

# Elettromagnetismo, relatività e quanti

Giuseppe Giuliani

Cagliari, 20–24 febbraio 2017

- Questa presentazione usa ampiamente il materiale contenuto in

- Questa presentazione usa ampiamente il materiale contenuto in
- Biagio Buonauro e Giuseppe Giuliani 2016 Wave and photon descriptions of light: historical highlights, epistemological aspects and teaching practices *Eur. J. Phys.* **37** 055303

# Di cosa parliamo?

- Premessa epistemologica: cosa vuol dire 'interpretare' una teoria (o un'equazione)

# Di cosa parliamo?

- Premessa epistemologica: cosa vuol dire 'interpretare' una teoria (o un'equazione)
- Elettromagnetismo maxwelliano: una teoria persistente

# Di cosa parliamo?

- Premessa epistemologica: cosa vuol dire 'interpretare' una teoria (o un'equazione)
- Elettromagnetismo maxwelliano: una teoria persistente
- Il suo rapporto con la relatività speciale

# Di cosa parliamo?

- Premessa epistemologica: cosa vuol dire 'interpretare' una teoria (o un'equazione)
- Elettromagnetismo maxwelliano: una teoria persistente
- Il suo rapporto con la relatività speciale
- La sua compatibilità con il concetto di quanto di luce (fotone)

# Di cosa parliamo?

- Premessa epistemologica: cosa vuol dire 'interpretare' una teoria (o un'equazione)
- Elettromagnetismo maxwelliano: una teoria persistente
- Il suo rapporto con la relatività speciale
- La sua compatibilità con il concetto di quanto di luce (fotone)
- Le connessioni causali in fisica classica e fisica quantistica

# Di cosa parliamo?

- Premessa epistemologica: cosa vuol dire 'interpretare' una teoria (o un'equazione)
- Elettromagnetismo maxwelliano: una teoria persistente
- Il suo rapporto con la relatività speciale
- La sua compatibilità con il concetto di quanto di luce (fotone)
- Le connessioni causali in fisica classica e fisica quantistica
- Questi argomenti **NON** verranno trattati dal punto di vista storico

# Di cosa parliamo?

- Premessa epistemologica: cosa vuol dire 'interpretare' una teoria (o un'equazione)
- Elettromagnetismo maxwelliano: una teoria persistente
- Il suo rapporto con la relatività speciale
- La sua compatibilità con il concetto di quanto di luce (fotone)
- Le connessioni causali in fisica classica e fisica quantistica
- Questi argomenti **NON** verranno trattati dal punto di vista storico
- Invece, ci concentreremo sulle connessioni concettuali e il substrato epistemologico

# Interpretazione di una teoria fisica (di una equazione)

Interpretare una teoria significa:

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)

# Interpretazione di una teoria fisica (di una equazione)

Interpretare una teoria significa:

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)
- Indicare le procedure per misurare le grandezze fisiche usate dalla teoria (equazione)

# Interpretazione di una teoria fisica (di una equazione)

Interpretare una teoria significa:

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)
- Indicare le procedure per misurare le grandezze fisiche usate dalla teoria (equazione)
- Questa definizione di 'interpretazione' è, di fatto, adottata dai fisici in laboratorio e nella elaborazione delle teorie

# Interpretazione di una teoria fisica (di una equazione)

Interpretare una teoria significa:

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)
- Indicare le procedure per misurare le grandezze fisiche usate dalla teoria (equazione)
- Questa definizione di 'interpretazione' è, di fatto, adottata dai fisici in laboratorio e nella elaborazione delle teorie
- Essa si applica anche alle teorie della fisica quantistica

# Interpretazione di una equazione: la legge della dinamica

- Come interpretiamo l'equazione:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \quad (1)$$

# Interpretazione di una equazione: la legge della dinamica

- Come interpretiamo l'equazione:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \quad (1)$$

- La forza 'causa' la variazione della quantità di moto. Esempio: palla che cade in un campo gravitazionale

# Interpretazione di una equazione: la legge della dinamica

- Come interpretiamo l'equazione:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \quad (1)$$

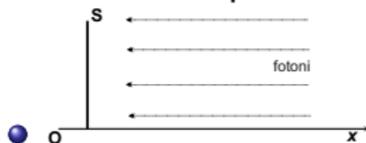
- La forza 'causa' la variazione della quantità di moto. Esempio: palla che cade in un campo gravitazionale
- La variazione della quantità di moto genera una forza che, a sua volta, produce una variazione della quantità di moto

# Interpretazione di una equazione: la legge della dinamica

- Come interpretiamo l'equazione:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \quad (1)$$

- La forza 'causa' la variazione della quantità di moto. Esempio: palla che cade in un campo gravitazionale
- La variazione della quantità di moto genera una forza che, a sua volta, produce una variazione della quantità di moto



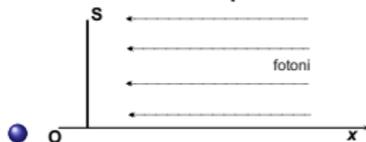
**Figura:** La superficie  $S$ , completamente assorbente, è investita da un fascio monocromatico di fotoni. La variazione della quantità di moto dei fotoni assorbiti genera una forza sulla superficie  $S$

# Interpretazione di una equazione: la legge della dinamica

- Come interpretiamo l'equazione:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \quad (1)$$

- La forza 'causa' la variazione della quantità di moto. Esempio: palla che cade in un campo gravitazionale
- La variazione della quantità di moto genera una forza che, a sua volta, produce una variazione della quantità di moto



**Figura:** La superficie  $S$ , completamente assorbente, è investita da un fascio monocromatico di fotoni. La variazione della quantità di moto dei fotoni assorbiti genera una forza sulla superficie  $S$

- In questo caso la forza può essere esclusa dalla descrizione: è sufficiente la conservazione della quantità di moto

# 'Interpretazione' e MQ I

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)

# 'Interpretazione' e MQ I

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)
- Indicare le procedure per misurare le grandezze fisiche usate dalla teoria (equazione)

# 'Interpretazione' e MQ I

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)
- Indicare le procedure per misurare le grandezze fisiche usate dalla teoria (equazione)

- 

$$\frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} \hat{H} \Psi(\vec{r}, t) \quad (2)$$

# 'Interpretazione' e MQ I

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)
- Indicare le procedure per misurare le grandezze fisiche usate dalla teoria (equazione)

- $$\frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} \hat{H} \Psi(\vec{r}, t) \quad (2)$$

- Questa equazione ha la stessa struttura matematica della legge della dinamica

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}$$

# 'Interpretazione' e MQ I

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)
- Indicare le procedure per misurare le grandezze fisiche usate dalla teoria (equazione)

$$\frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} \hat{H} \Psi(\vec{r}, t) \quad (2)$$

- Questa equazione ha la stessa struttura matematica della legge della dinamica

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}$$

- Mentre la legge della dinamica correla due grandezze fisiche (misurabili), l'equazione di Schrödinger correla la variazione temporale della funzione d'onda di un sistema fisico a se stessa

# 'Interpretazione' e MQ I

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)
- Indicare le procedure per misurare le grandezze fisiche usate dalla teoria (equazione)

$$\frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} \hat{H} \Psi(\vec{r}, t) \quad (2)$$

