

Le grandezze fisiche nelle teorie e negli esperimenti

Giuseppe Giuliani

<http://fisica.unipv.it/percorsi>

AIF, XIX Scuola di Storia della Fisica

5 marzo 2021

Particelle rotanti

- Se due orologi identici sono posti uno al centro e l'altro sul bordo di un disco rotante vale la relazione:

$$\Delta t_R = \Delta t_0 \sqrt{1 - \frac{\Omega^2 R^2}{c^2}} \quad (1)$$

Particelle rotanti

- Se due orologi identici sono posti uno al centro e l'altro sul bordo di un disco rotante vale la relazione:

$$\Delta t_R = \Delta t_0 \sqrt{1 - \frac{\Omega^2 R^2}{c^2}} \quad (1)$$

- Questa equazione può essere scritta sotto la forma:

$$\Delta t_R = \Delta t_0 \sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}}; \quad \chi = -\frac{1}{2}\Omega^2 R^2 \quad (2)$$

Particelle rotanti

- Se due orologi identici sono posti uno al centro e l'altro sul bordo di un disco rotante vale la relazione:

$$\Delta t_R = \Delta t_0 \sqrt{1 - \frac{\Omega^2 R^2}{c^2}} \quad (1)$$

- Questa equazione può essere scritta sotto la forma:

$$\Delta t_R = \Delta t_0 \sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}}; \quad \chi = -\frac{1}{2}\Omega^2 R^2 \quad (2)$$

- Che cosa è χ ?

Particelle rotanti

- Se due orologi identici sono posti uno al centro e l'altro sul bordo di un disco rotante vale la relazione:

$$\Delta t_R = \Delta t_0 \sqrt{1 - \frac{\Omega^2 R^2}{c^2}} \quad (1)$$

- Questa equazione può essere scritta sotto la forma:

$$\Delta t_R = \Delta t_0 \sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}}; \quad \chi = -\frac{1}{2}\Omega^2 R^2 \quad (2)$$

- Che cosa è χ ?
- In un sistema **non inerziale** co - rotante con il disco, i due orologi sono in quiete l'uno rispetto all'altro.
- Ciò non ostante, per un principio di relatività **esteso**, deve valere ancora l'equazione (1)

Particelle rotanti

- Se due orologi identici sono posti uno al centro e l'altro sul bordo di un disco rotante vale la relazione:

$$\Delta t_R = \Delta t_0 \sqrt{1 - \frac{\Omega^2 R^2}{c^2}} \quad (1)$$

- Questa equazione può essere scritta sotto la forma:

$$\Delta t_R = \Delta t_0 \sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}}; \quad \chi = -\frac{1}{2}\Omega^2 R^2 \quad (2)$$

- Che cosa è χ ?
- In un sistema **non inerziale** co - rotante con il disco, i due orologi sono in quiete l'uno rispetto all'altro.
- Ciò non ostante, per un principio di relatività **esteso**, deve valere ancora l'equazione (1)
- Nel sistema di riferimento rotante, per il principio di equivalenza, l'orologio posto sul bordo è sottoposto ad una accelerazione pseudo - gravitazionale (centrifuga) data da: $a_g = \Omega^2 R$ derivante da un potenziale pseudo - gravitazionale $\chi = -(1/2)\Omega^2 R^2$

Particelle rotanti

- Se due orologi identici sono posti uno al centro e l'altro sul bordo di un disco rotante vale la relazione:

$$\Delta t_R = \Delta t_0 \sqrt{1 - \frac{\Omega^2 R^2}{c^2}} \quad (1)$$

- Questa equazione può essere scritta sotto la forma:

$$\Delta t_R = \Delta t_0 \sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}}; \quad \chi = -\frac{1}{2}\Omega^2 R^2 \quad (2)$$

- Che cosa è χ ?
- In un sistema **non inerziale** co - rotante con il disco, i due orologi sono in quiete l'uno rispetto all'altro.
- Ciò non ostante, per un principio di relatività **esteso**, deve valere ancora l'equazione (1)
- Nel sistema di riferimento rotante, per il principio di equivalenza, l'orologio posto sul bordo è sottoposto ad una accelerazione pseudo - gravitazionale (centrifuga) data da: $a_g = \Omega^2 R$ derivante da un potenziale pseudo - gravitazionale $\chi = -(1/2)\Omega^2 R^2$
- Quindi, anche il sistema co - rotante **ricava** l'equazione (2) [Einstein, 1921, pp. 122 - 125](#)

- Giuliani G, 2019 *Elettromagnetismo, relatività, quanti - Fisica, storia, epistemologia* (Pavia; Pavia University Press). In rete [qui](#)

- Giuliani G, 2019 *Elettromagnetismo, relatività, quanti - Fisica, storia, epistemologia* (Pavia; Pavia University Press). In rete [qui](#)
- In particolare le pagine 1 - 25.

- Giuliani G, 2019 *Elettromagnetismo, relatività, quanti - Fisica, storia, epistemologia* (Pavia; Pavia University Press). In rete [qui](#)
- In particolare le pagine 1 - 25.
- E, per approfondire, i riferimenti ivi contenuti.

- Giuliani G, 2019 *Elettromagnetismo, relatività, quanti - Fisica, storia, epistemologia* (Pavia; Pavia University Press). In rete [qui](#)
- In particolare le pagine 1 - 25.
- E, per approfondire, i riferimenti ivi contenuti.
- Ringrazio Biagio Buonauro, le cui osservazioni e suggerimenti sono stati preziosi per la redazione della stesura finale

- Le riflessioni epistemologiche che seguono sono basate su:

Natura e struttura della lezione

- Le riflessioni epistemologiche che seguono sono basate su:
- L'analisi dei concetti e dei linguaggi usati dalle descrizioni della fisica

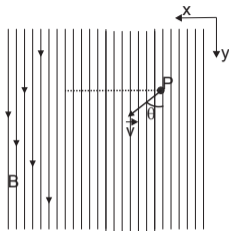
Natura e struttura della lezione

- Le riflessioni epistemologiche che seguono sono basate su:
- L'analisi dei concetti e dei linguaggi usati dalle descrizioni della fisica
- Si ispirano, in parte, ad alcune riflessioni di Rudolf Hertz

Natura e struttura della lezione

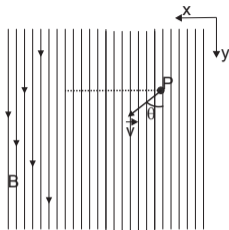
- Le riflessioni epistemologiche che seguono sono basate su:
- L'analisi dei concetti e dei linguaggi usati dalle descrizioni della fisica
- Si ispirano, in parte, ad alcune riflessioni di Rudolf Hertz
- La loro pertinenza e affidabilità è messa alla prova applicandole ad alcuni passaggi cruciali della storia della fisica

Faraday, induzione



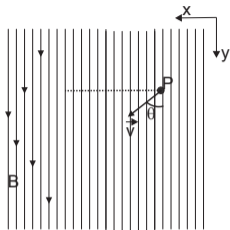
- Secondo Faraday, la carica elettrica iniettata nella corrente indotta è proporzionale alla durata del moto e alla velocità del filo. Inoltre, questa stessa quantità è proporzionale al numero di linee di forza magnetica ΔN intersecate.

Faraday, induzione



- Secondo Faraday, la carica elettrica iniettata nella corrente indotta è proporzionale alla durata del moto e alla velocità del filo. Inoltre, questa stessa quantità è proporzionale al numero di linee di forza magnetica ΔN intersecate.
- Traducendo in una formula i risultati sperimentali di Faraday si ottiene che:

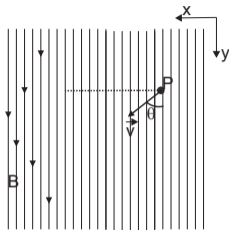
Faraday, induzione



- Secondo Faraday, la carica elettrica iniettata nella corrente indotta è proporzionale alla durata del moto e alla velocità del filo. Inoltre, questa stessa quantità è proporzionale al numero di linee di forza magnetica ΔN intersecate.
- Traducendo in una formula i risultati sperimentali di Faraday si ottiene che:
-

$$\Delta q \propto v_{\perp} \Delta t \Delta N$$

Faraday, induzione



- Secondo Faraday, la carica elettrica iniettata nella corrente indotta è proporzionale alla durata del moto e alla velocità del filo. Inoltre, questa stessa quantità è proporzionale al numero di linee di forza magnetica ΔN intersecate.
- Traducendo in una formula i risultati sperimentali di Faraday si ottiene che:
-

$$\Delta q \propto v_{\perp} \Delta t \Delta N$$

- o, in termini di corrente:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \propto v B \sin \theta$$

dove B è il nostro campo magnetico.

Contenuti della lezione

- Contesto della scoperta, della giustificazione, dell'accettazione

Contenuti della lezione

- Contesto della scoperta, della giustificazione, dell'accettazione
- Come è fatta una teoria: entità teoriche e grandezze fisiche

Contenuti della lezione

- Contesto della scoperta, della giustificazione, dell'accettazione
- Come è fatta una teoria: entità teoriche e grandezze fisiche
- Cosa significa interpretare una teoria

Contenuti della lezione

- Contesto della scoperta, della giustificazione, dell'accettazione
- Come è fatta una teoria: entità teoriche e grandezze fisiche
- Cosa significa interpretare una teoria
- Esempi: teoria di Maxwell, Meccanica quantica

Contenuti della lezione

- Contesto della scoperta, della giustificazione, dell'accettazione
- Come è fatta una teoria: entità teoriche e grandezze fisiche
- Cosa significa interpretare una teoria
- Esempi: teoria di Maxwell, Meccanica quantica
- Immagini del Mondo: immagine fisica del Mondo; immagine del Mondo contenente asserzioni *ontologiche*, cioè asserzioni di esistenza nel Mondo di entità teoriche

Contenuti della lezione

- Contesto della scoperta, della giustificazione, dell'accettazione
- Come è fatta una teoria: entità teoriche e grandezze fisiche
- Cosa significa interpretare una teoria
- Esempi: teoria di Maxwell, Meccanica quantica
- Immagini del Mondo: immagine fisica del Mondo; immagine del Mondo contenente asserzioni *ontologiche*, cioè asserzioni di esistenza nel Mondo di entità teoriche
- La tensione tra le due immagini del Mondo è una delle fonti delle innovazioni concettuali della fisica

Contenuti della lezione

- Contesto della scoperta, della giustificazione, dell'accettazione
- Come è fatta una teoria: entità teoriche e grandezze fisiche
- Cosa significa interpretare una teoria
- Esempi: teoria di Maxwell, Meccanica quantica
- Immagini del Mondo: immagine fisica del Mondo; immagine del Mondo contenente asserzioni *ontologiche*, cioè asserzioni di esistenza nel Mondo di entità teoriche
- La tensione tra le due immagini del Mondo è una delle fonti delle innovazioni concettuali della fisica
- Gli apparati di misura sono costruiti sulla base della conoscenza acquisita in laboratorio e non hanno – in generale – alcuna attinenza diretta con la teoria sottoposta a verifica

Scoperta e giustificazione I

- “Lo sviluppo storico della meccanica quantica illustra, pertanto, la distinzione fra **contesto della scoperta** e **contesto della giustificazione**; distinzione che deve venir fatta per tutti i generi di ricerca scientifica. La strada della scoperta corre attraverso una “serie di inferenze che sono profondamente avvolte nell’oscurità dell’indovinare istintivo”, se mi è permesso applicare qui una frase che Schrödinger mi rivolse in una sua lettera, scritta alcuni anni prima delle sue grandi scoperte nel campo della meccanica quantica. Una volta poi che una teoria è stata costruita, essa va giudicata entro il contesto della giustificazione, vale a dire mediante l’evidenza induttiva a essa conferita dal successo empirico”. [Hans Reichenbach, 1954, I fondamenti filosofici della meccanica quantistica (Boringhieri, Torino)]

Scoperta e giustificazione I

- “Lo sviluppo storico della meccanica quantica illustra, pertanto, la distinzione fra **contesto della scoperta** e **contesto della giustificazione**; distinzione che deve venir fatta per tutti i generi di ricerca scientifica. La strada della scoperta corre attraverso una “serie di inferenze che sono profondamente avvolte nell’oscurità dell’indovinare istintivo”, se mi è permesso applicare qui una frase che Schrödinger mi rivolse in una sua lettera, scritta alcuni anni prima delle sue grandi scoperte nel campo della meccanica quantica. Una volta poi che una teoria è stata costruita, essa va giudicata entro il contesto della giustificazione, vale a dire mediante l’evidenza induttiva a essa conferita dal successo empirico”. [Hans Reichenbach, 1954, I fondamenti filosofici della meccanica quantistica (Boringhieri, Torino)]
- La distinzione tra i due contesti non è temporale, ma si basa su criteri epistemologici distinti.

