L'interpretazione probabilistica della funzione d'onda [Tema con variazioni]

Fisica e probabilità - Una lunga storia, AIF - Messina

Giuseppe Giuliani

Dipartimento di Fisica dell'Università di Pavia

23–27 febbraio 2015

La MQ è un algoritmo

La meccanica quantistica non descrive la realtà fisica. Quello che fa è fornire un algoritmo per calcolare le probabilità di eventi macroscopici ("clicks di rivelatori") che sono le conseguenze dei nostri interventi sperimentali. Questa stringente definizione dello scopo della teoria quantistica è la sola interpretazione di cui abbiano bisogno sperimentatori o teorici.

C.A. Fuchs, A. Peres, *Quantum Theory Needs No 'Interpretation'*, Physics Today **53**, (2000) 70.

.....

Questioni di metodo [1]

Heinrich Hertz

- Il semplice fatto che diverse descrizioni contengano quello che sostanzialmente è la stessa cosa, rende particolarmente difficile una corretta comprensione di ciascuna di esse. . . Pertanto, per una corretta comprensione di ciascuna di esse, la prima cosa da fare è di comprendere ciascuna descrizione per sé stessa, senza introdurre in essa idee che appartengono ad un'altra.

[1] Heinrich Hertz, *Electric Waves*, (1892).

Questioni di metodo [1]

Heinrich Hertz

- Il semplice fatto che diverse descrizioni contengano quello che sostanzialmente è la stessa cosa, rende particolarmente difficile una corretta comprensione di ciascuna di esse. . . Pertanto, per una corretta comprensione di ciascuna di esse, la prima cosa da fare è di comprendere ciascuna descrizione per sé stessa, senza introdurre in essa idee che appartengono ad un'altra.
- Nell'esposizione, mi sono inoltre sforzato di limitare, per quanto possibile, il numero di quelle concezioni che sono arbitrariamente introdotte da noi, e ammettere solo quegli elementi che non possono essere rimossi o modificati senza alterare nel contempo possibili risultati sperimentali.

[1] Heinrich Hertz, *Electric Waves*, (1892).

Fondamenti, filosofia

- Le riflessioni sui fondamenti della fisica debbono essere distinte dalla filosofia (della fisica).

Fondamenti, filosofia

- Le riflessioni sui fondamenti della fisica debbono essere distinte dalla filosofia (della fisica).
- Einstein, 1905. "Asimmetrie nell'elettrodinamica che non sembrano conformi ai fenomeni"; "...i tentativi falliti di individuare un qualche movimento della Terra relativamente al 'mezzo luminifero' ".

Fondamenti, filosofia

- Le riflessioni sui fondamenti della fisica debbono essere distinte dalla filosofia (della fisica).
- Einstein, 1905. "Asimmetrie nell'elettrodinamica che non sembrano conformi ai fenomeni"; "...i tentativi falliti di individuare un qualche movimento della Terra relativamente al 'mezzo luminifero' ".
- $\Rightarrow$ Relatività speciale $\Rightarrow$ nuove predizioni empiricamente verificabili

Fondamenti, filosofia

- Le riflessioni sui fondamenti della fisica debbono essere distinte dalla filosofia (della fisica).
- Einstein, 1905. "Asimmetrie nell'elettrodinamica che non sembrano conformi ai fenomeni"; "...i tentativi falliti di individuare un qualche movimento della Terra relativamente al 'mezzo luminifero' ".
- $\Rightarrow$ Relatività speciale $\Rightarrow$ nuove predizioni empiricamente verificabili
- Einstein, 1905. "...è concepibile che una teoria della luce basata su funzioni spaziali continue porti a contraddizioni con l'esperienza se la si applica ai fenomeni della generazione e trasformazione della luce".

Fondamenti, filosofia

- Le riflessioni sui fondamenti della fisica debbono essere distinte dalla filosofia (della fisica).
- Einstein, 1905. "Asimmetrie nell'elettrodinamica che non sembrano conformi ai fenomeni"; "...i tentativi falliti di individuare un qualche movimento della Terra relativamente al 'mezzo luminifero' ".
- $\Rightarrow$ Relatività speciale $\Rightarrow$ nuove predizioni empiricamente verificabili
- Einstein, 1905. "...è concepibile che una teoria della luce basata su funzioni spaziali continue porti a contraddizioni con l'esperienza se la si applica ai fenomeni della generazione e trasformazione della luce".
- $\Rightarrow$ Quanti di luce $\Rightarrow$ descrizione corpuscolare della luce $\Rightarrow$ nuove predizioni empiricamente verificabili

Fondamenti, filosofia

- Le riflessioni sui fondamenti della fisica debbono essere distinte dalla filosofia (della fisica).
- Einstein, 1905. "Asimmetrie nell'elettrodinamica che non sembrano conformi ai fenomeni"; "...i tentativi falliti di individuare un qualche movimento della Terra relativamente al 'mezzo luminifero' ".
- $\Rightarrow$ Relatività speciale $\Rightarrow$ nuove predizioni empiricamente verificabili
- Einstein, 1905. "...è concepibile che una teoria della luce basata su funzioni spaziali continue porti a contraddizioni con l'esperienza se la si applica ai fenomeni della generazione e trasformazione della luce".
- $\Rightarrow$ Quanti di luce $\Rightarrow$ descrizione corpuscolare della luce $\Rightarrow$ nuove predizioni empiricamente verificabili
- Invece, le riflessioni filosofiche non producono nuove conoscenze empiricamente verificabili

Fondamenti, filosofia

- Le riflessioni sui fondamenti della fisica debbono essere distinte dalla filosofia (della fisica).
- Einstein, 1905. "Asimmetrie nell'elettrodinamica che non sembrano conformi ai fenomeni"; "...i tentativi falliti di individuare un qualche movimento della Terra relativamente al 'mezzo luminifero' ".
- $\Rightarrow$ Relatività speciale $\Rightarrow$ nuove predizioni empiricamente verificabili
- Einstein, 1905. "...è concepibile che una teoria della luce basata su funzioni spaziali continue porti a contraddizioni con l'esperienza se la si applica ai fenomeni della generazione e trasformazione della luce".
- $\Rightarrow$ Quanti di luce $\Rightarrow$ descrizione corpuscolare della luce $\Rightarrow$ nuove predizioni empiricamente verificabili
- Invece, le riflessioni filosofiche non producono nuove conoscenze empiricamente verificabili
- Reciprocamente, una filosofia non può essere falsificata da un esperimento

Che cos'è una teoria fisica

Meccanica classica

- Oggetti: corpi rigidi

Che cos'è una teoria fisica

Meccanica classica

- Oggetti: corpi rigidi
- Entità teoriche: spazio, tempo*, corpi, sistemi di riferimento, punto materiale

Che cos'è una teoria fisica

Meccanica classica

- Oggetti: corpi rigidi
- Entità teoriche: spazio, tempo*, corpi, sistemi di riferimento, punto materiale
- Grandezze fisiche. Descrivono proprietà delle entità teoriche (massa, energia). Sono attribuibili alle entità teoriche (velocità). Descrivono interazioni tra entità teoriche (forza).

Che cos'è una teoria fisica

Meccanica classica

- Oggetti: corpi rigidi
- Entità teoriche: spazio, tempo*, corpi, sistemi di riferimento, punto materiale
- Grandezze fisiche. Descrivono proprietà delle entità teoriche (massa, energia). Sono attribuibili alle entità teoriche (velocità). Descrivono interazioni tra entità teoriche (forza).
- In generale, le grandezze fisiche possono essere misurate e la teoria, insieme alla conoscenza di sfondo, indica le procedure necessarie per la loro misura.

Che cos'è una teoria fisica

Meccanica classica

- Oggetti: corpi rigidi
- Entità teoriche: spazio, tempo*, corpi, sistemi di riferimento, punto materiale
- Grandezze fisiche. Descrivono proprietà delle entità teoriche (massa, energia). Sono attribuibili alle entità teoriche (velocità). Descrivono interazioni tra entità teoriche (forza).
- In generale, le grandezze fisiche possono essere misurate e la teoria, insieme alla conoscenza di sfondo, indica le procedure necessarie per la loro misura.
- Interpretare una teoria fisica significa individuare le grandezze fisiche che possono essere misurate e indicare le procedure sperimentali per misurarle

Che cos'è una teoria fisica

Meccanica classica

- Oggetti: corpi rigidi
- Entità teoriche: spazio, tempo*, corpi, sistemi di riferimento, punto materiale
- Grandezze fisiche. Descrivono proprietà delle entità teoriche (massa, energia). Sono attribuibili alle entità teoriche (velocità). Descrivono interazioni tra entità teoriche (forza).
- In generale, le grandezze fisiche possono essere misurate e la teoria, insieme alla conoscenza di sfondo, indica le procedure necessarie per la loro misura.
- Interpretare una teoria fisica significa individuare le grandezze fisiche che possono essere misurate e indicare le procedure sperimentali per misurarle
- Ontologia: afferma che almeno alcune delle entità teoriche esistono nel Mondo.

Che cos'è una teoria fisica

Relatività speciale

- Oggetti: corpi rigidi, orologi

Che cos'è una teoria fisica

Relatività speciale

- Oggetti: corpi rigidi, orologi
- Entità teoriche: spazio, tempo*, luce, corpi, sistemi di riferimento, punto materiale

Che cos'è una teoria fisica

Relatività speciale

- Oggetti: corpi rigidi, orologi
- Entità teoriche: spazio, tempo*, luce, corpi, sistemi di riferimento, punto materiale
- Grandezze fisiche: come nella meccanica classica

Che cos'è una teoria fisica

Relatività speciale

- Oggetti: corpi rigidi, orologi
- Entità teoriche: spazio, tempo*, luce, corpi, sistemi di riferimento, punto materiale
- Grandezze fisiche: come nella meccanica classica
- Predizioni significative della teoria: $E = mc^2$; effetto orologi

Che cos'è una teoria fisica

Elettromagnetismo

- Oggetti: corpi elettricamente carichi

Che cos'è una teoria fisica

Elettromagnetismo

- Oggetti: corpi elettricamente carichi
- Entità teoriche: corpi, sistema di riferimento inerziale, punto materiale

Che cos'è una teoria fisica

Elettromagnetismo

- Oggetti: corpi elettricamente carichi
- Entità teoriche: corpi, sistema di riferimento inerziale, punto materiale
- Grandezze fisiche: carica elettrica, campo elettrico e magnetico, potenziali, correnti. . .

