eseguite nei due ordini diversi è proporzionale ad una *costante fondamentale della natura*, la *costante di Planck ridotta* $\hbar \simeq 1.05 \cdot 10^{-34}$ J·s, che ha un valore *piccolo ma diverso da zero*
- ▶ La costante di Planck esprime *un limite naturale fondamentale* alla precisione con cui è possibile conoscere lo stato di un sistema fisico: la fisica quantistica non è più *deterministica* (es. non ha più senso parlare di *traiettoria* di un oggetto), bensì *probabilistica*
- ▶ La fisica quantistica implica che, per alcuni sistemi fisici, certe grandezze possano assumere solo valori *discreti* (ovvero “quantizzati”), anziché continui
- ▶ La fisica quantistica prevede l’esistenza dell’*entanglement quantistico* (o “correlazione quantistica”), che non ha alcuna analogia nella fisica classica
- ▶ La fisica quantistica è una teoria che è stato difficile accettare (perché ricca di implicazioni controintuitive), ma che è stata *pienamente confermata* in *tutti* gli esperimenti che l’hanno testata

Principali caratteristiche della fisica quantistica

- ▶ La fisica quantistica assume che ogni sistema fisico sia descritto da un oggetto matematico (es. un vettore, oppure una funzione) che ne descrive lo “stato” e che contiene informazione sulle grandezze fisiche che lo caratterizzano
- ▶ Per calcolare il valore che una grandezza fisica assume in un certo sistema occorre eseguire una operazione matematica sull'oggetto che descrive il suo stato
- ▶ In generale, questa operazione può *modificare* lo stato di un sistema
- ▶ Calcolare teoricamente (oppure misurare sperimentalmente) due grandezze diverse in successione può dare risultati diversi, a seconda dell'ordine in cui vengono eseguite le due misure
- ▶ La differenza tra le due operazioni di misura eseguite nei due ordini diversi è proporzionale ad una *costante fondamentale della natura*, la *costante di Planck ridotta* $\hbar \simeq 1.05 \cdot 10^{-34}$ J·s, che ha un valore *piccolo ma diverso da zero*
- ▶ La costante di Planck esprime *un limite naturale fondamentale* alla precisione con cui è possibile conoscere lo stato di un sistema fisico: la fisica quantistica non è più *deterministica* (es. non ha più senso parlare di *traiettoria* di un oggetto), bensì *probabilistica*
- ▶ La fisica quantistica implica che, per alcuni sistemi fisici, certe grandezze possano assumere solo valori *discreti* (ovvero “quantizzati”), anziché continui
- ▶ La fisica quantistica prevede l'esistenza dell'*entanglement quantistico* (o “correlazione quantistica”), che non ha alcuna analogia nella fisica classica
- ▶ La fisica quantistica è una teoria che è stato difficile accettare (perché ricca di implicazioni controintuitive), ma che è stata *pienamente confermata* in *tutti* gli esperimenti che l'hanno testata

Principali caratteristiche della fisica quantistica

- ▶ La fisica quantistica assume che ogni sistema fisico sia descritto da un oggetto matematico (es. un vettore, oppure una funzione) che ne descrive lo “stato” e che contiene informazione sulle grandezze fisiche che lo caratterizzano
- ▶ Per calcolare il valore che una grandezza fisica assume in un certo sistema occorre eseguire una operazione matematica sull’oggetto che descrive il suo stato
- ▶ In generale, questa operazione può *modificare* lo stato di un sistema
- ▶ Calcolare teoricamente (oppure misurare sperimentalmente) due grandezze diverse in successione può dare risultati diversi, a seconda dell’ordine in cui vengono eseguite le due misure
- ▶ La differenza tra le due operazioni di misura eseguite nei due ordini diversi è proporzionale ad una *costante fondamentale della natura*, la *costante di Planck ridotta* $\hbar \simeq 1.05 \cdot 10^{-34}$ J·s, che ha un valore *piccolo ma diverso da zero*
- ▶ La costante di Planck esprime *un limite naturale fondamentale* alla precisione con cui è possibile conoscere lo stato di un sistema fisico: la fisica quantistica non è più *deterministica* (es. non ha più senso parlare di *traiettoria* di un oggetto), bensì *probabilistica*
- ▶ La fisica quantistica implica che, per alcuni sistemi fisici, certe grandezze possano assumere solo valori *discreti* (ovvero “quantizzati”), anziché continui
- ▶ La fisica quantistica prevede l’esistenza dell’*entanglement quantistico* (o “correlazione quantistica”), che non ha alcuna analogia nella fisica classica
- ▶ La fisica quantistica è una teoria che è stato difficile accettare (perché ricca di implicazioni controintuitive), ma che è stata *pienamente confermata* in *tutti* gli esperimenti che l’hanno testata

Principali caratteristiche della fisica quantistica

- ▶ La fisica quantistica assume che ogni sistema fisico sia descritto da un oggetto matematico (es. un vettore, oppure una funzione) che ne descrive lo “stato” e che contiene informazione sulle grandezze fisiche che lo caratterizzano
- ▶ Per calcolare il valore che una grandezza fisica assume in un certo sistema occorre eseguire una operazione matematica sull’oggetto che descrive il suo stato
- ▶ In generale, questa operazione può *modificare* lo stato di un sistema
- ▶ Calcolare teoricamente (oppure misurare sperimentalmente) due grandezze diverse in successione può dare risultati diversi, a seconda dell’ordine in cui vengono eseguite le due misure
- ▶ La differenza tra le due operazioni di misura eseguite nei due ordini diversi è proporzionale ad una *costante fondamentale della natura*, la *costante di Planck ridotta* $\hbar \simeq 1.05 \cdot 10^{-34}$ J·s, che ha un valore *piccolo ma diverso da zero*
- ▶ La costante di Planck esprime *un limite naturale fondamentale* alla precisione con cui è possibile conoscere lo stato di un sistema fisico: la fisica quantistica non è più *deterministica* (es. non ha più senso parlare di *traiettoria* di un oggetto), bensì *probabilistica*
- ▶ La fisica quantistica implica che, per alcuni sistemi fisici, certe grandezze possano assumere solo valori *discreti* (ovvero “quantizzati”), anziché continui
- ▶ La fisica quantistica prevede l’esistenza dell’*entanglement quantistico* (o “correlazione quantistica”), che non ha alcuna analogia nella fisica classica
- ▶ La fisica quantistica è una teoria che è stato difficile accettare (perché ricca di implicazioni controintuitive), ma che è stata *pienamente confermata* in *tutti* gli esperimenti che l’hanno testata

Principali caratteristiche della fisica quantistica

- ▶ La fisica quantistica assume che ogni sistema fisico sia descritto da un oggetto matematico (es. un vettore, oppure una funzione) che ne descrive lo “stato” e che contiene informazione sulle grandezze fisiche che lo caratterizzano
- ▶ Per calcolare il valore che una grandezza fisica assume in un certo sistema occorre eseguire una operazione matematica sull’oggetto che descrive il suo stato
- ▶ In generale, questa operazione può *modificare* lo stato di un sistema
- ▶ Calcolare teoricamente (oppure misurare sperimentalmente) due grandezze diverse in successione può dare risultati diversi, a seconda dell’ordine in cui vengono eseguite le due misure
- ▶ La differenza tra le due operazioni di misura eseguite nei due ordini diversi è proporzionale ad una *costante fondamentale della natura*, la *costante di Planck ridotta* $\hbar \simeq 1.05 \cdot 10^{-34}$ J·s, che ha un valore *piccolo ma diverso da zero*
- ▶ La costante di Planck esprime *un limite naturale fondamentale* alla precisione con cui è possibile conoscere lo stato di un sistema fisico: la fisica quantistica non è più *deterministica* (es. non ha più senso parlare di *traiettoria* di un oggetto), bensì *probabilistica*
- ▶ La fisica quantistica implica che, per alcuni sistemi fisici, certe grandezze possano assumere solo valori *discreti* (ovvero “quantizzati”), anziché continui
- ▶ La fisica quantistica prevede l’esistenza dell’*entanglement quantistico* (o “correlazione quantistica”), che non ha alcuna analogia nella fisica classica
- ▶ La fisica quantistica è una teoria che è stato difficile accettare (perché ricca di implicazioni controintuitive), ma che è stata *pienamente confermata* in *tutti* gli esperimenti che l’hanno testata

Principali caratteristiche della fisica quantistica

- ▶ La fisica quantistica assume che ogni sistema fisico sia descritto da un oggetto matematico (es. un vettore, oppure una funzione) che ne descrive lo “stato” e che contiene informazione sulle grandezze fisiche che lo caratterizzano
- ▶ Per calcolare il valore che una grandezza fisica assume in un certo sistema occorre eseguire una operazione matematica sull’oggetto che descrive il suo stato
- ▶ In generale, questa operazione può *modificare* lo stato di un sistema
- ▶ Calcolare teoricamente (oppure misurare sperimentalmente) due grandezze diverse in successione può dare risultati diversi, a seconda dell’ordine in cui vengono eseguite le due misure
- ▶ La differenza tra le due operazioni di misura eseguite nei due ordini diversi è proporzionale ad una *costante fondamentale della natura*, la *costante di Planck ridotta* $\hbar \simeq 1.05 \cdot 10^{-34}$ J·s, che ha un valore *piccolo ma diverso da zero*
- ▶ La costante di Planck esprime *un limite naturale fondamentale* alla precisione con cui è possibile conoscere lo stato di un sistema fisico: la fisica quantistica non è più *deterministica* (es. non ha più senso parlare di *traiettoria* di un oggetto), bensì *probabilistica*
- ▶ La fisica quantistica implica che, per alcuni sistemi fisici, certe grandezze possano assumere solo valori *discreti* (ovvero “quantizzati”), anziché continui
- ▶ La fisica quantistica prevede l’esistenza dell’*entanglement quantistico* (o “correlazione quantistica”), che non ha alcuna analogia nella fisica classica
- ▶ La fisica quantistica è una teoria che è stato difficile accettare (perché ricca di implicazioni controintuitive), ma che è stata *pienamente confermata* in tutti gli esperimenti che l’hanno testata

Principali caratteristiche della fisica quantistica

- ▶ La fisica quantistica assume che ogni sistema fisico sia descritto da un oggetto matematico (es. un vettore, oppure una funzione) che ne descrive lo “stato” e che contiene informazione sulle grandezze fisiche che lo caratterizzano
- ▶ Per calcolare il valore che una grandezza fisica assume in un certo sistema occorre eseguire una operazione matematica sull’oggetto che descrive il suo stato
- ▶ In generale, questa operazione può *modificare* lo stato di un sistema
- ▶ Calcolare teoricamente (oppure misurare sperimentalmente) due grandezze diverse in successione può dare risultati diversi, a seconda dell’ordine in cui vengono eseguite le due misure
- ▶ La differenza tra le due operazioni di misura eseguite nei due ordini diversi è proporzionale ad una *costante fondamentale della natura*, la *costante di Planck ridotta* $\hbar \simeq 1.05 \cdot 10^{-34}$ J·s, che ha un valore *piccolo ma diverso da zero*
- ▶ La costante di Planck esprime *un limite naturale fondamentale* alla precisione con cui è possibile conoscere lo stato di un sistema fisico: la fisica quantistica non è più *deterministica* (es. non ha più senso parlare di *traiettoria* di un oggetto), bensì *probabilistica*
- ▶ La fisica quantistica implica che, per alcuni sistemi fisici, certe grandezze possano assumere solo valori *discreti* (ovvero “quantizzati”), anziché continui
- ▶ La fisica quantistica prevede l’esistenza dell’*entanglement quantistico* (o “correlazione quantistica”), che non ha alcuna analogia nella fisica classica
- ▶ La fisica quantistica è una teoria che è stato difficile accettare (perché ricca di implicazioni controintuitive), ma che è stata *pienamente confermata* in *tutti* gli esperimenti che l’hanno testata

Indice

Introduzione

Formulazione in termini di vettori e matrici

Formulazione in termini di funzioni e di derivate

La relazione tra fisica classica e fisica quantistica

Applicazioni della fisica quantistica

Stati fisici come vettori

In una delle sue possibili formulazioni, la fisica quantistica assume che lo stato di un sistema fisico sia descritto da un *vettore-colonna* v di numeri complessi

- Il numero di componenti del vettore può essere finito oppure infinito
- Ciascuna componente del vettore associato allo stato di un sistema è legata alla probabilità che, in quello stato, una data grandezza fisica abbia un certo valore
- Ad ogni componente i del vettore corrisponde una grandezza fisica che può assumere un certo valore
- Quando il vettore ha un numero finito di componenti, si dice che il sistema fisico può assumere un numero finito di valori per quella grandezza fisica (ad esempio, una particella può assumere un numero finito di stati di spin)
- La somma dei moduli quadrati delle componenti deve essere normalizzata (ad esempio, la somma dei moduli quadrati delle componenti deve essere uguale a 1)

Esempio, per una particella che può esistere in due stati:

$$v = \begin{pmatrix} -0.6 \\ 0.8i \end{pmatrix}$$

Stati fisici come vettori

In una delle sue possibili formulazioni, la fisica quantistica assume che lo stato di un sistema fisico sia descritto da un *vettore-colonna* v di numeri complessi

- ▶ Il numero di componenti del vettore può essere finito oppure infinito
- ▶ Ciascuna componente del vettore associato allo stato di un sistema è legata alla probabilità che, in quello stato, una data grandezza fisica abbia un certo valore
- ▶ Più precisamente, il *modulo quadro* della componente del vettore rappresenta la *probabilità* che una certa grandezza fisica abbia un certo valore
- ▶ Quando il vettore ha più componenti diverse da zero, significa che in quello stato fisico, la grandezza in esame può assumere uno o l'altro dei valori corrispondenti
- ▶ La *somma* dei moduli quadri di tutte le componenti vale 1 (per normalizzare la probabilità che la grandezza fisica abbia *un valore qualsiasi* tra quelli che può assumere)