Scoperta e giustificazione II

- Nel contesto della scoperta, lo scienziato è libero da qualsiasi regola di comportamento.

Scoperta e giustificazione II

- Nel contesto della scoperta, lo scienziato è libero da qualsiasi regola di comportamento.
- “Nell’attacco al suo problema specifico egli non soffre di alcuna inibizione dovuta a casi precedenti o autorità, ma è completamente libero di adottare qualunque percorso il suo ingegno sia in grado di suggerirgli. Nessuno può predire ciò che il singolo scienziato farà o che metodo seguirà. In breve, la Scienza è ciò che gli scienziati fanno e ci sono tanti metodi scientifici quanti scienziati” [Percy Bridgman, 1955 Reflections of a physicist (Philosophical Library, New York)]

Scoperta e giustificazione II

- Nel contesto della scoperta, lo scienziato è libero da qualsiasi regola di comportamento.
- “Nell’attacco al suo problema specifico egli non soffre di alcuna inibizione dovuta a casi precedenti o autorità, ma è completamente libero di adottare qualunque percorso il suo ingegno sia in grado di suggerirgli. Nessuno può predire ciò che il singolo scienziato farà o che metodo seguirà. **In breve, la Scienza è ciò che gli scienziati fanno e ci sono tanti metodi scientifici quanti scienziati**” [Percy Bridgman, 1955 Reflections of a physicist (Philosophical Library, New York)]
- Il contesto della giustificazione è invece caratterizzato da criteri epistemologici largamente condivisi dalle comunità scientifiche; esso è, generalmente, un processo storico lento e si sovrappone al processo di accettazione delle novità introdotte.

Il processo di accettazione

- Mentre le scoperte sperimentali sono – in generale – rapidamente assimilate dalla comunità scientifica, il processo di accettazione delle innovazioni teoriche richiede – di solito – un tempo più o meno lungo

Il processo di accettazione

- Mentre le scoperte sperimentali sono – in generale – rapidamente assimilate dalla comunità scientifica, il processo di accettazione delle innovazioni teoriche richiede – di solito – un tempo più o meno lungo
- Un esempio ben noto è quello dei quanti di luce, la cui accettazione da parte della comunità dei fisici ha richiesto circa un trentennio

Il processo di accettazione

- Mentre le scoperte sperimentali sono – in generale – rapidamente assimilate dalla comunità scientifica, il processo di accettazione delle innovazioni teoriche richiede – di solito – un tempo più o meno lungo
- Un esempio ben noto è quello dei quanti di luce, la cui accettazione da parte della comunità dei fisici ha richiesto circa un trentennio
- Mentre il contesto della giustificazione si basa su criteri epistemologici largamente condivisi dalla comunità scientifica, quello dell'accettazione riguarda essenzialmente i processi sociali in cui l'impresa scientifica si realizza

Come è fatta una teoria

- Nella loro forma matura, le teorie della fisica sono sviluppate in modo ipotetico - deduttivo mediante l'assunzione di postulati che permettono – mediante argomentazioni logiche e lo sviluppo di calcoli matematici – di fare predizioni sul valore assunto da una grandezza fisica in un determinato contesto sperimentale.

Come è fatta una teoria

- Nella loro forma matura, le teorie della fisica sono sviluppate in modo ipotetico - deduttivo mediante l'assunzione di postulati che permettono – mediante argomentazioni logiche e lo sviluppo di calcoli matematici – di fare predizioni sul valore assunto da una grandezza fisica in un determinato contesto sperimentale.
- Le teorie usano, tra l'altro, i concetti di **entità teorica** e di **grandezza fisica**

Come è fatta una teoria

- Nella loro forma matura, le teorie della fisica sono sviluppate in modo ipotetico - deduttivo mediante l'assunzione di postulati che permettono – mediante argomentazioni logiche e lo sviluppo di calcoli matematici – di fare predizioni sul valore assunto da una grandezza fisica in un determinato contesto sperimentale.
- Le teorie usano, tra l'altro, i concetti di **entità teorica** e di **grandezza fisica**
- Esempi di entità teoriche sono: sistema di riferimento, punto materiale, gas, elettrone. . .

Come è fatta una teoria

- Nella loro forma matura, le teorie della fisica sono sviluppate in modo ipotetico - deduttivo mediante l'assunzione di postulati che permettono – mediante argomentazioni logiche e lo sviluppo di calcoli matematici – di fare predizioni sul valore assunto da una grandezza fisica in un determinato contesto sperimentale.
- Le teorie usano, tra l'altro, i concetti di **entità teorica** e di **grandezza fisica**
- Esempi di entità teoriche sono: sistema di riferimento, punto materiale, gas, elettrone. . .
- Le grandezze fisiche descrivono proprietà delle entità teoriche ○ sono attribuite a entità teoriche ○ descrivono interazioni tra entità teoriche

Come è fatta una teoria

- Nella loro forma matura, le teorie della fisica sono sviluppate in modo ipotetico - deduttivo mediante l'assunzione di postulati che permettono – mediante argomentazioni logiche e lo sviluppo di calcoli matematici – di fare predizioni sul valore assunto da una grandezza fisica in un determinato contesto sperimentale.
- Le teorie usano, tra l'altro, i concetti di **entità teorica** e di **grandezza fisica**
- Esempi di entità teoriche sono: sistema di riferimento, punto materiale, gas, elettrone. . .
- Le grandezze fisiche descrivono proprietà delle entità teoriche o sono attribuite a entità teoriche o descrivono interazioni tra entità teoriche
- Per esempio: la massa descrive una **proprietà** di un punto materiale, di un corpo rigido, di un gas o di un elettrone;

Come è fatta una teoria

- Nella loro forma matura, le teorie della fisica sono sviluppate in modo ipotetico - deduttivo mediante l'assunzione di postulati che permettono – mediante argomentazioni logiche e lo sviluppo di calcoli matematici – di fare predizioni sul valore assunto da una grandezza fisica in un determinato contesto sperimentale.
- Le teorie usano, tra l'altro, i concetti di **entità teorica** e di **grandezza fisica**
- Esempi di entità teoriche sono: sistema di riferimento, punto materiale, gas, elettrone. . .
- Le grandezze fisiche descrivono proprietà delle entità teoriche o sono attribuite a entità teoriche o descrivono interazioni tra entità teoriche
- Per esempio: la massa descrive una **proprietà** di un punto materiale, di un corpo rigido, di un gas o di un elettrone;
- la velocità, rispetto ad un sistema di riferimento, è **attribuita** ad un punto materiale, ad un corpo rigido o a un elettrone;

Come è fatta una teoria

- Nella loro forma matura, le teorie della fisica sono sviluppate in modo ipotetico - deduttivo mediante l'assunzione di postulati che permettono – mediante argomentazioni logiche e lo sviluppo di calcoli matematici – di fare predizioni sul valore assunto da una grandezza fisica in un determinato contesto sperimentale.
- Le teorie usano, tra l'altro, i concetti di **entità teorica** e di **grandezza fisica**
- Esempi di entità teoriche sono: sistema di riferimento, punto materiale, gas, elettrone. . .
- Le grandezze fisiche descrivono proprietà delle entità teoriche o sono attribuite a entità teoriche o descrivono interazioni tra entità teoriche
- Per esempio: la massa descrive una **proprietà** di un punto materiale, di un corpo rigido, di un gas o di un elettrone;
- la velocità, rispetto ad un sistema di riferimento, è **attribuita** ad un punto materiale, ad un corpo rigido o a un elettrone;
- la forza **descrive** l'interazione tra due corpi rigidi o tra due elettroni.

Le grandezze fisiche

- In generale, le grandezze fisiche **possono essere misurate**, almeno in linea di principio.

Le grandezze fisiche

- In generale, le grandezze fisiche **possono essere misurate**, almeno in linea di principio.
- Una teoria **interpretata** indica o suggerisce quali sono le grandezze fisiche da sottoporre a misura.

Le grandezze fisiche

- In generale, le grandezze fisiche **possono essere misurate**, almeno in linea di principio.
- Una teoria **interpretata** indica o suggerisce quali sono le grandezze fisiche da sottoporre a misura.
- Il fatto che una grandezza fisica sia misurata non implica che l'entità teorica, di cui essa descrive una proprietà, esista nel Mondo.

Le grandezze fisiche

- In generale, le grandezze fisiche **possono essere misurate**, almeno in linea di principio.
- Una teoria **interpretata** indica o suggerisce quali sono le grandezze fisiche da sottoporre a misura.
- Il fatto che una grandezza fisica sia misurata non implica che l'entità teorica, di cui essa descrive una proprietà, esista nel Mondo.
- Per esempio: Maxwell ha misurato la rigidità dell'Etere, la cui esistenza nel Mondo era allora plausibile. Ma ora non lo è più.

Le grandezze fisiche

- In generale, le grandezze fisiche **possono essere misurate**, almeno in linea di principio.
- Una teoria **interpretata** indica o suggerisce quali sono le grandezze fisiche da sottoporre a misura.
- Il fatto che una grandezza fisica sia misurata non implica che l'entità teorica, di cui essa descrive una proprietà, esista nel Mondo.
- Per esempio: Maxwell ha misurato la rigidità dell'Etere, la cui esistenza nel Mondo era allora plausibile. Ma ora non lo è più.
- Oggi, i fisici dello stato solido misurano le proprietà delle buche (carica elettrica, massa effettiva, mobilità elettrica, lunghezza di diffusione). Ma l'esistenza delle buche nel Mondo non è plausibile.

- Immagine **fisica** del Mondo: l'insieme delle teorie fisiche considerate come ragionevolmente acquisite

Immagini del Mondo

- Immagine **fisica** del Mondo: l'insieme delle teorie fisiche considerate come ragionevolmente acquisite
- immagine del Mondo contenente asserzioni di esistenza nel Mondo di entità teoriche: richiede che almeno alcune delle entità teoriche usate da una teoria esistano – **plausibilmente** – nel Mondo.