- Questa equazione ha la stessa struttura matematica della legge della dinamica

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}$$

- Mentre la legge della dinamica correla due grandezze fisiche (misurabili), l'equazione di Schrödinger correla la variazione temporale della funzione d'onda di un sistema fisico a se stessa
- Lo stato di un sistema fisico all'istante  $t$  determina (causa) la sua evoluzione temporale

# 'Interpretazione' e MQ II. Atomo di idrogeno

- Atomo di idrogeno

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi(r, \theta, \phi) = E\psi(r, \theta, \phi) \quad (3)$$

# 'Interpretazione' e MQ II. Atomo di idrogeno

- Atomo di idrogeno

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi(r, \theta, \phi) = E\psi(r, \theta, \phi) \quad (3)$$

- L'interazione coulombiana determina (causa) i valori permessi dell'energia dell'elettrone (stati stazionari)

# 'Interpretazione' e MQ II. Atomo di idrogeno

- Atomo di idrogeno

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi(r, \theta, \phi) = E\psi(r, \theta, \phi) \quad (3)$$

- L'interazione coulombiana determina (causa) i valori permessi dell'energia dell'elettrone (stati stazionari)
- L'interazione spin-orbita causa una variazione nella struttura dei livelli energetici

# 'Interpretazione' e MQ II. Atomo di idrogeno

- Atomo di idrogeno

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi(r, \theta, \phi) = E\psi(r, \theta, \phi) \quad (3)$$

- L'interazione coulombiana determina (causa) i valori permessi dell'energia dell'elettrone (stati stazionari)
- L'interazione spin-orbita causa una variazione nella struttura dei livelli energetici
- Le fluttuazioni e le polarizzazioni del 'vuoto' causano ulteriori variazioni nei livelli energetici (Lamb shift)

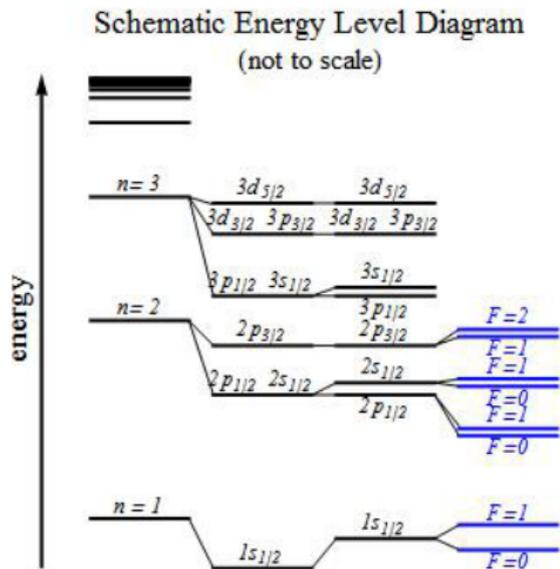
# 'Interpretazione' e MQ II. Atomo di idrogeno

- Atomo di idrogeno

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi(r, \theta, \phi) = E\psi(r, \theta, \phi) \quad (3)$$

- L'interazione coulombiana determina (causa) i valori permessi dell'energia dell'elettrone (stati stazionari)
- L'interazione spin-orbita causa una variazione nella struttura dei livelli energetici
- Le fluttuazioni e le polarizzazioni del 'vuoto' causano ulteriori variazioni nei livelli energetici (Lamb shift)
- Ulteriori variazioni sono causate dall'interazione tra il momento magnetico dell'elettrone e del protone (interazione iperfine)

# 'Interpretazione' e MQ III. Livelli dell'atomo di idrogeno



nonrelativistic Dirac equation Lamb shift hvoerfine structure

# Dispositivi quantistici e causalità

- I dispositivi quantistici obbediscono a leggi macroscopiche causali. Se così non fosse, tutta la nostra tecnologia sarebbe impossibile.

# Dispositivi quantistici e causalità

- I dispositivi quantistici obbediscono a leggi macroscopiche causali. Se così non fosse, tutta la nostra tecnologia sarebbe impossibile.
- Esempio. Il LED (Light Emitting Diode). Il LED è costituito da una giunzione p-n di un semiconduttore opportuno funzionante in polarizzazione diretta.

## Dispositivi quantistici e causalità

- I dispositivi quantistici obbediscono a leggi macroscopiche causali. Se così non fosse, tutta la nostra tecnologia sarebbe impossibile.
- Esempio. Il LED (Light Emitting Diode). Il LED è costituito da una giunzione p-n di un semiconduttore opportuno funzionante in polarizzazione diretta.
- L'applicazione di una differenza di potenziale positiva tra la parte  $p$  e la parte  $n$  della giunzione *causa* una corrente di elettroni dalla parte  $n$  alla parte  $p$  e di buche in direzione opposta. La corrente totale è data da:

$$J = J_i(e^{e\Delta V/kT} - 1); \quad J_i = \frac{eD_n n_p}{L_n} + \frac{eD_p p_n}{L_p} \quad (4)$$

# Dispositivi quantistici e causalità

- I dispositivi quantistici obbediscono a leggi macroscopiche causali. Se così non fosse, tutta la nostra tecnologia sarebbe impossibile.
- Esempio. Il LED (Light Emitting Diode). Il LED è costituito da una giunzione p-n di un semiconduttore opportuno funzionante in polarizzazione diretta.
- L'applicazione di una differenza di potenziale positiva tra la parte  $p$  e la parte  $n$  della giunzione *causa* una corrente di elettroni dalla parte  $n$  alla parte  $p$  e di buche in direzione opposta. La corrente totale è data da:

$$J = J_i(e^{e\Delta V/kT} - 1); \quad J_i = \frac{eD_n n_p}{L_n} + \frac{eD_p p_n}{L_p} \quad (4)$$

- La ricombinazione di elettroni e buche *causa* l'emissione di fotoni.

## Dispositivi quantistici e causalità

- I dispositivi quantistici obbediscono a leggi macroscopiche causali. Se così non fosse, tutta la nostra tecnologia sarebbe impossibile.
- Esempio. Il LED (Light Emitting Diode). Il LED è costituito da una giunzione p-n di un semiconduttore opportuno funzionante in polarizzazione diretta.
- L'applicazione di una differenza di potenziale positiva tra la parte  $p$  e la parte  $n$  della giunzione *causa* una corrente di elettroni dalla parte  $n$  alla parte  $p$  e di buche in direzione opposta. La corrente totale è data da:

$$J = J_i(e^{e\Delta V/kT} - 1); \quad J_i = \frac{eD_n n_p}{L_n} + \frac{eD_p p_n}{L_p} \quad (4)$$

- La ricombinazione di elettroni e buche *causa* l'emissione di fotoni.
- Ogni singolo evento quantistico che si verifica in un LED ha una probabilità di verificarsi minore di uno. Ovviamente, ai fini del funzionamento del LED, è irrilevante se questa probabilità è da noi considerata epistemica o ontica.

# La teoria di Maxwell

Alla domanda, “Che cosa è la teoria di Maxwell?”, io non so rispondere in modo più conciso o più preciso che dicendo: “La teoria di Maxwell è il sistema di equazioni di Maxwell”.

Heinrich Hertz (*Electric Waves*, 1892)

# Le equazioni di Maxwell



$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (7)$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (8)$$

dove  $\varepsilon_0$  e  $\mu_0$  sono, rispettivamente, la *costante dielettrica* e la *permeabilità magnetica* del vuoto.