Esempio, per una particella che può esistere in due stati:

$$v = \begin{pmatrix} -0.6 \\ 0.8i \end{pmatrix}$$

Stati fisici come vettori

In una delle sue possibili formulazioni, la fisica quantistica assume che lo stato di un sistema fisico sia descritto da un *vettore-colonna* v di numeri complessi

- ▶ Il numero di componenti del vettore può essere finito oppure infinito
- ▶ Ciascuna componente del vettore associato allo stato di un sistema è legata alla probabilità che, in quello stato, una data grandezza fisica abbia un certo valore
- ▶ Più precisamente, il *modulo quadro* della componente del vettore rappresenta la *probabilità* che una certa grandezza fisica abbia un certo valore
- ▶ Quando il vettore ha più componenti diverse da zero, significa che in quello stato fisico, la grandezza in esame può assumere uno o l'altro dei valori corrispondenti
- ▶ La *somma* dei moduli quadri di tutte le componenti vale 1 (per normalizzare la probabilità che la grandezza fisica abbia *un valore qualsiasi* tra quelli che può assumere)

Esempio, per una particella che può esistere in due stati:

$$v = \begin{pmatrix} -0.6 \\ 0.8i \end{pmatrix}$$

Stati fisici come vettori

In una delle sue possibili formulazioni, la fisica quantistica assume che lo stato di un sistema fisico sia descritto da un *vettore-colonna* v di numeri complessi

- ▶ Il numero di componenti del vettore può essere finito oppure infinito
- ▶ Ciascuna componente del vettore associato allo stato di un sistema è legata alla probabilità che, in quello stato, una data grandezza fisica abbia un certo valore
- ▶ Più precisamente, il *modulo quadro* della componente del vettore rappresenta la *probabilità* che una certa grandezza fisica abbia un certo valore
- ▶ Quando il vettore ha più componenti diverse da zero, significa che in quello stato fisico, la grandezza in esame può assumere uno o l'altro dei valori corrispondenti
- ▶ La *somma* dei moduli quadri di tutte le componenti vale 1 (per normalizzare la probabilità che la grandezza fisica abbia *un valore qualsiasi* tra quelli che può assumere)

Esempio, per una particella che può esistere in due stati:

$$v = \begin{pmatrix} -0.6 \\ 0.8i \end{pmatrix}$$

Stati fisici come vettori

In una delle sue possibili formulazioni, la fisica quantistica assume che lo stato di un sistema fisico sia descritto da un *vettore-colonna* v di numeri complessi

- ▶ Il numero di componenti del vettore può essere finito oppure infinito
- ▶ Ciascuna componente del vettore associato allo stato di un sistema è legata alla probabilità che, in quello stato, una data grandezza fisica abbia un certo valore
- ▶ Più precisamente, il *modulo quadro* della componente del vettore rappresenta la *probabilità* che una certa grandezza fisica abbia un certo valore
- ▶ Quando il vettore ha più componenti diverse da zero, significa che in quello stato fisico, la grandezza in esame può assumere uno o l'altro dei valori corrispondenti
- ▶ La *somma* dei moduli quadri di tutte le componenti vale 1 (per normalizzare la probabilità che la grandezza fisica abbia *un valore qualsiasi* tra quelli che può assumere)

Esempio, per una particella che può esistere in due stati:

$$v = \begin{pmatrix} -0.6 \\ 0.8i \end{pmatrix} \leftarrow \text{probab. di trovarla nel primo stato: } |-0.6|^2 = 0.36 = 36\%$$

Stati fisici come vettori

In una delle sue possibili formulazioni, la fisica quantistica assume che lo stato di un sistema fisico sia descritto da un *vettore-colonna* v di numeri complessi

- ▶ Il numero di componenti del vettore può essere finito oppure infinito
- ▶ Ciascuna componente del vettore associato allo stato di un sistema è legata alla probabilità che, in quello stato, una data grandezza fisica abbia un certo valore
- ▶ Più precisamente, il *modulo quadro* della componente del vettore rappresenta la *probabilità* che una certa grandezza fisica abbia un certo valore
- ▶ Quando il vettore ha più componenti diverse da zero, significa che in quello stato fisico, la grandezza in esame può assumere uno o l'altro dei valori corrispondenti
- ▶ La *somma* dei moduli quadri di tutte le componenti vale 1 (per normalizzare la probabilità che la grandezza fisica abbia *un valore qualsiasi* tra quelli che può assumere)

Esempio, per una particella che può esistere in due stati:

$$v = \begin{pmatrix} -0.6 \\ 0.8i \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \leftarrow \text{probab. di trovarla nel primo stato: } |-0.6|^2 = 0.36 = 36\% \\ \leftarrow \text{probab. di trovarla nel secondo stato: } |0.8i|^2 = 0.64 = 64\% \end{array}$$

Grandezze fisiche come matrici

Nella formulazione della fisica quantistica in cui rappresentiamo gli stati fisici come vettori, le varie grandezze fisiche che possiamo calcolare sono associate a *matrici*

Esempio:

$$A = \begin{pmatrix} 66 & -12i \\ 12i & 59 \end{pmatrix}$$

- ▶ Per calcolare il valore di una grandezza fisica in un certo stato ("misurare" la grandezza in quello stato) dobbiamo moltiplicare la matrice per il vettore
- ▶ Se il risultato di questa moltiplicazione è proporzionale al vettore di partenza, la costante di proporzionalità è il valore della grandezza fisica in quello stato: in tal caso, la grandezza fisica ha un valore fisico ben definito in quello stato

Grandezze fisiche come matrici

Nella formulazione della fisica quantistica in cui rappresentiamo gli stati fisici come vettori, le varie grandezze fisiche che possiamo calcolare sono associate a *matrici*

- ▶ Per calcolare il valore di una grandezza fisica in un certo stato (“misurare” la grandezza in quello stato) dobbiamo moltiplicare la matrice per il vettore
- ▶ Se il risultato di questa moltiplicazione è proporzionale al vettore di partenza, la costante di proporzionalità è il valore della grandezza fisica in quello stato: in tal caso, la grandezza fisica ha un valore fisico ben definito in quello stato
- ▶ In generale, tuttavia, il risultato di questa moltiplicazione *non* è proporzionale al vettore di partenza: in tal caso, la grandezza fisica in esame *non ha un unico valore ben definito* in quello stato fisico del sistema
- ▶ Inoltre, in questo caso il processo di “misura” ha *modificato* lo stato del sistema
- ▶ In questa formulazione della fisica quantistica, il fatto che misurare in successione due grandezze diverse possa dare risultati diversi, a seconda dell'ordine in cui vengono eseguite le due misure, è una conseguenza del fatto che, in generale, il prodotto di due matrici dipende dall'ordine dei fattori: $AB \neq BA$
- ▶ La scelta della corrispondenza tra grandezze fisiche e matrici *non* è arbitraria

Grandezze fisiche come matrici

Nella formulazione della fisica quantistica in cui rappresentiamo gli stati fisici come vettori, le varie grandezze fisiche che possiamo calcolare sono associate a *matrici*

- ▶ Per calcolare il valore di una grandezza fisica in un certo stato (“misurare” la grandezza in quello stato) dobbiamo moltiplicare la matrice per il vettore
- ▶ Se il risultato di questa moltiplicazione è proporzionale al vettore di partenza, la costante di proporzionalità è il valore della grandezza fisica in quello stato: in tal caso, la grandezza fisica ha un valore fisico ben definito in quello stato

$$A \cdot v = \begin{pmatrix} 66 & -12i \\ 12i & 59 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -0.6 \\ 0.8i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -30 \\ 40i \end{pmatrix} = 50 \begin{pmatrix} -0.6 \\ 0.8i \end{pmatrix}$$

- ▶ In generale, tuttavia, il risultato di questa moltiplicazione *non* è proporzionale al vettore di partenza: in tal caso, la grandezza fisica in esame *non ha un unico valore ben definito* in quello stato fisico del sistema
- ▶ Inoltre, in questo caso il processo di “misura” ha *modificato* lo stato del sistema
- ▶ In questa formulazione della fisica quantistica, il fatto che misurare in successione due grandezze diverse possa dare risultati diversi, a seconda dell'ordine in cui vengono eseguite le due misure, è una conseguenza del fatto che, in generale, il prodotto di due matrici dipende dall'ordine dei fattori: $AB \neq BA$
- ▶ La scelta della corrispondenza tra grandezze fisiche e matrici *non* è arbitraria

Grandezze fisiche come matrici

Nella formulazione della fisica quantistica in cui rappresentiamo gli stati fisici come vettori, le varie grandezze fisiche che possiamo calcolare sono associate a *matrici*

- ▶ Per calcolare il valore di una grandezza fisica in un certo stato (“misurare” la grandezza in quello stato) dobbiamo moltiplicare la matrice per il vettore
- ▶ Se il risultato di questa moltiplicazione è proporzionale al vettore di partenza, la costante di proporzionalità è il valore della grandezza fisica in quello stato: in tal caso, la grandezza fisica ha un valore fisico ben definito in quello stato
- ▶ In generale, tuttavia, il risultato di questa moltiplicazione *non* è proporzionale al vettore di partenza: in tal caso, la grandezza fisica in esame *non ha un unico valore ben definito* in quello stato fisico del sistema

$$B \cdot v = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -0.6 \\ 0.8i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.8 \\ -1.6i \end{pmatrix}$$

- ▶ Inoltre, in questo caso il processo di “misura” ha *modificato* lo stato del sistema
- ▶ In questa formulazione della fisica quantistica, il fatto che misurare in successione due grandezze diverse possa dare risultati diversi, a seconda dell'ordine in cui vengono eseguite le due misure, è una conseguenza del fatto che, in generale, il prodotto di due matrici dipende dall'ordine dei fattori: $AB \neq BA$
- ▶ La scelta della corrispondenza tra grandezze fisiche e matrici *non* è arbitraria

Grandezze fisiche come matrici

Nella formulazione della fisica quantistica in cui rappresentiamo gli stati fisici come vettori, le varie grandezze fisiche che possiamo calcolare sono associate a *matrici*

- ▶ Per calcolare il valore di una grandezza fisica in un certo stato (“misurare” la grandezza in quello stato) dobbiamo moltiplicare la matrice per il vettore
- ▶ Se il risultato di questa moltiplicazione è proporzionale al vettore di partenza, la costante di proporzionalità è il valore della grandezza fisica in quello stato: in tal caso, la grandezza fisica ha un valore fisico ben definito in quello stato
- ▶ In generale, tuttavia, il risultato di questa moltiplicazione *non* è proporzionale al vettore di partenza: in tal caso, la grandezza fisica in esame *non ha un unico valore ben definito* in quello stato fisico del sistema

$$B \cdot v = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -0.6 \\ 0.8i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.8 \\ -1.6i \end{pmatrix}$$

- ▶ Inoltre, in questo caso il processo di “misura” ha *modificato* lo stato del sistema
- ▶ In questa formulazione della fisica quantistica, il fatto che misurare in successione due grandezze diverse possa dare risultati diversi, a seconda dell'ordine in cui vengono eseguite le due misure, è una conseguenza del fatto che, in generale, il prodotto di due matrici dipende dall'ordine dei fattori: $AB \neq BA$
- ▶ La scelta della corrispondenza tra grandezze fisiche e matrici *non* è arbitraria

Grandezze fisiche come matrici

Nella formulazione della fisica quantistica in cui rappresentiamo gli stati fisici come vettori, le varie grandezze fisiche che possiamo calcolare sono associate a *matrici*

- ▶ Per calcolare il valore di una grandezza fisica in un certo stato (“misurare” la grandezza in quello stato) dobbiamo moltiplicare la matrice per il vettore
- ▶ Se il risultato di questa moltiplicazione è proporzionale al vettore di partenza, la costante di proporzionalità è il valore della grandezza fisica in quello stato: in tal caso, la grandezza fisica ha un valore fisico ben definito in quello stato
- ▶ In generale, tuttavia, il risultato di questa moltiplicazione *non* è proporzionale al vettore di partenza: in tal caso, la grandezza fisica in esame *non ha un unico valore ben definito* in quello stato fisico del sistema
- ▶ Inoltre, in questo caso il processo di “misura” ha *modificato* lo stato del sistema
- ▶ In questa formulazione della fisica quantistica, il fatto che misurare in successione due grandezze diverse possa dare risultati diversi, a seconda dell’ordine in cui vengono eseguite le due misure, è una conseguenza del fatto che, in generale, il prodotto di due matrici dipende dall’ordine dei fattori: $AB \neq BA$
- ▶ La scelta della corrispondenza tra grandezze fisiche e matrici *non* è arbitraria

Grandezze fisiche come matrici

Nella formulazione della fisica quantistica in cui rappresentiamo gli stati fisici come vettori, le varie grandezze fisiche che possiamo calcolare sono associate a *matrici*

- ▶ Per calcolare il valore di una grandezza fisica in un certo stato (“misurare” la grandezza in quello stato) dobbiamo moltiplicare la matrice per il vettore
- ▶ Se il risultato di questa moltiplicazione è proporzionale al vettore di partenza, la costante di proporzionalità è il valore della grandezza fisica in quello stato: in tal caso, la grandezza fisica ha un valore fisico ben definito in quello stato
- ▶ In generale, tuttavia, il risultato di questa moltiplicazione *non* è proporzionale al vettore di partenza: in tal caso, la grandezza fisica in esame *non ha un unico valore ben definito* in quello stato fisico del sistema
- ▶ Inoltre, in questo caso il processo di “misura” ha *modificato* lo stato del sistema
- ▶ In questa formulazione della fisica quantistica, il fatto che misurare in successione due grandezze diverse possa dare risultati diversi, a seconda dell’ordine in cui vengono eseguite le due misure, è una conseguenza del fatto che, in generale, il prodotto di due matrici dipende dall’ordine dei fattori: $AB \neq BA$
- ▶ La scelta della corrispondenza tra grandezze fisiche e matrici *non* è arbitraria

Indice

Introduzione

Formulazione in termini di vettori e matrici

Formulazione in termini di funzioni e di derivate

La relazione tra fisica classica e fisica quantistica

Applicazioni della fisica quantistica

La funzione d'onda

Un'altra formulazione della fisica quantistica assume che lo stato di un sistema fisico (ad esempio: una particella) sia descritto da una *funzione d'onda* $\Psi(x, t)$

- ▶ $\Psi(x, t)$ è un numero complesso che varia da punto a punto nello spazio, e cambia per istante al trascorrere del tempo
- ▶ $|\Psi(x, t)|^2$ è proporzionale alla probabilità di trovare la particella nel punto x all'istante t .