Immagini del Mondo

- Immagine **fisica** del Mondo: l'insieme delle teorie fisiche considerate come ragionevolmente acquisite
- immagine del Mondo contenente asserzioni di esistenza nel Mondo di entità teoriche: richiede che almeno alcune delle entità teoriche usate da una teoria esistano – **plausibilmente** – nel Mondo.
- Un'asserzione di esistenza nel Mondo di una entità teorica deve essere plausibile, cioè deve essere compatibile con l'insieme delle conoscenze acquisite.

Immagini del Mondo

- Immagine **fisica** del Mondo: l'insieme delle teorie fisiche considerate come ragionevolmente acquisite
- immagine del Mondo contenente asserzioni di esistenza nel Mondo di entità teoriche: richiede che almeno alcune delle entità teoriche usate da una teoria esistano – **plausibilmente** – nel Mondo.
- Un'asserzione di esistenza nel Mondo di una entità teorica deve essere plausibile, cioè deve essere compatibile con l'insieme delle conoscenze acquisite.
- Tra le due immagini del Mondo si stabilisce, sovente, una tensione.

Immagini del Mondo

- Immagine **fisica** del Mondo: l'insieme delle teorie fisiche considerate come ragionevolmente acquisite
- immagine del Mondo contenente asserzioni di esistenza nel Mondo di entità teoriche: richiede che almeno alcune delle entità teoriche usate da una teoria esistano – **plausibilmente** – nel Mondo.
- Un'asserzione di esistenza nel Mondo di una entità teorica deve essere plausibile, cioè deve essere compatibile con l'insieme delle conoscenze acquisite.
- Tra le due immagini del Mondo si stabilisce, sovente, una tensione.
- Questa tensione, produce – in alcuni casi – una situazione creativa.

Immagini del Mondo

- Immagine **fisica** del Mondo: l'insieme delle teorie fisiche considerate come ragionevolmente acquisite
- immagine del Mondo contenente asserzioni di esistenza nel Mondo di entità teoriche: richiede che almeno alcune delle entità teoriche usate da una teoria esistano – **plausibilmente** – nel Mondo.
- Un'asserzione di esistenza nel Mondo di una entità teorica deve essere plausibile, cioè deve essere compatibile con l'insieme delle conoscenze acquisite.
- Tra le due immagini del Mondo si stabilisce, sovente, una tensione.
- Questa tensione, produce – in alcuni casi – una situazione creativa.
- Esempi: i quanti di luce, le onde di de Broglie.

Immagine fisica del Mondo: Hertz

Nel cercare di trarre inferenze sul futuro dal passato, noi procediamo sempre in questo modo. Costruiamo delle immagini o simboli degli oggetti esterni; e diamo loro una forma tale che le necessarie conseguenze delle immagini nel pensiero sono sempre le necessarie conseguenze nella natura delle cose descritte

[...]

Le immagini di cui stiamo parlando sono le nostre concezioni delle cose. Esse sono in conformità con le cose stesse sotto *un* aspetto importante: perché soddisfano la condizione suesposta. Non è necessario, per i nostri fini, che esse siano in conformità con le cose sotto ogni altro aspetto qualsivoglia. Infatti, noi non sappiamo, né possiamo sapere in alcun modo, se le nostre concezioni delle cose sono in conformità con esse sotto ogni altro aspetto che non sia questo *unico* fondamentale aspetto [Hertz, 1899 *The Principles of Mechanics Presented in a New Form* (MacMillan, London)].

Immagine fisica del Mondo: Planck

La storia della fisica ci mostra in ogni pagina che questo difficilissimo compito fu sempre risolto ammettendo un mondo reale indipendente dai sensi umani, e non c'è dubbio che sarà così anche in futuro. Oltre al mondo sensibile ed al mondo reale c'è ancora, ed occorre tenerlo ben distinto dagli altri due, il mondo quale ce lo presenta la Scienza fisica: l'immagine fisica del mondo. Questo terzo mondo, contrariamente agli altri due, è stato creato coscientemente per un determinato scopo dallo spirito umano, e perciò varia e va soggetto ad un certo sviluppo [Planck, 1942, La conoscenza del mondo fisico (Einaudi, Torino)].

Interpretazione di una teoria

- Per interpretare una teoria dobbiamo:

Interpretazione di una teoria

- Per interpretare una teoria dobbiamo:
- Individuare le connessioni causali operanti nella teoria .

Interpretazione di una teoria

- Per interpretare una teoria dobbiamo:
- Individuare le connessioni causali operanti nella teoria .
- Nei fenomeni descritti dalla teoria operano, plausibilmente, connessioni causali corrispondenti

Interpretazione di una teoria

- Per interpretare una teoria dobbiamo:
- Individuare le connessioni causali operanti nella teoria .
- Nei fenomeni descritti dalla teoria operano, plausibilmente, connessioni causali corrispondenti
- Individuare le grandezze fisiche da sottoporre a misura.

Interpretazione di una teoria

- Per interpretare una teoria dobbiamo:
- Individuare le connessioni causali operanti nella teoria .
- Nei fenomeni descritti dalla teoria operano, plausibilmente, connessioni causali corrispondenti
- Individuare le grandezze fisiche da sottoporre a misura.
- Queste condizioni valgono anche per la fisica quantica.

La MQ non ha bisogno di “interpretazioni”

“Il filo comune a tutte le “interpretazioni” non convenzionali (standard) è il desiderio di creare una nuova teoria con caratteristiche che corrispondano a qualche realtà indipendente dai nostri esperimenti potenziali. Ma il tentativo di appagare una immagine del Mondo classica gravando la meccanica quantica con variabili nascoste, molti mondi, regole di consistenza, o collassi spontanei [della funzione d'onda], senza alcun incremento della sua capacità predittiva, dà soltanto l'illusione di una migliore comprensione. *Contrariamente a questi desideri, la teoria quantica non descrive la realtà fisica.* Quello che fa è fornire un algoritmo per calcolare la probabilità di eventi macroscopici (“clicks dei rivelatori”) che sono la conseguenza dei nostri interventi sperimentali. Questa scarna definizione dello scopo della teoria quantica è la sola interpretazione di cui abbiamo bisogno gli sperimentatori o i teorici” [Fuchs C A and Peres A 2000 *Phys. Today* **53** 70]

Individuare le connessioni causali operanti nella teoria

- Come interpretiamo l'equazione?:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \quad (3)$$

Individuare le connessioni causali operanti nella teoria

- Come interpretiamo l'equazione?:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \quad (3)$$

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

Individuare le connessioni causali operanti nella teoria

- Come interpretiamo l'equazione?:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \quad (3)$$

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

Individuare le connessioni causali operanti nella teoria

- Come interpretiamo l'equazione?:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \quad (3)$$

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

Individuare le connessioni causali operanti nella teoria

- Come interpretiamo l'equazione?:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \quad (3)$$

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

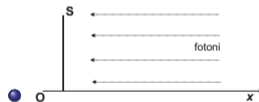


Figura: La superficie S , completamente assorbente, è investita da un fascio monocromatico di fotoni. La variazione della quantità di moto dei fotoni assorbiti genera una forza sulla superficie S

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

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (7)$$

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'

- Consideriamo l'equazione di Maxwell:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- Consideriamo l'equazione di Maxwell:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- Usualmente si dice che 'una variazione temporale del campo magnetico genera (causa) un campo elettrico

- Consideriamo l'equazione di Maxwell:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- Usualmente si dice che 'una variazione temporale del campo magnetico genera (causa) un campo elettrico
- Questa interpretazione causale non è compatibile con l'assunzione di base secondo cui i campi sono generati dalle cariche

- Consideriamo l'equazione di Maxwell:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- Usualmente si dice che 'una variazione temporale del campo magnetico genera (causa) un campo elettrico
- Questa interpretazione causale non è compatibile con l'assunzione di base secondo cui i campi sono generati dalle cariche
- L'equazione di Maxwell stabilisce **solo** una relazione tra i due campi, senza alcuna connessione causale

- La situazione si complica ulteriormente se consideriamo la stessa equazione in forma integrale:

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS$$

- La situazione si complica ulteriormente se consideriamo la stessa equazione in forma integrale:

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS$$

- Questa equazione, nel caso dell'induzione elettromagnetica, è usualmente interpretata affermando che la variazione del flusso del campo magnetico attraverso la superficie S genera (causa) una forza elettromotrice lungo il circuito l

- La situazione si complica ulteriormente se consideriamo la stessa equazione in forma integrale:

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS$$

- Questa equazione, nel caso dell'induzione elettromagnetica, è usualmente interpretata affermando che la variazione del flusso del campo magnetico attraverso la superficie S genera (causa) una forza elettromotrice lungo il circuito l
- Questa interpretazione causale non è permessa perché viola la condizione di località

- La situazione si complica ulteriormente se consideriamo la stessa equazione in forma integrale:

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS$$

- Questa equazione, nel caso dell'induzione elettromagnetica, è usualmente interpretata affermando che la variazione del flusso del campo magnetico attraverso la superficie S genera (causa) una forza elettromotrice lungo il circuito l
- Questa interpretazione causale non è permessa perché viola la condizione di località
- Presentare le equazioni di Maxwell in forma integrale pone seri problemi epistemologici e didattici

- La forma integrale delle equazioni di Maxwell annulla l'intrinseca località delle equazioni differenziali

Campi e cause III

- La forma integrale delle equazioni di Maxwell annulla l'intrinseca località delle equazioni differenziali
- Di conseguenza, rende impossibile spiegare la produzione delle onde elettromagnetiche

Campi e cause III

- La forma integrale delle equazioni di Maxwell annulla l'intrinseca località delle equazioni differenziali
- Di conseguenza, rende impossibile spiegare la produzione delle onde elettromagnetiche
- È mia opinione che questo stravolgimento concettuale vada evitato

Campi e cause III

- La forma integrale delle equazioni di Maxwell annulla l'intrinseca località delle equazioni differenziali
- Di conseguenza, rende impossibile spiegare la produzione delle onde elettromagnetiche
- È mia opinione che questo stravolgimento concettuale vada evitato
- Perché non si tratta di fare una approssimazione, ma di negare l'essenza stessa di una teoria

'Interpretazione' e MQ I. Atomo di idrogeno

- Atomo di idrogeno

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi(r, \theta, \phi) = E\psi(r, \theta, \phi) \quad (8)$$

'Interpretazione' e MQ I. Atomo di idrogeno

- Atomo di idrogeno

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi(r, \theta, \phi) = E\psi(r, \theta, \phi) \quad (8)$$

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

'Interpretazione' e MQ I. Atomo di idrogeno

- Atomo di idrogeno

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi(r, \theta, \phi) = E\psi(r, \theta, \phi) \quad (8)$$

- L'interazione coulombiana **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 I. Atomo di idrogeno

- Atomo di idrogeno

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi(r, \theta, \phi) = E\psi(r, \theta, \phi) \quad (8)$$

- L'interazione coulombiana **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 I. Atomo di idrogeno

- Atomo di idrogeno

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi(r, \theta, \phi) = E\psi(r, \theta, \phi) \quad (8)$$

- L'interazione coulombiana **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 II. Livelli dell'atomo di idrogeno

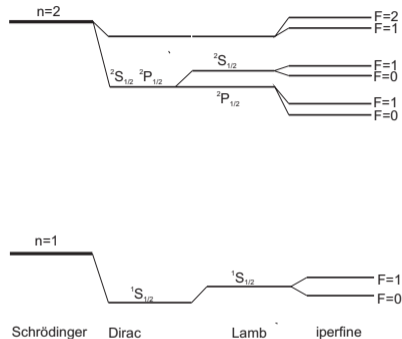


Figura: I vari contributi ai primi due livelli dell'atomo di idrogeno (non in scala). In termini di connessioni causali (si veda il testo), la didascalia della figura deve essere letta con queste sostituzioni: Schrödinger \rightarrow interazione coulombiana; Dirac \rightarrow correzione relativistica + interazione spin - orbita; Lamb \rightarrow fluttuazioni e polarizzazioni del 'vuoto'; iperfine \rightarrow interazione tra il momento magnetico dell'elettrone e quello del protone.