# Le equazioni di Maxwell



$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (7)$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (8)$$

dove  $\varepsilon_0$  e  $\mu_0$  sono, rispettivamente, la *costante dielettrica* e la *permeabilità magnetica* del vuoto.

- I due campi vettoriali  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  sono tali che la forza che si esercita su una carica puntiforme  $q$ , dotata di velocità  $\vec{v}$ , è:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (9)$$

# La persistenza della teoria di Maxwell

Il sistema di equazioni di Maxwell è sopravvissuto

- Alla scoperta della natura discreta della carica elettrica (1897)

# La persistenza della teoria di Maxwell

Il sistema di equazioni di Maxwell è sopravvissuto

- Alla scoperta della natura discreta della carica elettrica (1897)
- Alla scomparsa dell'Etere (1905)

# La persistenza della teoria di Maxwell

Il sistema di equazioni di Maxwell è sopravvissuto

- Alla scoperta della natura discreta della carica elettrica (1897)
- Alla scomparsa dell'Etere (1905)
- Alla nascita della relatività speciale (1905)

# La persistenza della teoria di Maxwell

Il sistema di equazioni di Maxwell è sopravvissuto

- Alla scoperta della natura discreta della carica elettrica (1897)
- Alla scomparsa dell'Etere (1905)
- Alla nascita della relatività speciale (1905)
- Al riemergere della natura corpuscolare della luce (1905)

# La persistenza della teoria di Maxwell

Il sistema di equazioni di Maxwell è sopravvissuto

- Alla scoperta della natura discreta della carica elettrica (1897)
- Alla scomparsa dell'Etere (1905)
- Alla nascita della relatività speciale (1905)
- Al riemergere della natura corpuscolare della luce (1905)
- Infine, sottoponendo le equazioni di Maxwell ad un procedimento di quantizzazione, si posero le basi della elettrodinamica quantistica (1930 circa)

# La persistenza della teoria di Maxwell

Il sistema di equazioni di Maxwell è sopravvissuto

- Alla scoperta della natura discreta della carica elettrica (1897)
- Alla scomparsa dell'Etere (1905)
- Alla nascita della relatività speciale (1905)
- Al riemergere della natura corpuscolare della luce (1905)
- Infine, sottoponendo le equazioni di Maxwell ad un procedimento di quantizzazione, si posero le basi della elettrodinamica quantistica (1930 circa)
- Nella storia della fisica, non esiste forse altra teoria che abbia superato così tante sfide

# La persistenza della teoria di Maxwell

Il sistema di equazioni di Maxwell è sopravvissuto

- Alla scoperta della natura discreta della carica elettrica (1897)
- Alla scomparsa dell'Etere (1905)
- Alla nascita della relatività speciale (1905)
- Al riemergere della natura corpuscolare della luce (1905)
- Infine, sottoponendo le equazioni di Maxwell ad un procedimento di quantizzazione, si posero le basi della elettrodinamica quantistica (1930 circa)
- Nella storia della fisica, non esiste forse altra teoria che abbia superato così tante sfide
- Ciò non ostante, la teoria di Maxwell, come ogni altra teoria, ha un dominio di applicazione limitato

# Interpretazione della teoria di Maxwell

Se consideriamo il sistema delle equazioni di Maxwell, abbiamo due possibilità:

- I campi producono le cariche. Per quanto possa sembrare a noi strano, questa fu l'opzione di Hertz (e, in Italia, di Galileo Ferraris)

# Interpretazione della teoria di Maxwell

Se consideriamo il sistema delle equazioni di Maxwell, abbiamo due possibilità:

- I campi producono le cariche. Per quanto possa sembrare a noi strano, questa fu l'opzione di Hertz (e, in Italia, di Galileo Ferraris)
- Oppure: Le cariche producono i campi. In questo caso, le connessioni causali possono essere rappresentate dallo schema:

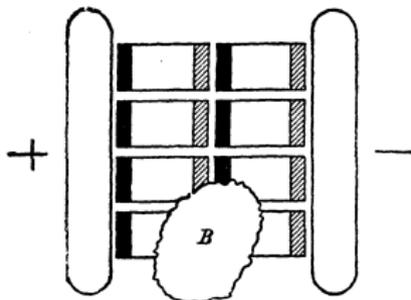
# Interpretazione della teoria di Maxwell

Se consideriamo il sistema delle equazioni di Maxwell, abbiamo due possibilità:

- I campi producono le cariche. Per quanto possa sembrare a noi strano, questa fu l'opzione di Hertz (e, in Italia, di Galileo Ferraris)
- Oppure: Le cariche producono i campi. In questo caso, le connessioni causali possono essere rappresentate dallo schema:
- cariche 'sorgenti'  $\Rightarrow$  campi  $\Rightarrow$  forze sulle cariche 'oggetto'

## L'interpretazione di Hertz

Hertz prendeva in considerazione il caso di un condensatore piano e mostrava come, all'epoca, fossero possibili quattro 'rappresentazioni' della fisica del condensatore caratterizzate dal passaggio da una 'rappresentazione' di 'azione a distanza' pura ad una 'rappresentazione' pura di 'campo'. Quest'ultima, era schematizzata dalla figura seguente.



**Figura:** Le cariche positive sono indicate dalle zone nere; quelle negative dalle zone tratteggiate. Sulle armature non ci sono cariche libere, ma solo cariche di polarizzazione: queste compaiono come risultato dello stato di polarizzazione dell'Etere o del mezzo materiale.

# La teoria di Maxwell è una teoria relativistica I

- Le sue equazioni sono invarianti per trasformazioni di Lorentz

# La teoria di Maxwell è una teoria relativistica I

- Le sue equazioni sono invarianti per trasformazioni di Lorentz
- Einstein (1905) impone questa condizione e ricava le equazioni di trasformazione dei campi

# La teoria di Maxwell è una teoria relativistica II

- Scrivendo le equazioni di Maxwell in funzione dei potenziali

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}; \quad \vec{B} = \text{rot}\vec{A} \quad (10)$$

# La teoria di Maxwell è una teoria relativistica II

- Scrivendo le equazioni di Maxwell in funzione dei potenziali

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}; \quad \vec{B} = \text{rot}\vec{A} \quad (10)$$

- esse appaiono invarianti “a vista”:

$$\boxed{\square\phi_\mu = \mu_0 J_\mu \quad \mu = ct, x, y, z} \quad (11)$$

# La teoria di Maxwell è una teoria relativistica II

- Scrivendo le equazioni di Maxwell in funzione dei potenziali

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}; \quad \vec{B} = \text{rot}\vec{A} \quad (10)$$

- esse appaiono invarianti “a vista”:

$$\boxed{\square\phi_\mu = \mu_0 J_\mu \quad \mu = ct, x, y, z} \quad (11)$$

- $\phi_\mu \equiv \left(\frac{\varphi}{c}, A_i\right); \quad i = x, y, z \quad \text{quadri} - \text{potenziale} \quad (12)$

# La teoria di Maxwell è una teoria relativistica II

- Scrivendo le equazioni di Maxwell in funzione dei potenziali

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}; \quad \vec{B} = \text{rot}\vec{A} \quad (10)$$