La funzione d'onda

Un'altra formulazione della fisica quantistica assume che lo stato di un sistema fisico (ad esempio: una particella) sia descritto da una *funzione d'onda* $\Psi(x, t)$

- ▶ $\Psi(x, t)$ è un numero complesso che varia da punto a punto nello spazio, e istante per istante al trascorrere del tempo
- ▶ $|\Psi(x, t)|^2$ è proporzionale alla *probabilità* di trovare la particella nel punto x all'istante t

La funzione d'onda

Un'altra formulazione della fisica quantistica assume che lo stato di un sistema fisico (ad esempio: una particella) sia descritto da una *funzione d'onda* $\Psi(x, t)$

- ▶ $\Psi(x, t)$ è un numero complesso che varia da punto a punto nello spazio, e istante per istante al trascorrere del tempo
- ▶ $|\Psi(x, t)|^2$ è proporzionale alla *probabilità* di trovare la particella nel punto x all'istante t

L'equazione di Schrödinger

- ▶ Il modo in cui la funzione d'onda $\Psi(x, t)$ varia nel tempo e nello spazio è definito dall'*equazione di Schrödinger*; es. per una particella di massa m che oscilla intorno al punto $x = 0$ con pulsazione ω

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = H\Psi, \quad \text{dove } H = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx} \frac{d}{dx}$$

- ▶ H è un *operatore* che agisce su Ψ

★ La prima parte di H moltiplica semplicemente la funzione Ψ per $(m/2)\omega^2 x^2$

★ La seconda parte di H agisce su Ψ in senso derivativo, e corrisponde alla derivata seconda di Ψ moltiplicata per $-\hbar^2/2m$

★ Ψ è una funzione complessa



- ▶ Interpretare $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la velocità associata alla particella *non* è arbitrario: già nella fisica *classica* si può definire una grandezza S (chiamata "azione", e che è una energia per un tempo), con la proprietà che la velocità è proporzionale alla derivata di S rispetto alla posizione x
- ▶ Esistono molte altre corrispondenze di questo tipo: per esempio, l'*energia* è proporzionale alla derivata di S rispetto al *tempo*
- ▶ Osservazione: l'azione ha le stesse unità di misura della costante di Planck \hbar (J·s)

L'equazione di Schrödinger

- ▶ Il modo in cui la funzione d'onda $\Psi(x, t)$ varia nel tempo e nello spazio è definito dall'*equazione di Schrödinger*; es. per una particella di massa m che oscilla intorno al punto $x = 0$ con pulsazione ω

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = H\Psi, \quad \text{dove } H = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx} \frac{d}{dx}$$

- ▶ H è un *operatore* che agisce su Ψ

- ★ La prima parte di H moltiplica semplicemente la funzione Ψ per $(m/2)\omega^2 x^2$
- ★ La seconda parte di H prende Ψ , la deriva due volte rispetto alla posizione x , e moltiplica il risultato per $-\hbar^2/(2m)$

▶

- ▶ Interpretare $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la velocità associata alla particella *non* è arbitrario: già nella fisica *classica* si può definire una grandezza S (chiamata "azione", e che è una energia per un tempo), con la proprietà che la velocità è proporzionale alla derivata di S rispetto alla posizione x
- ▶ Esistono molte altre corrispondenze di questo tipo: per esempio, l'*energia* è proporzionale alla derivata di S rispetto al *tempo*
- ▶ Osservazione: l'azione ha le stesse unità di misura della costante di Planck \hbar (J·s)

L'equazione di Schrödinger

- ▶ Il modo in cui la funzione d'onda $\Psi(x, t)$ varia nel tempo e nello spazio è definito dall'*equazione di Schrödinger*; es. per una particella di massa m che oscilla intorno al punto $x = 0$ con pulsazione ω

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = H\Psi, \quad \text{dove } H = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx} \frac{d}{dx}$$

- ▶ H è un *operatore* che agisce su Ψ
 - ★ La prima parte di H moltiplica semplicemente la funzione Ψ per $(m/2)\omega^2 x^2$
 - ★ La seconda parte di H prende Ψ , la deriva due volte rispetto alla posizione x , e moltiplica il risultato per $-\hbar^2/(2m)$

- ▶ Interpretare $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la velocità associata alla particella *non* è arbitrario: già nella fisica *classica* si può definire una grandezza S (chiamata "azione", e che è una energia per un tempo), con la proprietà che la velocità è proporzionale alla derivata di S rispetto alla posizione x
- ▶ Esistono molte altre corrispondenze di questo tipo: per esempio, l'*energia* è proporzionale alla derivata di S rispetto al *tempo*
- ▶ Osservazione: l'azione ha le stesse unità di misura della costante di Planck \hbar (J·s)

L'equazione di Schrödinger

- ▶ Il modo in cui la funzione d'onda $\Psi(x, t)$ varia nel tempo e nello spazio è definito dall'*equazione di Schrödinger*; es. per una particella di massa m che oscilla intorno al punto $x = 0$ con pulsazione ω

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = H\Psi, \quad \text{dove } H = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx} \frac{d}{dx}$$

- ▶ H è un *operatore* che agisce su Ψ

- ★ La prima parte di H moltiplica semplicemente la funzione Ψ per $(m/2)\omega^2 x^2$
- ★ La seconda parte di H prende Ψ , la deriva due volte rispetto alla posizione x , e moltiplica il risultato per $-\hbar^2/(2m)$

- ▶ ★ La prima parte di H rappresenta l'energia potenziale della particella che sta oscillando; come per una particella attaccata a una molla, essa è tanto maggiore quanto più x è grande (che quanto più la particella è lontana dal centro di oscillazione).
- ▶ ★ La seconda parte di H rappresenta l'energia cinetica della particella.
- ▶ Interpretare $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la velocità associata alla particella *non* è arbitrario: già nella fisica *classica* si può definire una grandezza S (chiamata "azione", e che è una energia per un tempo), con la proprietà che la velocità è proporzionale alla derivata di S rispetto alla posizione x .
- ▶ Esistono molte altre corrispondenze di questo tipo: per esempio, l'*energia* è proporzionale alla derivata di S rispetto al *tempo*.
- ▶ Osservazione: l'azione ha le stesse unità di misura della costante di Planck \hbar (J·s)

L'equazione di Schrödinger

- ▶ Il modo in cui la funzione d'onda $\Psi(x, t)$ varia nel tempo e nello spazio è definito dall'*equazione di Schrödinger*; es. per una particella di massa m che oscilla intorno al punto $x = 0$ con pulsazione ω

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = H\Psi, \quad \text{dove } H = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx} \frac{d}{dx}$$

- ▶ H è un *operatore* che agisce su Ψ
 - ★ La prima parte di H moltiplica semplicemente la funzione Ψ per $(m/2)\omega^2 x^2$
 - ★ La seconda parte di H prende Ψ , la deriva due volte rispetto alla posizione x , e moltiplica il risultato per $-\hbar^2/(2m)$
- ▶ H rappresenta l'*energia* della particella
 - ★ La prima parte di H rappresenta l'*energia potenziale* della particella che sta oscillando: come per una particella attaccata a una molla, essa è tanto maggiore quanto più x è grande (cioè quanto più la particella è lontana dal centro di oscillazione)
 - ★ Se interpretiamo $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la *velocità*, la seconda parte di H rappresenta l'*energia cinetica* della particella: $\frac{1}{2}mv^2$
- ▶ Interpretare $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la velocità associata alla particella *non* è arbitrario: già nella fisica *classica* si può definire una grandezza S (chiamata "azione", e che è una energia per un tempo), con la proprietà che la velocità è proporzionale alla derivata di S rispetto alla posizione x
- ▶ Esistono molte altre corrispondenze di questo tipo: per esempio, l'*energia* è proporzionale alla derivata di S rispetto al *tempo*
- ▶ Osservazione: l'azione ha le stesse unità di misura della costante di Planck \hbar (J·s)

L'equazione di Schrödinger

- ▶ Il modo in cui la funzione d'onda $\Psi(x, t)$ varia nel tempo e nello spazio è definito dall'*equazione di Schrödinger*, es. per una particella di massa m che oscilla intorno al punto $x = 0$ con pulsazione ω

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = H\Psi, \quad \text{dove } H = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx} \frac{d}{dx}$$

- ▶ H è un *operatore* che agisce su Ψ
 - ★ La prima parte di H moltiplica semplicemente la funzione Ψ per $(m/2)\omega^2 x^2$
 - ★ La seconda parte di H prende Ψ , la deriva due volte rispetto alla posizione x , e moltiplica il risultato per $-\hbar^2/(2m)$
- ▶ H rappresenta l'*energia* della particella
 - ★ La prima parte di H rappresenta l'*energia potenziale* della particella che sta oscillando: come per una particella attaccata a una molla, essa è tanto maggiore quanto più x è grande (cioè quanto più la particella è lontana dal centro di oscillazione)



L'equazione di Schrödinger

- ▶ Il modo in cui la funzione d'onda $\Psi(x, t)$ varia nel tempo e nello spazio è definito dall'*equazione di Schrödinger*, es. per una particella di massa m che oscilla intorno al punto $x = 0$ con pulsazione ω

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = H\Psi, \quad \text{dove } H = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx} \frac{d}{dx}$$

- ▶ H è un *operatore* che agisce su Ψ
 - ★ La prima parte di H moltiplica semplicemente la funzione Ψ per $(m/2)\omega^2 x^2$
 - ★ La seconda parte di H prende Ψ , la deriva due volte rispetto alla posizione x , e moltiplica il risultato per $-\hbar^2/(2m)$
- ▶ H rappresenta l'*energia* della particella
 - ★ La prima parte di H rappresenta l'*energia potenziale* della particella che sta oscillando: come per una particella attaccata a una molla, essa è tanto maggiore quanto più x è grande (cioè quanto più la particella è lontana dal centro di oscillazione)
 - ★ Se interpretiamo $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la *velocità*, la seconda parte di H rappresenta l'*energia cinetica* della particella: $\frac{1}{2}mv^2$
- ▶ Interpretare $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la velocità associata alla particella *non* è arbitrario: già nella fisica *classica* si può definire una grandezza S (chiamata "azione", e che è una energia per un tempo), con la proprietà che la velocità è proporzionale alla derivata di S rispetto alla posizione x
- ▶ Esistono molte altre corrispondenze di questo tipo: per esempio, l'*energia* è proporzionale alla derivata di S rispetto al *tempo*
- ▶ Osservazione: l'azione ha le stesse unità di misura della costante di Planck \hbar (J·s)

L'equazione di Schrödinger

- ▶ Il modo in cui la funzione d'onda $\Psi(x, t)$ varia nel tempo e nello spazio è definito dall'*equazione di Schrödinger*, es. per una particella di massa m che oscilla intorno al punto $x = 0$ con pulsazione ω

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = H\Psi, \quad \text{dove } H = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx} \frac{d}{dx}$$

- ▶ H è un *operatore* che agisce su Ψ
 - ★ La prima parte di H moltiplica semplicemente la funzione Ψ per $(m/2)\omega^2 x^2$
 - ★ La seconda parte di H prende Ψ , la deriva due volte rispetto alla posizione x , e moltiplica il risultato per $-\hbar^2/(2m)$
- ▶ H rappresenta l'*energia* della particella
 - ★ La prima parte di H rappresenta l'*energia potenziale* della particella che sta oscillando: come per una particella attaccata a una molla, essa è tanto maggiore quanto più x è grande (cioè quanto più la particella è lontana dal centro di oscillazione)
 - ★ Se interpretiamo $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la *velocità*, la seconda parte di H rappresenta l'*energia cinetica* della particella: $\frac{1}{2}mv^2$
- ▶ Interpretare $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la velocità associata alla particella *non* è arbitrario: già nella fisica *classica* si può definire una grandezza S (chiamata "azione", e che è una energia per un tempo), con la proprietà che la velocità è proporzionale alla derivata di S rispetto alla posizione x
- ▶ Esistono molte altre corrispondenze di questo tipo: per esempio, l'*energia* è proporzionale alla derivata di S rispetto al *tempo*
- ▶ Osservazione: l'azione ha le stesse unità di misura della costante di Planck \hbar (J·s)

L'equazione di Schrödinger

- ▶ Il modo in cui la funzione d'onda $\Psi(x, t)$ varia nel tempo e nello spazio è definito dall'*equazione di Schrödinger*, es. per una particella di massa m che oscilla intorno al punto $x = 0$ con pulsazione ω

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = H\Psi, \quad \text{dove } H = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx} \frac{d}{dx}$$