Connessioni causali nella descrizione dei dispositivi quantici

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

Connessioni causali nella descrizione dei dispositivi quantici

- I dispositivi quantici 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.

Connessioni causali nella descrizione dei dispositivi quantici

- I dispositivi quantici 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.

Connessioni causali nella descrizione dei dispositivi quantici

- I dispositivi quantici 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 ricombinazione di elettroni e buche **causa** l'emissione di fotoni.

Connessioni causali nella descrizione dei dispositivi quantici

- I dispositivi quantici 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 ricombinazione di elettroni e buche **causa** l'emissione di fotoni.
- Nel Mondo sono plausibilmente operanti catene causali **corrispondenti** a quelle della teoria.

Il significato di “significato fisico”

- In generale si può attribuire significato fisico a diverse cose: una asserzione, una entità teorica, una grandezza fisica. . .

Il significato di “significato fisico”

- In generale si può attribuire significato fisico a diverse cose: una asserzione, una entità teorica, una grandezza fisica. . .
- È importante definire i criteri secondo cui una entità teorica od una grandezza fisica hanno significato fisico

Il significato di “significato fisico”

- In generale si può attribuire significato fisico a diverse cose: una asserzione, una entità teorica, una grandezza fisica. . .
- È importante definire i criteri secondo cui una entità teorica od una grandezza fisica hanno significato fisico
- Questi criteri debbono essere epistemologicamente rigidi. . .

Il significato di “significato fisico”

- In generale si può attribuire significato fisico a diverse cose: una asserzione, una entità teorica, una grandezza fisica. . .
- È importante definire i criteri secondo cui una entità teorica od una grandezza fisica hanno significato fisico
- Questi criteri debbono essere epistemologicamente rigidi. . .
- . . . ma storicamente flessibili

Criteri di significanza per le entità teoriche

- Una entità teorica ha significato fisico se:

Criteri di significanza per le entità teoriche

- Una entità teorica ha significato fisico se:
- Criterio forte: la sua eliminazione riduce la **capacità predittiva** della teoria

Criteri di significanza per le entità teoriche

- Una entità teorica ha significato fisico se:
- Criterio forte: la sua eliminazione riduce la **capacità predittiva** della teoria
- Criterio debole: la sua eliminazione riduce la **capacità descrittiva o euristica** della teoria

Criteri di significanza per le entità teoriche

- Una entità teorica ha significato fisico se:
- Criterio forte: la sua eliminazione riduce la **capacità predittiva** della teoria
- Criterio debole: la sua eliminazione riduce la **capacità descrittiva o euristica** della teoria
- Esempi: Etere, spazio - tempo. . .

Criteri di significanza per le grandezze fisiche

- Una grandezza fisica ha significato fisico se:

Criteri di significanza per le grandezze fisiche

- Una grandezza fisica ha significato fisico se:
- Criterio forte: la sua eliminazione riduce la **capacità predittiva** della teoria

Criteri di significanza per le grandezze fisiche

- Una grandezza fisica ha significato fisico se:
- Criterio forte: la sua eliminazione riduce la **capacità predittiva** della teoria
- Esempi: quantità di moto dei quanti di luce, spin dell'elettrone, lunghezza d'onda di de Broglie. . .

Criteri di significanza per le grandezze fisiche

- Una grandezza fisica ha significato fisico se:
- Criterio forte: la sua eliminazione riduce la **capacità predittiva** della teoria
- Esempi: quantità di moto dei quanti di luce, spin dell'elettrone, lunghezza d'onda di de Broglie. . .
- Criterio debole: la sua eliminazione riduce la **capacità descrittiva** della teoria

Criteri di significanza per le grandezze fisiche

- Una grandezza fisica ha significato fisico se:
- Criterio forte: la sua eliminazione riduce la **capacità predittiva** della teoria
- Esempi: quantità di moto dei quanti di luce, spin dell'elettrone, lunghezza d'onda di de Broglie. . .
- Criterio debole: la sua eliminazione riduce la **capacità descrittiva** della teoria
- Esempio: il campo $\vec{H} = \vec{B}_0 / \mu_0$

L'invenzione di una nuova entità teorica...

- Nasce, in generale, in base all'ipotesi che questa entità teorica esista nel Mondo.

L'invenzione di una nuova entità teorica...

- Nasce, in generale, in base all'ipotesi che questa entità teorica esista nel Mondo.
- Può segnare una svolta nella storia della fisica: i quanti di luce.

L'invenzione di una nuova entità teorica...

- Nasce, in generale, in base all'ipotesi che questa entità teorica esista nel Mondo.
- Può segnare una svolta nella storia della fisica: i quanti di luce.
- Non a caso, questa entità teorica soddisfa i criteri di significanza

L'invenzione di una nuova entità teorica...

- Nasce, in generale, in base all'ipotesi che questa entità teorica esista nel Mondo.
- Può segnare una svolta nella storia della fisica: i quanti di luce.
- Non a caso, questa entità teorica soddisfa i criteri di significanza
- Può essere presto dimenticata: i tubi elettrici di J. J. Thomson.

L'invenzione di una nuova entità teorica...

- Nasce, in generale, in base all'ipotesi che questa entità teorica esista nel Mondo.
- Può segnare una svolta nella storia della fisica: i quanti di luce.
- Non a caso, questa entità teorica soddisfa i criteri di significanza
- Può essere presto dimenticata: i tubi elettrici di J. J. Thomson.
- Non a caso, questa entità teorica **NON** soddisfa i criteri di significanza

L'invenzione di una nuova entità teorica: i quanti di luce

- L'ipotesi dei quanti di luce presupponeva, che, nel Mondo, l'energia della luce fosse distribuita in elementi discreti di energia “localizzati in punti dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza”. Era quindi una ipotesi su come è fatto il Mondo e come funziona.

L'invenzione di una nuova entità teorica: i quanti di luce

- L'ipotesi dei quanti di luce presupponeva, che, nel Mondo, l'energia della luce fosse distribuita in elementi discreti di energia “localizzati in punti dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza”. Era quindi una ipotesi su come è fatto il Mondo e come funziona.
- Questa ipotesi era in netto contrasto con l'immagine del Mondo ottocentesca secondo cui la distribuzione spaziale dell'energia elettromagnetica era continua.

L'invenzione di una nuova entità teorica: i quanti di luce

- L'ipotesi dei quanti di luce presupponeva, che, nel Mondo, l'energia della luce fosse distribuita in elementi discreti di energia “localizzati in punti dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza”. Era quindi una ipotesi su come è fatto il Mondo e come funziona.
- Questa ipotesi era in netto contrasto con l'immagine del Mondo ottocentesca secondo cui la distribuzione spaziale dell'energia elettromagnetica era continua.
- La tensione tra le due descrizioni – ondulatoria (continua) e corpuscolare (discreta) – della luce perdura tuttora.

L'invenzione di una nuova entità teorica: i 'tubi elettrici' di J. J. Thomson

- Thomson (1903 - 1910) aveva concepito e sviluppato l'idea che la distribuzione spaziale dell'energia elettromagnetica fosse distribuita in modo discontinuo lungo 'tubi elettrici'.
R. McCormach, 1967, J.J. Thomson and the structure of light, *Br. J. His. Sc.*, **3**, 362.

L'invenzione di una nuova entità teorica: i 'tubi elettrici' di J. J. Thomson

- Thomson (1903 - 1910) aveva concepito e sviluppato l'idea che la distribuzione spaziale dell'energia elettromagnetica fosse distribuita in modo discontinuo lungo 'tubi elettrici'. R. McCormach, 1967, J.J. Thomson and the structure of light, *Br. J. His. Sc.*, **3**, 362.
- “La teoria della luce di Thomson fu inconcludente e il suo impeto iniziale deviò nel coinvolgimento nella critica della teoria quantica” [McCormach, p. 385].

L'invenzione di una nuova entità teorica: i 'tubi elettrici' di J. J. Thomson

- Thomson (1903 - 1910) aveva concepito e sviluppato l'idea che la distribuzione spaziale dell'energia elettromagnetica fosse distribuita in modo discontinuo lungo 'tubi elettrici'. R. McCormach, 1967, J.J. Thomson and the structure of light, *Br. J. His. Sc.*, **3**, 362.
- “La teoria della luce di Thomson fu inconcludente e il suo impeto iniziale deviò nel coinvolgimento nella critica della teoria quantica” [McCormach, p. 385].
- Tuttavia, essa suggerì il primo esperimento di diffrazione con luce molto debole.

Le due invenzioni a confronto

- Einstein riteneva che la teoria di Maxwell fosse incapace di descrivere i processi di emissione e assorbimento della luce da parte della materia.

Le due invenzioni a confronto

- Einstein riteneva che la teoria di Maxwell fosse incapace di descrivere i processi di emissione e assorbimento della luce da parte della materia.
- Thonsom riteneva invece necessario formulare una versione della teoria di Maxwell che prevedesse una distribuzione spaziale discontinua dell'energia.

Le due invenzioni a confronto

- Einstein riteneva che la teoria di Maxwell fosse incapace di descrivere i processi di emissione e assorbimento della luce da parte della materia.
- Thomson riteneva invece necessario formulare una versione della teoria di Maxwell che prevedesse una distribuzione spaziale discontinua dell'energia.
- Einstein, con la formula $E_{ph} = h\nu$ individuava l'energia di un quanto di luce.

Le due invenzioni a confronto

- Einstein riteneva che la teoria di Maxwell fosse incapace di descrivere i processi di emissione e assorbimento della luce da parte della materia.
- Thomson riteneva invece necessario formulare una versione della teoria di Maxwell che prevedesse una distribuzione spaziale discontinua dell'energia.
- Einstein, con la formula $E_{ph} = h\nu$ individuava l'energia di un quanto di luce.
- Thomson non ha mai associato un valore definito alla ipotizzata unità elementare di energia elettromagnetica.

Le due invenzioni a confronto

- Einstein riteneva che la teoria di Maxwell fosse incapace di descrivere i processi di emissione e assorbimento della luce da parte della materia.
- Thomson riteneva invece necessario formulare una versione della teoria di Maxwell che prevedesse una distribuzione spaziale discontinua dell'energia.
- Einstein, con la formula $E_{ph} = h\nu$ individuava l'energia di un quanto di luce.
- Thomson non ha mai associato un valore definito alla ipotizzata unità elementare di energia elettromagnetica.
- Einstein ha cercato di ancorare l'ipotesi dei quanti di luce alla fisica statistica [analogia tra la dipendenza dal volume dell'entropia del gas perfetto e quella dell'entropia di un gas di quanti di luce nell'approssimazione di Wien].