- esse appaiono invarianti “a vista”:

$$\boxed{\square\phi_\mu = \mu_0 J_\mu \quad \mu = ct, x, y, z} \quad (11)$$

- 

$$\phi_\mu \equiv \left(\frac{\varphi}{c}, A_i\right); \quad i = x, y, z \quad \text{quadri} - \text{potenziale} \quad (12)$$

- 

$$J_\mu \equiv (\rho c, J_i); \quad i = x, y, z \quad \text{quadri} - \text{corrente} \quad (13)$$

# La teoria di Maxwell è una teoria relativistica II

- Scrivendo le equazioni di Maxwell in funzione dei potenziali

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}; \quad \vec{B} = \text{rot}\vec{A} \quad (10)$$

- esse appaiono invarianti "a vista":

$$\square \phi_\mu = \mu_0 J_\mu \quad \mu = ct, x, y, z \quad (11)$$

- 

$$\phi_\mu \equiv \left( \frac{\varphi}{c}, A_i \right); \quad i = x, y, z \quad \text{quadri} - \text{potenziale} \quad (12)$$

- 

$$J_\mu \equiv (\rho c, J_i); \quad i = x, y, z \quad \text{quadri} - \text{corrente} \quad (13)$$

- 

$$\square \equiv \left( \frac{\partial^2}{\partial (c^2 t^2)} - \nabla^2 \right) \quad \text{operatore di d'Alembert} \quad (14)$$

# Implicazioni dell'invarianza delle equazioni di Maxwell

- La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto è la stessa in ogni sistema di riferimento inerziale

# Implicazioni dell'invarianza delle equazioni di Maxwell

- La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto è la stessa in ogni sistema di riferimento inerziale
- Il postulato della costanza della velocità della luce nella relatività speciale può essere sostituito dal seguente: “Sono valide le equazioni di Maxwell nel vuoto” (Einstein, 1906)

# Energia e frequenza delle onde EM

- L'energia di un'onda elettromagnetica monocromatica contenuta in un volume finito varia, passando da un sistema inerziale ad un altro, come la sua frequenza (Einstein, 1905). Quindi:

$$\mathcal{E} = \langle u \rangle V \propto \nu$$

# Energia e frequenza delle onde EM

- L'energia di un'onda elettromagnetica monocromatica contenuta in un volume finito varia, passando da un sistema inerziale ad un altro, come la sua frequenza (Einstein, 1905). Quindi:

$$\mathcal{E} = \langle u \rangle V \propto \nu$$

- Se  $\langle u \rangle = nh\nu$ , allora  $\mathcal{E} = nh\nu V = Nh\nu \propto \nu$  dove  $N$  è il numero di quanti di luce contenuti nel volume  $V$ .

# Energia e frequenza delle onde EM

- L'energia di un'onda elettromagnetica monocromatica contenuta in un volume finito varia, passando da un sistema inerziale ad un altro, come la sua frequenza (Einstein, 1905). Quindi:

$$\mathcal{E} = \langle u \rangle V \propto \nu$$

- Se  $\langle u \rangle = nh\nu$ , allora  $\mathcal{E} = nh\nu V = Nh\nu \propto \nu$  dove  $N$  è il numero di quanti di luce contenuti nel volume  $V$ .
- Quindi, il concetto di quanto di luce è, formalmente, compatibile con l'elettromagnetismo maxwelliano

# Fotoni in azione: effetto Doppler

- E' possibile ricavare le formule dell'effetto Doppler per la radiazione EM nel vuoto applicando le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto al processo di emissione/assorbimento di un fotone da parte di un atomo/nucleo (Schrödinger 1922, solo emissione)

# Fotoni in azione: effetto Doppler

- E' possibile ricavare le formule dell'effetto Doppler per la radiazione EM nel vuoto applicando le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto al processo di emissione/assorbimento di un fotone da parte di un atomo/nucleo (Schrödinger 1922, solo emissione)
- Questa trattazione 'corpuscolare' permette di descrivere l'emissione/assorbimento di fotoni da parte di atomi/nuclei in volo a velocità relativistiche, l'emissione/assorbimento di fotoni gamma senza rinculo (effetto Mössbauer) su dispositivi rotanti, il raffreddamento laser di atomi a due livelli (Giuliani 2013-2015)

# Fotoni in azione: effetto Doppler

- E' possibile ricavare le formule dell'effetto Doppler per la radiazione EM nel vuoto applicando le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto al processo di emissione/assorbimento di un fotone da parte di un atomo/nucleo (Schrödinger 1922, solo emissione)
- Questa trattazione 'corpuscolare' permette di descrivere l'emissione/assorbimento di fotoni da parte di atomi/nuclei in volo a velocità relativistiche, l'emissione/assorbimento di fotoni gamma senza rinculo (effetto Mössbauer) su dispositivi rotanti, il raffreddamento laser di atomi a due livelli (Giuliani 2013-2015)
- La descrizione ondulatoria dell'effetto Doppler riguarda *solo* la relazione tra le frequenze misurate in due sistemi di riferimento inerziali. Lo stato fisico della sorgente/assorbitore è ignorato

# Fotoni in azione: effetto Doppler

- E' possibile ricavare le formule dell'effetto Doppler per la radiazione EM nel vuoto applicando le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto al processo di emissione/assorbimento di un fotone da parte di un atomo/nucleo (Schrödinger 1922, solo emissione)
- Questa trattazione 'corpuscolare' permette di descrivere l'emissione/assorbimento di fotoni da parte di atomi/nuclei in volo a velocità relativistiche, l'emissione/assorbimento di fotoni gamma senza rinculo (effetto Mössbauer) su dispositivi rotanti, il raffreddamento laser di atomi a due livelli (Giuliani 2013-2015)
- La descrizione ondulatoria dell'effetto Doppler riguarda *solo* la relazione tra le frequenze misurate in due sistemi di riferimento inerziali. Lo stato fisico della sorgente/assorbitore è ignorato
- La descrizione in termini di fotoni utilizza tutti i parametri fisici che entrano in gioco: massa dell'atomo/nucleo, energia di transizione, velocità dell'atomo/nucleo prima e dopo l'emissione/assorbimento

# Esempio: emissione di un fotone

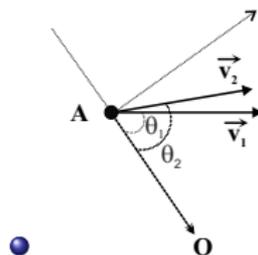


Figura: Emissione di un fotone

## Esempio: emissione di un fotone

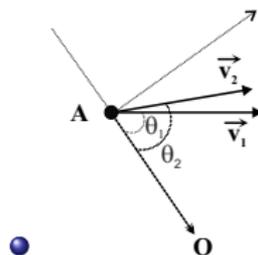


Figura: Emissione di un fotone

$$\begin{aligned} E_{ph}^{emi} &= \Delta E \left( 1 - \frac{\Delta E}{2E_1^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1} \\ &= \Delta E \left( 1 + \frac{\Delta E}{2E_2^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_2^2}}{1 - B_2 \cos \theta_2} \end{aligned} \quad (15)$$