- ▶ H è un *operatore* che agisce su Ψ
 - ★ La prima parte di H moltiplica semplicemente la funzione Ψ per $(m/2)\omega^2 x^2$
 - ★ La seconda parte di H prende Ψ , la deriva due volte rispetto alla posizione x , e moltiplica il risultato per $-\hbar^2/(2m)$
- ▶ H rappresenta l'*energia* della particella
 - ★ La prima parte di H rappresenta l'*energia potenziale* della particella che sta oscillando: come per una particella attaccata a una molla, essa è tanto maggiore quanto più x è grande (cioè quanto più la particella è lontana dal centro di oscillazione)
 - ★ Se interpretiamo $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la *velocità*, la seconda parte di H rappresenta l'*energia cinetica* della particella: $\frac{1}{2}mv^2$
- ▶ Interpretare $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la velocità associata alla particella *non* è arbitrario: già nella fisica *classica* si può definire una grandezza S (chiamata "azione", e che è una energia per un tempo), con la proprietà che la velocità è proporzionale alla derivata di S rispetto alla posizione x
- ▶ Esistono molte altre corrispondenze di questo tipo: per esempio, l'*energia* è proporzionale alla derivata di S rispetto al *tempo*
- ▶ Osservazione: l'azione ha le stesse unità di misura della costante di Planck \hbar (J·s)

L'equazione di Schrödinger

- ▶ Il modo in cui la funzione d'onda $\Psi(x, t)$ varia nel tempo e nello spazio è definito dall'*equazione di Schrödinger*, es. per una particella di massa m che oscilla intorno al punto $x = 0$ con pulsazione ω

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = H\Psi, \quad \text{dove } H = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx} \frac{d}{dx}$$

- ▶ H è un *operatore* che agisce su Ψ
 - ★ La prima parte di H moltiplica semplicemente la funzione Ψ per $(m/2)\omega^2 x^2$
 - ★ La seconda parte di H prende Ψ , la deriva due volte rispetto alla posizione x , e moltiplica il risultato per $-\hbar^2/(2m)$
- ▶ H rappresenta l'*energia* della particella
 - ★ La prima parte di H rappresenta l'*energia potenziale* della particella che sta oscillando: come per una particella attaccata a una molla, essa è tanto maggiore quanto più x è grande (cioè quanto più la particella è lontana dal centro di oscillazione)
 - ★ Se interpretiamo $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la *velocità*, la seconda parte di H rappresenta l'*energia cinetica* della particella: $\frac{1}{2}mv^2$
- ▶ Interpretare $-i(\hbar/m) \frac{d}{dx}$ come la velocità associata alla particella *non* è arbitrario: già nella fisica *classica* si può definire una grandezza S (chiamata "azione", e che è una energia per un tempo), con la proprietà che la velocità è proporzionale alla derivata di S rispetto alla posizione x
- ▶ Esistono molte altre corrispondenze di questo tipo: per esempio, l'*energia* è proporzionale alla derivata di S rispetto al *tempo*
- ▶ Osservazione: l'azione ha le stesse unità di misura della costante di Planck \hbar (J·s)

Dualismo onda-particella

La formulazione in termini di una funzione d'onda rivela la duplice natura di una particella nella fisica quantistica

- ▶ Una particella viene sempre rivelata come un corpuscolo
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è definita da un'onda (un'onda di probabilità)
- ▶ L'interferenza osservata a vari altri esperimenti conferma l'esistenza di un corpuscolo libero associato con la onda

Dualismo onda-particella

La formulazione in termini di una funzione d'onda rivela la duplice natura di una particella nella fisica quantistica

- ▶ Una particella viene sempre rivelata come un *corpuscolo*
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è definita da un'onda (un'onda di probabilità)
- ▶ L'indeterminazione quantistica e vari altri aspetti della propagazione quantistica di un oggetto hanno analogie con le onde

Dualismo onda-particella

La formulazione in termini di una funzione d'onda rivela la duplice natura di una particella nella fisica quantistica

- ▶ Una particella viene sempre rivelata come un *corpuscolo*
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è definita da un'onda (un'*onda di probabilità*)
- ▶ L'indeterminazione quantistica e vari altri aspetti della propagazione quantistica di un oggetto hanno analogie con le onde
 - ★ Un'onda con velocità ben definita è molto estesa nello spazio
 - ★ L'indeterminazione sulla posizione corrisponde alla ben definita e molto estesa natura spaziale dell'onda
 - ★ L'indeterminazione sulla velocità corrisponde alla ben definita e molto estesa natura spaziale dell'onda
 - ★ L'indeterminazione sulla direzione corrisponde alla ben definita e molto estesa natura spaziale dell'onda

Dualismo onda-particella

La formulazione in termini di una funzione d'onda rivela la duplice natura di una particella nella fisica quantistica

- ▶ Una particella viene sempre rivelata come un *corpuscolo*
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è definita da un'onda (un'*onda di probabilità*)
- ▶ L'indeterminazione quantistica e vari altri aspetti della propagazione quantistica di un oggetto hanno analogie con le onde
 - ★ Un'onda con velocità ben definita è molto estesa nello spazio
 - ★ Viceversa, un'onda la cui posizione spaziale è ben definita è solitamente data dalla sovrapposizione di più onde di velocità diverse
 - ★ *Diffrazione*: le onde possono aggirare ostacoli
 - ★ *Interferenza*: onde diverse che si incontrano in un punto possono *sommarsi* o *sottrarsi*

Dualismo onda-particella

La formulazione in termini di una funzione d'onda rivela la duplice natura di una particella nella fisica quantistica

- ▶ Una particella viene sempre rivelata come un *corpuscolo*
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è definita da un'onda (un'*onda di probabilità*)
- ▶ L'indeterminazione quantistica e vari altri aspetti della propagazione quantistica di un oggetto hanno analogie con le onde
 - ★ Un'onda con velocità ben definita è molto estesa nello spazio

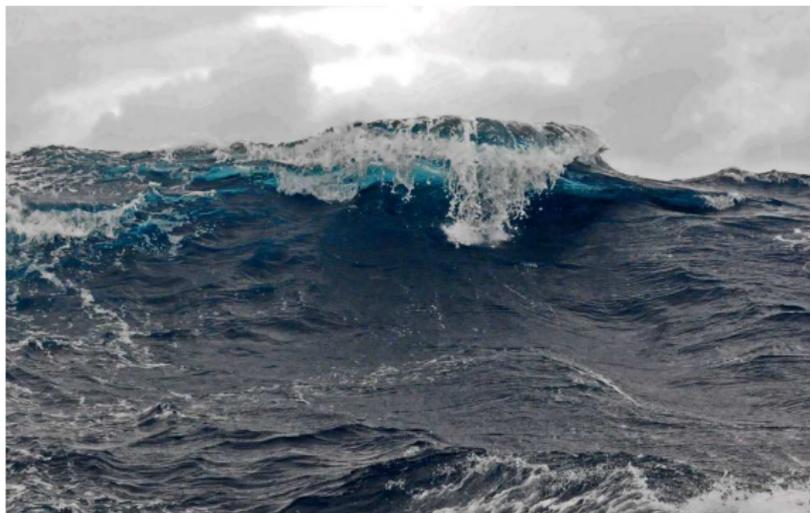


- ★ Viceversa, un'onda la cui posizione spaziale è ben definita è solitamente data dalla sovrapposizione di più onde di velocità diverse
- ★ *Diffrazione*: le onde possono *aggirare* ostacoli
- ★ *Interferenza*: onde diverse che si incontrano in un punto possono *sommarsi* o *sottrarsi*

Dualismo onda-particella

La formulazione in termini di una funzione d'onda rivela la duplice natura di una particella nella fisica quantistica

- ▶ Una particella viene sempre rivelata come un *corpuscolo*
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è definita da un'onda (un'onda di probabilità)
- ▶ L'indeterminazione quantistica e vari altri aspetti della propagazione quantistica di un oggetto hanno analogie con le onde
 - ★ Un'onda con velocità ben definita è molto estesa nello spazio
 - ★ Viceversa, un'onda la cui posizione spaziale è ben definita è solitamente data dalla sovrapposizione di più onde di velocità diverse



★ *Diffrazione*: le onde possono aggirare ostacoli

★ *Interferenza*: onde diverse che si incontrano in un punto possono sommarsi o sottrarsi

Dualismo onda-particella

La formulazione in termini di una funzione d'onda rivela la duplice natura di una particella nella fisica quantistica

- ▶ Una particella viene sempre rivelata come un *corpuscolo*
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è definita da un'onda (un'*onda di probabilità*)
- ▶ L'indeterminazione quantistica e vari altri aspetti della propagazione quantistica di un oggetto hanno analogie con le onde
 - ★ Un'onda con velocità ben definita è molto estesa nello spazio
 - ★ Viceversa, un'onda la cui posizione spaziale è ben definita è solitamente data dalla sovrapposizione di più onde di velocità diverse
 - ★ *Diffrazione*: le onde possono *aggirare* ostacoli
 - ★ *Interferenza*: onde diverse che si incontrano in un punto possono *sommarsi* o *sottrarsi*



Esperimento della doppia fenditura, con oggetti macroscopici

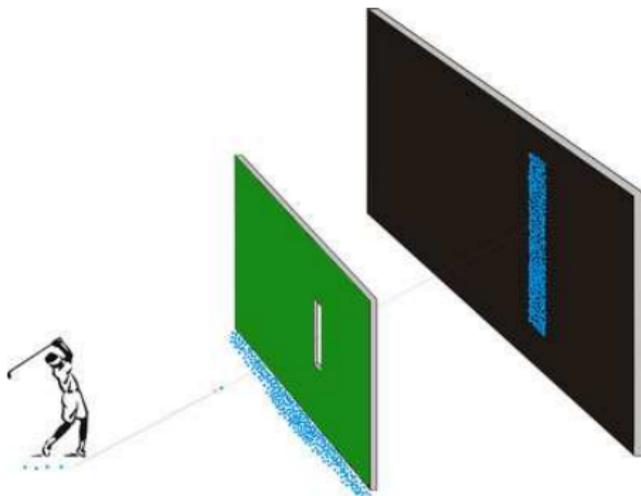
L'esperimento in cui un oggetto viene ripetutamente fatto passare attraverso una barriera con due fenditure è uno dei più importanti per illustrare la differenza tra fisica classica e fisica quantistica; consideriamo dapprima il caso in cui l'esperimento venga eseguito con oggetti *macroscopici* (es. palline da golf)

- ▶ Supponiamo che inizialmente una sola delle fenditure sia aperta; secondo la fisica classica, la pallina andrà a colpire lo schermo nero in una zona di punti situati dietro la fenditura aperta
- ▶ Tenendo aperta solo l'altra fenditura, si trova una distribuzione dei punti di urto approssimativamente simmetrica rispetto al caso precedente
- ▶ Se si apre contemporaneamente entrambe le fenditure, si ottiene una distribuzione

Esperimento della doppia fenditura, con oggetti macroscopici

L'esperimento in cui un oggetto viene ripetutamente fatto passare attraverso una barriera con due fenditure è uno dei più importanti per illustrare la differenza tra fisica classica e fisica quantistica; consideriamo dapprima il caso in cui l'esperimento venga eseguito con oggetti *macroscopici* (es. palline da golf)

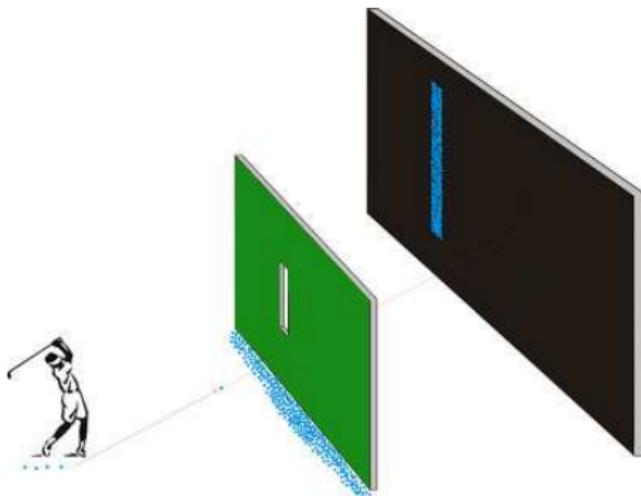
- ▶ Supponiamo che inizialmente una sola delle fenditure sia aperta: secondo la fisica classica, la pallina andrà a colpire lo schermo nero in una serie di punti situati dietro la fenditura aperta
- ▶ Tenendo aperta solo l'altra fenditura, si trova una distribuzione dei punti di urto approssimativamente simmetrica rispetto al caso precedente
- ▶ Se entrambe le fenditure sono aperte, la distribuzione che si ottiene è la sovrapposizione delle due distribuzioni precedenti



Esperimento della doppia fenditura, con oggetti macroscopici

L'esperimento in cui un oggetto viene ripetutamente fatto passare attraverso una barriera con due fenditure è uno dei più importanti per illustrare la differenza tra fisica classica e fisica quantistica; consideriamo dapprima il caso in cui l'esperimento venga eseguito con oggetti *macroscopici* (es. palline da golf)

- ▶ Supponiamo che inizialmente una sola delle fenditure sia aperta: secondo la fisica classica, la pallina andrà a colpire lo schermo nero in una serie di punti situati dietro la fenditura aperta
- ▶ Tenendo aperta solo l'altra fenditura, si trova una distribuzione dei punti di urto approssimativamente simmetrica rispetto al caso precedente
- ▶ Se entrambe le fenditure sono aperte, la distribuzione che si ottiene è la sovrapposizione delle due distribuzioni precedenti



Esperimento della doppia fenditura con oggetti microscopici

Consideriamo ora lo stesso esperimento eseguito *su una scala microscopica*, ad es. utilizzando elettroni invece che palline da golf, dove *gli effetti quantistici non sono trascurabili*

- Espandendo una sola volta l'esperimento con le sole fenditure destra e sinistra, l'elettrone va ogni volta a colpire lo schermo in un unico punto (prevalentemente nella parte destra dello schermo)
- Se invece si apre contemporaneamente entrambe le fenditure, l'elettrone si comporta come un'onda e produce un pattern di interferenza
- Se si tenta di scoprire attraverso quale fenditura l'elettrone si sta muovendo, il pattern di interferenza scompare

Esperimento della doppia fenditura con oggetti microscopici

Consideriamo ora lo stesso esperimento eseguito *su una scala microscopica*, ad es. utilizzando elettroni invece che palline da golf, dove *gli effetti quantistici non sono trascurabili*

- ▶ Eseguendo una sola volta l'esperimento con la sola fenditura destra aperta, l'elettrone va ogni volta a colpire lo schermo in un unico punto (prevalentemente nella parte destra dello schermo)



Esperimento della doppia fenditura con oggetti microscopici

Consideriamo ora lo stesso esperimento eseguito *su una scala microscopica*, ad es. utilizzando elettroni invece che palline da golf, dove *gli effetti quantistici non sono trascurabili*

- ▶ Eseguendo una sola volta l'esperimento con la sola fenditura destra aperta, l'elettrone va ogni volta a colpire lo schermo in un unico punto (prevalentemente nella parte destra dello schermo)



Esperimento della doppia fenditura con oggetti microscopici

Consideriamo ora lo stesso esperimento eseguito *su una scala microscopica*, ad es. utilizzando elettroni invece che palline da golf, dove *gli effetti quantistici non sono trascurabili*

- ▶ Eseguendo una sola volta l'esperimento con la sola fenditura destra aperta, l'elettrone va ogni volta a colpire lo schermo in un unico punto (prevalentemente nella parte destra dello schermo)

▶ Se l'esperimento viene ripetuto lasciando aperta la fenditura sinistra invece della destra, i punti in cui l'elettrone colpisce lo schermo formano una distribuzione simmetrica rispetto alla precedente.