Che cos'è una teoria fisica

Elettromagnetismo

- Oggetti: corpi elettricamente carichi
- Entità teoriche: corpi, sistema di riferimento inerziale, punto materiale
- Grandezze fisiche: carica elettrica, campo elettrico e magnetico, potenziali, correnti. . .
- Predizioni significative della teoria: induzione elettromagnetica, onde elettromagnetiche; interferenza; la luce è un'onda elettromagnetica

Elettromagnetismo

Postulati [campi]

$$div\ \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{1}$$

$$rot\ \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2}$$

$$div\ \vec{B} = 0 \tag{3}$$

$$rot\ \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \tag{4}$$

$$d\vec{F} = \rho dV (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \tag{5}$$

Elettromagnetismo

Postulati [potenziali]

- $$\left(\nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial(c^2t^2)}\right)\phi_\mu = -\mu_0 J_\mu \qquad \mu = ct, x, y, z$$

Elettromagnetismo

Postulati [potenziali]

- $$\left(\nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial(c^2t^2)}\right)\phi_\mu = -\mu_0 J_\mu \qquad \mu = ct, x, y, z$$
- Dove: $\phi_\mu = (\varphi/c, A_i)$ è il quadri–potenziale e $J_\mu = (\rho/c, J_i)$ la quadri–corrente.

Che cos'è una teoria fisica

Caratteristiche di una teoria fisica

- Tutte e tre le teorie discusse posseggono la seguente caratteristica:

Che cos'è una teoria fisica

Caratteristiche di una teoria fisica

- Tutte e tre le teorie discusse posseggono la seguente caratteristica:
- Le loro equazioni contengono, come elementi costitutivi, gli oggetti di cui si occupano

Che cos'è una teoria fisica

Caratteristiche di una teoria fisica

- Tutte e tre le teorie discusse posseggono la seguente caratteristica:
- Le loro equazioni contengono, come elementi costitutivi, gli oggetti di cui si occupano
- Come vedremo, la MQ non contiene alcun oggetto

Che cos'è una teoria fisica

Caratteristiche di una teoria fisica

- Tutte e tre le teorie discusse posseggono la seguente caratteristica:
- Le loro equazioni contengono, come elementi costitutivi, gli oggetti di cui si occupano
- Come vedremo, la MQ non contiene alcun oggetto
- Essa è un algoritmo vuoto

Definizioni

Interpretazione

- Significato di ‘interpretazione’

Definizioni

Interpretazione

- Significato di 'interpretazione'
- Interpretare una teoria fisica significa individuare le grandezze fisiche che possono essere misurate e indicare le procedure sperimentali per misurarle

Definizioni

Interpretazione

- Significato di 'interpretazione'
- Interpretare una teoria fisica significa individuare le grandezze fisiche che possono essere misurate e indicare le procedure sperimentali per misurarle
- D'ora in avanti ci atterremo a questa definizione di interpretazione.

Definizioni

Significato fisico [2]

- Significato di 'significato fisico'.

[2] G. Giuliani, Vector potential, electromagnetic induction and 'physical meaning', *Eur. J. Phys.*, **31**, 871-880 (2010).

Definizioni

Significato fisico [2]

- Significato di 'significato fisico'.
- Criterio della misurabilità: un termine teorico ha significato fisico se almeno una delle grandezze fisiche ad esso associate è misurabile.

[2] G. Giuliani, Vector potential, electromagnetic induction and 'physical meaning', *Eur. J. Phys.*, **31**, 871-880 (2010).

Definizioni

Significato fisico [2]

- Significato di 'significato fisico'.
- Criterio della misurabilità: un termine teorico ha significato fisico se almeno una delle grandezze fisiche ad esso associate è misurabile.
- Criterio della predicibilità:

[2] G. Giuliani, Vector potential, electromagnetic induction and 'physical meaning', *Eur. J. Phys.*, **31**, 871-880 (2010).

Definizioni

Significato fisico [2]

- Significato di 'significato fisico'.
- Criterio della misurabilità: un termine teorico ha significato fisico se almeno una delle grandezze fisiche ad esso associate è misurabile.
- Criterio della predicibilità:
- Qualcosa (termine teorico, asserzione, insieme di asserzioni) ha significato fisico se. . .

[2] G. Giuliani, Vector potential, electromagnetic induction and 'physical meaning', *Eur. J. Phys.*, **31**, 871-880 (2010).

Definizioni

Significato fisico [2]

- Significato di 'significato fisico'.
- Criterio della misurabilità: un termine teorico ha significato fisico se almeno una delle grandezze fisiche ad esso associate è misurabile.
- Criterio della predicibilità:
- Qualcosa (termine teorico, asserzione, insieme di asserzioni) ha significato fisico se...
- ...la sua eliminazione diminuisce la capacità predittiva di una teoria (criterio forte)...

[2] G. Giuliani, Vector potential, electromagnetic induction and 'physical meaning', *Eur. J. Phys.*, **31**, 871-880 (2010).

Definizioni

Significato fisico [2]

- Significato di 'significato fisico'.
- Criterio della misurabilità: un termine teorico ha significato fisico se almeno una delle grandezze fisiche ad esso associate è misurabile.
- Criterio della predicibilità:
- Qualcosa (termine teorico, asserzione, insieme di asserzioni) ha significato fisico se...
- ...la sua eliminazione diminuisce la capacità predittiva di una teoria (criterio forte)...
- ...oppure se la sua eliminazione diminuisce la capacità descrittiva di una teoria (criterio debole)

[2] G. Giuliani, Vector potential, electromagnetic induction and 'physical meaning', *Eur. J. Phys.*, **31**, 871-880 (2010).

Definizioni

Significato fisico [2]

- Significato di 'significato fisico'.
- Criterio della misurabilità: un termine teorico ha significato fisico se almeno una delle grandezze fisiche ad esso associate è misurabile.
- Criterio della predicibilità:
- Qualcosa (termine teorico, asserzione, insieme di asserzioni) ha significato fisico se...
- ...la sua eliminazione diminuisce la capacità predittiva di una teoria (criterio forte)...
- ...oppure se la sua eliminazione diminuisce la capacità descrittiva di una teoria (criterio debole)
- Debbono essere soddisfatti almeno due dei tre criteri.

[2] G. Giuliani, Vector potential, electromagnetic induction and 'physical meaning', *Eur. J. Phys.*, **31**, 871-880 (2010).

Significato fisico

Applicazione dei criteri

- Etere. Supera il criterio della misurabilità. Infatti, Maxwell ha indicato come misurare la rigidità dell'etere partendo dalla misura dell'intensità della luce proveniente dal Sole (voce 'Etere' nella IX edizione della Enciclopedia Britannica, 1878).

Significato fisico

Applicazione dei criteri

- Etere. Supera il criterio della misurabilità. Infatti, Maxwell ha indicato come misurare la rigidità dell'etere partendo dalla misura dell'intensità della luce proveniente dal Sole (voce 'Etere' nella IX edizione della Enciclopedia Britannica, 1878).
- Tuttavia, esso non supera i due criteri della predicibilità: quindi, deve essere eliminato.

Significato fisico

Applicazione dei criteri

- Etere. Supera il criterio della misurabilità. Infatti, Maxwell ha indicato come misurare la rigidità dell'etere partendo dalla misura dell'intensità della luce proveniente dal Sole (voce 'Etere' nella IX edizione della Enciclopedia Britannica, 1878).
- Tuttavia, esso non supera i due criteri della predicibilità: quindi, deve essere eliminato.
- Potenziale vettore. Supera tutti e tre i criteri. Perché:

Significato fisico

Applicazione dei criteri

- Etere. Supera il criterio della misurabilità. Infatti, Maxwell ha indicato come misurare la rigidità dell'etere partendo dalla misura dell'intensità della luce proveniente dal Sole (voce 'Etere' nella IX edizione della Enciclopedia Britannica, 1878).
- Tuttavia, esso non supera i due criteri della predicibilità: quindi, deve essere eliminato.
- Potenziale vettore. Supera tutti e tre i criteri. Perché:
- L'intensità, mediata su un periodo, di un'onda elettromagnetica è misurabile e può essere espressa in funzione del potenziale vettore $I = \frac{\varepsilon_0 c}{2}\omega^2 A_0^2$.

Significato fisico

Applicazione dei criteri

- Etere. Supera il criterio della misurabilità. Infatti, Maxwell ha indicato come misurare la rigidità dell'etere partendo dalla misura dell'intensità della luce proveniente dal Sole (voce 'Etere' nella IX edizione della Enciclopedia Britannica, 1878).
- Tuttavia, esso non supera i due criteri della predicibilità: quindi, deve essere eliminato.
- Potenziale vettore. Supera tutti e tre i criteri. Perché:
- L'intensità, mediata su un periodo, di un'onda elettromagnetica è misurabile e può essere espressa in funzione del potenziale vettore $I = \frac{\varepsilon_0 c}{2}\omega^2 A_0^2$.
- Permette una descrizione dei fenomeni di induzione elettromagnetica relativisticamente invariante, impossibile in funzione dei campi (criterio forte della predicibilità).