Le due invenzioni a confronto

- Einstein riteneva che la teoria di Maxwell fosse incapace di descrivere i processi di emissione e assorbimento della luce da parte della materia.
- Thomson riteneva invece necessario formulare una versione della teoria di Maxwell che prevedesse una distribuzione spaziale discontinua dell'energia.
- Einstein, con la formula $E_{ph} = h\nu$ individuava l'energia di un quanto di luce.
- Thomson non ha mai associato un valore definito alla ipotizzata unità elementare di energia elettromagnetica.
- Einstein ha cercato di ancorare l'ipotesi dei quanti di luce alla fisica statistica [analogia tra la dipendenza dal volume dell'entropia del gas perfetto e quella dell'entropia di un gas di quanti di luce nell'approssimazione di Wien].
- Thomson non ha mai sviluppato una teoria maxwelliana che prevedesse una distribuzione discreta dell'energia elettromagnetica.

Le due invenzioni a confronto

- Einstein riteneva che la teoria di Maxwell fosse incapace di descrivere i processi di emissione e assorbimento della luce da parte della materia.
- Thomson riteneva invece necessario formulare una versione della teoria di Maxwell che prevedesse una distribuzione spaziale discontinua dell'energia.
- Einstein, con la formula $E_{ph} = h\nu$ individuava l'energia di un quanto di luce.
- Thomson non ha mai associato un valore definito alla ipotizzata unità elementare di energia elettromagnetica.
- Einstein ha cercato di ancorare l'ipotesi dei quanti di luce alla fisica statistica [analogia tra la dipendenza dal volume dell'entropia del gas perfetto e quella dell'entropia di un gas di quanti di luce nell'approssimazione di Wien].
- Thomson non ha mai sviluppato una teoria maxwelliana che prevedesse una distribuzione discreta dell'energia elettromagnetica.
- Einstein ha fornito una spiegazione dell'effetto fotoelettrico [$E_{cin} = P - h\nu$].

Le due invenzioni a confronto

- Einstein riteneva che la teoria di Maxwell fosse incapace di descrivere i processi di emissione e assorbimento della luce da parte della materia.
- Thomson riteneva invece necessario formulare una versione della teoria di Maxwell che prevedesse una distribuzione spaziale discontinua dell'energia.
- Einstein, con la formula $E_{ph} = h\nu$ individuava l'energia di un quanto di luce.
- Thomson non ha mai associato un valore definito alla ipotizzata unità elementare di energia elettromagnetica.
- Einstein ha cercato di ancorare l'ipotesi dei quanti di luce alla fisica statistica [analogia tra la dipendenza dal volume dell'entropia del gas perfetto e quella dell'entropia di un gas di quanti di luce nell'approssimazione di Wien].
- Thomson non ha mai sviluppato una teoria maxwelliana che prevedesse una distribuzione discreta dell'energia elettromagnetica.
- Einstein ha fornito una spiegazione dell'effetto fotoelettrico [$E_{cin} = P - h\nu$].
- Thomson non ha mai individuato esperimenti che potessero suffragare la sua ipotesi.

L'esperimento di Geoffrey Ingram Taylor: 1908

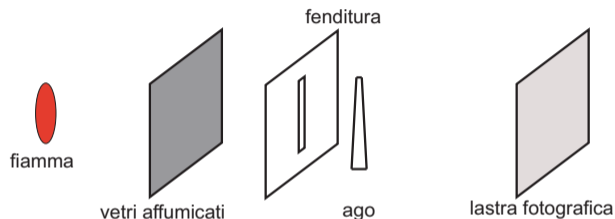


Figura: Esperimento di diffrazione a bassa intensità luminosa. Taylor G I 1908 Interference fringes with feeble light Proc. Camb. Phil. Soc. **15** 114

L'invenzione della velocità limite c

- Assumeremo questa congettura (il contenuto della quale nel seguito sarà chiamato “principio di relatività”) come postulato, e oltre a questo introdurremo il postulato, con questo solo apparentemente incompatibile, secondo cui la luce nello spazio vuoto si propaga sempre con una velocità determinata V , indipendente dallo stato di moto dei corpi emittenti. [Einstein, 1905]

L'invenzione della velocità limite c

- Assumeremo questa congettura (il contenuto della quale nel seguito sarà chiamato “principio di relatività”) come postulato, e oltre a questo introdurremo il postulato, con questo solo apparentemente incompatibile, secondo cui la luce nello spazio vuoto si propaga sempre con una velocità determinata V , indipendente dallo stato di moto dei corpi emittenti. [Einstein, 1905]
- Il postulato dell'esistenza della velocità limite c è suggerito da un'idea di come accadono le cose nel Mondo

L'invenzione della velocità limite c

- Assumeremo questa congettura (il contenuto della quale nel seguito sarà chiamato “principio di relatività”) come postulato, e oltre a questo introdurremo il postulato, con questo solo apparentemente incompatibile, secondo cui la luce nello spazio vuoto si propaga sempre con una velocità determinata V , indipendente dallo stato di moto dei corpi emittenti. [Einstein, 1905]
- Il postulato dell'esistenza della velocità limite c è suggerito da un'idea di come accadono le cose nel Mondo
- Cioè da una immagine del Mondo di uno scienziato, diversa dalla immagine fisica del Mondo, basata sulla conoscenza acquisita.

L'invenzione di h

- Planck, 1899.

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} b e^{-a\nu/T} \quad \text{legge di Wien}$$

L'invenzione di h

- Planck, 1899.

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \mathbf{b} e^{-\mathbf{a}\nu/T} \quad \text{legge di Wien}$$

- Dove $\mathbf{b} = 6.885 \times 10^{-27}$ erg s; e $\mathbf{a} = 0.4818 \times 10^{-10}$ s K sono costanti **universali**.

L'invenzione di h

- Planck, 1899.

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \mathbf{b} e^{-\mathbf{a}\nu/T} \quad \text{legge di Wien}$$

- Dove $\mathbf{b} = 6.885 \times 10^{-27}$ erg s; e $\mathbf{a} = 0.4818 \times 10^{-10}$ s K sono costanti **universali**.
- Secondo Planck, l'universalità di queste costanti era dovuta al fatto che la legge della radiazione di corpo nero, essendo indipendente dalla natura del corpo, non poteva che contenere costanti universali.

L'invenzione di h

- Planck, 1899.

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \mathbf{b} e^{-\mathbf{a}\nu/T} \quad \text{legge di Wien}$$

- Dove $\mathbf{b} = 6.885 \times 10^{-27}$ erg s; e $\mathbf{a} = 0.4818 \times 10^{-10}$ s K sono costanti **universali**.
- Secondo Planck, l'universalità di queste costanti era dovuta al fatto che la legge della radiazione di corpo nero, essendo indipendente dalla natura del corpo, non poteva che contenere costanti universali.
- $\mathbf{b} = \mathbf{h}$ $\mathbf{a} = \mathbf{h}/\mathbf{k}_B$

L'invenzione di h

- Planck, 1899.

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \mathbf{b} e^{-\mathbf{a}\nu/T} \quad \text{legge di Wien}$$

- Dove $\mathbf{b} = 6.885 \times 10^{-27}$ erg s; e $\mathbf{a} = 0.4818 \times 10^{-10}$ s K sono costanti **universali**.
- Secondo Planck, l'universalità di queste costanti era dovuta al fatto che la legge della radiazione di corpo nero, essendo indipendente dalla natura del corpo, non poteva che contenere costanti universali.
- $\mathbf{b} = \mathbf{h}$ $\mathbf{a} = \mathbf{h}/\mathbf{k}_B$
- Planck, 1900. $E = \mathbf{h}\nu$

L'invenzione di h

- Planck, 1899.

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \mathbf{b} e^{-\mathbf{a}\nu/T} \quad \text{legge di Wien}$$

- Dove $\mathbf{b} = 6.885 \times 10^{-27}$ erg s; e $\mathbf{a} = 0.4818 \times 10^{-10}$ s K sono costanti **universali**.
- Secondo Planck, l'universalità di queste costanti era dovuta al fatto che la legge della radiazione di corpo nero, essendo indipendente dalla natura del corpo, non poteva che contenere costanti universali.
- $\mathbf{b} = \mathbf{h}$ $\mathbf{a} = \mathbf{h}/\mathbf{k}_B$
- Planck, 1900. $E = \mathbf{h}\nu$
- Tuttavia, Planck non interpreta fisicamente questa relazione. Essa assumerà un significato fisico preciso quando Einstein la interpreterà come l'**energia di un quanto di luce**:
 $E_{ph} = h\nu$.

L'invenzione dell'onda "fittizia" I (de Broglie, 1922 - 1925)

- I quanti di luce posseggono una massa, seppur piccolissima (1922). Per i quanti, vale la relazione: $E = h\nu$, dove ν è la frequenza della radiazione luminosa trattata come un'onda.

L'invenzione dell'onda "fittizia" I (de Broglie, 1922 - 1925)

- I quanti di luce posseggono una massa, seppur piccolissima (1922). Per i quanti, vale la relazione: $E = h\nu$, dove ν è la frequenza della radiazione luminosa trattata come un'onda.
- L'idea è quella di trattare quanti di luce e corpi dotati di massa a riposo allo stesso modo: un modo **singolare** di superare la dicotomia posta in luce da Einstein nel 1905.

L'invenzione dell'onda "fittizia" I (de Broglie, 1922 - 1925)

- I quanti di luce posseggono una massa, seppur piccolissima (1922). Per i quanti, vale la relazione: $E = h\nu$, dove ν è la frequenza della radiazione luminosa trattata come un'onda.
- L'idea è quella di trattare quanti di luce e corpi dotati di massa a riposo allo stesso modo: un modo **singolare** di superare la dicotomia posta in luce da Einstein nel 1905.
- Quindi: $mc^2 = h\nu_0$, dove ν_0 è la frequenza di un moto periodico interno (1923).

L'invenzione dell'onda "fittizia" I (de Broglie, 1922 - 1925)

- I quanti di luce posseggono una massa, seppur piccolissima (1922). Per i quanti, vale la relazione: $E = h\nu$, dove ν è la frequenza della radiazione luminosa trattata come un'onda.
- L'idea è quella di trattare quanti di luce e corpi dotati di massa a riposo allo stesso modo: un modo **singolare** di superare la dicotomia posta in luce da Einstein nel 1905.
- Quindi: $mc^2 = h\nu_0$, dove ν_0 è la frequenza di un moto periodico interno (1923).
- In un SRI che vede la particella in moto con velocità $v = \beta c$; $\beta < 1$, l'energia della particella è data da: $E = mc^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$.

L'invenzione dell'onda "fittizia" I (de Broglie, 1922 - 1925)

- I quanti di luce posseggono una massa, seppur piccolissima (1922). Per i quanti, vale la relazione: $E = h\nu$, dove ν è la frequenza della radiazione luminosa trattata come un'onda.
- L'idea è quella di trattare quanti di luce e corpi dotati di massa a riposo allo stesso modo: un modo **singolare** di superare la dicotomia posta in luce da Einstein nel 1905.
- Quindi: $mc^2 = h\nu_0$, dove ν_0 è la frequenza di un moto periodico interno (1923).
- In un SRI che vede la particella in moto con velocità $v = \beta c$; $\beta < 1$, l'energia della particella è data da: $E = mc^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$.
- Alla particella in moto è quindi **attribuibile** una frequenza data da $\nu = \nu_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$

L'invenzione dell'onda "fittizia" I (de Broglie, 1922 - 1925)

- I quanti di luce posseggono una massa, seppur piccolissima (1922). Per i quanti, vale la relazione: $E = h\nu$, dove ν è la frequenza della radiazione luminosa trattata come un'onda.
- L'idea è quella di trattare quanti di luce e corpi dotati di massa a riposo allo stesso modo: un modo **singolare** di superare la dicotomia posta in luce da Einstein nel 1905.
- Quindi: $mc^2 = h\nu_0$, dove ν_0 è la frequenza di un moto periodico interno (1923).
- In un SRI che vede la particella in moto con velocità $v = \beta c$; $\beta < 1$, l'energia della particella è data da: $E = mc^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$.
- Alla particella in moto è quindi **attribuibile** una frequenza data da $\nu = \nu_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$
- **Ben diversa** da quella che lo stesso SRI attribuirebbe al moto periodico interno della particella $\nu_1 = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$.