Esperimento della doppia fenditura: descrizione teorica

La fisica quantistica dà la corretta descrizione dell'esperimento della doppia fenditura compiuto con elettroni

- ▶ L'elettrone è ancora una particella (come nella fisica classica)
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è descritta da un'onda: la *funzione d'onda* $\Psi(x, t)$, che è un numero complesso
- ▶ La probabilità di trovare l'elettrone in un certo punto x all'istante t è proporzionale al *modulo quadro* della funzione d'onda: $|\Psi(x, t)|^2$
- ▶ Quando una sola fenditura è aperta, la funzione d'onda si propaga (con *diffrazione*) attraverso di essa, e il suo modulo quadro è massimo nella regione dietro la fenditura aperta
- ▶ Quando entrambe le fenditure sono aperte, la funzione d'onda si propaga attraverso entrambe, e le onde provenienti dalle due fenditure si sommano fra loro (con *diffrazione* e *interferenza*)
- ▶ Il modulo quadro della somma di due numeri complessi può anche essere *più piccolo* dei moduli quadri dei due numeri presi separatamente
- ▶ Di conseguenza, la probabilità di trovare la particella in un certo punto dello schermo quando entrambe le fenditure sono aperte può anche essere minore rispetto a quando solo una delle fenditure è aperta
- ▶ Non ha più senso parlare di "traiettoria" della particella, né chiedersi "da quale fenditura sia passata"

Esperimento della doppia fenditura: descrizione teorica

La fisica quantistica dà la corretta descrizione dell'esperimento della doppia fenditura compiuto con elettroni

- ▶ L'elettrone è ancora una particella (come nella fisica classica)
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è descritta da un'onda: la *funzione d'onda* $\Psi(x, t)$, che è un numero complesso
- ▶ La probabilità di trovare l'elettrone in un certo punto x all'istante t è proporzionale al *modulo quadro* della funzione d'onda: $|\Psi(x, t)|^2$
- ▶ Quando una sola fenditura è aperta, la funzione d'onda si propaga (con *diffrazione*) attraverso di essa, e il suo modulo quadro è massimo nella regione dietro la fenditura aperta
- ▶ Quando entrambe le fenditure sono aperte, la funzione d'onda si propaga attraverso entrambe, e le onde provenienti dalle due fenditure si sommano fra loro (con *diffrazione e interferenza*)
- ▶ Il modulo quadro della somma di due numeri complessi può anche essere *più piccolo* dei moduli quadri dei due numeri presi separatamente
- ▶ Di conseguenza, la probabilità di trovare la particella in un certo punto dello schermo quando entrambe le fenditure sono aperte può anche essere minore rispetto a quando solo una delle fenditure è aperta
- ▶ Non ha più senso parlare di "traiettoria" della particella, né chiedersi "da quale fenditura sia passata"

Esperimento della doppia fenditura: descrizione teorica

La fisica quantistica dà la corretta descrizione dell'esperimento della doppia fenditura compiuto con elettroni

- ▶ L'elettrone è ancora una particella (come nella fisica classica)
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è descritta da un'onda: la *funzione d'onda* $\Psi(x, t)$, che è un numero complesso
- ▶ La probabilità di trovare l'elettrone in un certo punto x all'istante t è proporzionale al *modulo quadro* della funzione d'onda: $|\Psi(x, t)|^2$
- ▶ Quando una sola fenditura è aperta, la funzione d'onda si propaga (con *diffrazione*) attraverso di essa, e il suo modulo quadro è massimo nella regione dietro la fenditura aperta
- ▶ Quando entrambe le fenditure sono aperte, la funzione d'onda si propaga attraverso entrambe, e le onde provenienti dalle due fenditure si sommano fra loro (con *diffrazione e interferenza*)
- ▶ Il modulo quadro della somma di due numeri complessi può anche essere *più piccolo* dei moduli quadri dei due numeri presi separatamente
- ▶ Di conseguenza, la probabilità di trovare la particella in un certo punto dello schermo quando entrambe le fenditure sono aperte può anche essere minore rispetto a quando solo una delle fenditure è aperta
- ▶ Non ha più senso parlare di "traiettoria" della particella, né chiedersi "da quale fenditura sia passata"

Esperimento della doppia fenditura: descrizione teorica

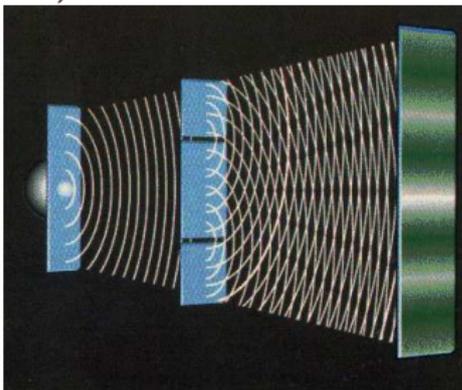
La fisica quantistica dà la corretta descrizione dell'esperimento della doppia fenditura compiuto con elettroni

- ▶ L'elettrone è ancora una particella (come nella fisica classica)
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è descritta da un'onda: la *funzione d'onda* $\Psi(x, t)$, che è un numero complesso
- ▶ La probabilità di trovare l'elettrone in un certo punto x all'istante t è proporzionale al *modulo quadro* della funzione d'onda: $|\Psi(x, t)|^2$
- ▶ Quando una sola fenditura è aperta, la funzione d'onda si propaga (con *diffrazione*) attraverso di essa, e il suo modulo quadro è massimo nella regione dietro la fenditura aperta
- ▶ Quando entrambe le fenditure sono aperte, la funzione d'onda si propaga attraverso entrambe, e le onde provenienti dalle due fenditure si sommano fra loro (con *diffrazione e interferenza*)
- ▶ Il modulo quadro della somma di due numeri complessi può anche essere *più piccolo* dei moduli quadri dei due numeri presi separatamente
- ▶ Di conseguenza, la probabilità di trovare la particella in un certo punto dello schermo quando entrambe le fenditure sono aperte può anche essere minore rispetto a quando solo una delle fenditure è aperta
- ▶ Non ha più senso parlare di "traiettoria" della particella, né chiedersi "da quale fenditura sia passata"

Esperimento della doppia fenditura: descrizione teorica

La fisica quantistica dà la corretta descrizione dell'esperimento della doppia fenditura compiuto con elettroni

- ▶ L'elettrone è ancora una particella (come nella fisica classica)
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è descritta da un'onda: la *funzione d'onda* $\Psi(x, t)$, che è un numero complesso
- ▶ La probabilità di trovare l'elettrone in un certo punto x all'istante t è proporzionale al *modulo quadro* della funzione d'onda: $|\Psi(x, t)|^2$
- ▶ Quando una sola fenditura è aperta, la funzione d'onda si propaga (con *diffrazione*) attraverso di essa, e il suo modulo quadro è massimo nella regione dietro la fenditura aperta
- ▶ Quando entrambe le fenditure sono aperte, la funzione d'onda si propaga attraverso entrambe, e le onde provenienti dalle due fenditure si sommano fra loro (con *diffrazione e interferenza*)



- ▶ Il modulo quadro della somma di due numeri complessi può anche essere *più piccolo* dei moduli quadri dei due numeri presi separatamente

Esperimento della doppia fenditura: descrizione teorica

La fisica quantistica dà la corretta descrizione dell'esperimento della doppia fenditura compiuto con elettroni

- ▶ L'elettrone è ancora una particella (come nella fisica classica)
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è descritta da un'onda: la *funzione d'onda* $\Psi(x, t)$, che è un numero complesso
- ▶ La probabilità di trovare l'elettrone in un certo punto x all'istante t è proporzionale al *modulo quadro* della funzione d'onda: $|\Psi(x, t)|^2$
- ▶ Quando una sola fenditura è aperta, la funzione d'onda si propaga (con *diffrazione*) attraverso di essa, e il suo modulo quadro è massimo nella regione dietro la fenditura aperta
- ▶ Quando entrambe le fenditure sono aperte, la funzione d'onda si propaga attraverso entrambe, e le onde provenienti dalle due fenditure si sommano fra loro (con *diffrazione e interferenza*)
- ▶ Il modulo quadro della somma di due numeri complessi può anche essere *più piccolo* dei moduli quadri dei due numeri presi separatamente

$$\begin{array}{l} \text{Esempio:} \quad |1 - 2i|^2 = 1^2 + (-2)^2 = 5, \quad |-2 + 2i|^2 = (-2)^2 + 2^2 = 8, \\ \text{ma} \quad |(1 - 2i) + (-2 + 2i)|^2 = |-1|^2 = (-1)^2 = 1 \end{array}$$

- ▶ Di conseguenza, la probabilità di trovare la particella in un certo punto dello schermo quando entrambe le fenditure sono aperte può anche essere minore rispetto a quando solo una delle fenditure è aperta
- ▶ Non ha più senso parlare di "traiettoria" della particella, né chiedersi "da quale fenditura sia passata"

Esperimento della doppia fenditura: descrizione teorica

La fisica quantistica dà la corretta descrizione dell'esperimento della doppia fenditura compiuto con elettroni

- ▶ L'elettrone è ancora una particella (come nella fisica classica)
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è descritta da un'onda: la *funzione d'onda* $\Psi(x, t)$, che è un numero complesso
- ▶ La probabilità di trovare l'elettrone in un certo punto x all'istante t è proporzionale al *modulo quadro* della funzione d'onda: $|\Psi(x, t)|^2$
- ▶ Quando una sola fenditura è aperta, la funzione d'onda si propaga (con *diffrazione*) attraverso di essa, e il suo modulo quadro è massimo nella regione dietro la fenditura aperta
- ▶ Quando entrambe le fenditure sono aperte, la funzione d'onda si propaga attraverso entrambe, e le onde provenienti dalle due fenditure si sommano fra loro (con *diffrazione e interferenza*)
- ▶ Il modulo quadro della somma di due numeri complessi può anche essere *più piccolo* dei moduli quadri dei due numeri presi separatamente
- ▶ Di conseguenza, la probabilità di trovare la particella in un certo punto dello schermo quando entrambe le fenditure sono aperte può anche essere minore rispetto a quando solo una delle fenditure è aperta
- ▶ Non ha più senso parlare di "traiettoria" della particella, né chiedersi "da quale fenditura sia passata"

Esperimento della doppia fenditura: descrizione teorica

La fisica quantistica dà la corretta descrizione dell'esperimento della doppia fenditura compiuto con elettroni

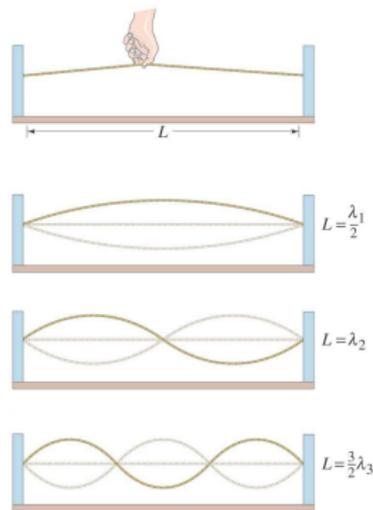
- ▶ L'elettrone è ancora una particella (come nella fisica classica)
- ▶ Tuttavia, la sua propagazione è descritta da un'onda: la *funzione d'onda* $\Psi(x, t)$, che è un numero complesso
- ▶ La probabilità di trovare l'elettrone in un certo punto x all'istante t è proporzionale al *modulo quadro* della funzione d'onda: $|\Psi(x, t)|^2$
- ▶ Quando una sola fenditura è aperta, la funzione d'onda si propaga (con *diffrazione*) attraverso di essa, e il suo modulo quadro è massimo nella regione dietro la fenditura aperta
- ▶ Quando entrambe le fenditure sono aperte, la funzione d'onda si propaga attraverso entrambe, e le onde provenienti dalle due fenditure si sommano fra loro (con *diffrazione e interferenza*)
- ▶ Il modulo quadro della somma di due numeri complessi può anche essere *più piccolo* dei moduli quadri dei due numeri presi separatamente
- ▶ Di conseguenza, la probabilità di trovare la particella in un certo punto dello schermo quando entrambe le fenditure sono aperte può anche essere minore rispetto a quando solo una delle fenditure è aperta
- ▶ Non ha più senso parlare di "traiettoria" della particella, né chiedersi "da quale fenditura sia passata"

