

La luce

Biagio Buonaura e Giuseppe Giuliani

AIF - XXIII Scuola di Storia della Fisica - Fermo

Gruppo AIF - Storia della Fisica

Gruppo di studio Fisica - Storia - Epistemologia

24 - 28 febbraio 2025

Articolo

Che cosa è la luce? Prime ipotesi

- Secondo **Pitagora** (~575 a.c. - ~490 a.c.) la luce è costituita da raggi che partendo dagli occhi raggiungono gli oggetti verso cui si guarda: la loro vista si realizza quando i raggi luminosi li raggiungono. Il senso della vista veniva così spiegato in termini del più intuitivo senso del tatto.

Che cosa è la luce? Prime ipotesi

- Secondo **Pitagora** (~575 a.c. - ~490 a.c.) la luce è costituita da raggi che partendo dagli occhi raggiungono gli oggetti verso cui si guarda: la loro vista si realizza quando i raggi luminosi li raggiungono. Il senso della vista veniva così spiegato in termini del più intuitivo senso del tatto.
- **III a.c.** Secondo **Epicuro** (341 a.c. - 270 a.c.) la luce, emessa da una sorgente, viene riflessa dagli oggetti nei nostri occhi.

Che cosa è la luce? Prime ipotesi

- Secondo **Pitagora** (~575 a.c. - ~490 a.c.) la luce è costituita da raggi che partendo dagli occhi raggiungono gli oggetti verso cui si guarda: la loro vista si realizza quando i raggi luminosi li raggiungono. Il senso della vista veniva così spiegato in termini del più intuitivo senso del tatto.
- **III a.c.** Secondo **Epicuro** (341 a.c. - 270 a.c.) la luce, emessa da una sorgente, viene riflessa dagli oggetti nei nostri occhi.
- **1000 circa.** **Alhazen** (965 - 1040, Mesopotamia) sviluppa un'ampia teoria dell'ottica che include, fra l'altro, i fenomeni di riflessione, rifrazione e visione binoculare.

- Seicento anni dopo. . .

- Seicento anni dopo. . .
- **1621. Willebrord van Roijen Snell** (1580 - 1626, Olanda) scopre la *legge della rifrazione*:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_r}{n_i} \quad (1)$$

- Seicento anni dopo. . .
- **1621. Willebrord van Roijen Snell** (1580 - 1626, Olanda) scopre la *legge della rifrazione*:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_r}{n_i} \quad (1)$$

- **1660 circa. Pierre de Fermat** (1601 - 1665) ricava le leggi della riflessione e rifrazione usando il **principio** secondo cui il percorso di un raggio luminoso in un sistema ottico complesso è quello corrispondente al tempo di percorrenza minimo, nonché il postulato secondo cui la velocità della luce in un mezzo di indice di rifrazione n è ridotta di un fattore $1/n$

Diffrazione

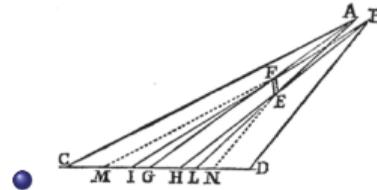
- **1665. Francesco Maria Grimaldi** (1618 - 1663). Il libro *Physico - Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride* fu pubblicato postumo (1665). Esso contiene la descrizione degli esperimenti che segnano la scoperta della **diffrazione**.

Diffrazione

- **1665. Francesco Maria Grimaldi** (1618 - 1663). Il libro *Physico - Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride* fu pubblicato postumo (1665). Esso contiene la descrizione degli esperimenti che segnano la scoperta della **diffrazione**.
- Grimaldi si proponeva di verificare l'affermazione, comunemente accettata, che la luce si propaga in linea retta. Allo scopo, praticò un piccolo foro nell'imposta di una finestra e collocò nel fascio di luce divergente (visibile in presenza di pulviscolo, o di fumo) un corpo opaco e osservò le immagini create su una parete o su un foglio di carta bianca steso sul pavimento.

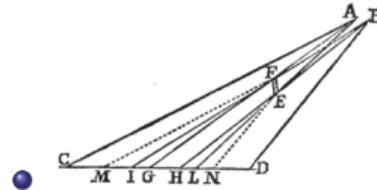
Diffrazione

- **1665. Francesco Maria Grimaldi** (1618 - 1663). Il libro *Physico - Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride* fu pubblicato postumo (1665). Esso contiene la descrizione degli esperimenti che segnano la scoperta della **diffrazione**.
- Grimaldi si proponeva di verificare l'affermazione, comunemente accettata, che la luce si propaga in linea retta. Allo scopo, praticò un piccolo foro nell'imposta di una finestra e collocò nel fascio di luce divergente (visibile in presenza di pulviscolo, o di fumo) un corpo opaco e osservò le immagini create su una parete o su un foglio di carta bianca steso sul pavimento.