Significato fisico

Applicazione dei criteri

- Etere. Supera il criterio della misurabilità. Infatti, Maxwell ha indicato come misurare la rigidità dell'etere partendo dalla misura dell'intensità della luce proveniente dal Sole (voce 'Etere' nella IX edizione della Enciclopedia Britannica, 1878).
- Tuttavia, esso non supera i due criteri della predicibilità: quindi, deve essere eliminato.
- Potenziale vettore. Supera tutti e tre i criteri. Perché:
- L'intensità, mediata su un periodo, di un'onda elettromagnetica è misurabile e può essere espressa in funzione del potenziale vettore $I = \frac{\varepsilon_0 c}{2}\omega^2 A_0^2$.
- Permette una descrizione dei fenomeni di induzione elettromagnetica relativisticamente invariante, impossibile in funzione dei campi (criterio forte della predicibilità).
- Permette un passaggio naturale alla descrizione relativistica dell'elettromagnetismo (criterio debole della predicibilità).

Definizioni

Significato fisico

- Spazio - tempo nella relatività speciale. Soddisfa due dei tre criteri.

Definizioni

Significato fisico

- Spazio - tempo nella relatività speciale. Soddisfa due dei tre criteri.
- Alcune sue grandezze fisiche possono essere misurate: distanza tra due punti, intervalli temporali. $\Rightarrow$ soddisfa il criterio della misurabilità.

Definizioni

Significato fisico

- Spazio - tempo nella relatività speciale. Soddisfa due dei tre criteri.
- Alcune sue grandezze fisiche possono essere misurate: distanza tra due punti, intervalli temporali. $\Rightarrow$ soddisfa il criterio della misurabilità.
- Può essere eliminato senza diminuire la capacità predittiva della teoria. Quindi non soddisfa il primo criterio della predicibiltà. Tuttavia...

Definizioni

Significato fisico

- Spazio - tempo nella relatività speciale. Soddisfa due dei tre criteri.
- Alcune sue grandezze fisiche possono essere misurate: distanza tra due punti, intervalli temporali. $\Rightarrow$ soddisfa il criterio della misurabilità.
- Può essere eliminato senza diminuire la capacità predittiva della teoria. Quindi non soddisfa il primo criterio della predicibiltà. Tuttavia...
- soddisfa il secondo criterio della predicibilità perché incrementa la capacità descrittiva della teoria

Definizioni

Significato fisico

- Spazio - tempo nella relatività speciale. Soddisfa due dei tre criteri.
- Alcune sue grandezze fisiche possono essere misurate: distanza tra due punti, intervalli temporali. $\Rightarrow$ soddisfa il criterio della misurabilità.
- Può essere eliminato senza diminuire la capacità predittiva della teoria. Quindi non soddisfa il primo criterio della predicibiltà. Tuttavia...
- soddisfa il secondo criterio della predicibilità perché incrementa la capacità descrittiva della teoria
- Infatti, ha permesso la descrizione spazio–temporale dell'elettromagnetismo e suggerito la formulazione della relatività generale.

Da Thomson a de Broglie

- 1897 Joseph John Thomson: elettrone

Da Thomson a de Broglie

- 1897 Joseph John Thomson: elettrone
- 1900 Max Planck:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} < U_\nu >= \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/K_B T} - 1}$$

Da Thomson a de Broglie

- 1897 Joseph John Thomson: elettrone
- 1900 Max Planck:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} < U_\nu >= \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/K_B T} - 1}$$

- 1905 Albert Einstein: quanti di luce $E = h\nu$

Da Thomson a de Broglie

- 1897 Joseph John Thomson: elettrone
- 1900 Max Planck:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} < U_\nu >= \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/K_B T} - 1}$$

- 1905 Albert Einstein: quanti di luce $E = h\nu$
- 1911 Ernest Rutherford: nucleo

Da Thomson a de Broglie

- 1897 Joseph John Thomson: elettrone
- 1900 Max Planck:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} < U_\nu >= \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/K_B T} - 1}$$

- 1905 Albert Einstein: quanti di luce $E = h\nu$
- 1911 Ernest Rutherford: nucleo
- 1913 Niels Bohr:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \qquad \nu = \frac{E_1 - E_2}{h}$$

Da Thomson a de Broglie

- 1916 Arnold Sommerfeld, atomo di idrogeno con correzione relativistica (orbite ellittiche). La teoria, ovviamente, ignora lo spin dell'elettrone e l'interazione spin–orbita, ma le energie permesse sono uguali a quelle di Dirac del 1928 (con opportuna re–interpretazione del numero quantico n_θ che quantizza il momento angolare dell'elettrone)

$$E_{n,n_\theta} \approx \frac{1}{n^2}\frac{\mu e^4}{8h^2\varepsilon_0^2}\left[1+\frac{\alpha^2}{n}\left(\frac{1}{n_\theta}-\frac{3}{4n}\right)\right]$$

Da Thomson a de Broglie

- 1916 Arnold Sommerfeld, atomo di idrogeno con correzione relativistica (orbite ellittiche). La teoria, ovviamente, ignora lo spin dell'elettrone e l'interazione spin–orbita, ma le energie permesse sono uguali a quelle di Dirac del 1928 (con opportuna re–interpretazione del numero quantico n_θ che quantizza il momento angolare dell'elettrone)

$$E_{n,n_\theta} \approx \frac{1}{n^2}\frac{\mu e^4}{8h^2\varepsilon_0^2}\left[1+\frac{\alpha^2}{n}\left(\frac{1}{n_\theta}-\frac{3}{4n}\right)\right]$$

- dove μ è la massa ridotta dell'elettrone e

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

è la costante, adimensionale, di 'struttura fine'

Da Thomson a de Broglie

- 1916 Arnold Sommerfeld, atomo di idrogeno con correzione relativistica (orbite ellittiche). La teoria, ovviamente, ignora lo spin dell'elettrone e l'interazione spin–orbita, ma le energie permesse sono uguali a quelle di Dirac del 1928 (con opportuna re–interpretazione del numero quantico n_θ che quantizza il momento angolare dell'elettrone)

$$E_{n,n_\theta} \approx \frac{1}{n^2}\frac{\mu e^4}{8h^2\varepsilon_0^2}\left[1+\frac{\alpha^2}{n}\left(\frac{1}{n_\theta}-\frac{3}{4n}\right)\right]$$

- dove μ è la massa ridotta dell'elettrone e

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

  è la costante, adimensionale, di 'struttura fine'
- 1928 Dirac, atomo di idrogeno (teoria quantistica relativistica)

$$E_{n,j} \approx \frac{1}{n^2}\frac{\mu e^4}{8h^2\varepsilon_0^2}\left[1+\frac{\alpha^2}{n}\left(\frac{1}{j+1/2}-\frac{3}{4n}\right)\right]; \qquad j = l + s$$

Sommerfeld $\Leftrightarrow$ Dirac

La formula di Dirac *approssimata* può essere ricavata anche aggiungendo ai valori permessi dell'energia - che si ottengono con la trattazione quantistica non relativistica (e che coincidono, come abbiamo visto, con quelli del modello di Bohr) - correzioni che tengano conto del fatto che:

- la dinamica usata deve essere relativistica;

Sommerfeld $\Leftrightarrow$ Dirac

La formula di Dirac *approssimata* può essere ricavata anche aggiungendo ai valori permessi dell'energia - che si ottengono con la trattazione quantistica non relativistica (e che coincidono, come abbiamo visto, con quelli del modello di Bohr) - correzioni che tengano conto del fatto che:

- la dinamica usata deve essere relativistica;
- l'elettrone possiede uno spin; questa correzione è nulla per $l > 0$;

Sommerfeld $\Leftrightarrow$ Dirac

La formula di Dirac *approssimata* può essere ricavata anche aggiungendo ai valori permessi dell'energia - che si ottengono con la trattazione quantistica non relativistica (e che coincidono, come abbiamo visto, con quelli del modello di Bohr) - correzioni che tengano conto del fatto che:

- la dinamica usata deve essere relativistica;
- l'elettrone possiede uno spin; questa correzione è nulla per $l > 0$;
- c'è una interazione tra il momento magnetico intrinseco dell'elettrone e il suo momento magnetico orbitale (interazione *spin - orbita*); questa correzione è nulla per $l = 0$.

Sommerfeld $\Leftrightarrow$ Dirac

La formula di Dirac *approssimata* può essere ricavata anche aggiungendo ai valori permessi dell'energia - che si ottengono con la trattazione quantistica non relativistica (e che coincidono, come abbiamo visto, con quelli del modello di Bohr) - correzioni che tengano conto del fatto che:

- la dinamica usata deve essere relativistica;
- l'elettrone possiede uno spin; questa correzione è nulla per $l > 0$;
- c'è una interazione tra il momento magnetico intrinseco dell'elettrone e il suo momento magnetico orbitale (interazione *spin - orbita*); questa correzione è nulla per $l = 0$.
- La correzione relativistica è diversa da quella di Sommerfeld

Sommerfeld $\Leftrightarrow$ Dirac

La formula di Dirac *approssimata* può essere ricavata anche aggiungendo ai valori permessi dell'energia - che si ottengono con la trattazione quantistica non relativistica (e che coincidono, come abbiamo visto, con quelli del modello di Bohr) - correzioni che tengano conto del fatto che:

- la dinamica usata deve essere relativistica;
- l'elettrone possiede uno spin; questa correzione è nulla per $l > 0$;
- c'è una interazione tra il momento magnetico intrinseco dell'elettrone e il suo momento magnetico orbitale (interazione *spin - orbita*); questa correzione è nulla per $l = 0$.
- La correzione relativistica è diversa da quella di Sommerfeld
- Tuttavia, le due ultime correzioni sono tali da annullare la differenza tra le due correzioni relativistiche

Da Thomson a de Broglie

- 1916-1917 Einstein - Probabilità di transizione 'senza eccitazione mediante cause esterne' e probabilità di transizione 'stimolata': $A_{mn}/B_{mn} = 8\pi h\nu^3/c^3 \Rightarrow p = h\nu/c$

Da Thomson a de Broglie

- 1916-1917 Einstein - Probabilità di transizione 'senza eccitazione mediante cause esterne' e probabilità di transizione 'stimolata': $A_{mn}/B_{mn} = 8\pi h\nu^3/c^3 \Rightarrow p = h\nu/c$
- 1923-1924 Louis de Broglie - Onda associata ad una particella:

$$h\nu = mc^2 \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p} \Rightarrow p = n\frac{h}{2\pi} \text{ condizione di Bohr}$$