Quantizzazione

- ▶ Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
- ▶ Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da onde implica che alcune grandezze fisiche siano quantizzate, vale a dire che possono assumere solo certi valori discreti (e fissati)
- ▶ Questo è il caso, per esempio, dell'energia di un elettrone in un atomo
- ▶ Questo è anche il caso dell'energia di un fotone in un campo elettromagnetico
- ▶ Questo è il caso dell'energia di un oscillatore armonico

Quantizzazione

- ▶ Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
 - ▶ Esempio: la corda di una chitarra di lunghezza fissata produce *solo* alcune note ben definite



• Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da onde implica che alcune grandezze fisiche siano quantizzate, vale a dire che possono assumere solo certi valori discreti (a fianco)

Quantizzazione

- ▶ Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
- ▶ Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da *onde* implica che alcune grandezze fisiche siano *quantizzate*, vale a dire che possano assumere solo certi valori *discreti* (e fissati)
- ▶ L'esistenza di grandezze fisiche discrete, cioè *quantizzate*, è il motivo per cui la fisica basata sul principio di indeterminazione è detta "quantistica"
- ▶ L'esistenza di grandezze fisiche quantizzate ha implicazioni molto importanti: per esempio, permette agli atomi di essere *stabili*

Quantizzazione

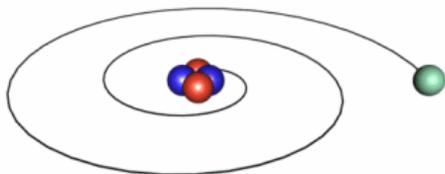
- ▶ Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
- ▶ Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da *onde* implica che alcune grandezze fisiche siano *quantizzate*, vale a dire che possano assumere solo certi valori *discreti* (e fissati)
- ▶ L'esistenza di grandezze fisiche discrete, cioè *quantizzate*, è il motivo per cui la fisica basata sul principio di indeterminazione è detta "quantistica"
- ▶ L'esistenza di grandezze fisiche quantizzate ha implicazioni molto importanti: per esempio, permette agli atomi di essere *stabili*
 - ▶ Se gli elettroni si muovessero su orbite continue intorno al nucleo degli atomi, perderebbero progressivamente energia, e finirebbero per cadere sul nucleo

Quantizzazione

- ▶ Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
- ▶ Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da *onde* implica che alcune grandezze fisiche siano *quantizzate*, vale a dire che possano assumere solo certi valori *discreti* (e fissati)
- ▶ L'esistenza di grandezze fisiche discrete, cioè *quantizzate*, è il motivo per cui la fisica basata sul principio di indeterminazione è detta "quantistica"
- ▶ L'esistenza di grandezze fisiche quantizzate ha implicazioni molto importanti: per esempio, permette agli atomi di essere *stabili*
 - ▶ Se gli elettroni si muovessero su traiettorie intorno al nucleo degli atomi, perderebbero progressivamente energia, e finirebbero per *cadere sul nucleo*
 - ▶ La fisica quantistica prevede invece che gli elettroni possano trovarsi solo a distanze fissate e ben definite dal nucleo

Quantizzazione

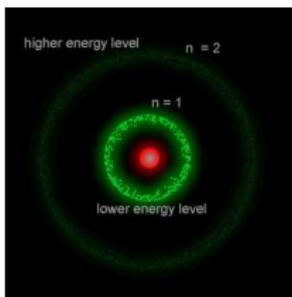
- ▶ Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
- ▶ Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da *onde* implica che alcune grandezze fisiche siano *quantizzate*, vale a dire che possano assumere solo certi valori *discreti* (e fissati)
- ▶ L'esistenza di grandezze fisiche discrete, cioè *quantizzate*, è il motivo per cui la fisica basata sul principio di indeterminazione è detta "quantistica"
- ▶ L'esistenza di grandezze fisiche quantizzate ha implicazioni molto importanti: per esempio, permette agli atomi di essere *stabili*
 - ▶ Se gli elettroni si muovessero su traiettorie intorno al nucleo degli atomi, perderebbero progressivamente energia, e finirebbero per *cadere sul nucleo*



- ▶ La fisica quantistica prevede invece che gli elettroni possano trovarsi solo a distanze fissate e ben definite dal nucleo

Quantizzazione

- ▶ Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
- ▶ Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da *onde* implica che alcune grandezze fisiche siano *quantizzate*, vale a dire che possano assumere solo certi valori *discreti* (e fissati)
- ▶ L'esistenza di grandezze fisiche discrete, cioè *quantizzate*, è il motivo per cui la fisica basata sul principio di indeterminazione è detta "quantistica"
- ▶ L'esistenza di grandezze fisiche quantizzate ha implicazioni molto importanti: per esempio, permette agli atomi di essere *stabili*
 - ▶ Se gli elettroni si muovessero su traiettorie intorno al nucleo degli atomi, perderebbero progressivamente energia, e finirebbero per *cadere sul nucleo*
 - ▶ La fisica quantistica prevede invece che gli elettroni possano trovarsi solo a distanze fissate e ben definite dal nucleo



Indice

Introduzione

Formulazione in termini di vettori e matrici

Formulazione in termini di funzioni e di derivate

La relazione tra fisica classica e fisica quantistica

Applicazioni della fisica quantistica

Entanglement quantistico e disuguaglianze di Bell

- ▶ Una vecchia (ed erronea) interpretazione dell'indeterminazione della fisica quantistica è che essa sia in realtà dovuta alla presenza di *variabili nascoste*, che sono inaccessibili, ma che seguono comunque le leggi della fisica classica
 - ▶ Molte previsioni della fisica quantistica possono essere interpretate in questo modo
 - ▶ L'*entanglement* (o *correlazione quantistica*) è invece una caratteristica della fisica quantistica che non ammette una descrizione di questo tipo
 - ▶ L'entanglement quantistico è definito come la presenza di correlazioni tra diverse componenti (A e B) di un sistema fisico
-
- ▶ Quando si ha entanglement, lo stato di ogni componente del sistema non può essere descritto indipendentemente da quello delle altre
 - ▶ Un teorema dovuto a John Stewart Bell dimostra che, se l'entanglement fosse spiegato in termini di variabili classiche, dovrebbero valere alcune disuguaglianze tra le correlazioni tra diversi risultati sperimentali possibili
 - ▶ La fisica quantistica prevede che queste disuguaglianze siano violate
 - ▶ I risultati sperimentali mostrano che queste disuguaglianze siano violate, e quindi confermano le previsioni della fisica quantistica

Entanglement quantistico e disuguaglianze di Bell

- ▶ Una vecchia (ed erronea) interpretazione dell'indeterminazione della fisica quantistica è che essa sia in realtà dovuta alla presenza di *variabili nascoste*, che sono inaccessibili, ma che seguono comunque le leggi della fisica classica
- ▶ Molte previsioni della fisica quantistica possono essere interpretate in questo modo
- ▶ L'*entanglement* (o *correlazione quantistica*) è invece una caratteristica della fisica quantistica che non ammette una descrizione di questo tipo
- ▶ L'entanglement quantistico è definito come la presenza di correlazioni tra diverse componenti (A e B) di un sistema fisico

Entanglement quantistico e disuguaglianze di Bell

- ▶ Quando si ha entanglement, lo stato di ogni componente del sistema non può essere descritto indipendentemente da quello delle altre
- ▶ Un teorema dovuto a John Stewart Bell dimostra che, se l'entanglement fosse spiegato in termini di variabili classiche, dovrebbero valere alcune disuguaglianze tra le correlazioni tra diversi risultati sperimentali possibili
- ▶ La fisica quantistica prevede che queste disuguaglianze siano violate
- ▶ I risultati sperimentali mostrano che queste disuguaglianze sono violate, e quindi confermano le previsioni della fisica quantistica

Entanglement quantistico e disuguaglianze di Bell

- ▶ Una vecchia (ed erronea) interpretazione dell'indeterminazione della fisica quantistica è che essa sia in realtà dovuta alla presenza di *variabili nascoste*, che sono inaccessibili, ma che seguono comunque le leggi della fisica classica
- ▶ Molte previsioni della fisica quantistica possono essere interpretate in questo modo
- ▶ L'*entanglement* (o *correlazione quantistica*) è invece una caratteristica della fisica quantistica che non ammette una descrizione di questo tipo
- ▶ L'entanglement quantistico è definito come la presenza di correlazioni tra diverse componenti (A e B) di un sistema fisico

★ Esempio di stato in cui non c'è entanglement:

A nello stato α E B nello stato β

→ α e β sono stati di un sistema a due componenti

→ α e β sono stati di un sistema a due componenti, α e β sono stati di un sistema a due componenti

- ▶ Quando si ha entanglement, lo stato di ogni componente del sistema non può essere descritto indipendentemente da quello delle altre
- ▶ Un teorema dovuto a John Stewart Bell dimostra che, se l'entanglement fosse spiegato in termini di variabili classiche, dovrebbero valere alcune disuguaglianze tra le correlazioni tra diversi risultati sperimentali possibili
- ▶ La fisica quantistica prevede che queste disuguaglianze siano violate
- ▶ I risultati sperimentali mostrano che queste disuguaglianze siano violate, e quindi confermano le previsioni della fisica quantistica

Entanglement quantistico e disuguaglianze di Bell

- ▶ Una vecchia (ed erronea) interpretazione dell'indeterminazione della fisica quantistica è che essa sia in realtà dovuta alla presenza di *variabili nascoste*, che sono inaccessibili, ma che seguono comunque le leggi della fisica classica
- ▶ Molte previsioni della fisica quantistica possono essere interpretate in questo modo
- ▶ L'*entanglement* (o *correlazione quantistica*) è invece una caratteristica della fisica quantistica che non ammette una descrizione di questo tipo
- ▶ L'entanglement quantistico è definito come la presenza di correlazioni tra diverse componenti (A e B) di un sistema fisico

★ Esempio di stato in cui *non* c'è entanglement:

A nello stato α E B nello stato β

★ Esempio di stato in cui *c'è* entanglement:

$(A$ nello stato α E B nello stato $\beta)$ OPPURE $(A$ nello stato β E B nello stato $\alpha)$

- ▶ Quando si ha entanglement, lo stato di ogni componente del sistema non può essere descritto indipendentemente da quello delle altre
- ▶ Un teorema dovuto a John Stewart Bell dimostra che, se l'entanglement fosse spiegato in termini di variabili classiche, dovrebbero valere alcune disuguaglianze tra le correlazioni tra diversi risultati sperimentali possibili
- ▶ La fisica quantistica prevede che queste disuguaglianze siano violate
- ▶ I risultati sperimentali mostrano che queste disuguaglianze siano violate, e quindi confermano le previsioni della fisica quantistica

Entanglement quantistico e disuguaglianze di Bell

- ▶ Una vecchia (ed erronea) interpretazione dell'indeterminazione della fisica quantistica è che essa sia in realtà dovuta alla presenza di *variabili nascoste*, che sono inaccessibili, ma che seguono comunque le leggi della fisica classica
- ▶ Molte previsioni della fisica quantistica possono essere interpretate in questo modo
- ▶ L'*entanglement* (o *correlazione quantistica*) è invece una caratteristica della fisica quantistica che non ammette una descrizione di questo tipo
- ▶ L'entanglement quantistico è definito come la presenza di correlazioni tra diverse componenti (A e B) di un sistema fisico
 - ★ Esempio di stato in cui *non* c'è entanglement:

A nello stato α E B nello stato β

- ★ Esempio di stato in cui *c'è* entanglement:

$(A$ nello stato α E B nello stato $\beta)$ OPPURE $(A$ nello stato β E B nello stato $\alpha)$

- ▶ Quando si ha entanglement, lo stato di ogni componente del sistema non può essere descritto indipendentemente da quello delle altre
- ▶ Un teorema dovuto a John Stewart Bell dimostra che, se l'entanglement fosse spiegato in termini di variabili classiche, dovrebbero valere alcune disuguaglianze tra le correlazioni tra diversi risultati sperimentali possibili
- ▶ La fisica quantistica prevede che queste disuguaglianze siano violate
- ▶ I risultati sperimentali mostrano che queste disuguaglianze siano violate, e quindi confermano le previsioni della fisica quantistica

Entanglement quantistico e disuguaglianze di Bell

- ▶ Una vecchia (ed erronea) interpretazione dell'indeterminazione della fisica quantistica è che essa sia in realtà dovuta alla presenza di *variabili nascoste*, che sono inaccessibili, ma che seguono comunque le leggi della fisica classica
- ▶ Molte previsioni della fisica quantistica possono essere interpretate in questo modo
- ▶ L'*entanglement* (o *correlazione quantistica*) è invece una caratteristica della fisica quantistica che non ammette una descrizione di questo tipo
- ▶ L'entanglement quantistico è definito come la presenza di correlazioni tra diverse componenti (A e B) di un sistema fisico
 - ★ Esempio di stato in cui *non* c'è entanglement:

A nello stato α E B nello stato β

- ★ Esempio di stato in cui *c'è* entanglement:

$(A$ nello stato α E B nello stato $\beta)$ OPPURE $(A$ nello stato β E B nello stato $\alpha)$

- ▶ Quando si ha entanglement, lo stato di ogni componente del sistema non può essere descritto indipendentemente da quello delle altre
- ▶ Un teorema dovuto a John Stewart Bell dimostra che, se l'entanglement fosse spiegato in termini di variabili classiche, dovrebbero valere alcune disuguaglianze tra le correlazioni tra diversi risultati sperimentali possibili
- ▶ La fisica quantistica prevede che queste disuguaglianze siano violate
- ▶ I risultati sperimentali mostrano che queste disuguaglianze siano violate, e quindi confermano le previsioni della fisica quantistica