Diffrazione

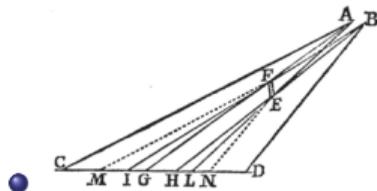
- **1665. Francesco Maria Grimaldi** (1618 - 1663). Il libro [Physico - Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride](#) fu pubblicato postumo (1665). Esso contiene la descrizione degli esperimenti che segnano la scoperta della [diffrazione](#).
- Grimaldi si proponeva di verificare l'affermazione, comunemente accettata, che la luce si propaga in linea retta. Allo scopo, praticò un piccolo foro nell'imposta di una finestra e collocò nel fascio di luce divergente (visibile in presenza di pulviscolo, o di fumo) un corpo opaco e osservò le immagini create su una parete o su un foglio di carta bianca steso sul pavimento.



- A e B sono due raggi , considerati avere un certo spessore, che sono posti in due punti diametralmente opposti del foro circolare. Se la luce si propagasse in linea retta, l'immagine dovrebbe consistere in una zona centrale scura GH, separata nettamente dalla zona esterna luminosa.

Diffrazione

- **1665. Francesco Maria Grimaldi** (1618 - 1663). Il libro [Physico - Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride](#) fu pubblicato postumo (1665). Esso contiene la descrizione degli esperimenti che segnano la scoperta della [diffrazione](#).
- Grimaldi si proponeva di verificare l'affermazione, comunemente accettata, che la luce si propaga in linea retta. Allo scopo, praticò un piccolo foro nell'imposta di una finestra e collocò nel fascio di luce divergente (visibile in presenza di pulviscolo, o di fumo) un corpo opaco e osservò le immagini create su una parete o su un foglio di carta bianca steso sul pavimento.



- A e B sono due raggi , considerati avere un certo spessore, che sono posti in due punti diametralmente opposti del foro circolare. Se la luce si propagasse in linea retta, l'immagine dovrebbe consistere in una zona centrale scura GH, separata nettamente dalla zona esterna luminosa.
- Grimaldi osservò invece che il passaggio dalla zona centrale a quella esterna era graduale e conteneva delle frange; “nel mezzo di ciascuna frangia la luce risultava pura e genuina, mentre agli orli presentava qualche colorazione. Le frange, infine, mostravano una certa dipendenza dalla grandezza del foro, e scomparivano se esso diventava troppo grande.” [qui una breve ma accurata descrizione dell'esperimento da parte di Silvio Bergia.](#)

Dispersione, doppia rifrazione

- **1665 - 1666. Isaac Newton** (1642 - 1727, Gran Bretagna), in seguito a esperimenti condotti con prismi di vetro, formula l'ipotesi secondo cui la luce è composta da diversi colori che il prisma separa. Newton sostenne una teoria corpuscolare della luce motivata dal fatto che i suoi componenti erano considerati immutabili e tale proprietà poteva essere posseduta, secondo Newton, solo da immutabili particelle materiali. I raggi di diverso colore, costituiti da particelle di dimensioni diverse, provocano sensazioni diverse sulla retina dei nostri occhi.

Dispersione, doppia rifrazione

- **1665 - 1666. Isaac Newton** (1642 - 1727, Gran Bretagna), in seguito a esperimenti condotti con prismi di vetro, formula l'ipotesi secondo cui la luce è composta da diversi colori che il prisma separa. Newton sostenne una teoria corpuscolare della luce motivata dal fatto che i suoi componenti erano considerati immutabili e tale proprietà poteva essere posseduta, secondo Newton, solo da immutabili particelle materiali. I raggi di diverso colore, costituiti da particelle di dimensioni diverse, provocano sensazioni diverse sulla retina dei nostri occhi.
- **1669. Erasmus Bartholin** (1625 - 1698, Danimarca) scopre la **doppia rifrazione**. Tra le mani di Bartholin finirono alcuni cristalli raccolti da un marinaio nella baia di Røeford in Islanda. Ogni piccolo oggetto osservato attraverso questi cristalli appariva doppio: ne dedusse che un raggio di luce, nell'attraversare il cristallo, subiva una *doppia rifrazione*. I cristalli trovati dal marinaio erano cristalli di calcite (CaCO_3) detta anche spato d'Islanda.