L'invenzione dell'onda "fittizia" II (de Broglie, 1922 - 1925)

- Si tratta allora di attribuire un significato fisico all'onda "fittizia" di frequenza ν .

L'invenzione dell'onda "fittizia" II (de Broglie, 1922 - 1925)

- Si tratta allora di attribuire un significato fisico all'onda "fittizia" di frequenza ν .
- Se si attribuisce all'onda "fittizia" la velocità di fase $V = c/\beta > c$ allora vale il teorema dell' "armonia delle fasi": se le due onde di frequenza ν_1 e ν all'istante $t = 0$ sono in fase nel sistema di riferimento del laboratorio, esse continueranno ad essere in fase ad ogni istante successivo.

L'invenzione dell'onda "fittizia" II (de Broglie, 1922 - 1925)

- Si tratta allora di attribuire un significato fisico all'onda "fittizia" di frequenza ν .
- Se si attribuisce all'onda "fittizia" la velocità di fase $V = c/\beta > c$ allora vale il teorema dell'"armonia delle fasi": se le due onde di frequenza ν_1 e ν all'istante $t = 0$ sono in fase nel sistema di riferimento del laboratorio, esse continueranno ad essere in fase ad ogni istante successivo.
- de Broglie considera quindi un pacchetto d'onde le cui singole componenti hanno frequenze molto vicine a ν e 'dimostra' che la velocità di gruppo di questo pacchetto d'onde coincide con la velocità v dell'oggetto mobile.

L'invenzione dell'onda "fittizia" II (de Broglie, 1922 - 1925)

- Si tratta allora di attribuire un significato fisico all'onda "fittizia" di frequenza ν .
- Se si attribuisce all'onda "fittizia" la velocità di fase $V = c/\beta > c$ allora vale il teorema dell'"armonia delle fasi": se le due onde di frequenza ν_1 e ν all'istante $t = 0$ sono in fase nel sistema di riferimento del laboratorio, esse continueranno ad essere in fase ad ogni istante successivo.
- de Broglie considera quindi un pacchetto d'onde le cui singole componenti hanno frequenze molto vicine a ν e 'dimostra' che la velocità di gruppo di questo pacchetto d'onde coincide con la velocità v dell'oggetto mobile.
- Tuttavia, questa dimostrazione è stata posta in discussione da diversi studiosi.

L'invenzione dell'onda "fittizia" II (de Broglie, 1922 - 1925)

- Si tratta allora di attribuire un significato fisico all'onda "fittizia" di frequenza ν .
- Se si attribuisce all'onda "fittizia" la velocità di fase $V = c/\beta > c$ allora vale il teorema dell'"armonia delle fasi": se le due onde di frequenza ν_1 e ν all'istante $t = 0$ sono in fase nel sistema di riferimento del laboratorio, esse continueranno ad essere in fase ad ogni istante successivo.
- de Broglie considera quindi un pacchetto d'onde le cui singole componenti hanno frequenze molto vicine a ν e 'dimostra' che la velocità di gruppo di questo pacchetto d'onde coincide con la velocità v dell'oggetto mobile.
- Tuttavia, questa dimostrazione è stata posta in discussione da diversi studiosi.
- Usando la relazione $Vv = (c/\beta)(\beta c) = c^2$, si ottiene immediatamente che la lunghezza d'onda dell'onda fittizia è data da: $\lambda_{dB} = h/p$.

L'invenzione dell'onda "fittizia" II (de Broglie, 1922 - 1925)

- Si tratta allora di attribuire un significato fisico all'onda "fittizia" di frequenza ν .
- Se si attribuisce all'onda "fittizia" la velocità di fase $V = c/\beta > c$ allora vale il teorema dell'"armonia delle fasi": se le due onde di frequenza ν_1 e ν all'istante $t = 0$ sono in fase nel sistema di riferimento del laboratorio, esse continueranno ad essere in fase ad ogni istante successivo.
- de Broglie considera quindi un pacchetto d'onde le cui singole componenti hanno frequenze molto vicine a ν e 'dimostra' che la velocità di gruppo di questo pacchetto d'onde coincide con la velocità v dell'oggetto mobile.
- Tuttavia, questa dimostrazione è stata posta in discussione da diversi studiosi.
- Usando la relazione $Vv = (c/\beta)(\beta c) = c^2$, si ottiene immediatamente che la lunghezza d'onda dell'onda fittizia è data da: $\lambda_{dB} = h/p$.
- de Broglie non svolge questa semplice derivazione e non scrive mai la formula magica in questo modo. Nei suoi scritti compaiono però formule equivalenti [Brown e de Martins, p. 1132 - 33].

L'invenzione dell'onda "fittizia" II (de Broglie, 1922 - 1925)

- Si tratta allora di attribuire un significato fisico all'onda "fittizia" di frequenza ν .
- Se si attribuisce all'onda "fittizia" la velocità di fase $V = c/\beta > c$ allora vale il teorema dell'"armonia delle fasi": se le due onde di frequenza ν_1 e ν all'istante $t = 0$ sono in fase nel sistema di riferimento del laboratorio, esse continueranno ad essere in fase ad ogni istante successivo.
- de Broglie considera quindi un pacchetto d'onde le cui singole componenti hanno frequenze molto vicine a ν e 'dimostra' che la velocità di gruppo di questo pacchetto d'onde coincide con la velocità v dell'oggetto mobile.
- Tuttavia, questa dimostrazione è stata posta in discussione da diversi studiosi.
- Usando la relazione $Vv = (c/\beta)(\beta c) = c^2$, si ottiene immediatamente che la lunghezza d'onda dell'onda fittizia è data da: $\lambda_{dB} = h/p$.
- de Broglie non svolge questa semplice derivazione e non scrive mai la formula magica in questo modo. Nei suoi scritti compaiono però formule equivalenti [Brown e de Martins, p. 1132 - 33].
- La formula $\lambda = h/p$ compare per la prima volta in una comunicazione di Compton alla Società Americana di Fisica il primo dicembre 1923.

Due formule magiche a confronto. $E_{ph} = h\nu$ e $\lambda_{dB} = h/p$. I

- La formula di Einstein è stata ancorata alla fisica statistica [anche per l'attribuzione della quantità di moto $h\nu/c$ al quanto di luce].

Due formule magiche a confronto. $E_{ph} = h\nu$ e $\lambda_{dB} = h/p$. I

- La formula di Einstein è stata ancorata alla fisica statistica [anche per l'attribuzione della quantità di moto $h\nu/c$ al quanto di luce].
- Essa lega l'energia di un quanto alla frequenza della radiazione trattata come un'onda.

Due formule magiche a confronto. $E_{ph} = h\nu$ e $\lambda_{dB} = h/p$. I

- La formula di Einstein è stata ancorata alla fisica statistica [anche per l'attribuzione della quantità di moto $h\nu/c$ al quanto di luce].
- Essa lega l'energia di un quanto alla frequenza della radiazione trattata come un'onda.
- L'esperimento dice che, in talune situazioni, quando il numero dei fotoni usati – non importa se uno alla volta o tutti insieme – è sufficientemente elevato, i risultati sperimentali possono essere descritti in termini di onde.

Due formule magiche a confronto. $E_{ph} = h\nu$ e $\lambda_{dB} = h/p$. I

- La formula di Einstein è stata ancorata alla fisica statistica [anche per l'attribuzione della quantità di moto $h\nu/c$ al quanto di luce].
- Essa lega l'energia di un quanto alla frequenza della radiazione trattata come un'onda.
- L'esperimento dice che, in talune situazioni, quando il numero dei fotoni usati – non importa se uno alla volta o tutti insieme – è sufficientemente elevato, i risultati sperimentali possono essere descritti in termini di onde.
- Ma non sappiamo perché.

Jacques V, et al. 2005 *Eur. Phys. J. D* **35** 561

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

Due formule magiche a confronto. $E_{ph} = h\nu$ e $\lambda_{dB} = h/p$. II

- La formula di de Broglie è stata ricavata combinando in modo assai eterodosso relatività speciale e fisica quantica.

Due formule magiche a confronto. $E_{ph} = h\nu$ e $\lambda_{dB} = h/p$. II

- La formula di de Broglie è stata ricavata combinando in modo assai eterodosso relatività speciale e fisica quantica.
- Essa permette di descrivere i fenomeni di interferenza di particelle materiali, cioè dotate di massa.

Due formule magiche a confronto. $E_{ph} = h\nu$ e $\lambda_{dB} = h/p$. II

- La formula di de Broglie è stata ricavata combinando in modo assai eterodosso relatività speciale e fisica quantica.
- Essa permette di descrivere i fenomeni di interferenza di particelle materiali, cioè dotate di massa.
- Ma rimane un postulato non integrato in alcuna teoria corroborata.

Interferenza di elettroni

Esperimento di Tonomura A. et al. [Hitachi Comp.] 1989.

Che cosa è una misura

- Una misura consiste in un insieme di procedure sperimentali che permette di attribuire ad una grandezza fisica un valore **definito** con un margine di errore.

Che cosa è una misura

- Una misura consiste in un insieme di procedure sperimentali che permette di attribuire ad una grandezza fisica un valore **definito** con un margine di errore.
- Le procedure sperimentali usate per misurare una grandezza fisica sono, in generale, suggerite dalla conoscenza acquisita e non hanno una connessione diretta con la teoria che utilizza questa grandezza.

La radiazione di corpo nero: come è stata misurata

- Nell'estate del 1900, Rubens e Kurlbaum estendono le misure della radiazione di corpo nero a lunghezze d'onda dell'infrarosso (decine di μ) usando superfici riflettenti di cristalli di fluorite o di cloruro di sodio ed una termopila come rivelatore.

La radiazione di corpo nero: come è stata misurata

- Nell'estate del 1900, Rubens e Kurlbaum estendono le misure della radiazione di corpo nero a lunghezze d'onda dell'infrarosso (decine di μ) usando superfici riflettenti di cristalli di fluorite o di cloruro di sodio ed una termopila come rivelatore.
- Quindi lo studio delle proprietà di quello che sarà poi interpretato come l'equilibrio termodinamico dei fotoni, fu fatto con tecniche sperimentali tipiche del tardo Ottocento.

La radiazione di corpo nero: come è stata misurata

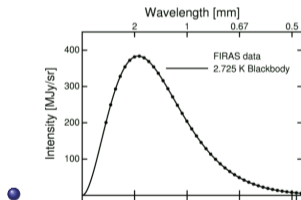
- Nell'estate del 1900, Rubens e Kurlbaum estendono le misure della radiazione di corpo nero a lunghezze d'onda dell'infrarosso (decine di μ) usando superfici riflettenti di cristalli di fluorite o di cloruro di sodio ed una termopila come rivelatore.
- Quindi lo studio delle proprietà di quello che sarà poi interpretato come l'equilibrio termodinamico dei fotoni, fu fatto con tecniche sperimentali tipiche del tardo Ottocento.
- Negli anni Novanta del secolo scorso, lo spettro di corpo nero della radiazione cosmica di fondo è stata misurato con lo spettrometro FIRAS (Far Infrared Absolute Spectrophotometer) installato sul satellite COBE (COsmic Background Explore) lanciato dalla NASA il 18 novembre 1989.