Entanglement quantistico e disuguaglianze di Bell

- ▶ Una vecchia (ed erronea) interpretazione dell'indeterminazione della fisica quantistica è che essa sia in realtà dovuta alla presenza di *variabili nascoste*, che sono inaccessibili, ma che seguono comunque le leggi della fisica classica
- ▶ Molte previsioni della fisica quantistica possono essere interpretate in questo modo
- ▶ L'*entanglement* (o *correlazione quantistica*) è invece una caratteristica della fisica quantistica che non ammette una descrizione di questo tipo
- ▶ L'entanglement quantistico è definito come la presenza di correlazioni tra diverse componenti (A e B) di un sistema fisico
 - ★ Esempio di stato in cui *non* c'è entanglement:

A nello stato α E B nello stato β

- ★ Esempio di stato in cui *c'è* entanglement:

$(A$ nello stato α E B nello stato β) OPPURE $(A$ nello stato β E B nello stato α)

- ▶ Quando si ha entanglement, lo stato di ogni componente del sistema non può essere descritto indipendentemente da quello delle altre
- ▶ Un teorema dovuto a John Stewart Bell dimostra che, se l'entanglement fosse spiegato in termini di variabili classiche, dovrebbero valere alcune disuguaglianze tra le correlazioni tra diversi risultati sperimentali possibili
- ▶ La fisica quantistica prevede che queste disuguaglianze siano violate
- ▶ I risultati sperimentali mostrano che queste disuguaglianze siano violate, e quindi confermano le previsioni della fisica quantistica

Entanglement quantistico e disuguaglianze di Bell

- ▶ Una vecchia (ed erronea) interpretazione dell'indeterminazione della fisica quantistica è che essa sia in realtà dovuta alla presenza di *variabili nascoste*, che sono inaccessibili, ma che seguono comunque le leggi della fisica classica
- ▶ Molte previsioni della fisica quantistica possono essere interpretate in questo modo
- ▶ L'*entanglement* (o *correlazione quantistica*) è invece una caratteristica della fisica quantistica che non ammette una descrizione di questo tipo
- ▶ L'entanglement quantistico è definito come la presenza di correlazioni tra diverse componenti (A e B) di un sistema fisico
 - ★ Esempio di stato in cui *non* c'è entanglement:

A nello stato α E B nello stato β

- ★ Esempio di stato in cui *c'è* entanglement:

$(A$ nello stato α E B nello stato β) OPPURE $(A$ nello stato β E B nello stato α)

- ▶ Quando si ha entanglement, lo stato di ogni componente del sistema non può essere descritto indipendentemente da quello delle altre
- ▶ Un teorema dovuto a John Stewart Bell dimostra che, se l'entanglement fosse spiegato in termini di variabili classiche, dovrebbero valere alcune disuguaglianze tra le correlazioni tra diversi risultati sperimentali possibili
- ▶ La fisica quantistica prevede che queste disuguaglianze siano violate
- ▶ I risultati sperimentali mostrano che queste disuguaglianze siano violate, e quindi confermano le previsioni della fisica quantistica

Entanglement quantistico e disuguaglianze di Bell

- ▶ Una vecchia (ed erronea) interpretazione dell'indeterminazione della fisica quantistica è che essa sia in realtà dovuta alla presenza di *variabili nascoste*, che sono inaccessibili, ma che seguono comunque le leggi della fisica classica
- ▶ Molte previsioni della fisica quantistica possono essere interpretate in questo modo
- ▶ L'*entanglement* (o *correlazione quantistica*) è invece una caratteristica della fisica quantistica che non ammette una descrizione di questo tipo
- ▶ L'entanglement quantistico è definito come la presenza di correlazioni tra diverse componenti (A e B) di un sistema fisico
 - ★ Esempio di stato in cui *non* c'è entanglement:

A nello stato α E B nello stato β

- ★ Esempio di stato in cui *c'è* entanglement:

$(A$ nello stato α E B nello stato $\beta)$ OPPURE $(A$ nello stato β E B nello stato $\alpha)$

- ▶ Quando si ha entanglement, lo stato di ogni componente del sistema non può essere descritto indipendentemente da quello delle altre
- ▶ Un teorema dovuto a John Stewart Bell dimostra che, se l'entanglement fosse spiegato in termini di variabili classiche, dovrebbero valere alcune disuguaglianze tra le correlazioni tra diversi risultati sperimentali possibili
- ▶ La fisica quantistica prevede che queste disuguaglianze siano violate
- ▶ I risultati sperimentali mostrano che queste disuguaglianze siano violate, e quindi confermano le previsioni della fisica quantistica

Entanglement quantistico e disuguaglianze di Bell

- ▶ Una vecchia (ed erronea) interpretazione dell'indeterminazione della fisica quantistica è che essa sia in realtà dovuta alla presenza di *variabili nascoste*, che sono inaccessibili, ma che seguono comunque le leggi della fisica classica
- ▶ Molte previsioni della fisica quantistica possono essere interpretate in questo modo
- ▶ L'*entanglement* (o *correlazione quantistica*) è invece una caratteristica della fisica quantistica che non ammette una descrizione di questo tipo
- ▶ L'entanglement quantistico è definito come la presenza di correlazioni tra diverse componenti (A e B) di un sistema fisico
 - ★ Esempio di stato in cui *non* c'è entanglement:

A nello stato α E B nello stato β

- ★ Esempio di stato in cui *c'è* entanglement:

$(A$ nello stato α E B nello stato $\beta)$ OPPURE $(A$ nello stato β E B nello stato $\alpha)$

- ▶ Quando si ha entanglement, lo stato di ogni componente del sistema non può essere descritto indipendentemente da quello delle altre
- ▶ Un teorema dovuto a John Stewart Bell dimostra che, se l'entanglement fosse spiegato in termini di variabili classiche, dovrebbero valere alcune disuguaglianze tra le correlazioni tra diversi risultati sperimentali possibili
- ▶ La fisica quantistica prevede che queste disuguaglianze siano violate
- ▶ I risultati sperimentali mostrano che queste disuguaglianze siano violate, e quindi confermano le previsioni della fisica quantistica

Perché il mondo macroscopico appare “classico”

- ▶ La conferma sperimentale della violazione delle disuguaglianze di Bell dimostra che la corretta descrizione dei fenomeni naturali è *quantistica*, non *classica*
- ▶ Tuttavia, nella vita quotidiana non ci accorgiamo mai dell'indeterminazione quantistica, né vediamo oggetti esistere in una sovrapposizione di due stati fisici diversi, ecc. (“paradosso” del *gatto di Schrödinger*)
- ▶ Per quale motivo il mondo macroscopico appare “classico”?
- ▶ Tutti gli oggetti macroscopici sono costituiti da un numero enorme di particelle, che interagiscono continuamente con l'ambiente circostante (e con gli eventuali osservatori)
- ▶ Gli effetti quantistici (es. interferenza nell'esperimento della doppia fenditura) sono visibili quando varie componenti della funzione d'onda sono fra loro *coerenti*
- ▶ Questi effetti tendono a cancellarsi fra loro, e quindi a “scompare”, in un sistema macroscopico, con molte componenti (che interagiscono in maniera complicata fra loro e con l'ambiente circostante), che generalmente non sono tutte coerenti fra loro
- ▶ I valori delle grandezze fisiche macroscopiche “ben definite” che vediamo nel mondo intorno a noi sono quelli corrispondenti a stati quantistici che *sopravvivono più facilmente* all'effetto delle interazioni con l'ambiente circostante
- ▶ Per questo motivo, la fisica “classica” è generalmente un'ottima approssimazione per la maggior parte dei fenomeni fisici macroscopici

Perché il mondo macroscopico appare “classico”

- ▶ La conferma sperimentale della violazione delle disuguaglianze di Bell dimostra che la corretta descrizione dei fenomeni naturali è *quantistica*, non *classica*
- ▶ Tuttavia, nella vita quotidiana non ci accorgiamo mai dell'indeterminazione quantistica, né vediamo oggetti esistere in una sovrapposizione di due stati fisici diversi, ecc. (“paradosso” del *gatto di Schrödinger*)
- ▶ Per quale motivo il mondo macroscopico appare “classico”?
- ▶ Tutti gli oggetti macroscopici sono costituiti da un numero enorme di particelle, che interagiscono continuamente con l'ambiente circostante (e con gli eventuali osservatori)
- ▶ Gli effetti quantistici (es. interferenza nell'esperimento della doppia fenditura) sono visibili quando varie componenti della funzione d'onda sono fra loro *coerenti*
- ▶ Questi effetti tendono a cancellarsi fra loro, e quindi a “scompare”, in un sistema macroscopico, con molte componenti (che interagiscono in maniera complicata fra loro e con l'ambiente circostante), che generalmente non sono tutte coerenti fra loro
- ▶ I valori delle grandezze fisiche macroscopiche “ben definite” che vediamo nel mondo intorno a noi sono quelli corrispondenti a stati quantistici che *sopravvivono più facilmente* all'effetto delle interazioni con l'ambiente circostante
- ▶ Per questo motivo, la fisica “classica” è generalmente un'ottima approssimazione per la maggior parte dei fenomeni fisici macroscopici

Perché il mondo macroscopico appare “classico”

- ▶ La conferma sperimentale della violazione delle disuguaglianze di Bell dimostra che la corretta descrizione dei fenomeni naturali è *quantistica*, non *classica*
- ▶ Tuttavia, nella vita quotidiana non ci accorgiamo mai dell'indeterminazione quantistica, né vediamo oggetti esistere in una sovrapposizione di due stati fisici diversi, ecc. (“paradosso” del *gatto di Schrödinger*)
- ▶ Per quale motivo il mondo macroscopico appare “classico”?
- ▶ Tutti gli oggetti macroscopici sono costituiti da un numero enorme di particelle, che interagiscono continuamente con l'ambiente circostante (e con gli eventuali osservatori)
- ▶ Gli effetti quantistici (es. interferenza nell'esperimento della doppia fenditura) sono visibili quando varie componenti della funzione d'onda sono fra loro *coerenti*
- ▶ Questi effetti tendono a cancellarsi fra loro, e quindi a “scompare”, in un sistema macroscopico, con molte componenti (che interagiscono in maniera complicata fra loro e con l'ambiente circostante), che generalmente non sono tutte coerenti fra loro
- ▶ I valori delle grandezze fisiche macroscopiche “ben definite” che vediamo nel mondo intorno a noi sono quelli corrispondenti a stati quantistici che *sopravvivono più facilmente* all'effetto delle interazioni con l'ambiente circostante
- ▶ Per questo motivo, la fisica “classica” è generalmente un'ottima approssimazione per la maggior parte dei fenomeni fisici macroscopici

Perché il mondo macroscopico appare “classico”

- ▶ La conferma sperimentale della violazione delle disuguaglianze di Bell dimostra che la corretta descrizione dei fenomeni naturali è *quantistica*, non *classica*
- ▶ Tuttavia, nella vita quotidiana non ci accorgiamo mai dell'indeterminazione quantistica, né vediamo oggetti esistere in una sovrapposizione di due stati fisici diversi, ecc. (“paradosso” del *gatto di Schrödinger*)
- ▶ Per quale motivo il mondo macroscopico appare “classico”?
- ▶ Tutti gli oggetti macroscopici sono costituiti da un numero enorme di particelle, che interagiscono continuamente con l'ambiente circostante (e con gli eventuali osservatori)
- ▶ Gli effetti quantistici (es. interferenza nell'esperimento della doppia fenditura) sono visibili quando varie componenti della funzione d'onda sono fra loro *coerenti*
- ▶ Questi effetti tendono a cancellarsi fra loro, e quindi a “scompare”, in un sistema macroscopico, con molte componenti (che interagiscono in maniera complicata fra loro e con l'ambiente circostante), che generalmente non sono tutte coerenti fra loro
- ▶ I valori delle grandezze fisiche macroscopiche “ben definite” che vediamo nel mondo intorno a noi sono quelli corrispondenti a stati quantistici che *sopravvivono più facilmente* all'effetto delle interazioni con l'ambiente circostante
- ▶ Per questo motivo, la fisica “classica” è generalmente un'ottima approssimazione per la maggior parte dei fenomeni fisici macroscopici

Perché il mondo macroscopico appare “classico”

- ▶ La conferma sperimentale della violazione delle disuguaglianze di Bell dimostra che la corretta descrizione dei fenomeni naturali è *quantistica*, non *classica*
- ▶ Tuttavia, nella vita quotidiana non ci accorgiamo mai dell'indeterminazione quantistica, né vediamo oggetti esistere in una sovrapposizione di due stati fisici diversi, ecc. (“paradosso” del *gatto di Schrödinger*)
- ▶ Per quale motivo il mondo macroscopico appare “classico”?
- ▶ Tutti gli oggetti macroscopici sono costituiti da un numero enorme di particelle, che interagiscono continuamente con l'ambiente circostante (e con gli eventuali osservatori)
- ▶ Gli effetti quantistici (es. interferenza nell'esperimento della doppia fenditura) sono visibili quando varie componenti della funzione d'onda sono fra loro *coerenti*
- ▶ Questi effetti tendono a cancellarsi fra loro, e quindi a “scompare”, in un sistema macroscopico, con molte componenti (che interagiscono in maniera complicata fra loro e con l'ambiente circostante), che generalmente non sono tutte coerenti fra loro
- ▶ I valori delle grandezze fisiche macroscopiche “ben definite” che vediamo nel mondo intorno a noi sono quelli corrispondenti a stati quantistici che *sopravvivono più facilmente* all'effetto delle interazioni con l'ambiente circostante
- ▶ Per questo motivo, la fisica “classica” è generalmente un'ottima approssimazione per la maggior parte dei fenomeni fisici macroscopici

Perché il mondo macroscopico appare “classico”