La velocità della luce ha un valore finito

- **1676. Olaf Rømer** (1644 - 1710, Danimarca) osserva che il periodo dell'eclissi del satellite **Io** di Giove varia durante l'anno: il periodo medio è di circa 42 ore e la variazione massima di circa 22 minuti. Escludendo la possibilità che questa variazione fosse dovuta ad una variazione del periodo orbitale di **Io**, Rømer suppose che il fenomeno fosse dovuto alla velocità finita di propagazione della luce e al moto orbitale della Terra intorno al Sole. Rømer stimò che la luce si propaga con una velocità pari a $2.143 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Il valore attuale, misurato con lo stesso procedimento usato da Rømer, è di $2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$.

- **1690. Christiaan Huyghens** (1629 - 1695, Danimarca) pubblica il suo *Trattato della luce* in cui sviluppa una teoria ondulatoria della luce. Secondo Huyghens, la luce è un fenomeno ondulatorio che si propaga nell'Etere. Le caratteristiche di questa propagazione sono studiate da Huyghens sulla base del seguente **principio**: si consideri all'istante t_0 un fronte d'onda; tutti i suoi punti diventano origine di onde secondarie che, in un mezzo omogeneo ed isotropo, si propagano sotto forma di superfici sferiche; all'istante generico t il nuovo fronte d'onda è costituito dall'involuppo delle onde secondarie.

- La natura della luce è un argomento che non ha alcuna importante rilevanza per le faccende della vita o per la pratica delle arti, ma è per molti altri versi estremamente interessante, specialmente perché aiuta a sostenere le nostre idee sulla natura delle nostre sensazioni e, in generale, sulla struttura dell'universo. [Thomas Young]

- La natura della luce è un argomento che non ha alcuna importante rilevanza per le faccende della vita o per la pratica delle arti, ma è per molti altri versi estremamente interessante, specialmente perché aiuta a sostenere le nostre idee sulla natura delle nostre sensazioni e, in generale, sulla struttura dell'universo. [Thomas Young]
- Immaginate quello che provò quando le equazioni differenziali che aveva formulato gli dimostrarono che il campo elettromagnetico si propagava in forma di onde polarizzate e con la velocità della luce! A pochi uomini al mondo è stata concessa una tale esperienza. In quel momento emozionante certo non pensò minimamente che l'ambigua natura della luce, apparentemente spiegata in maniera così completa, avrebbe continuato a frustrare gli sforzi di generazioni successive. [Albert Einstein]

- L'invenzione di h e la radiazione di corpo nero (Planck, 1900)

Cronologia

- L'invenzione di h e la radiazione di corpo nero (Planck, 1900)
- I quanti di luce **senza** quantità di moto (Einstein, 1905)

Cronologia

- L'invenzione di h e la radiazione di corpo nero (Planck, 1900)
- I quanti di luce **senza** quantità di moto (Einstein, 1905)
- La quantità di moto dei quanti di luce (Stark, 1909)

Cronologia

- L'invenzione di h e la radiazione di corpo nero (Planck, 1900)
- I quanti di luce **senza** quantità di moto (Einstein, 1905)
- La quantità di moto dei quanti di luce (Stark, 1909)
- Quantità di moto dei quanti di luce ed effetto Doppler (Emden, 1921)

Cronologia

- L'invenzione di h e la radiazione di corpo nero (Planck, 1900)
- I quanti di luce **senza** quantità di moto (Einstein, 1905)
- La quantità di moto dei quanti di luce (Stark, 1909)
- Quantità di moto dei quanti di luce ed effetto Doppler (Emden, 1921)
- I quanti di luce in azione: emissione di quanti da parte di atomi (Schrödinger, 1922)

Cronologia

- L'invenzione di h e la radiazione di corpo nero (Planck, 1900)
- I quanti di luce **senza** quantità di moto (Einstein, 1905)
- La quantità di moto dei quanti di luce (Stark, 1909)
- Quantità di moto dei quanti di luce ed effetto Doppler (Emden, 1921)
- I quanti di luce in azione: emissione di quanti da parte di atomi (Schrödinger, 1922)
- I quanti di luce in azione: effetto Compton (1924)

- L'invenzione di h e la radiazione di corpo nero (Planck, 1900)
- I quanti di luce **senza** quantità di moto (Einstein, 1905)
- La quantità di moto dei quanti di luce (Stark, 1909)
- Quantità di moto dei quanti di luce ed effetto Doppler (Emden, 1921)
- I quanti di luce in azione: emissione di quanti da parte di atomi (Schrödinger, 1922)
- I quanti di luce in azione: effetto Compton (1924)
- Particelle come quanti di luce: $\lambda = h/p$ (de Broglie, 1923)