Erwin Schrödinger. La funzione d'onda

- $$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi$$

Erwin Schrödinger. La funzione d'onda

- $$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi$$
- Integrando rispetto al tempo

Erwin Schrödinger. La funzione d'onda

- $$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi$$
- Integrando rispetto al tempo
- $$\Psi = e^{-(i/\hbar)E_n t}\psi_n(x, y, z)$$

Erwin Schrödinger. La funzione d'onda

- $$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi$$
- Integrando rispetto al tempo
- $$\Psi = e^{-(i/\hbar)E_n t}\psi_n(x, y, z)$$
- Quindi

Erwin Schrödinger. La funzione d'onda

- $$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi$$
- Integrando rispetto al tempo
- $$\Psi = e^{-(i/\hbar)E_n t}\psi_n(x, y, z)$$
- Quindi
- $$\hat{H}\psi_n = E\psi_n(x, y, z)$$

Max Born. L'interpretazione probabilistica

- Il prodotto $\Psi(q,t)\Psi(q,t)^* dq$ è proporzionale alla probabilità che la particella, all'istante t, si trovi nell'elemento di volume dq

Max Born. L'interpretazione probabilistica

- Il prodotto $\Psi(q,t)\Psi(q,t)^* dq$ è proporzionale alla probabilità che la particella, all'istante t, si trovi nell'elemento di volume dq
- Se

$$\psi(q) = \sum_i c_i \psi_i(q)$$

Max Born. L'interpretazione probabilistica

- Il prodotto $\Psi(q,t)\Psi(q,t)^* dq$ è proporzionale alla probabilità che la particella, all'istante t, si trovi nell'elemento di volume dq
- Se

$$\psi(q) = \sum_i c_i \psi_i(q)$$

- Dove

$$c_i = \int \psi_i^* \psi dq$$

Max Born. L'interpretazione probabilistica

- Il prodotto $\Psi(q,t)\Psi(q,t)^* dq$ è proporzionale alla probabilità che la particella, all'istante t, si trovi nell'elemento di volume dq
- Se

$$\psi(q) = \sum_i c_i \psi_i(q)$$

- Dove

$$c_i = \int \psi_i^* \psi dq$$

- La probabilità che la grandezza fisica A abbia il valore a_i è data da:

$$P_i = c_i c_i^*$$

Max Born. L'interpretazione probabilistica

- Il prodotto $\Psi(q,t)\Psi(q,t)^* dq$ è proporzionale alla probabilità che la particella, all'istante t, si trovi nell'elemento di volume dq
- Se

$$\psi(q) = \sum_i c_i \psi_i(q)$$

- Dove

$$c_i = \int \psi_i^* \psi dq$$

- La probabilità che la grandezza fisica A abbia il valore a_i è data da:

$$P_i = c_i c_i^*$$

Che cos'è una teoria fisica

MQ ondulatoria

- Oggetti: nessuno

Che cos'è una teoria fisica

MQ ondulatoria

- Oggetti: nessuno
- Entità teoriche: funzione d'onda (funzione di stato)

Che cos'è una teoria fisica

MQ ondulatoria

- Oggetti: nessuno
- Entità teoriche: funzione d'onda (funzione di stato)
- Grandezze fisiche: dipendono dagli oggetti studiati

Che cos'è una teoria fisica

MQ ondulatoria

- Oggetti: nessuno
- Entità teoriche: funzione d'onda (funzione di stato)
- Grandezze fisiche: dipendono dagli oggetti studiati
- La teoria effettua predizioni empiricamente verificabili solo quando applicata a sistemi fisici specifici

Che cos'è una teoria fisica

MQ ondulatoria

- Oggetti: nessuno
- Entità teoriche: funzione d'onda (funzione di stato)
- Grandezze fisiche: dipendono dagli oggetti studiati
- La teoria effettua predizioni empiricamente verificabili solo quando applicata a sistemi fisici specifici
- Quindi, essa è un formalismo VUOTO

Che cos'è una teoria fisica

MQ ondulatoria

- Oggetti: nessuno
- Entità teoriche: funzione d'onda (funzione di stato)
- Grandezze fisiche: dipendono dagli oggetti studiati
- La teoria effettua predizioni empiricamente verificabili solo quando applicata a sistemi fisici specifici
- Quindi, essa è un formalismo VUOTO
- Per 'riempire' il formalismo vuoto è necessario ricorrere alla conoscenza acquisita da teorie fisiche come quelle che abbiamo analizzato in precedenza: meccanica, elettromagnetismo, relatività speciale.

MQ ondulatoria

Il formalismo vuoto

Come si costruisce il formalismo 'vuoto' della MQ ondulatoria.

Simb. Gr.	Simb. Op.	Operatore
$\vec{r}$	$\hat{r}$	$\vec{r}$ (moltiplicare per)
p_x	$\hat{p}_x$	$-i\hbar\partial/\partial x$
E	$\hat{H}$	$-\hbar^2/2m(\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2) + V(\vec{r})$
l_x	$\hat{l}_x$	$-i\hbar(y\partial/\partial z - z\partial/\partial y)$

Come si riempie il formalismo vuoto

Atomo di idrogeno

- L'espressione dell'operatore hamiltoniano (non relativistico)

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)+U(\vec{r})$$

Come si riempie il formalismo vuoto

Atomo di idrogeno

- L'espressione dell'operatore hamiltoniano (non relativistico)

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)+U(\vec{r})$$

- richiede la conoscenza della massa m e dell'energia potenziale dell'elettrone $U(r) = -e^2/(4\pi\varepsilon_0 r)$

Come si riempie il formalismo vuoto

Atomo di idrogeno

- L'espressione dell'operatore hamiltoniano (non relativistico)

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)+U(\vec{r})$$

- richiede la conoscenza della massa m e dell'energia potenziale dell'elettrone $U(r) = -e^2/(4\pi\varepsilon_0 r)$
- Equazione degli stati stazionari: $\hat{H}\psi = E\psi$

Come si riempie il formalismo vuoto

Atomo di idrogeno

- L'espressione dell'operatore hamiltoniano (non relativistico)

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)+U(\vec{r})$$

- richiede la conoscenza della massa m e dell'energia potenziale dell'elettrone $U(r) = -e^2/(4\pi\varepsilon_0 r)$
- Equazione degli stati stazionari: $\hat{H}\psi = E\psi$
- I livelli energetici calcolati coincidono con quelli del modello di Bohr

Come si riempie il formalismo vuoto

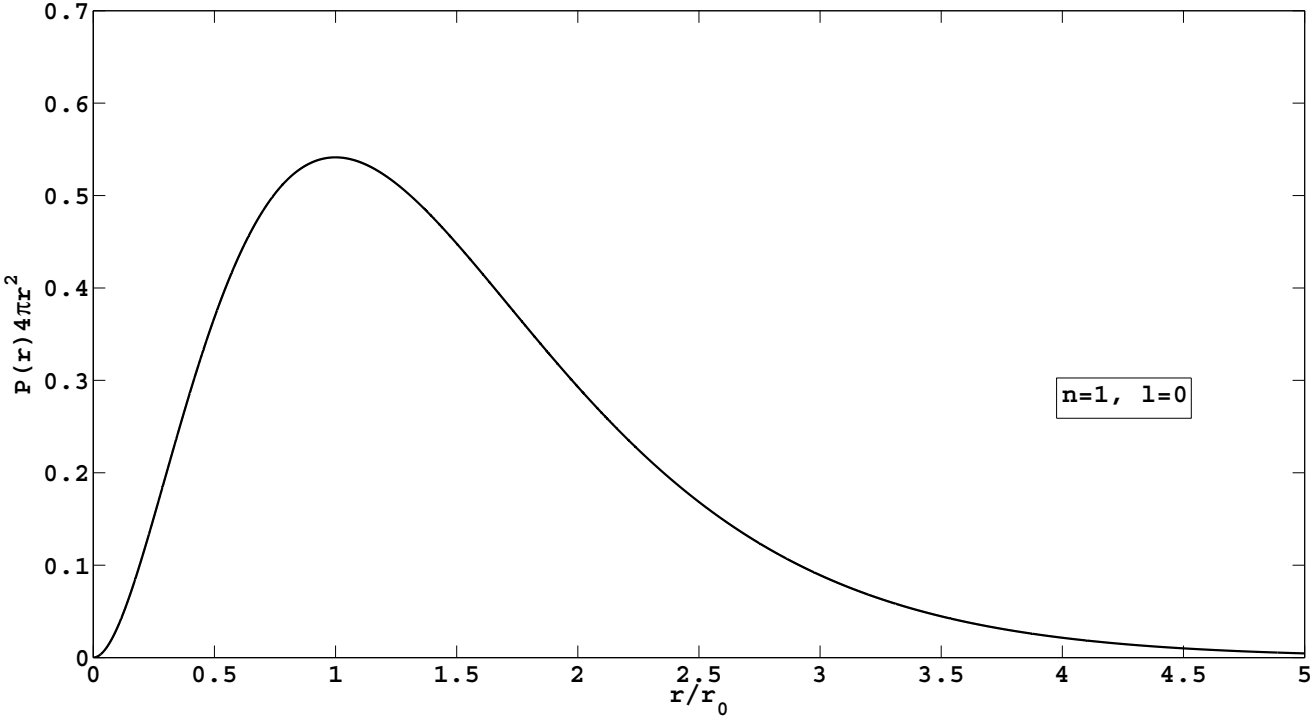
Atomo di idrogeno

- L'espressione dell'operatore hamiltoniano (non relativistico)

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)+U(\vec{r})$$

- richiede la conoscenza della massa m e dell'energia potenziale dell'elettrone $U(r) = -e^2/(4\pi\varepsilon_0 r)$
- Equazione degli stati stazionari: $\hat{H}\psi = E\psi$
- I livelli energetici calcolati coincidono con quelli del modello di Bohr
- Tuttavia, la descrizione di Schrödinger è più dettagliata...