- ▶ La conferma sperimentale della violazione delle disuguaglianze di Bell dimostra che la corretta descrizione dei fenomeni naturali è *quantistica*, non *classica*
- ▶ Tuttavia, nella vita quotidiana non ci accorgiamo mai dell'indeterminazione quantistica, né vediamo oggetti esistere in una sovrapposizione di due stati fisici diversi, ecc. (“paradosso” del *gatto di Schrödinger*)
- ▶ Per quale motivo il mondo macroscopico appare “classico”?
- ▶ Tutti gli oggetti macroscopici sono costituiti da un numero enorme di particelle, che interagiscono continuamente con l'ambiente circostante (e con gli eventuali osservatori)
- ▶ Gli effetti quantistici (es. interferenza nell'esperimento della doppia fenditura) sono visibili quando varie componenti della funzione d'onda sono fra loro *coerenti*
- ▶ Questi effetti tendono a cancellarsi fra loro, e quindi a “scompare”, in un sistema macroscopico, con molte componenti (che interagiscono in maniera complicata fra loro e con l'ambiente circostante), che generalmente non sono tutte coerenti fra loro
- ▶ I valori delle grandezze fisiche macroscopiche “ben definite” che vediamo nel mondo intorno a noi sono quelli corrispondenti a stati quantistici che *sopravvivono più facilmente* all'effetto delle interazioni con l'ambiente circostante
- ▶ Per questo motivo, la fisica “classica” è generalmente un'ottima approssimazione per la maggior parte dei fenomeni fisici macroscopici

Perché il mondo macroscopico appare “classico”

- ▶ La conferma sperimentale della violazione delle disuguaglianze di Bell dimostra che la corretta descrizione dei fenomeni naturali è *quantistica*, non *classica*
- ▶ Tuttavia, nella vita quotidiana non ci accorgiamo mai dell'indeterminazione quantistica, né vediamo oggetti esistere in una sovrapposizione di due stati fisici diversi, ecc. (“paradosso” del *gatto di Schrödinger*)
- ▶ Per quale motivo il mondo macroscopico appare “classico”?
- ▶ Tutti gli oggetti macroscopici sono costituiti da un numero enorme di particelle, che interagiscono continuamente con l'ambiente circostante (e con gli eventuali osservatori)
- ▶ Gli effetti quantistici (es. interferenza nell'esperimento della doppia fenditura) sono visibili quando varie componenti della funzione d'onda sono fra loro *coerenti*
- ▶ Questi effetti tendono a cancellarsi fra loro, e quindi a “scompare”, in un sistema macroscopico, con molte componenti (che interagiscono in maniera complicata fra loro e con l'ambiente circostante), che generalmente non sono tutte coerenti fra loro
- ▶ I valori delle grandezze fisiche macroscopiche “ben definite” che vediamo nel mondo intorno a noi sono quelli corrispondenti a stati quantistici che *sopravvivono più facilmente* all'effetto delle interazioni con l'ambiente circostante
- ▶ Per questo motivo, la fisica “classica” è generalmente un'ottima approssimazione per la maggior parte dei fenomeni fisici macroscopici

Perché il mondo macroscopico appare “classico”

- ▶ La conferma sperimentale della violazione delle disuguaglianze di Bell dimostra che la corretta descrizione dei fenomeni naturali è *quantistica*, non *classica*
- ▶ Tuttavia, nella vita quotidiana non ci accorgiamo mai dell'indeterminazione quantistica, né vediamo oggetti esistere in una sovrapposizione di due stati fisici diversi, ecc. (“paradosso” del *gatto di Schrödinger*)
- ▶ Per quale motivo il mondo macroscopico appare “classico”?
- ▶ Tutti gli oggetti macroscopici sono costituiti da un numero enorme di particelle, che interagiscono continuamente con l'ambiente circostante (e con gli eventuali osservatori)
- ▶ Gli effetti quantistici (es. interferenza nell'esperimento della doppia fenditura) sono visibili quando varie componenti della funzione d'onda sono fra loro *coerenti*
- ▶ Questi effetti tendono a cancellarsi fra loro, e quindi a “scompare”, in un sistema macroscopico, con molte componenti (che interagiscono in maniera complicata fra loro e con l'ambiente circostante), che generalmente non sono tutte coerenti fra loro
- ▶ I valori delle grandezze fisiche macroscopiche “ben definite” che vediamo nel mondo intorno a noi sono quelli corrispondenti a stati quantistici che *sopravvivono più facilmente* all'effetto delle interazioni con l'ambiente circostante
- ▶ Per questo motivo, la fisica “classica” è generalmente un'ottima approssimazione per la maggior parte dei fenomeni fisici macroscopici

Indice

Introduzione

Formulazione in termini di vettori e matrici

Formulazione in termini di funzioni e di derivate

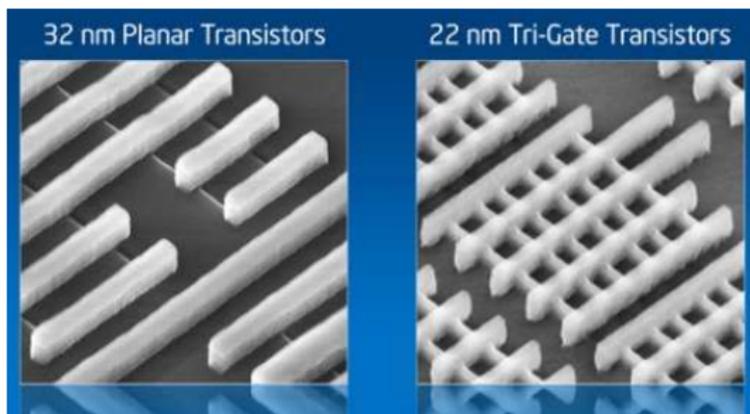
La relazione tra fisica classica e fisica quantistica

Applicazioni della fisica quantistica

Applicazioni

La fisica quantistica ha un grande numero di applicazioni tecnologiche

- ▶ L'intera industria informatica moderna è basata sull'esistenza dei transistor a semiconduttore, il cui funzionamento è fondato sulla fisica quantistica



- ▶ Telecomunicazioni e fibre ottiche: i cavi a fibre ottiche usati nelle telecomunicazioni trasmettono informazione mediante luce laser, il cui funzionamento si basa sulla fisica quantistica
- ▶ Il sistema di posizionamento globale (GPS), con cui un utente può conoscere la propria posizione sulla terra, in base al ritardo con cui riceve un segnale orario ad alta precisione (determinato con orologi atomici, basati sulla fisica quantistica) inviato da una rete di satelliti
- ▶ La risonanza magnetica nucleare usata in diagnostica medica è basata sull'esistenza di valori discreti del momento angolare intrinseco dei nuclei atomici, che è una conseguenza della fisica quantistica
- ▶ In crittografia, la distribuzione a chiave quantistica (QKD) è un metodo per

Applicazioni

La fisica quantistica ha un grande numero di applicazioni tecnologiche

- ▶ L'intera industria informatica moderna è basata sull'esistenza dei transistor a semiconduttore, il cui funzionamento è fondato sulla fisica quantistica
- ▶ Telecomunicazioni e fibre ottiche: i cavi a fibre ottiche usati nelle telecomunicazioni trasmettono informazione mediante luce laser, il cui funzionamento si basa sulla fisica quantistica

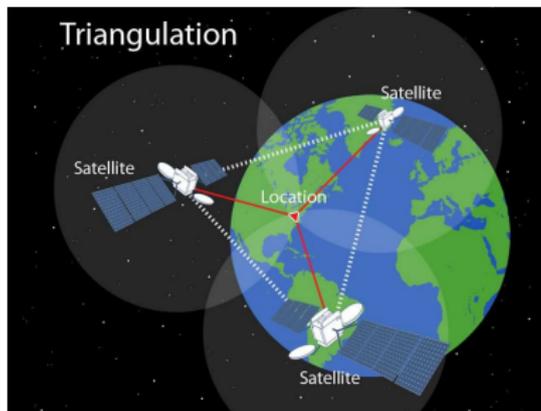


- ▶ Il sistema di posizionamento globale (GPS), con cui un utente può conoscere la propria posizione sulla terra, in base al ritardo con cui riceve un segnale orario ad alta precisione (determinato con orologi atomici, basati sulla fisica quantistica) inviato da una rete di satelliti
- ▶ La risonanza magnetica nucleare usata in diagnostica medica è basata sull'esistenza di valori discreti del momento angolare intrinseco dei nuclei atomici, che è una conseguenza della fisica quantistica
- ▶ In crittografia, la distribuzione a chiave quantistica (QKD) è un metodo per

Applicazioni

La fisica quantistica ha un grande numero di applicazioni tecnologiche

- ▶ L'intera industria informatica moderna è basata sull'esistenza dei transistor a semiconduttore, il cui funzionamento è fondato sulla fisica quantistica
- ▶ Telecomunicazioni e fibre ottiche: i cavi a fibre ottiche usati nelle telecomunicazioni trasmettono informazione mediante luce laser, il cui funzionamento si basa sulla fisica quantistica
- ▶ Il sistema di posizionamento globale (GPS), con cui un utente può conoscere la propria posizione sulla terra, in base al ritardo con cui riceve un segnale orario ad alta precisione (determinato con orologi atomici, basati sulla fisica quantistica) inviato da una rete di satelliti



- ▶ La risonanza magnetica nucleare usata in diagnostica medica è basata sull'esistenza di valori discreti del momento angolare intrinseco dei nuclei atomici, che è una conseguenza della fisica quantistica
- ▶ In crittografia, la distribuzione a chiave quantistica (QKD) è un metodo per permettere a un trasmettitore e a un ricevente di produrre e condividere una chiave

Applicazioni

La fisica quantistica ha un grande numero di applicazioni tecnologiche

- ▶ L'intera industria informatica moderna è basata sull'esistenza dei transistor a semiconduttore, il cui funzionamento è fondato sulla fisica quantistica
- ▶ Telecomunicazioni e fibre ottiche: i cavi a fibre ottiche usati nelle telecomunicazioni trasmettono informazione mediante luce laser, il cui funzionamento si basa sulla fisica quantistica
- ▶ Il sistema di posizionamento globale (GPS), con cui un utente può conoscere la propria posizione sulla terra, in base al ritardo con cui riceve un segnale orario ad alta precisione (determinato con orologi atomici, basati sulla fisica quantistica) inviato da una rete di satelliti
- ▶ La risonanza magnetica nucleare usata in diagnostica medica è basata sull'esistenza di valori discreti del momento angolare intrinseco dei nuclei atomici, che è una conseguenza della fisica quantistica



- ▶ In crittografia, la distribuzione a chiave quantistica (QKD) è un metodo per permettere a un trasmettitore e a un ricevente di produrre e condividere una chiave segreta sfruttando il fatto che un tentativo di misurare i fotoni quantistici

La fisica quantistica ha un grande numero di applicazioni tecnologiche

- ▶ L'intera industria informatica moderna è basata sull'esistenza dei transistor a semiconduttore, il cui funzionamento è fondato sulla fisica quantistica
- ▶ Telecomunicazioni e fibre ottiche: i cavi a fibre ottiche usati nelle telecomunicazioni trasmettono informazione mediante luce laser, il cui funzionamento si basa sulla fisica quantistica
- ▶ Il sistema di posizionamento globale (GPS), con cui un utente può conoscere la propria posizione sulla terra, in base al ritardo con cui riceve un segnale orario ad alta precisione (determinato con orologi atomici, basati sulla fisica quantistica) inviato da una rete di satelliti
- ▶ La risonanza magnetica nucleare usata in diagnostica medica è basata sull'esistenza di valori discreti del momento angolare intrinseco dei nuclei atomici, che è una conseguenza della fisica quantistica
- ▶ In crittografia, la distribuzione a chiave quantistica (QKD) è un metodo per permette a un trasmettitore e a un ricevente di produrre e condividere una chiave segreta; sfruttando il fatto che un processo di misura in un sistema quantistico disturba il sistema, essa permette una elevata sicurezza
- ▶ I computer quantistici sono dispositivi di calcolo che, sfruttando i fenomeni tipici della fisica quantistica, possono (almeno potenzialmente) eseguire operazioni che sarebbero praticamente impossibili per i computer basati sull'elettronica

La fisica quantistica ha un grande numero di applicazioni tecnologiche

- ▶ L'intera industria informatica moderna è basata sull'esistenza dei transistor a semiconduttore, il cui funzionamento è fondato sulla fisica quantistica
- ▶ Telecomunicazioni e fibre ottiche: i cavi a fibre ottiche usati nelle telecomunicazioni trasmettono informazione mediante luce laser, il cui funzionamento si basa sulla fisica quantistica
- ▶ Il sistema di posizionamento globale (GPS), con cui un utente può conoscere la propria posizione sulla terra, in base al ritardo con cui riceve un segnale orario ad alta precisione (determinato con orologi atomici, basati sulla fisica quantistica) inviato da una rete di satelliti
- ▶ La risonanza magnetica nucleare usata in diagnostica medica è basata sull'esistenza di valori discreti del momento angolare intrinseco dei nuclei atomici, che è una conseguenza della fisica quantistica
- ▶ In crittografia, la distribuzione a chiave quantistica (QKD) è un metodo per permette a un trasmettitore e a un ricevente di produrre e condividere una chiave segreta; sfruttando il fatto che un processo di misura in un sistema quantistico disturba il sistema, essa permette una elevata sicurezza
- ▶ I computer quantistici sono dispositivi di calcolo che, sfruttando i fenomeni tipici della fisica quantistica, possono (almeno potenzialmente) eseguire operazioni che sarebbero praticamente impossibili per i computer basati sull'elettronica

Grazie per la vostra attenzione

HACKMEETING 0X14

15-16-17-18 GIUGNO @ VENAUS, VAL SUSÀ

PER INFO E PROGRAMMA HACKMEETING.ORG