- L'invenzione di h e la radiazione di corpo nero (Planck, 1900)
- I quanti di luce **senza** quantità di moto (Einstein, 1905)
- La quantità di moto dei quanti di luce (Stark, 1909)
- Quantità di moto dei quanti di luce ed effetto Doppler (Emden, 1921)
- I quanti di luce in azione: emissione di quanti da parte di atomi (Schrödinger, 1922)
- I quanti di luce in azione: effetto Compton (1924)
- Particelle come quanti di luce: $\lambda = h/p$ (de Broglie, 1923)
- Cavità isoterma con quanti di luce: Bose (1924)

- L'invenzione di h e la radiazione di corpo nero (Planck, 1900)
- I quanti di luce **senza** quantità di moto (Einstein, 1905)
- La quantità di moto dei quanti di luce (Stark, 1909)
- Quantità di moto dei quanti di luce ed effetto Doppler (Emden, 1921)
- I quanti di luce in azione: emissione di quanti da parte di atomi (Schrödinger, 1922)
- I quanti di luce in azione: effetto Compton (1924)
- Particelle come quanti di luce: $\lambda = h/p$ (de Broglie, 1923)
- Cavità isoterma con quanti di luce: Bose (1924)
- Statistica quantica del gas ideale: Einstein (1924- 1925)

- L'invenzione di h e la radiazione di corpo nero (Planck, 1900)
- I quanti di luce **senza** quantità di moto (Einstein, 1905)
- La quantità di moto dei quanti di luce (Stark, 1909)
- Quantità di moto dei quanti di luce ed effetto Doppler (Emden, 1921)
- I quanti di luce in azione: emissione di quanti da parte di atomi (Schrödinger, 1922)
- I quanti di luce in azione: effetto Compton (1924)
- Particelle come quanti di luce: $\lambda = h/p$ (de Broglie, 1923)
- Cavità isoterma con quanti di luce: Bose (1924)
- Statistica quantica del gas ideale: Einstein (1924- 1925)
- Statistica di Fermi - Dirac (1926-1927)

- L'invenzione di h e la radiazione di corpo nero (Planck, 1900)
- I quanti di luce **senza** quantità di moto (Einstein, 1905)
- La quantità di moto dei quanti di luce (Stark, 1909)
- Quantità di moto dei quanti di luce ed effetto Doppler (Emden, 1921)
- I quanti di luce in azione: emissione di quanti da parte di atomi (Schrödinger, 1922)
- I quanti di luce in azione: effetto Compton (1924)
- Particelle come quanti di luce: $\lambda = h/p$ (de Broglie, 1923)
- Cavità isoterma con quanti di luce: Bose (1924)
- Statistica quantica del gas ideale: Einstein (1924- 1925)
- Statistica di Fermi - Dirac (1926-1927)
- Diffrazione di elettroni (Davisson & Germer; G. P. Thomson; 1927 - 1928)

- L'invenzione di h e la radiazione di corpo nero (Planck, 1900)
- I quanti di luce **senza** quantità di moto (Einstein, 1905)
- La quantità di moto dei quanti di luce (Stark, 1909)
- Quantità di moto dei quanti di luce ed effetto Doppler (Emden, 1921)
- I quanti di luce in azione: emissione di quanti da parte di atomi (Schrödinger, 1922)
- I quanti di luce in azione: effetto Compton (1924)
- Particelle come quanti di luce: $\lambda = h/p$ (de Broglie, 1923)
- Cavità isoterma con quanti di luce: Bose (1924)
- Statistica quantica del gas ideale: Einstein (1924- 1925)
- Statistica di Fermi - Dirac (1926-1927)
- Diffrazione di elettroni (Davisson & Germer; G. P. Thomson; 1927 - 1928)
- La polarizzazione dei fotoni: Pokrowsky (1929)

Che cosa è la luce? I

- È un'onda elettromagnetica.

Che cosa è la luce? I

- È un'onda elettromagnetica.
- È costituita da fotoni.

Che cosa è la luce? I

- È un'onda elettromagnetica.
- È costituita da fotoni.
- Le due risposte fanno asserzioni su come è fatto il Mondo.

Che cosa è la luce? I

- È un'onda elettromagnetica.
- È costituita da fotoni.
- Le due risposte fanno asserzioni su come è fatto il Mondo.
- Le due risposte sono, evidentemente, incompatibili.

Che cosa è la luce? II

- In talune situazioni **si comporta** **come se** fosse costituita da un'onda EM

Che cosa è la luce? II

- In talune situazioni **si comporta come se** fosse costituita da un'onda EM
- In talune situazioni **si comporta come se** fosse costituita da fotoni

Che cosa è la luce? II

- In talune situazioni **si comporta come se** fosse costituita da un'onda EM
- In talune situazioni **si comporta come se** fosse costituita da fotoni
- Le due risposte fanno asserzioni su come è fatto il Mondo.