Probabilità di trovare l'elettrone alla distanza r dal protone.



Come si riempie il formalismo vuoto

Atomo di idrogeno

- Numeri quantici secondo Bohr e MQ non relativistica

numero quantico	Bohr	Schrödinger
n	$1, 2, 3 \ldots$	$1, 2, 3 \ldots$
l	$==$	$0, 1, 2, 3, \ldots n-1$
m	$==$	$-l \cdots +l$

Come si riempie il formalismo vuoto

Atomo di idrogeno

- Numeri quantici secondo Bohr e MQ non relativistica

numero quantico	Bohr	Schrödinger
n	$1, 2, 3 \ldots$	$1, 2, 3 \ldots$
l	$==$	$0, 1, 2, 3, \ldots n-1$
m	$==$	$-l \cdots +l$

- Bohr $\Rightarrow L = n\hbar$; Schrödinger $\Rightarrow L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$

MQ, interpretazione

- Interpretare una teoria fisica significa individuare le grandezze fisiche che possono essere misurate e indicare le procedure sperimentali per misurarle

MQ, interpretazione

- Interpretare una teoria fisica significa individuare le grandezze fisiche che possono essere misurate e indicare le procedure sperimentali per misurarle
- In quanto algoritmo vuoto, cioè privo di oggetti, la MQ non è suscettibile di alcuna interpretazione

MQ, interpretazione

- Interpretare una teoria fisica significa individuare le grandezze fisiche che possono essere misurate e indicare le procedure sperimentali per misurarle
- In quanto algoritmo vuoto, cioè privo di oggetti, la MQ non è suscettibile di alcuna interpretazione
- Se applicata ad un oggetto, la MQ indica le grandezze fisiche che possono essere misurate

MQ, interpretazione

- Interpretare una teoria fisica significa individuare le grandezze fisiche che possono essere misurate e indicare le procedure sperimentali per misurarle
- In quanto algoritmo vuoto, cioè privo di oggetti, la MQ non è suscettibile di alcuna interpretazione
- Se applicata ad un oggetto, la MQ indica le grandezze fisiche che possono essere misurate
- Tuttavia, le procedure sperimentali per la misura sono suggerite dalla conoscenza acquisita

MQ, interpretazioni (?)

- Le 'interpretazioni' della MQ, diverse da quella definita precedentemente, debbono essere distinte da eventuali teorie alternative. Una teoria è alternativa se conduce a predizioni empiricamente verificabili diverse da quelle della MQ.

MQ, interpretazioni (?)

- Le 'interpretazioni' della MQ, diverse da quella definita precedentemente, debbono essere distinte da eventuali teorie alternative. Una teoria è alternativa se conduce a predizioni empiricamente verificabili diverse da quelle della MQ.
- Pertanto, le 'interpretazioni' di cui ci occupiamo non modificano le predizioni della MQ. Esse, quindi, possono essere eliminate sulla base del criterio 'forte' della predicibilità.

MQ, interpretazioni (?)

- Le 'interpretazioni' della MQ, diverse da quella definita precedentemente, debbono essere distinte da eventuali teorie alternative. Una teoria è alternativa se conduce a predizioni empiricamente verificabili diverse da quelle della MQ.
- Pertanto, le 'interpretazioni' di cui ci occupiamo non modificano le predizioni della MQ. Esse, quindi, possono essere eliminate sulla base del criterio 'forte' della predicibilità.
- D'altra parte, per aumentare la capacità descrittiva di una teoria devono essere verificate alcune condizioni. Per esempio: rendere il formalismo più semplice o fisicamente più trasparente, nel senso di porre in evidenza le connessioni di alcuni passaggi formali con i processi fisici da loro descritti.

MQ, interpretazioni (?)

- La versione [NON interpretazione] spazio–temporale della relatività speciale soddisfa queste condizioni. E' assai dubbio che lo stesso si possa dire delle 'interpretazioni' dell MQ.

MQ, interpretazioni (?)

- La versione [NON interpretazione] spazio–temporale della relatività speciale soddisfa queste condizioni. E' assai dubbio che lo stesso si possa dire delle 'interpretazioni' dell MQ.
- Queste "interpretazioni" sono, nei casi migliori, pure riflessioni filosofiche.

MQ, interpretazioni (?)

- La versione [NON interpretazione] spazio–temporale della relatività speciale soddisfa queste condizioni. E' assai dubbio che lo stesso si possa dire delle 'interpretazioni' dell MQ.
- Queste "interpretazioni" sono, nei casi migliori, pure riflessioni filosofiche.
- In quanto tali, non possono nè essere corroborate né falsificate da alcun esperimento.

Intermezzo

Prima della misura

- Asserzione **R**. Prima della misura, una grandezza fisica ha un valore definito.

Intermezzo

Prima della misura

- Asserzione **R**. Prima della misura, una grandezza fisica ha un valore definito.
- Asserzione **M**. Prima della misura, una grandezza fisica non ha un valore definito. Sola la misura attribuisce un valore definito alla grandezza in questione.

Intermezzo

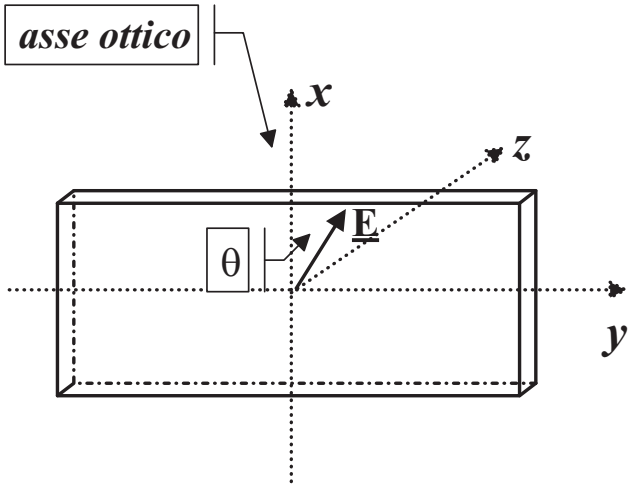
Prima della misura

- Asserzione **R**. Prima della misura, una grandezza fisica ha un valore definito.
- Asserzione **M**. Prima della misura, una grandezza fisica non ha un valore definito. Sola la misura attribuisce un valore definito alla grandezza in questione.
- Queste due asserzioni, NON solo asserzioni filosofiche, ma fisiche. Infatti. . .

Prima della misura

Lamina a quarto d'onda

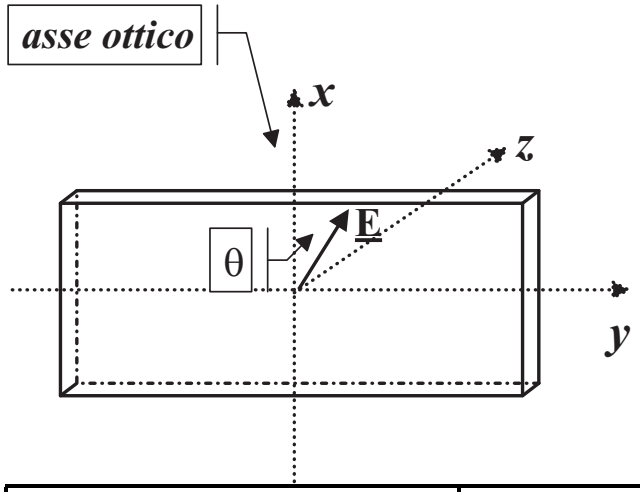
- lamina a quarto d'onda



Prima della misura

Lamina a quarto d'onda

- lamina a quarto d'onda



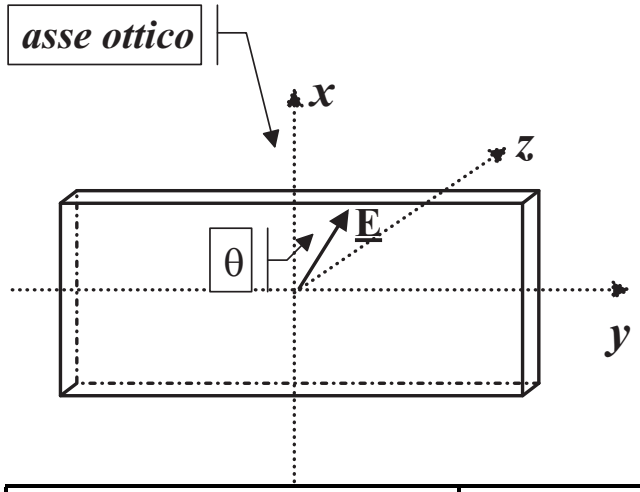
-

Polarizzazione incidente	Polarizzazione uscente
Circolare D	Rettilinea con $\theta_u = \pi/4$
Circolare S	Rettilinea con $\theta_u = -\pi/4$

Prima della misura

Lamina a quarto d'onda

- lamina a quarto d'onda



-

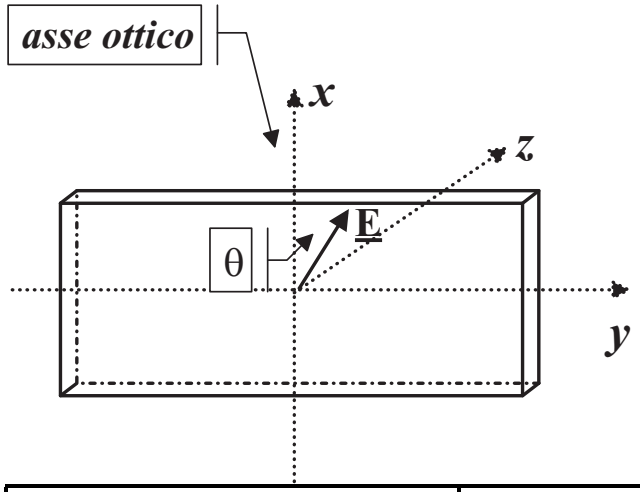
Polarizzazione incidente	Polarizzazione uscente
Circolare D	Rettilinea con $\theta_u = \pi/4$
Circolare S	Rettilinea con $\theta_u = -\pi/4$

- Inserendo un polarizzatore lineare dopo la lamina a quarto d'onda...