# Onde EM e fotoni: interferenza

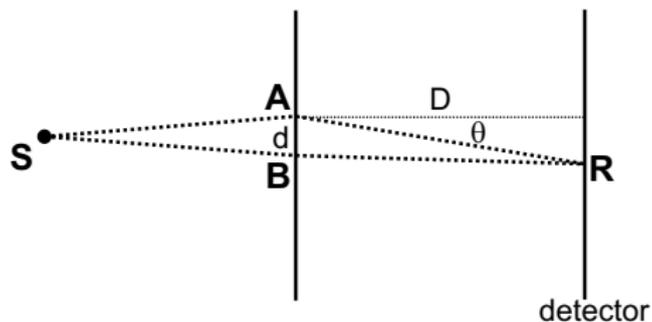


Figura: Interferenza attraverso due fenditure

# Onde EM e fotoni: interferenza

| Onde EM                           | Fotoni   |
|-----------------------------------|--|
| $\lambda = c/\nu$                 | $\lambda = h/p = c/\nu$                        |
| • Campo elettrico $\vec{E}$       | Ampiezza di probabilità $\Psi = Ce^{i\varphi}$ |
| $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ | $\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$                       |
| Densità di energia $\propto E^2$  | Probabilità $\propto  \Psi ^2$                 |

**Tabella:** La descrizione classica e quantistica dell'interferenza hanno la stessa struttura matematica

# Onde EM e fotoni: interferenza

| Onde EM                           | Fotoni   |
|-----------------------------------|--|
| $\lambda = c/\nu$                 | $\lambda = h/p = c/\nu$                        |
| • Campo elettrico $\vec{E}$       | Ampiezza di probabilità $\Psi = Ce^{i\varphi}$ |
| $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ | $\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$                       |
| Densità di energia $\propto E^2$  | Probabilità $\propto  \Psi ^2$                 |

**Tabella:** La descrizione classica e quantistica dell'interferenza hanno la stessa struttura matematica

- La teoria di Maxwell può prevedere la probabilità che un fotone arrivi in un punto del rivelatore se si assume che questa probabilità sia proporzionale all'intensità classica nel medesimo punto

# Onde EM e fotoni: interferenza

| Onde EM                           | Fotoni   |
|-----------------------------------|--|
| $\lambda = c/\nu$                 | $\lambda = h/p = c/\nu$                        |
| • Campo elettrico $\vec{E}$       | Ampiezza di probabilità $\Psi = Ce^{i\varphi}$ |
| $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ | $\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$                       |
| Densità di energia $\propto E^2$  | Probabilità $\propto  \Psi ^2$                 |

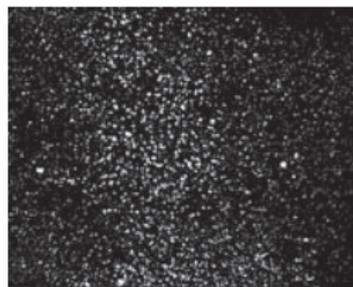
**Tabella:** La descrizione classica e quantistica dell'interferenza hanno la stessa struttura matematica

- La teoria di Maxwell può prevedere la probabilità che un fotone arrivi in un punto del rivelatore se si assume che questa probabilità sia proporzionale all'intensità classica nel medesimo punto
- Ciò conferma che il concetto di fotone è formalmente compatibile con la teoria di Maxwell

# Onde EM e fotoni: interferenza a fotone singolo

una foto ogni secondo; 8 fotoni al secondo; film: 30 fotogrammi al secondo

# Onde EM e fotoni: fotografia con poca luce



(a)



(b)



(c)

**Figura:** Foto con poca luce: (a)  $1 \times 10^3$  fotoni; (b)  $1.2 \times 10^4$  fotoni; (c)  $2.8 \times 10^7$  fotoni. Rose, 1953.

# Onde EM e fotoni: osservazioni

- Gli esperimenti di interferenza a fotone singolo e le fotografie a bassa intensità luminosa indicano che...

# Onde EM e fotoni: osservazioni

- Gli esperimenti di interferenza a fotone singolo e le fotografie a bassa intensità luminosa indicano che...
- Le predizioni della teoria di Maxwell sono corroborate dall'esperimento se il numero dei fotoni usato è sufficientemente elevato (statisticamente significativo)

# Onde EM e fotoni: osservazioni

- Gli esperimenti di interferenza a fotone singolo e le fotografie a bassa intensità luminosa indicano che. . .
- Le predizioni della teoria di Maxwell sono corroborate dall'esperimento se il numero dei fotoni usato è sufficientemente elevato (statisticamente significativo)
- Non importa se i fotoni sono usati uno alla volta o tutti insieme

# Onde EM e fotoni: la formula di Planck I

- La formula di Planck per la radiazione di corpo nero può essere scritta così

$$u(\nu, T) = Z(\nu)[\bar{n}(\nu, T)h\nu] \quad (16)$$

# Onde EM e fotoni: la formula di Planck I

- La formula di Planck per la radiazione di corpo nero può essere scritta così

$$u(\nu, T) = Z(\nu)[\bar{n}(\nu, T)h\nu] \quad (16)$$

- dove

$$Z(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}, \quad \bar{n}(\nu, T) = \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \quad (17)$$

## Onde EM e fotoni: la formula di Planck II

- Il significato di  $Z(\nu)$  dipende dal modello di cavità usato:

## Onde EM e fotoni: la formula di Planck II

- Il significato di  $Z(\nu)$  dipende dal modello di cavità usato:
- Numero di oscillatori per unità di volume e di frequenza (Planck, 1900)

## Onde EM e fotoni: la formula di Planck II

- Il significato di  $Z(\nu)$  dipende dal modello di cavità usato:
- Numero di oscillatori per unità di volume e di frequenza (Planck, 1900)
- Numero dei modi di vibrazione per unità di volume e frequenza di onde EM stazionarie nella cavità (Debye, 1910)

## Onde EM e fotoni: la formula di Planck II

- Il significato di  $Z(\nu)$  dipende dal modello di cavità usato:
- Numero di oscillatori per unità di volume e di frequenza (Planck, 1900)
- Numero dei modi di vibrazione per unità di volume e frequenza di onde EM stazionarie nella cavità (Debye, 1910)
- Numero di celle di volume  $h^3$  per unità di volume nello spazio delle fasi (Bose, 1924)

## Onde EM e fotoni: la formula di Planck II

- Il significato di  $Z(\nu)$  dipende dal modello di cavità usato:
- Numero di oscillatori per unità di volume e di frequenza (Planck, 1900)
- Numero dei modi di vibrazione per unità di volume e frequenza di onde EM stazionarie nella cavità (Debye, 1910)
- Numero di celle di volume  $h^3$  per unità di volume nello spazio delle fasi (Bose, 1924)
- Tutte le deduzioni usano questa formula

$$R = \frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)!P!} \quad (18)$$

per calcolare il numero di modi  $R$  in cui  $P$  quanti indistinguibili possono essere distribuiti tra  $N$  accettori distinguibili

# Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni I

- Se vale la formula di Planck, la fluttuazione dell'energia della radiazione assume la forma

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{(E - \overline{E})^2} = \overline{E^2} - \overline{E}^2 = Z(\nu)(h\nu)^2 \bar{n}(\nu, T)[1 + \bar{n}(\nu, T)](v d\nu) \quad (19)$$

# Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni I

- Se vale la formula di Planck, la fluttuazione dell'energia della radiazione assume la forma

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{(E - \overline{E})^2} = \overline{E^2} - \overline{E}^2 = Z(\nu)(h\nu)^2 \bar{n}(\nu, T)[1 + \bar{n}(\nu, T)](v d\nu) \quad (19)$$