Che cosa è la luce? II

- In talune situazioni **si comporta come se** fosse costituita da un'onda EM
- In talune situazioni **si comporta come se** fosse costituita da fotoni
- Le due risposte fanno asserzioni su come è fatto il Mondo.
- Le due risposte sono compatibili, ma epistemologicamente discutibili

Che cosa è la luce? II

- In talune situazioni **si comporta come se** fosse costituita da un'onda EM
- In talune situazioni **si comporta come se** fosse costituita da fotoni
- Le due risposte fanno asserzioni su come è fatto il Mondo.
- Le due risposte sono compatibili, ma epistemologicamente discutibili
- Infatti sono asserzioni non plausibili perché in contrasto con l'intera conoscenza acquisita

Che cosa è la luce? III

- In taluni contesti, può essere **descritta** come un'onda EM.

Che cosa è la luce? III

- In taluni contesti, può essere **descritta** come un'onda EM.
- In taluni contesti, può essere **descritta** come costituita da fotoni.

Che cosa è la luce? III

- In taluni contesti, può essere **descritta** come un'onda EM.
- In taluni contesti, può essere **descritta** come costituita da fotoni.
- Le due risposte sono compatibili, seppure non esaurienti.

Che cosa è la luce? III

- In taluni contesti, può essere **descritta** come un'onda EM.
- In taluni contesti, può essere **descritta** come costituita da fotoni.
- Le due risposte sono compatibili, seppure non esaurienti.
- **È quindi necessario distinguere la descrizione di un fenomeno da asserzioni su cosa succede nel Mondo.**

La luce come un'onda. Interferenza: Young, 1803

- **1803. Thomas Young** (1773 - 1829) “Nell'imposta di una finestra ho fatto un piccolo foro e l'ho ricoperto con uno spesso foglio di carta perforato con un piccolo ago. Per facilitare l'osservazione, ho posizionato, senza l'imposta della finestra, un piccolo specchio in modo tale da riflettere la luce del sole in una direzione quasi orizzontale, sulla parete opposta, e di far passare il cono della luce divergente su un tavolo, su cui erano posti diversi piccoli schermi di cartoncino. Ho collocato nel fascio di luce un cartoncino, il cui spessore era di circa un trentesimo di pollice [0.8 mm] e ho osservato la sua ombra sulla parete o su altri cartoncini posti a distanze diverse. Oltre alle frange colorate da entrambe le parti dell'ombra, l'ombra medesima era divisa da frange simili parallele, di minori dimensioni, in numero diverso a seconda della distanza di osservazione dell'ombra, ma con il centro dell'ombra sempre bianco.”

Esperimento alla Young, oggi

- “... esperimenti che possono essere ripetuti con grande facilità, quando il sole risplende e senza alcun altro apparato che non sia a disposizione di chiunque.” [Thomas Young]

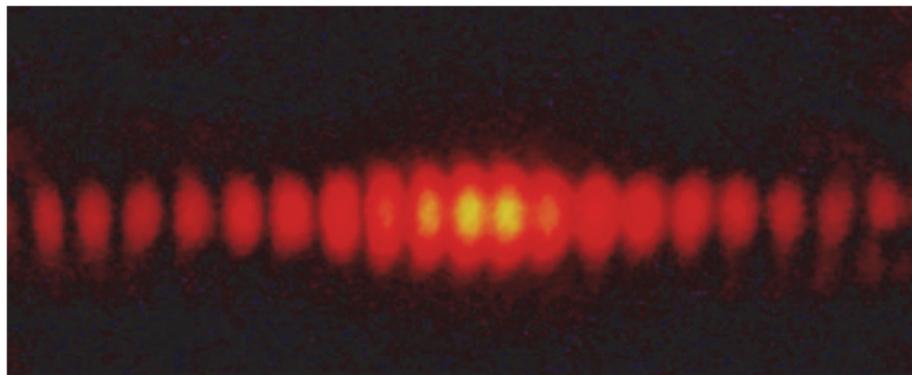


Figura: Interferenza alla Young. Laser Elio - Neon; spessore cartoncino: 0.5 mm

Il radicamento della descrizione ondulatoria

- **1808. Etienne Louis Malus** (1775 - 1812) scopre la polarizzazione della luce.

Il radicamento della descrizione ondulatoria

- **1808. Etienne Louis Malus** (1775 - 1812) scopre la polarizzazione della luce.
- **1817. Young** avanza l'ipotesi che le onde luminose siano trasversali.