- FIRAS era un interferometro polarizzatore di Michelson

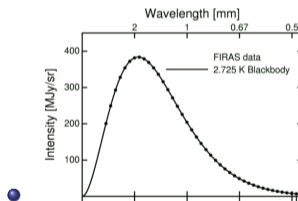
- FIRAS era un interferometro polarizzatore di Michelson
- Lo strumento era raffreddato a circa 1.5 K, essendo a contatto con un serbatoio di elio superfluido.

- FIRAS era un interferometro polarizzatore di Michelson
- Lo strumento era raffreddato a circa 1.5 K, essendo a contatto con un serbatoio di elio superfluido.
- FIRAS cessò di funzionare quando, il 21 settembre 1990, si esaurì la scorta di elio.

- FIRAS era un interferometro polarizzatore di Michelson
- Lo strumento era raffreddato a circa 1.5 K, essendo a contatto con un serbatoio di elio superfluido.
- FIRAS cessò di funzionare quando, il 21 settembre 1990, si esaurì la scorta di elio.



- FIRAS era un interferometro polarizzatore di Michelson
- Lo strumento era raffreddato a circa 1.5 K, essendo a contatto con un serbatoio di elio superfluido.
- FIRAS cessò di funzionare quando, il 21 settembre 1990, si esaurì la scorta di elio.



- 1 Jy(jansky) = $10^{-26} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$

La costante h di Planck

- Nel 1916, Robert Millikan misura la costante h di Planck convalidando sperimentalmente l'equazione

$$E_{cin} = h\nu - P$$

qui

La costante h di Planck

- Nel 1916, Robert Millikan misura la costante h di Planck convalidando sperimentalmente l'equazione

$$E_{cin} = h\nu - P$$

qui

- La costante di Planck – che innerva tutta la fisica quantica – è stata quindi misurata attraverso la misura di una differenza di potenziale

Momento angolare intrinseco dei fotoni – Richard Beth, 1936

- Il momento angolare intrinseco dei fotoni polarizzati circolarmente \hbar è stato misurato misurando la rotazione di una lamina a mezz'onda di quarzo, attraversata dai fotoni [qui](#).

Momento angolare intrinseco dei fotoni – Richard Beth, 1936

- Il momento angolare intrinseco dei fotoni polarizzati circolarmente \hbar è stato misurato misurando la rotazione di una lamina a mezz'onda di quarzo, attraversata dai fotoni qui.
- La rotazione della lamina era misurata osservando la deviazione di un raggio luminoso riflesso da uno specchietto fissato al filo di quarzo che sosteneva la lamina.

- L'energia di un fotone emesso da un atomo in moto è data da

$$E_{ph} = \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta}$$

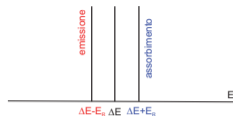
Dilatazione del tempo – Ives e Stilwell, 1938

- L'energia di un fotone emesso da un atomo in moto è data da

$$E_{ph} = \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta}$$

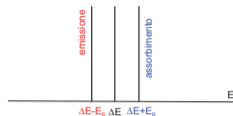
- Ives e Stilwell, misurano il termine in V^2/c^2 , ($V \ll c$), misurando lo spostamento della riga H_β dell'atomo di idrogeno su una lastra fotografica di uno spettrometro a reticolo.

Effetto Mössbauer – Rudolf Mössbauer, 1957. I



- L'emissione di fotoni gamma **senza rinculo** da parte di nuclei è possibile se i nuclei appartengono ad un cristallo raffreddato a temperature sufficientemente basse.

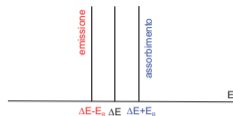
Effetto Mössbauer – Rudolf Mössbauer, 1957. I



- L'emissione di fotoni gamma **senza rinculo** da parte di nuclei è possibile se i nuclei appartengono ad un cristallo raffreddato a temperature sufficientemente basse.
- Ricordiamo che l'energia di un fotone emesso – quando è a riposo prima dell'emissione – è data da

$$E_0^{emi} = \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2 E_1} \right] \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2 M c^2} \right] = \Delta E - E_R$$

Effetto Mössbauer – Rudolf Mössbauer, 1957. I

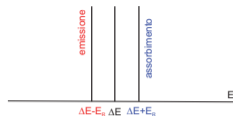


- L'emissione di fotoni gamma **senza rinculo** da parte di nuclei è possibile se i nuclei appartengono ad un cristallo raffreddato a temperature sufficientemente basse.
- Ricordiamo che l'energia di un fotone emesso – quando è a riposo prima dell'emissione – è data da

$$E_0^{emi} = \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2 E_1} \right] \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2 M c^2} \right] = \Delta E - E_R$$

- Nel caso dell'effetto Mössbauer, la massa M al denominatore deve essere moltiplicata per il numero di atomi contenuti nel cristallo

Effetto Mössbauer – Rudolf Mössbauer, 1957. I

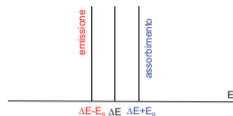


- L'emissione di fotoni gamma **senza rinculo** da parte di nuclei è possibile se i nuclei appartengono ad un cristallo raffreddato a temperature sufficientemente basse.
- Ricordiamo che l'energia di un fotone emesso – quando è a riposo prima dell'emissione – è data da

$$E_0^{emi} = \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2 E_1} \right] \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2 M c^2} \right] = \Delta E - E_R$$

- Nel caso dell'effetto Mössbauer, la massa M al denominatore deve essere moltiplicata per il numero di atomi contenuti nel cristallo
- Il problema è come misurare la larghezza naturale della riga emessa.

Effetto Mössbauer – Rudolf Mössbauer, 1957. I

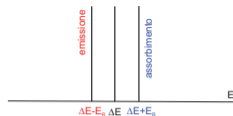


- L'emissione di fotoni gamma **senza rinculo** da parte di nuclei è possibile se i nuclei appartengono ad un cristallo raffreddato a temperature sufficientemente basse.
- Ricordiamo che l'energia di un fotone emesso – quando è a riposo prima dell'emissione – è data da

$$E_0^{emi} = \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2 E_1} \right] \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2 M c^2} \right] = \Delta E - E_R$$

- Nel caso dell'effetto Mössbauer, la massa M al denominatore deve essere moltiplicata per il numero di atomi contenuti nel cristallo
- Il problema è come misurare la larghezza naturale della riga emessa.
- Mössbauer pensò di utilizzare l'effetto Doppler del primo ordine.

Effetto Mössbauer – Rudolf Mössbauer, 1957. I



- L'emissione di fotoni gamma **senza rinculo** da parte di nuclei è possibile se i nuclei appartengono ad un cristallo raffreddato a temperature sufficientemente basse.
- Ricordiamo che l'energia di un fotone emesso – quando è a riposo prima dell'emissione – è data da

$$E_0^{emi} = \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2 E_1} \right] \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2 M c^2} \right] = \Delta E - E_R$$

- Nel caso dell'effetto Mössbauer, la massa M al denominatore deve essere moltiplicata per il numero di atomi contenuti nel cristallo
- Il problema è come misurare la larghezza naturale della riga emessa.
- Mössbauer pensò di utilizzare l'effetto Doppler del primo ordine.
- Le vicende della sua scoperta sono state raccontate dallo stesso Mössbauer **qui**.

Effetto Mössbauer – Rudolf Mössbauer, 1957. II

- La sorgente di ^{131}I era posta in rotazione fissandola su un giradischi la cui velocità di rotazione era diminuita con ruote dentate acquistate in un negozio di giocattoli.

Effetto Mössbauer – Rudolf Mössbauer, 1957. II

- La sorgente di ^{131}I era posta in rotazione fissandola su un giradischi la cui velocità di rotazione era diminuita con ruote dentate acquistate in un negozio di giocattoli.
- **apparato sperimentale**

Effetto Mössbauer – Rudolf Mössbauer, 1957. II

- La sorgente di ^{131}I era posta in rotazione fissandola su un giradischi la cui velocità di rotazione era diminuita con ruote dentate acquistate in un negozio di giocattoli.
- **apparato sperimentale**
- Questa è la prima misura dell'**effetto**.

Un esperimento “pensato”

- Consideriamo un atomo eccitato posto al centro di una sfera la cui superficie è in grado di rivelare – con rendimento quantico pari ad uno – un fotone.

Un esperimento “pensato”

- Consideriamo un atomo eccitato posto al centro di una sfera la cui superficie è in grado di rivelare – con rendimento quantico pari ad uno – un fotone.
- L'atomo può essere descritto come una sovrapposizione di 'atomo eccitato' e 'atomo nello stato fondamentale':

$$|\psi\rangle = c_1|\psi(\text{eccitato})\rangle + c_2|\psi(\text{stato fondamentale})\rangle$$

Un esperimento “pensato”

- Consideriamo un atomo eccitato posto al centro di una sfera la cui superficie è in grado di rivelare – con rendimento quantico pari ad uno – un fotone.
- L'atomo può essere descritto come una sovrapposizione di ‘atomo eccitato’ e ‘atomo nello stato fondamentale’:

$$|\psi\rangle = c_1|\psi(\text{eccitato})\rangle + c_2|\psi(\text{stato fondamentale})\rangle$$

- Finché il rivelatore non rivela un fotone, l'atomo è nello stato eccitato.

Un esperimento “pensato”

- Consideriamo un atomo eccitato posto al centro di una sfera la cui superficie è in grado di rivelare – con rendimento quantico pari ad uno – un fotone.
- L'atomo può essere descritto come una sovrapposizione di 'atomo eccitato' e 'atomo nello stato fondamentale':

$$|\psi\rangle = c_1|\psi(\text{eccitato})\rangle + c_2|\psi(\text{stato fondamentale})\rangle$$

- Finché il rivelatore non rivela un fotone, l'atomo è nello stato eccitato.
- Anche se esso continua ad essere descritto dallo stato di sovrapposizione.

Un esperimento “pensato”

- Consideriamo un atomo eccitato posto al centro di una sfera la cui superficie è in grado di rivelare – con rendimento quantico pari ad uno – un fotone.
- L'atomo può essere descritto come una sovrapposizione di ‘atomo eccitato’ e ‘atomo nello stato fondamentale’:

$$|\psi\rangle = c_1|\psi(\text{eccitato})\rangle + c_2|\psi(\text{stato fondamentale})\rangle$$

- Finché il rivelatore non rivela un fotone, l'atomo è nello stato eccitato.
- Anche se esso continua ad essere descritto dallo stato di sovrapposizione.
- Ciò mostra che lo “stato di sovrapposizione” è solo una funzione matematica che permette di fare predizioni.