Prima della misura

Lamina a quarto d'onda

- lamina a quarto d'onda



-

Polarizzazione incidente	Polarizzazione uscente
Circolare D	Rettilinea con $\theta_u = \pi/4$
Circolare S	Rettilinea con $\theta_u = -\pi/4$

- Inserendo un polarizzatore lineare dopo la lamina a quarto d'onda...
- stabiliamo quale era la polarizzazione della luce (del fotone) prima della misura

Prima della misura

Lamina a quarto d'onda

- La lamina a quarto d'onda modifica le proprietà della luce (del fotone): la luce (il fotone) viene trasformata da polarizzata circolarmente a polarizzata linearmente

Prima della misura

Lamina a quarto d'onda

- La lamina a quarto d'onda modifica le proprietà della luce (del fotone): la luce (il fotone) viene trasformata da polarizzata circolarmente a polarizzata linearmente
- La successiva misura con un polarizzatore lineare non modifica lo stato di polarizzazione della luce (del fotone): individua solo lo stato di polarizzazione della luce (del fotone)

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

Contro–esempio dell'asserzione **M**

- Supponiamo che:

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_1 + \psi_2)$$

$$\psi_1 \Rightarrow a_1 \qquad\qquad \psi_2 \Rightarrow a_2$$

$$\Downarrow$$

$$P(a_1) = \frac{1}{2} \qquad\qquad P(a_2) = \frac{1}{2}$$

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

Contro–esempio dell'asserzione **M**

- Supponiamo che:

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_1 + \psi_2)$$

$$\psi_1 \Rightarrow a_1 \qquad\qquad \psi_2 \Rightarrow a_2$$

$$\Downarrow$$

$$P(a_1) = \frac{1}{2} \qquad\qquad P(a_2) = \frac{1}{2}$$

- Postulato **M**. Prima della misura, il sistema si trova in uno stato in cui la grandezza fisica A non ha un valore definito (né a_1, né a_2); durante la misura il sistema passa, con probabilità (1/2), dallo stato descritto dalla ψ allo stato ψ_1 o ψ_2 con le relative proprietà (valori a_1 o a_2 della grandezza fisica A)

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

Contro–esempio dell'asserzione **M** [3,4]

- Il postulato **M**, se aggiunto all'insieme dei postulati della MQ...

[3] G. Giuliani, Scienza, fisica, filosofia e senso comune, *Giornale di Fisica* **48** 303-322 (2007).

[4] G. Giuliani, On realism and quantum mechanics, *Il Nuovo Cimento* **122 B** 267-276 (2007).

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

Contro–esempio dell'asserzione **M** [3,4]

- Il postulato **M**, se aggiunto all'insieme dei postulati della MQ...
- non è usato nella catena deduttiva che conduce alle predizioni della MQ; quindi...

[3] G. Giuliani, Scienza, fisica, filosofia e senso comune, *Giornale di Fisica* **48** 303-322 (2007).

[4] G. Giuliani, On realism and quantum mechanics, *Il Nuovo Cimento* **122 B** 267-276 (2007).

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

Contro–esempio dell'asserzione **M** [3,4]

- Il postulato **M**, se aggiunto all'insieme dei postulati della MQ...
- non è usato nella catena deduttiva che conduce alle predizioni della MQ; quindi...
- è superfluo; pertanto...

[3] G. Giuliani, Scienza, fisica, filosofia e senso comune, *Giornale di Fisica* **48** 303-322 (2007).

[4] G. Giuliani, On realism and quantum mechanics, *Il Nuovo Cimento* **122 B** 267-276 (2007).

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

Contro–esempio dell'asserzione **M** [3,4]

- Il postulato **M**, se aggiunto all'insieme dei postulati della MQ...
- non è usato nella catena deduttiva che conduce alle predizioni della MQ; quindi...
- è superfluo; pertanto...
- deve essere espunto.

[3] G. Giuliani, Scienza, fisica, filosofia e senso comune, *Giornale di Fisica* **48** 303-322 (2007).

[4] G. Giuliani, On realism and quantum mechanics, *Il Nuovo Cimento* **122 B** 267-276 (2007).

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

Contro–esempio dell'asserzione **M** [3,4]

- Il postulato **M**, se aggiunto all'insieme dei postulati della MQ...
- non è usato nella catena deduttiva che conduce alle predizioni della MQ; quindi...
- è superfluo; pertanto...
- deve essere espunto.
- Si noti come il cosiddetto paradosso del 'gatto di Schrödinger' nasca dall'assunzione del postulato **M**.

[3] G. Giuliani, Scienza, fisica, filosofia e senso comune, *Giornale di Fisica* **48** 303-322 (2007).

[4] G. Giuliani, On realism and quantum mechanics, *Il Nuovo Cimento* **122 B** 267-276 (2007).

MQ, interpretazioni (?)

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

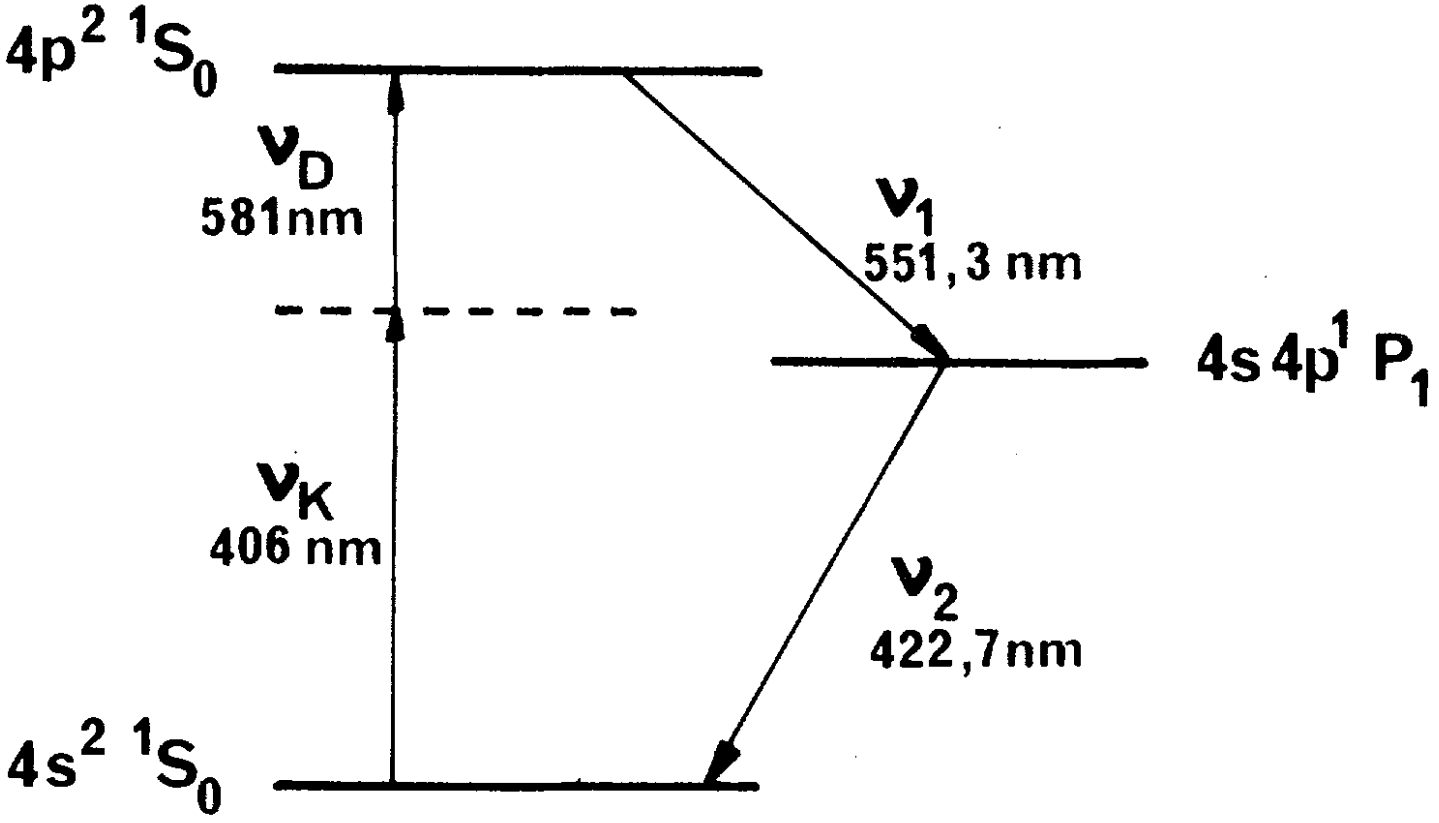
- Il postulato **M**, applicato a oggetti definiti, può essere falsificato. Infatti...

MQ, interpretazioni (?)

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

- Il postulato **M**, applicato a oggetti definiti, può essere falsificato. Infatti...
- Supponiamo che un atomo emetta, in cascata, una coppia di fotoni: il primo fotone, di energia E_1, è emesso passando da uno stato iniziale con $J = 0$ ad uno stato intermedio con $J = 1$; il secondo fotone, di energia E_2, passando dallo stato intermedio con $J = 1$ ad uno stato finale con $J = 0$. La conservazione del momento angolare implica che i due fotoni sono entrambi polarizzati $|R>$ o $|L>$.

Livelli energetici del calcio coinvolti nell'emissione di due fotoni in cascata.



MQ, interpretazioni (?)

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

- Supponiamo che una coppia di questi fotoni 'gemelli' sia emessa in direzioni opposte lungo l'asse z. Supponiamo inoltre che un filtro lasci passare solo i fotoni di energia E_1 lungo la direzione $+z$, mentre un altro filtro lasci passare solo i fotoni di energia E_2 lungo la direzione $-z$. Supponiamo infine che la frequenza di emissione delle coppie sia tale che solo una coppia alla volta sia in volo tra sorgente e rivelatori.

MQ, interpretazioni (?)