Il radicamento della descrizione ondulatoria

- **1808. Etienne Louis Malus** (1775 - 1812) scopre la polarizzazione della luce.
- **1817. Young** avanza l'ipotesi che le onde luminose siano trasversali.
- **1821. Augustin Jean Fresnel** (1788 - 1827) sviluppa una teoria ondulatoria della luce basata su onde trasversali. Per far questo è necessario supporre che il fluido (Etere) possenga una rigidità sufficiente da permettere, come in un solido, vibrazioni trasversali.

Il radicamento della descrizione ondulatoria

- **1808. Etienne Louis Malus** (1775 - 1812) scopre la polarizzazione della luce.
- **1817. Young** avanza l'ipotesi che le onde luminose siano trasversali.
- **1821. Augustin Jean Fresnel** (1788 - 1827) sviluppa una teoria ondulatoria della luce basata su onde trasversali. Per far questo è necessario supporre che il fluido (Etere) possenga una rigidità sufficiente da permettere, come in un solido, vibrazioni trasversali.
- **1873. James Clerck Maxwell** (1831 - 1879). Viene pubblicato il **Treatise of Electricity and Magnetism**. La luce è descritta come un'onda elettromagnetica in cui i campi elettrico e magnetico sono tra loro perpendicolari e perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda.

Il radicamento della descrizione ondulatoria

- **1808. Etienne Louis Malus** (1775 - 1812) scopre la polarizzazione della luce.
- **1817. Young** avanza l'ipotesi che le onde luminose siano trasversali.
- **1821. Augustin Jean Fresnel** (1788 - 1827) sviluppa una teoria ondulatoria della luce basata su onde trasversali. Per far questo è necessario supporre che il fluido (Etere) possenga una rigidità sufficiente da permettere, come in un solido, vibrazioni trasversali.
- **1873. James Clerck Maxwell** (1831 - 1879). Viene pubblicato il **Treatise of Electricity and Magnetism**. La luce è descritta come un'onda elettromagnetica in cui i campi elettrico e magnetico sono tra loro perpendicolari e perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda.
- **1887. Heinrich Rudolf Hertz** (1857 - 1894). Produce in laboratorio onde elettromagnetiche e dimostra che esse si riflettono, rifrangono, diffrangono come la luce. Inoltre, come la luce, presentano la proprietà della polarizzazione.

Il radicamento della descrizione ondulatoria

- **1808. Etienne Louis Malus** (1775 - 1812) scopre la polarizzazione della luce.
- **1817. Young** avanza l'ipotesi che le onde luminose siano trasversali.
- **1821. Augustin Jean Fresnel** (1788 - 1827) sviluppa una teoria ondulatoria della luce basata su onde trasversali. Per far questo è necessario supporre che il fluido (Etere) possenga una rigidità sufficiente da permettere, come in un solido, vibrazioni trasversali.
- **1873. James Clerck Maxwell** (1831 - 1879). Viene pubblicato il **Treatise of Electricity and Magnetism**. La luce è descritta come un'onda elettromagnetica in cui i campi elettrico e magnetico sono tra loro perpendicolari e perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda.
- **1887. Heinrich Rudolf Hertz** (1857 - 1894). Produce in laboratorio onde elettromagnetiche e dimostra che esse si riflettono, rifrangono, diffrangono come la luce. Inoltre, come la luce, presentano la proprietà della polarizzazione.
- Quindi la luce e le onde elettromagnetiche sono descritte dalle stesse leggi. La luce può essere **descritta** come un'onda elettromagnetica.

- Maxwell considera la luce proveniente dal Sole

Misura della rigidità dell'Etere

- Maxwell considera la luce proveniente dal Sole
- Esprime la densità di energia u della luce (onda EM) in funzione del coefficiente di rigidità dell'Etere

Misura della rigidità dell'Etere

- Maxwell considera la luce proveniente dal Sole
- Esprime la densità di energia u della luce (onda EM) in funzione del coefficiente di rigidità dell'Etere
- La potenza W assorbita da una superficie unitaria sulla Terra è data da $W = uc$, dove c è la velocità della luce nel vuoto

Misura della rigidità dell'Etere

- Maxwell considera la luce proveniente dal Sole
- Esprime la densità di energia u della luce (onda EM) in funzione del coefficiente di rigidità dell'Etere
- La potenza W assorbita da una superficie unitaria sulla Terra è data da $W = uc$, dove c è la velocità della luce nel vuoto
- Dal valore misurato di W risale al coefficiente di rigidità dell'Etere