- La fluttuazione dell'energia è data dalla somma di due termini, uno proporzionale al numero medio di fotoni attribuito a ciascun 'accettore', l'altro proporzionale al suo quadrato

# Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni I

- Se vale la formula di Planck, la fluttuazione dell'energia della radiazione assume la forma

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{(E - \overline{E})^2} = \overline{E^2} - \overline{E}^2 = Z(\nu)(h\nu)^2 \bar{n}(\nu, T)[1 + \bar{n}(\nu, T)](v d\nu) \quad (19)$$

- La fluttuazione dell'energia è data dalla somma di due termini, uno proporzionale al numero medio di fotoni attribuito a ciascun 'accettore', l'altro proporzionale al suo quadrato
- Il primo termine è tipico di un sistema di particelle, come le molecole di un gas perfetto

# Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni I

- Se vale la formula di Planck, la fluttuazione dell'energia della radiazione assume la forma

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{(E - \overline{E})^2} = \overline{E^2} - \overline{E}^2 = Z(\nu)(h\nu)^2 \bar{n}(\nu, T)[1 + \bar{n}(\nu, T)](v d\nu) \quad (19)$$

- La fluttuazione dell'energia è data dalla somma di due termini, uno proporzionale al numero medio di fotoni attribuito a ciascun 'accettore', l'altro proporzionale al suo quadrato
- Il primo termine è tipico di un sistema di particelle, come le molecole di un gas perfetto
- Il secondo termine ci ricorda che la statistica dei fotoni di un corpo nero non è quella di Boltzmann (particelle distinguibili) ma quella di Bose (particelle indistinguibili, bosoni)

## Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni II

- Come è noto, la formula della fluttuazione, scritta in modo diverso

$$\overline{\varepsilon^2} = \left( u(\nu, T)h\nu + \frac{c^3}{8\pi\nu^2}u^2(\nu, T) \right) \nu d\nu$$

è stata interpretata da Einstein (1909) come la somma di due termini, uno tipico delle particelle, l'altro tipico delle onde

## Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni II

- Come è noto, la formula della fluttuazione, scritta in modo diverso

$$\overline{\varepsilon^2} = \left( u(\nu, T)h\nu + \frac{c^3}{8\pi\nu^2}u^2(\nu, T) \right) \nu d\nu$$

è stata interpretata da Einstein (1909) come la somma di due termini, uno tipico delle particelle, l'altro tipico delle onde

- Questa interpretazione è considerata come l'origine della dualità onda-corpuscolo

# Onde EM e fotoni. Interferenza e fluttuazioni: analogia

| <b>Numero di fotoni</b> | <b>Interferenza</b>  | <b>Fluttuazioni</b> |
|-------------------------|----------------------|---------------------|
| basso                   | spots                | particelle          |
| intermedio              | frange individuabili | particelle + onde   |
| alto                    | frange definite      | onde                |

**Tabella:** Analogia. Il 'numero di fotoni' è definito in modo diverso nei due casi. Nel caso dell'interferenza, è il numero di fotoni usato. Nel caso delle fluttuazioni dell'energia della radiazione di corpo nero è il numero di fotoni attribuito ad ogni cella dello spazio delle fasi di volume  $h^3$ .

# Singolo processo quantistico

- Nel caso dell'interferenza a fotone singolo siamo solo in grado di predire la probabilità che un fotone arrivi in un punto del rivelatore

# Singolo processo quantistico

- Nel caso dell'interferenza a fotone singolo siamo solo in grado di predire la probabilità che un fotone arrivi in un punto del rivelatore
- Abbiamo visto come questa predizione possa essere fatta sia usando l'elettromagnetismo maxwelliano sia la fisica quantistica (le due predizioni hanno la stessa struttura matematica)

# Singolo processo quantistico

- Nel caso dell'interferenza a fotone singolo siamo solo in grado di predire la probabilità che un fotone arrivi in un punto del rivelatore
- Abbiamo visto come questa predizione possa essere fatta sia usando l'elettromagnetismo maxwelliano sia la fisica quantistica (le due predizioni hanno la stessa struttura matematica)
- Non sappiamo nulla di ciò che accade al fotone tra l'emissione da parte della sorgente e la misura del suo arrivo da parte del rivelatore

# Singolo processo quantistico

- Nel caso dell'interferenza a fotone singolo siamo solo in grado di predire la probabilità che un fotone arrivi in un punto del rivelatore
- Abbiamo visto come questa predizione possa essere fatta sia usando l'elettromagnetismo maxwelliano sia la fisica quantistica (le due predizioni hanno la stessa struttura matematica)
- Non sappiamo nulla di ciò che accade al fotone tra l'emissione da parte della sorgente e la misura del suo arrivo da parte del rivelatore
- Ci troviamo pertanto nella condizione di ignoranza riguardante lo svolgimento di una parte del fenomeno

# Sulla natura probabilistica di alcune teorie

Usualmente, si sostiene che...

- La natura probabilistica di alcune branche della fisica classica riflette la nostra ignoranza dei fenomeni (**probabilità epistemica**)

# Sulla natura probabilistica di alcune teorie

Usualmente, si sostiene che...

- La natura probabilistica di alcune branche della fisica classica riflette la nostra ignoranza dei fenomeni (**probabilità epistemica**)
- La natura probabilistica della meccanica quantica è inerente ai fenomeni, cioè ne riflette il carattere **indeterministico** (**probabilità ontica**)

# Sulla natura probabilistica di alcune teorie

Usualmente, si sostiene che...

- La natura probabilistica di alcune branche della fisica classica riflette la nostra ignoranza dei fenomeni (**probabilità epistemica**)
- La natura probabilistica della meccanica quantica è inerente ai fenomeni, cioè ne riflette il carattere **indeterministico** (**probabilità ontica**)
- **Tuttavia...**

# Sulla natura probabilistica di alcune teorie

Usualmente, si sostiene che...

- La natura probabilistica di alcune branche della fisica classica riflette la nostra ignoranza dei fenomeni (**probabilità epistemica**)
- La natura probabilistica della meccanica quantica è inerente ai fenomeni, cioè ne riflette il carattere **indeterministico** (**probabilità ontica**)
- **Tuttavia...**

# Sulla natura probabilistica di alcune teorie

Usualmente, si sostiene che...

- La natura probabilistica di alcune branche della fisica classica riflette la nostra ignoranza dei fenomeni (**probabilità epistemica**)
- La natura probabilistica della meccanica quantica è inerente ai fenomeni, cioè ne riflette il carattere **indeterministico** (**probabilità ontica**)
- **Tuttavia...**
- Siccome la ricerca delle connessioni causali è stata ed è una spinta propulsiva per l'acquisizione di nuove conoscenze...

# Sulla natura probabilistica di alcune teorie

Usualmente, si sostiene che...