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

- Supponiamo che una coppia di questi fotoni 'gemelli' sia emessa in direzioni opposte lungo l'asse z. Supponiamo inoltre che un filtro lasci passare solo i fotoni di energia E_1 lungo la direzione $+z$, mentre un altro filtro lasci passare solo i fotoni di energia E_2 lungo la direzione $-z$. Supponiamo infine che la frequenza di emissione delle coppie sia tale che solo una coppia alla volta sia in volo tra sorgente e rivelatori.
- Inseriamo ora lungo la direzione $\pm z$ un analizzatore costituito da una lamina a quarto d'onda e da un polarizzatore il cui asse privilegiato sia ruotato di $+\pi/4$ rispetto all'asse ottico della lamina.

MQ, interpretazioni (?)

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

- L'analizzatore lascerà passare solo fotoni che prima dell'analizzatore, cioè prima della misura, sono fotoni $|R>$.

MQ, interpretazioni (?)

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

- L'analizzatore lascerà passare solo fotoni che prima dell'analizzatore, cioè prima della misura, sono fotoni $|R>$.
- Se lungo la direzione $-z$ poniamo un analizzatore identico, i due rivelatori emetteranno un click in coincidenza.

MQ, interpretazioni (?)

Esempio di "interpretazione" dell'algoritmo 'vuoto'

- L'analizzatore lascerà passare solo fotoni che prima dell'analizzatore, cioè prima della misura, sono fotoni $|R>$.
- Se lungo la direzione $-z$ poniamo un analizzatore identico, i due rivelatori emetteranno un click in coincidenza.
- Se, invece l'analizzatore posto lungo $-z$ è tale da lasciar passare solo fotoni $|L>$, solo uno dei due rivelatori emetterà un click.

Prima della misura

Una strana assunzione[5,6]

- Come abbiamo visto, le leggi di conservazione indicano che i fotoni gemelli emessi in cascata hanno una polarizzazione definita: entrambi $|R>$ o $|L>$.

Prima della misura

Una strana assunzione[5,6]

- Come abbiamo visto, le leggi di conservazione indicano che i fotoni gemelli emessi in cascata hanno una polarizzazione definita: entrambi $|R>$ o $|L>$.
- Abbiamo inoltre indicato come, mediante una misura, sia possibile verificare questa predizione

Prima della misura

Una strana assunzione[5,6]

- Come abbiamo visto, le leggi di conservazione indicano che i fotoni gemelli emessi in cascata hanno una polarizzazione definita: entrambi $|R>$ o $|L>$.
- Abbiamo inoltre indicato come, mediante una misura, sia possibile verificare questa predizione
- Ciò non ostante, si afferma che, se i fotoni hanno una polarizzazione definita prima della misura, allora essi non possono descritti da uno stato puro (sovrapposizione di autostati) ma da una miscela

Prima della misura

Una strana assunzione[5,6]

- Come abbiamo visto, le leggi di conservazione indicano che i fotoni gemelli emessi in cascata hanno una polarizzazione definita: entrambi $|R>$ o $|L>$.
- Abbiamo inoltre indicato come, mediante una misura, sia possibile verificare questa predizione
- Ciò non ostante, si afferma che, se i fotoni hanno una polarizzazione definita prima della misura, allora essi non possono descritti da uno stato puro (sovrapposizione di autostati) ma da una miscela
- Abbiamo invece visto, nel caso di fotoni polarizzati linearmente, come essi vengano normalmente descritti mediante uno stato puro (sovrapposizione di autostati)

Prima della misura

Una strana assunzione[5,6]

- Come abbiamo visto, le leggi di conservazione indicano che i fotoni gemelli emessi in cascata hanno una polarizzazione definita: entrambi $|R>$ o $|L>$.
- Abbiamo inoltre indicato come, mediante una misura, sia possibile verificare questa predizione
- Ciò non ostante, si afferma che, se i fotoni hanno una polarizzazione definita prima della misura, allora essi non possono descritti da uno stato puro (sovrapposizione di autostati) ma da una miscela
- Abbiamo invece visto, nel caso di fotoni polarizzati linearmente, come essi vengano normalmente descritti mediante uno stato puro (sovrapposizione di autostati)
- Queste contraddizioni nascono dall'assunto secondo cui, prima della misura, una grandezza fisica non ha un valore definito.

Regola di sovrapposizione nell'Elettromagnetismo

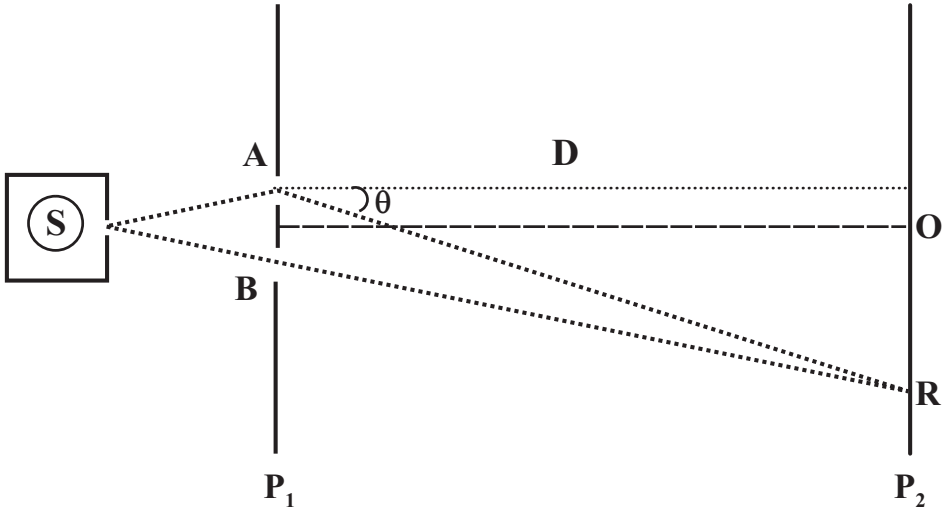
Esperimento delle due fenditure

- $$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \qquad I \propto E^2$$

Regola di sovrapposizione nell'Elettromagnetismo

Esperimento delle due fenditure

- $$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \qquad I \propto E^2$$

- 

Esperimento delle due fenditure

Qual'è il percorso dell'energia? [7,8]

- La teoria prevede correttamente quale è la distribuzione di energia sullo schermo; ma...

Esperimento delle due fenditure

Qual'è il percorso dell'energia? [7,8]

- La teoria prevede correttamente quale è la distribuzione di energia sullo schermo; ma...
- non è in grado di dire quale sia il percorso dell'energia tra le due fenditure e lo schermo e...

Esperimento delle due fenditure

Qual'è il percorso dell'energia? [7,8]

- La teoria prevede correttamente quale è la distribuzione di energia sullo schermo; ma...
- non è in grado di dire quale sia il percorso dell'energia tra le due fenditure e lo schermo e...
- quindi, quale sia il percorso dell'energia tra la sorgente e lo schermo

Esperimento delle due fenditure

Qual'è il percorso dell'energia? [7,8]

- La teoria prevede correttamente quale è la distribuzione di energia sullo schermo; ma...
- non è in grado di dire quale sia il percorso dell'energia tra le due fenditure e lo schermo e...
- quindi, quale sia il percorso dell'energia tra la sorgente e lo schermo
- E' pertanto erroneo pensare che questa caratteristica sia una novità introdotta nella descrizione dell'esperimento dalla Meccanica Quantistica.

Esperimento delle due fenditure

Qual'è il percorso dell'energia? [7,8]

- La teoria prevede correttamente quale è la distribuzione di energia sullo schermo; ma...
- non è in grado di dire quale sia il percorso dell'energia tra le due fenditure e lo schermo e...
- quindi, quale sia il percorso dell'energia tra la sorgente e lo schermo
- E' pertanto erroneo pensare che questa caratteristica sia una novità introdotta nella descrizione dell'esperimento dalla Meccanica Quantistica.
- Nella descrizione maxwelliana, l'impossibilità di dire quale sia il percorso dell'energia è dovuto al fatto che, in un punto qualsiasi, i campi vettoriali si sommano, ma l'energia è proporzionale al quadrato del modulo del campo risultante.

Esperimento delle due fenditure

Qual'è il percorso dell'energia? [7,8]

- La teoria prevede correttamente quale è la distribuzione di energia sullo schermo; ma...
- non è in grado di dire quale sia il percorso dell'energia tra le due fenditure e lo schermo e...
- quindi, quale sia il percorso dell'energia tra la sorgente e lo schermo
- E' pertanto erroneo pensare che questa caratteristica sia una novità introdotta nella descrizione dell'esperimento dalla Meccanica Quantistica.
- Nella descrizione maxwelliana, l'impossibilità di dire quale sia il percorso dell'energia è dovuto al fatto che, in un punto qualsiasi, i campi vettoriali si sommano, ma l'energia è proporzionale al quadrato del modulo del campo risultante.
- E' quindi interessante analizzare la struttura del formalismo matematico usato nelle due descrizioni

Intensità $\Leftrightarrow$ Probabilità

Elettromagnetismo $\Leftrightarrow$ Meccanica quantistica

La descrizione quantistica è un adattamento ai fotoni di quella usata da Feynman per l'interferenza di elettroni [9]

Tabella: Descrizione maxwelliana e quantistica dell'interferenza della luce.

Elettromagnetica	$\Leftrightarrow$	**Quantistica**
$\lambda = c/\nu$	$\Leftrightarrow$	$\lambda = h/p$
Campo elettrico $\vec{E}$	$\Leftrightarrow$	Ampiezza di probabilità $\eta = Ce^{i\phi}$
$\vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_B$	$\Leftrightarrow$	$\eta = \eta_A + \eta_B$
Intensità $\propto E^2$	$\Leftrightarrow$	Probabilità $\propto \lvert\eta\rvert^2$

[9] R. Feynman, R. Leighton e M. Sands, *The Feynman lectures on Physics*, (Addison - Wesley, Reading 1963) vol. II pp. 15 - 7, 15 - 14.