Misura della rigidità dell'Etere

- Maxwell considera la luce proveniente dal Sole
- Esprime la densità di energia u della luce (onda EM) in funzione del coefficiente di rigidità dell'Etere
- La potenza W assorbita da una superficie unitaria sulla Terra è data da $W = uc$, dove c è la velocità della luce nel vuoto
- Dal valore misurato di W risale al coefficiente di rigidità dell'Etere
- Maxwell ha così misurato una proprietà di una cosa che non esiste

Misura della lunghezza d'onda, con un fotone alla volta

- Con un spettrografo che utilizza un reticolo di diffrazione o un prisma si misura la lunghezza d'onda di una radiazione luminosa

Misura della lunghezza d'onda, con un fotone alla volta

- Con un spettrografo che utilizza un reticolo di diffrazione o un prisma si misura la lunghezza d'onda di una radiazione luminosa
- Se la misura è effettuata usando un fotone alla volta, possiamo affermare che lo spettrometro non è attraversato da alcuna onda

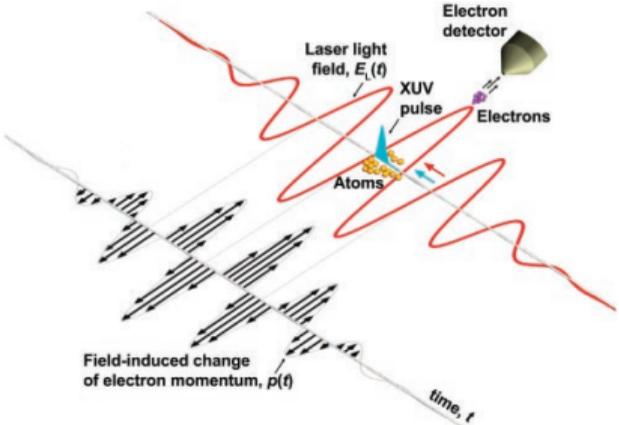
Misura della lunghezza d'onda, con un fotone alla volta

- Con un spettrografo che utilizza un reticolo di diffrazione o un prisma si misura la lunghezza d'onda di una radiazione luminosa
- Se la misura è effettuata usando un fotone alla volta, possiamo affermare che lo spettrometro non è attraversato da alcuna onda
- Quindi, misuriamo una proprietà (λ) di una entità teorica (Onda) che non c'è nel nostro esperimento

Misura della lunghezza d'onda, con un fotone alla volta

- Con un spettrografo che utilizza un reticolo di diffrazione o un prisma si misura la lunghezza d'onda di una radiazione luminosa
- Se la misura è effettuata usando un fotone alla volta, possiamo affermare che lo spettrometro non è attraversato da alcuna onda
- Quindi, misuriamo una proprietà (λ) di una entità teorica (Onda) che non c'è nel nostro esperimento
- ???

La luce descritta come un'onda elettromagnetica - Misura del campo elettrico dell'onda



Un impulso di luce laser costituito da pochi cicli, è diretto – insieme ad un impulso di luce XUV sincronizzato con l'impulso laser (e di durata inferiore a 10^{-15}) s – su un bersaglio di un gas atomico (neon). L'impulso XUV ionizza gli atomi. Il campo elettrico della luce $E_L(t)$ determina una variazione della quantità di moto degli elettroni (freccette nere), che è dato dal valore del potenziale vettore $A_L(t)$ all'istante in cui gli elettroni sono espulsi dagli atomi. La variazione della quantità di moto degli elettroni è misurata da un rivelatore di elettroni, che raccoglie gli elettroni espulsi lungo la direzione del campo elettrico polarizzato $E_L(\vec{r}, t)$. [qui]

$$\Delta p(\vec{r}, t) = F\Delta t = -e \int_{-\infty}^t E_L(\vec{r}, t') dt' = -e \int_{-\infty}^t -\frac{\partial A_L(\vec{r}, t')}{\partial t'} dt' = eA_L(\vec{r}, t)$$

- $$\Delta p(\vec{r}, t) = F\Delta t = -e \int_{-\infty}^t E_L(\vec{r}, t') dt' = -e \int_{-\infty}^t -\frac{\partial A_L(\vec{r}, t')}{\partial t'} dt' = eA_L(\vec{r}, t)$$

- In questo caso la misura viene suggerita dalla teoria che descrive la luce come un'onda elettromagnetica

$$\Delta p(\vec{r}, t) = F\Delta t = -e \int_{-\infty}^t E_L(\vec{r}, t') dt' = -e \int_{-\infty}^t -\frac{\partial A_L(\vec{r}, t')}{\partial t'} dt' = eA_L(\vec{r}, t)$$