- La natura probabilistica di alcune branche della fisica classica riflette la nostra ignoranza dei fenomeni (**probabilità epistemica**)
- La natura probabilistica della meccanica quantica è inerente ai fenomeni, cioè ne riflette il carattere **indeterministico** (**probabilità ontica**)
- **Tuttavia...**
- Siccome la ricerca delle connessioni causali è stata ed è una spinta propulsiva per l'acquisizione di nuove conoscenze...
- Non sembra metodologicamente ragionevole abbandonare la ricerca delle connessioni causali anche per quanto riguarda i singoli eventi quantistici

# Conclusioni?

- L'elettromagnetismo maxwelliano ha svolto un ruolo essenziale nella formulazione della relatività speciale

# Conclusioni?

- L'elettromagnetismo maxwelliano ha svolto un ruolo essenziale nella formulazione della relatività speciale
- Storicamente, con il postulato della costanza della velocità della luce (Einstein, 1905)

# Conclusioni?

- L'elettromagnetismo maxwelliano ha svolto un ruolo essenziale nella formulazione della relatività speciale
- Storicamente, con il postulato della costanza della velocità della luce (Einstein, 1905)
- Concettualmente, con l'invarianza delle sue equazioni per trasformazioni di Lorentz. Invarianza delle equazioni  $\Rightarrow$  costanza di  $c$  (Einstein, 1906)

# Conclusioni?

- L'elettromagnetismo maxwelliano ha svolto un ruolo essenziale nella formulazione della relatività speciale
- Storicamente, con il postulato della costanza della velocità della luce (Einstein, 1905)
- Concettualmente, con l'invarianza delle sue equazioni per trasformazioni di Lorentz. Invarianza delle equazioni  $\Rightarrow$  costanza di  $c$  (Einstein, 1906)
- Il concetto di quanto di luce (fotone) è, *formalmente*, compatibile con l'elettromagnetismo maxwelliano

# Conclusioni?

- L'elettromagnetismo maxwelliano ha svolto un ruolo essenziale nella formulazione della relatività speciale
- Storicamente, con il postulato della costanza della velocità della luce (Einstein, 1905)
- Concettualmente, con l'invarianza delle sue equazioni per trasformazioni di Lorentz. Invarianza delle equazioni  $\Rightarrow$  costanza di  $c$  (Einstein, 1906)
- Il concetto di quanto di luce (fotone) è, *formalmente*, compatibile con l'elettromagnetismo maxwelliano
- In generale, ma con le necessarie precisazioni, si può affermare che le predizioni dell'elettromagnetismo maxwelliano sono valide quando il numero dei fotoni usato è sufficientemente elevato

# Conclusioni?

- L'elettromagnetismo maxwelliano ha svolto un ruolo essenziale nella formulazione della relatività speciale
- Storicamente, con il postulato della costanza della velocità della luce (Einstein, 1905)
- Concettualmente, con l'invarianza delle sue equazioni per trasformazioni di Lorentz. Invarianza delle equazioni  $\Rightarrow$  costanza di  $c$  (Einstein, 1906)
- Il concetto di quanto di luce (fotone) è, *formalmente*, compatibile con l'elettromagnetismo maxwelliano
- In generale, ma con le necessarie precisazioni, si può affermare che le predizioni dell'elettromagnetismo maxwelliano sono valide quando il numero dei fotoni usato è sufficientemente elevato
- Il funzionamento dei dispositivi quantistici si basa su leggi macroscopiche causali

# Conclusioni?

- L'elettromagnetismo maxwelliano ha svolto un ruolo essenziale nella formulazione della relatività speciale
- Storicamente, con il postulato della costanza della velocità della luce (Einstein, 1905)
- Concettualmente, con l'invarianza delle sue equazioni per trasformazioni di Lorentz. Invarianza delle equazioni  $\Rightarrow$  costanza di  $c$  (Einstein, 1906)
- Il concetto di quanto di luce (fotone) è, *formalmente*, compatibile con l'elettromagnetismo maxwelliano
- In generale, ma con le necessarie precisazioni, si può affermare che le predizioni dell'elettromagnetismo maxwelliano sono valide quando il numero dei fotoni usato è sufficientemente elevato
- Il funzionamento dei dispositivi quantistici si basa su leggi macroscopiche causali
- Non sembra ragionevole abbandonare la ricerca di connessioni causali anche per i singoli eventi quantistici

# Riferimenti bibliografici

Per approfondire gli argomenti trattati, si possono vedere:

-  Giuliani G 2010 Vector potential, electromagnetic induction and physical meaning *Eur. J. Phys.* **31** 871
-  Giuliani G 2013 Experiment and theory: the case of the Doppler effect for photons *Eur. J. Phys.* **34** 1035
-  Giuliani G 2014 On the Doppler effect for photons in rotating systems *Eur. J. Phys.* **35** 025015
-  Giuliani G 2015 Conservation laws and laser cooling of atoms *Eur. J. Phys.* **36** 065008
-  Buonauro B and Giuliani G 2016 Wave and photon descriptions of light: historical highlights, epistemological aspects and teaching practices *Eur. J. Phys.* **37** 055303

... **e la bibliografia ivi contenuta!**

# 'Interpretazione' e MQ I

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)

# 'Interpretazione' e MQ I

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)
- Indicare le procedure per misurare le grandezze fisiche usate dalla teoria (equazione)

# 'Interpretazione' e MQ I

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)
- Indicare le procedure per misurare le grandezze fisiche usate dalla teoria (equazione)

- 

$$\frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} \hat{H} \Psi(\vec{r}, t) \quad (20)$$

# 'Interpretazione' e MQ I

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)
- Indicare le procedure per misurare le grandezze fisiche usate dalla teoria (equazione)

$$\frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} \hat{H} \Psi(\vec{r}, t) \quad (20)$$

- Questa equazione ha la stessa struttura matematica della legge della dinamica

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}$$

# 'Interpretazione' e MQ I

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)
- Indicare le procedure per misurare le grandezze fisiche usate dalla teoria (equazione)

$$\frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} \hat{H} \Psi(\vec{r}, t) \quad (20)$$

- Questa equazione ha la stessa struttura matematica della legge della dinamica

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}$$

- Mentre la legge della dinamica correla due grandezze fisiche (misurabili), l'equazione di Schrödinger correla la variazione temporale della funzione d'onda di un sistema fisico a se stessa

# 'Interpretazione' e MQ I

- Individuare le **connessioni causali** operanti all'interno dei fenomeni descritti dalla teoria (equazione)
- Indicare le procedure per misurare le grandezze fisiche usate dalla teoria (equazione)

$$\frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} \hat{H} \Psi(\vec{r}, t) \quad (20)$$

- Questa equazione ha la stessa struttura matematica della legge della dinamica

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}$$

- Mentre la legge della dinamica correla due grandezze fisiche (misurabili), l'equazione di Schrödinger correla la variazione temporale della funzione d'onda di un sistema fisico a se stessa
- Lo stato di un sistema fisico all'istante  $t$  determina (causa) la sua evoluzione temporale

## 'Interpretazione' e MQ II

- Tuttavia, il fatto che, in generale, le predizioni riguardanti il risultato di una misura siano espresse in termini di probabilità, ha dato luogo alla distinzione tra probabilità epistemica e probabilità ontica

## 'Interpretazione' e MQ II

- Tuttavia, il fatto che, in generale, le predizioni riguardanti il risultato di una misura siano espresse in termini di probabilità, ha dato luogo alla distinzione tra probabilità epistemica e probabilità ontica
- La probabilità epistemica sarebbe dovuta alla nostra incompleta conoscenza dei fenomeni