Un esperimento “pensato”

- Consideriamo un atomo eccitato posto al centro di una sfera la cui superficie è in grado di rivelare – con rendimento quantico pari ad uno – un fotone.
- L'atomo può essere descritto come una sovrapposizione di ‘atomo eccitato’ e ‘atomo nello stato fondamentale’:

$$|\psi\rangle = c_1|\psi(\text{eccitato})\rangle + c_2|\psi(\text{stato fondamentale})\rangle$$

- Finché il rivelatore non rivela un fotone, l'atomo è nello stato eccitato.
- Anche se esso continua ad essere descritto dallo stato di sovrapposizione.
- Ciò mostra che lo “stato di sovrapposizione” è solo una funzione matematica che permette di fare predizioni.
- Ad esso **NON** corrisponde alcuno stato fisico dell'atomo.

Un esperimento “pensato”

- Consideriamo un atomo eccitato posto al centro di una sfera la cui superficie è in grado di rivelare – con rendimento quantico pari ad uno – un fotone.
- L'atomo può essere descritto come una sovrapposizione di ‘atomo eccitato’ e ‘atomo nello stato fondamentale’:

$$|\psi\rangle = c_1|\psi(\text{eccitato})\rangle + c_2|\psi(\text{stato fondamentale})\rangle$$

- Finché il rivelatore non rivela un fotone, l'atomo è nello stato eccitato.
- Anche se esso continua ad essere descritto dallo stato di sovrapposizione.
- Ciò mostra che lo “stato di sovrapposizione” è solo una funzione matematica che permette di fare predizioni.
- Ad esso **NON** corrisponde alcuno stato fisico dell'atomo.
- Quando il rivelatore misura l'arrivo di un fotone, l'atomo è nello stato fondamentale.

Il “gatto di Schrödinger”

- Il “gatto di Schrödinger”, rivisto alla luce delle riflessioni precedenti. . .

Il “gatto di Schrödinger”

- Il “gatto di Schrödinger”, rivisto alla luce delle riflessioni precedenti. . .
- Appare come un apologo epistemologico. Infatti:

Il “gatto di Schrödinger”

- Il “gatto di Schrödinger”, rivisto alla luce delle riflessioni precedenti. . .
- Appare come un apologo epistemologico. Infatti:
- Un fisico non chiuderebbe mai un apparato sperimentale in una scatola con la sola intenzione di NON vedere ciò che accade.

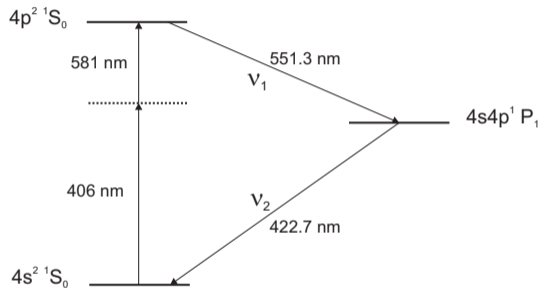
Il “gatto di Schrödinger”

- Il “gatto di Schrödinger”, rivisto alla luce delle riflessioni precedenti. . .
- Appare come un apologo epistemologico. Infatti:
- Un fisico non chiuderebbe mai un apparato sperimentale in una scatola con la sola intenzione di NON vedere ciò che accade.
- L'idea di sostituire un essere macroscopico vivente ad un atomo è un artificio retorico magistrale. . .

Il “gatto di Schrödinger”

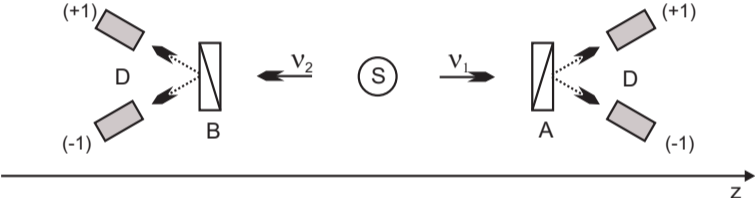
- Il “gatto di Schrödinger”, rivisto alla luce delle riflessioni precedenti. . .
- Appare come un apologo epistemologico. Infatti:
- Un fisico non chiuderebbe mai un apparato sperimentale in una scatola con la sola intenzione di NON vedere ciò che accade.
- L’idea di sostituire un essere macroscopico vivente ad un atomo è un artificio retorico magistrale. . .
- teso ad illustrare l’assurdità dell’idea di uno stato in cui il gatto è mezzo vivo e mezzo morto.

L'esperimento di Orsay (1982)



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

L'esperimento di Orsay (1982)



- La misura della polarizzazione del fotone ν_1 è effettuata **prima** di quella del fotone ν_2

La 'non località'

- La misura della polarizzazione del fotone ν_1 è effettuata **prima** di quella del fotone ν_2
- I fotoni emessi non hanno una polarizzazione definita (Grandezza Fisica Non Definita)

La 'non località'

- La misura della polarizzazione del fotone ν_1 è effettuata **prima** di quella del fotone ν_2
- I fotoni emessi non hanno una polarizzazione definita (Grandezza Fisica Non Definita)
- Se P è la polarizzazione misurata del fotone ν_1 , allora il fotone ν_2 assume **istantaneamente** la stessa polarizzazione

La 'non località'

- L'ipotesi GFND non è utilizzata nella catena deduttiva, ma solo per **descrivere**, a posteriori, le predizioni basate sul formalismo della MQ

La 'non località'

- L'ipotesi GFND non è utilizzata nella catena deduttiva, ma solo per **descrivere**, a posteriori, le predizioni basate sul formalismo della MQ
- Quindi, può essere eliminata senza diminuire la capacità predittiva della teoria

La 'non località'

- L'ipotesi GFND non è utilizzata nella catena deduttiva, ma solo per **descrivere**, a posteriori, le predizioni basate sul formalismo della MQ
- Quindi, può essere eliminata senza diminuire la capacità predittiva della teoria
- É possibile fare un esperimento che. . .

La 'non località'

- L'ipotesi GFND non è utilizzata nella catena deduttiva, ma solo per **descrivere**, a posteriori, le predizioni basate sul formalismo della MQ
- Quindi, può essere eliminata senza diminuire la capacità predittiva della teoria
- É possibile fare un esperimento che...
- ...verifica se, come previsto dalla conservazione della quantità di moto, i due fotoni emessi sono entrambi polarizzati circolarmente *Right* o *Left*

Come misurare la polarizzazione di un fotone R o L

- Si usa un analizzatore costituito da una lamina a quarto d'onda e un polarizzatore lineare

Come misurare la polarizzazione di un fotone R o L

- Si usa un analizzatore costituito da una lamina a quarto d'onda e un polarizzatore lineare
- Se un fotone è polarizzato circolarmente R o L , una lamina a quarto d'onda lo trasforma in un fotone polarizzato linearmente lungo una direzione che forma un angolo $\theta_R = \pi/4$ o $\theta_L = -\pi/4$ con l'asse ottico della lamina

Come misurare la polarizzazione di un fotone R o L

- Si usa un analizzatore costituito da una lamina a quarto d'onda e un polarizzatore lineare
- Se un fotone è polarizzato circolarmente R o L , una lamina a quarto d'onda lo trasforma in un fotone polarizzato linearmente lungo una direzione che forma un angolo $\theta_R = \pi/4$ o $\theta_L = -\pi/4$ con l'asse ottico della lamina
- Quindi, un fotone R passerà con probabilità uguale ad UNO attraverso un polarizzatore lineare il cui asse ottico è parallelo alla direzione $\theta_R = \pi/4$

Come misurare la polarizzazione di un fotone R o L

- Si usa un analizzatore costituito da una lamina a quarto d'onda e un polarizzatore lineare
- Se un fotone è polarizzato circolarmente R o L , una lamina a quarto d'onda lo trasforma in un fotone polarizzato linearmente lungo una direzione che forma un angolo $\theta_R = \pi/4$ o $\theta_L = -\pi/4$ con l'asse ottico della lamina
- Quindi, un fotone R passerà con probabilità uguale ad UNO attraverso un polarizzatore lineare il cui asse ottico è parallelo alla direzione $\theta_R = \pi/4$
- Mentre un fotone L passerà con probabilità uguale ad UNO attraverso un polarizzatore lineare il cui asse ottico è parallelo alla direzione $\theta_L = -\pi/4$

Come misurare la polarizzazione di un fotone R o L

- Si usa un analizzatore costituito da una lamina a quarto d'onda e un polarizzatore lineare
- Se un fotone è polarizzato circolarmente R o L , una lamina a quarto d'onda lo trasforma in un fotone polarizzato linearmente lungo una direzione che forma un angolo $\theta_R = \pi/4$ o $\theta_L = -\pi/4$ con l'asse ottico della lamina
- Quindi, un fotone R passerà con probabilità uguale ad UNO attraverso un polarizzatore lineare il cui asse ottico è parallelo alla direzione $\theta_R = \pi/4$
- Mentre un fotone L passerà con probabilità uguale ad UNO attraverso un polarizzatore lineare il cui asse ottico è parallelo alla direzione $\theta_L = -\pi/4$
- Quindi, collocando un analizzatore di questo tipo lungo le direzioni di propagazione dei due fotoni ν_1 e ν_2 i rivelatori posti dopo gli analizzatori segneranno l'arrivo dei due fotoni in coincidenza

Quindi. . . alcune regole

- Asserire l'esistenza nel Mondo di una entità teorica significa costruire una Immagine del Mondo ontologica

Quindi. . . alcune regole

- Asserire l'esistenza nel Mondo di una entità teorica significa costruire una Immagine del Mondo ontologica
- Queste asserzioni devono essere compatibili con l'intera conoscenza acquisita

Quindi. . . alcune regole

- Asserire l'esistenza nel Mondo di una entità teorica significa costruire una Immagine del Mondo ontologica
- Queste asserzioni devono essere compatibili con l'intera conoscenza acquisita
- Esse sono solo plausibili

Osservazioni finali

- È saggio distinguere tra **descrizione di un fenomeno** e **come le cose si svolgono nel Mondo**

Osservazioni finali

- È saggio distinguere tra **descrizione di un fenomeno** e **come le cose si svolgono nel Mondo**
- Le verifiche sperimentali riguardano le nostre descrizioni.

Osservazioni finali

- È saggio distinguere tra **descrizione di un fenomeno** e **come le cose si svolgono nel Mondo**
- Le verifiche sperimentali riguardano le nostre descrizioni.

Osservazioni finali

- È saggio distinguere tra **descrizione di un fenomeno** e **come le cose si svolgono nel Mondo**
- Le verifiche sperimentali riguardano le nostre descrizioni.
- Trattare qualunque entità teorica come se fosse un oggetto esistente nel Mondo equivale a popolare il Mondo di fantasmi.

Osservazioni finali

- È saggio distinguere tra **descrizione di un fenomeno** e **come le cose si svolgono nel Mondo**
- Le verifiche sperimentali riguardano le nostre descrizioni.
- Trattare qualunque entità teorica come se fosse un oggetto esistente nel Mondo equivale a popolare il Mondo di fantasmi.
- Questa cautela ontologica deve essere soprattutto esercitata nei confronti della fisica moderna e contemporanea.

Osservazioni finali

- È saggio distinguere tra **descrizione di un fenomeno** e **come le cose si svolgono nel Mondo**
- Le verifiche sperimentali riguardano le nostre descrizioni.
- Trattare qualunque entità teorica come se fosse un oggetto esistente nel Mondo equivale a popolare il Mondo di fantasmi.
- Questa cautela ontologica deve essere soprattutto esercitata nei confronti della fisica moderna e contemporanea.
- Evitare di diffondere Immagini del Mondo popolate di fantasmi dovrebbe essere un tratto caratteristico della divulgazione scientifica.

Grazie per l'attenzione.