Intensità $\Leftrightarrow$ Probabilità

Elettromagnetismo $\Leftrightarrow$ Meccanica quantistica

- La fase ϕ è posta uguale a $2\pi l/\lambda$ dove l è la lunghezza del cammino percorso dal fotone e λ la lunghezza d'onda di de Broglie.

Intensità $\Leftrightarrow$ Probabilità

Elettromagnetismo $\Leftrightarrow$ Meccanica quantistica

- La fase ϕ è posta uguale a $2\pi l/\lambda$ dove l è la lunghezza del cammino percorso dal fotone e λ la lunghezza d'onda di de Broglie.
- In questo modo, la descrizione quantistica 'recupera' una grandezza ondulatoria

Intensità $\Leftrightarrow$ Probabilità

Elettromagnetismo $\Leftrightarrow$ Meccanica quantistica

- La fase ϕ è posta uguale a $2\pi l/\lambda$ dove l è la lunghezza del cammino percorso dal fotone e λ la lunghezza d'onda di de Broglie.
- In questo modo, la descrizione quantistica 'recupera' una grandezza ondulatoria
- I due formalismi matematici hanno la stessa struttura. In particolare, all'intensità classica in un punto, corrisponde la probabilità di trovare un fotone in quel punto.

Intensità $\Leftrightarrow$ Probabilità

Elettromagnetismo $\Leftrightarrow$ Meccanica quantistica

- La fase ϕ è posta uguale a $2\pi l/\lambda$ dove l è la lunghezza del cammino percorso dal fotone e λ la lunghezza d'onda di de Broglie.
- In questo modo, la descrizione quantistica 'recupera' una grandezza ondulatoria
- I due formalismi matematici hanno la stessa struttura. In particolare, all'intensità classica in un punto, corrisponde la probabilità di trovare un fotone in quel punto.
- L'identità delle due strutture matematiche suggerisce che la descrizione maxwelliana possa predire la probabilità di trovare un fotone in un punto dello schermo se si assume *ad hoc* che questa probabilità sia proporzionale all'intensità maxwelliana in quel punto.

Intensità $\Leftrightarrow$ Probabilità

Elettromagnetismo $\Leftrightarrow$ Meccanica quantistica

- La fase ϕ è posta uguale a $2\pi l/\lambda$ dove l è la lunghezza del cammino percorso dal fotone e λ la lunghezza d'onda di de Broglie.
- In questo modo, la descrizione quantistica 'recupera' una grandezza ondulatoria
- I due formalismi matematici hanno la stessa struttura. In particolare, all'intensità classica in un punto, corrisponde la probabilità di trovare un fotone in quel punto.
- L'identità delle due strutture matematiche suggerisce che la descrizione maxwelliana possa predire la probabilità di trovare un fotone in un punto dello schermo se si assume *ad hoc* che questa probabilità sia proporzionale all'intensità maxwelliana in quel punto.
- Quindi: intensità classica $\Leftrightarrow$ probabilità quantistica

Intensità $\Leftrightarrow$ Probabilità

Elettromagnetismo $\Leftrightarrow$ Meccanica quantistica

- Quindi, le predizioni della descrizione maxwelliana sono corrette se il numero di fotoni coinvolti è statisticamente significativo.

Intensità ⇔ Probabilità

Elettromagnetismo ⇔ Meccanica quantistica

- Quindi, le predizioni della descrizione maxwelliana sono corrette se il numero di fotoni coinvolti è statisticamente significativo.
- Cioé: un numero statisticamente significativo di fotoni può essere descritto come un'onda

Intensità ⇔ Probabilità

Elettromagnetismo ⇔ Meccanica quantistica

- Quindi, le predizioni della descrizione maxwelliana sono corrette se il numero di fotoni coinvolti è statisticamente significativo.
- Cioé: un numero statisticamente significativo di fotoni può essere descritto come un'onda
- Ma . . . non sappiamo perché

Esperimento con un solo fotone alla volta [10]

[10] Jacques V. et al., Single-photon wavefront–splitting interference, *Eur. Phys. J. D*, **35** 561-565 (2005).

Intensità $\Leftrightarrow$ Probabilità

Esempi

- Interferenza onde elettromagnetiche: intensità dell'onda $\Leftrightarrow$ probabilità di rivelare un fotone

Intensità $\Leftrightarrow$ Probabilità

Esempi

- Interferenza onde elettromagnetiche: intensità dell'onda $\Leftrightarrow$ probabilità di rivelare un fotone
- Diffusione (an)elastica raggi X o Gamma. Intensità diffusa alla lunghezza d'onda $\lambda \Rightarrow$ probabilità di emissione di un fotone di energia $hc/\lambda \Rightarrow$ effetto Mössbauer (emissione/assorbimento di un fotone senza rinculo)

Intensità $\Leftrightarrow$ Probabilità

Esempi

- Interferenza onde elettromagnetiche: intensità dell'onda $\Leftrightarrow$ probabilità di rivelare un fotone
- Diffusione (an)elastica raggi X o Gamma. Intensità diffusa alla lunghezza d'onda $\lambda \Rightarrow$ probabilità di emissione di un fotone di energia $hc/\lambda \Rightarrow$ effetto Mössbauer (emissione/assorbimento di un fotone senza rinculo)
- Raffreddamento laser: intensità della riga di assorbimento (lorentziana) corrispondente all'energia $E \Leftrightarrow$ probabilità di assorbimento di un fotone corrispondente all'energia di transizione E

Intensità $\Leftrightarrow$ Probabilità

Esempi

- Interferenza onde elettromagnetiche: intensità dell'onda $\Leftrightarrow$ probabilità di rivelare un fotone
- Diffusione (an)elastica raggi X o Gamma. Intensità diffusa alla lunghezza d'onda $\lambda \Rightarrow$ probabilità di emissione di un fotone di energia $hc/\lambda \Rightarrow$ effetto Mössbauer (emissione/assorbimento di un fotone senza rinculo)
- Raffreddamento laser: intensità della riga di assorbimento (lorentziana) corrispondente all'energia $E \Leftrightarrow$ probabilità di assorbimento di un fotone corrispondente all'energia di transizione E
- Polarizzazione della luce: quadrato della componente del campo elettrico lungo la direzione privilegiata di un polarizzatore lineare $\Leftrightarrow$ probabilità che il fotone passi attraverso il polarizzatore

Probabilità e causalità

Dispositivi quantistici

- Il funzionamento di tutti i dispositivi elettronici o optoelettronici è descritto dalla MQ: i processi elementari su cui si basano hanno una probabilità di verificarsi minore di uno

Probabilità e causalità

Dispositivi quantistici

- Il funzionamento di tutti i dispositivi elettronici o optoelettronici è descritto dalla MQ: i processi elementari su cui si basano hanno una probabilità di verificarsi minore di uno
- Ciò non ostante, il loro funzionamento presuppone l'esistenza di catene causali

Probabilità e causalità

Dispositivi quantistici

- Il funzionamento di tutti i dispositivi elettronici o optoelettronici è descritto dalla MQ: i processi elementari su cui si basano hanno una probabilità di verificarsi minore di uno
- Ciò non ostante, il loro funzionamento presuppone l'esistenza di catene causali
- Quando un dispositivo 'non funziona', nessuno pensa che ciò sia dovuto alla rottura di una catena causale
- Questo atteggiamento è corretto dal punto di vista epistemologico!

Probabilità e causalità

Dispositivi quantistici

- Il funzionamento di tutti i dispositivi elettronici o optoelettronici è descritto dalla MQ: i processi elementari su cui si basano hanno una probabilità di verificarsi minore di uno
- Ciò non ostante, il loro funzionamento presuppone l'esistenza di catene causali
- Quando un dispositivo 'non funziona', nessuno pensa che ciò sia dovuto alla rottura di una catena causale
- Questo atteggiamento è corretto dal punto di vista epistemologico!
- Rimane aperta la questione se il singolo processo elementare possa essere ricondotto ad una connessione causale

Solo una questione di metodo?

Causalità

- Principio di Causalità.

Solo una questione di metodo?

Causalità

- Principio di Causalità.
- E' un criterio organizzatore dell'esperienza comune e dell'indagine scientifica

Solo una questione di metodo?

Causalità

- Principio di Causalità.
- E' un criterio organizzatore dell'esperienza comune e dell'indagine scientifica
- permette di effettuare previsioni

Solo una questione di metodo?

Causalità

- Principio di Causalità.
- E' un criterio organizzatore dell'esperienza comune e dell'indagine scientifica
- permette di effettuare previsioni
- costituisce un'assunzione metodologica tesa alla ricerca delle connessioni causali che...

Solo una questione di metodo?

Causalità

- Principio di Causalità.
- E' un criterio organizzatore dell'esperienza comune e dell'indagine scientifica
- permette di effettuare previsioni
- costituisce un'assunzione metodologica tesa alla ricerca delle connessioni causali che...
- ha svolto un ruolo propulsivo fondamentale nello sviluppo della nostra specie e della scienza.

Solo una questione di metodo?

Causalità

- Principio di Causalità.
- E' un criterio organizzatore dell'esperienza comune e dell'indagine scientifica
- permette di effettuare previsioni
- costituisce un'assunzione metodologica tesa alla ricerca delle connessioni causali che...
- ha svolto un ruolo propulsivo fondamentale nello sviluppo della nostra specie e della scienza.
- Pertanto, non è razionale abbandonare la ricerca delle connessioni causali anche nei processi elementari

Solo una questione di metodo?

Causalità

- Principio di Causalità.
- E' un criterio organizzatore dell'esperienza comune e dell'indagine scientifica
- permette di effettuare previsioni
- costituisce un'assunzione metodologica tesa alla ricerca delle connessioni causali che...
- ha svolto un ruolo propulsivo fondamentale nello sviluppo della nostra specie e della scienza.
- Pertanto, non è razionale abbandonare la ricerca delle connessioni causali anche nei processi elementari
- Quindi, "buone connessioni" e...

Qui, il numero dei fotoni è statisticamente significativo. . .