## 'Interpretazione' e MQ II

- Tuttavia, il fatto che, in generale, le predizioni riguardanti il risultato di una misura siano espresse in termini di probabilità, ha dato luogo alla distinzione tra probabilità epistemica e probabilità ontica
- La probabilità epistemica sarebbe dovuta alla nostra incompleta conoscenza dei fenomeni
- Mentre la probabilità ontica sarebbe inerente ai fenomeni stessi (indeterminismo)

## 'Interpretazione' e MQ II

- Tuttavia, il fatto che, in generale, le predizioni riguardanti il risultato di una misura siano espresse in termini di probabilità, ha dato luogo alla distinzione tra probabilità epistemica e probabilità ontica
- La probabilità epistemica sarebbe dovuta alla nostra incompleta conoscenza dei fenomeni
- Mentre la probabilità ontica sarebbe inerente ai fenomeni stessi (indeterminismo)
- Parlare di probabilità ontica (inerente ai fenomeni) significa trasferire al Mondo una caratteristica **intrinseca** della teoria

## 'Interpretazione' e MQ II

- Tuttavia, il fatto che, in generale, le predizioni riguardanti il risultato di una misura siano espresse in termini di probabilità, ha dato luogo alla distinzione tra probabilità epistemica e probabilità ontica
- La probabilità epistemica sarebbe dovuta alla nostra incompleta conoscenza dei fenomeni
- Mentre la probabilità ontica sarebbe inerente ai fenomeni stessi (indeterminismo)
- Parlare di probabilità ontica (inerente ai fenomeni) significa trasferire al Mondo una caratteristica **intrinseca** della teoria
- Asserzioni di questo tipo (ontologiche) sono solo plausibili e la loro plausibilità deve essere valutata sulla base dell'intera conoscenza acquisita

# Stato di sovrapposizione



$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle) \quad |\psi_1\rangle \Rightarrow a_1; \quad |\psi_2\rangle \Rightarrow a_2 \quad (21)$$

# Stato di sovrapposizione

- $$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle) \quad |\psi_1\rangle \Rightarrow a_1; \quad |\psi_2\rangle \Rightarrow a_2 \quad (21)$$
- Interpretazione minimale. Se effettuiamo una misura, la probabilità di trovare il valore  $a_1$  o il valore  $a_2$  è uguale ad  $1/2$

# Stato di sovrapposizione



$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle) \quad |\psi_1\rangle \Rightarrow a_1; \quad |\psi_2\rangle \Rightarrow a_2 \quad (21)$$

- Interpretazione minimale. Se effettuiamo una misura, la probabilità di trovare il valore  $a_1$  o il valore  $a_2$  è uguale ad  $1/2$
- Interpretazione corrente. Prima della misura, la grandezza fisica  $A$  non ha nè il valore  $a_1$ , né il valore  $a_2$ .

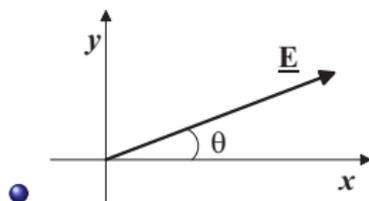
# Stato di sovrapposizione



$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle) \quad |\psi_1\rangle \Rightarrow a_1; \quad |\psi_2\rangle \Rightarrow a_2 \quad (21)$$

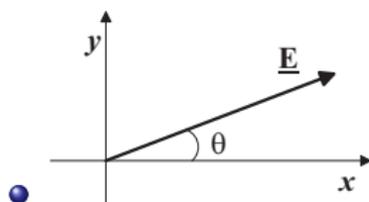
- Interpretazione minimale. Se effettuiamo una misura, la probabilità di trovare il valore  $a_1$  o il valore  $a_2$  è uguale ad  $1/2$
- Interpretazione corrente. Prima della misura, la grandezza fisica  $A$  non ha nè il valore  $a_1$ , né il valore  $a_2$ .
- Interpretazione corrente. Durante la misura, il sistema passa dallo stato di sovrapposizione  $|\psi\rangle$  allo stato  $|\psi_1\rangle$  o allo stato  $|\psi_2\rangle$

# Luce polarizzata linearmente: elettromagnetismo



**Figura:** Un fascio di luce polarizzata linearmente e avente intensità  $I_0$  incide  $\perp$  su un polarizzatore lineare il cui asse coincide con l'asse  $x$

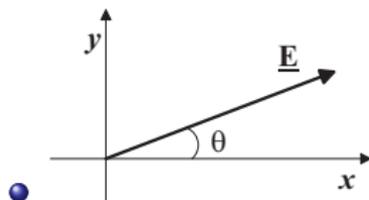
# Luce polarizzata linearmente: elettromagnetismo



**Figura:** Un fascio di luce polarizzata linearmente e avente intensità  $I_0$  incide  $\perp$  su un polarizzatore lineare il cui asse coincide con l'asse  $x$

- Se scomponiamo il campo elettrico  $\vec{E}$  del fascio incidente lungo gli assi  $x$  e  $y$ ...

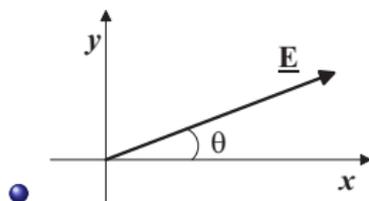
# Luce polarizzata linearmente: elettromagnetismo



**Figura:** Un fascio di luce polarizzata linearmente e avente intensità  $I_0$  incide  $\perp$  su un polarizzatore lineare il cui asse coincide con l'asse  $x$

- Se scomponiamo il campo elettrico  $\vec{E}$  del fascio incidente lungo gli assi  $x$  e  $y$ ...
- Otteniamo subito che l'intensità della luce che attraversa il polarizzatore lineare è uguale a  $I_0 \cos^2 \theta$  (legge di Malus)

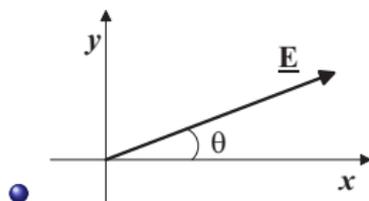
# Luce polarizzata linearmente: elettromagnetismo



**Figura:** Un fascio di luce polarizzata linearmente e avente intensità  $I_0$  incide  $\perp$  su un polarizzatore lineare il cui asse coincide con l'asse  $x$

- Se scomponiamo il campo elettrico  $\vec{E}$  del fascio incidente lungo gli assi  $x$  e  $y$ ...
- Otteniamo subito che l'intensità della luce che attraversa il polarizzatore lineare è uguale a  $I_0 \cos^2 \theta$  (legge di Malus)
- Il polarizzatore lineare **cambia** la direzione di polarizzazione della luce

# Luce polarizzata linearmente: elettromagnetismo



**Figura:** Un fascio di luce polarizzata linearmente e avente intensità  $I_0$  incide  $\perp$  su un polarizzatore lineare il cui asse coincide con l'asse  $x$

- Se scomponiamo il campo elettrico  $\vec{E}$  del fascio incidente lungo gli assi  $x$  e  $y$  . . .
- Otteniamo subito che l'intensità della luce che attraversa il polarizzatore lineare è uguale a  $I_0 \cos^2 \theta$  (legge di Malus)
- Il polarizzatore lineare **cambia** la direzione di polarizzazione della luce
- La MQ descrive questo esperimento usando uno stato di sovrapposizione analogamente a quanto fa l'elettromagnetismo