- In questo caso la misura viene suggerita dalla teoria che descrive la luce come un'onda elettromagnetica
- Tuttavia, si osservi che la foto - ionizzazione degli atomi di neon presuppone una descrizione corpuscolare della luce

$$\Delta p(\vec{r}, t) = F\Delta t = -e \int_{-\infty}^t E_L(\vec{r}, t') dt' = -e \int_{-\infty}^t -\frac{\partial A_L(\vec{r}, t')}{\partial t'} dt' = eA_L(\vec{r}, t)$$

- In questo caso la misura viene suggerita dalla teoria che descrive la luce come un'onda elettromagnetica
- Tuttavia, si osservi che la foto - ionizzazione degli atomi di neon presuppone una descrizione corpuscolare della luce
- Quindi, in questo lavoro si usano contemporaneamente concetti appartenenti a descrizioni alternative, violando così un principio metodologico suggerito da Hertz:

$$\Delta p(\vec{r}, t) = F\Delta t = -e \int_{-\infty}^t E_L(\vec{r}, t') dt' = -e \int_{-\infty}^t -\frac{\partial A_L(\vec{r}, t')}{\partial t'} dt' = eA_L(\vec{r}, t)$$

- In questo caso la misura viene suggerita dalla teoria che descrive la luce come un'onda elettromagnetica
- Tuttavia, si osservi che la foto - ionizzazione degli atomi di neon presuppone una descrizione corpuscolare della luce
- Quindi, in questo lavoro si usano contemporaneamente concetti appartenenti a descrizioni alternative, violando così un principio metodologico suggerito da Hertz:
- “Idee e concetti che sono al contempo simili e diversi possono essere rappresentati dagli stessi simboli nelle diverse rappresentazioni. Pertanto, per una corretta comprensione di ciascuna di esse, la prima cosa che bisogna fare è quella di comprendere ciascuna rappresentazione per se stessa, senza introdurre in essa idee che appartengono ad un'altra.”

$$\Delta p(\vec{r}, t) = F\Delta t = -e \int_{-\infty}^t E_L(\vec{r}, t') dt' = -e \int_{-\infty}^t -\frac{\partial A_L(\vec{r}, t')}{\partial t'} dt' = eA_L(\vec{r}, t)$$

- In questo caso la misura viene suggerita dalla teoria che descrive la luce come un'onda elettromagnetica
- Tuttavia, si osservi che la foto - ionizzazione degli atomi di neon presuppone una descrizione corpuscolare della luce
- Quindi, in questo lavoro si usano contemporaneamente concetti appartenenti a descrizioni alternative, violando così un principio metodologico suggerito da Hertz:
- “Idee e concetti che sono al contempo simili e diversi possono essere rappresentati dagli stessi simboli nelle diverse rappresentazioni. Pertanto, per una corretta comprensione di ciascuna di esse, la prima cosa che bisogna fare è quella di comprendere ciascuna rappresentazione per se stessa, senza introdurre in essa idee che appartengono ad un'altra.”
- Infine, la misura del campo elettrico dell'onda luminosa non ci assicura che l'onda luminosa esista nel Mondo

Che cosa misuriamo?

- Maxwell ha misurato il valore di una grandezza fisica - **la rigidità dell'Etere** - cioè una proprietà di un qualcosa che non esiste nel Mondo.

Che cosa misuriamo?

- Maxwell ha misurato il valore di una grandezza fisica - **la rigidità dell'Etere** - cioè una proprietà di un qualcosa che non esiste nel Mondo.
- Quando misuriamo una lunghezza d'onda di una radiazione luminosa, misuriamo una proprietà di un qualcosa che, plausibilmente, non esiste nel Mondo

Che cosa misuriamo?

- Maxwell ha misurato il valore di una grandezza fisica - **la rigidità dell'Etere** - cioè una proprietà di un qualcosa che non esiste nel Mondo.
- Quando misuriamo una lunghezza d'onda di una radiazione luminosa, misuriamo una proprietà di un qualcosa che, plausibilmente, non esiste nel Mondo
- Goulielmakis E et al. hanno misurato il valore di una grandezza fisica - **il campo elettrico** - cioè una proprietà di un'onda elettromagnetica che, *plausibilmente*, non esiste nel Mondo.

Che cosa misuriamo?

- Maxwell ha misurato il valore di una grandezza fisica - **la rigidità dell'Etere** - cioè una proprietà di un qualcosa che non esiste nel Mondo.
- Quando misuriamo una lunghezza d'onda di una radiazione luminosa, misuriamo una proprietà di un qualcosa che, plausibilmente, non esiste nel Mondo
- Goulielmakis E et al. hanno misurato il valore di una grandezza fisica - **il campo elettrico** - cioè una proprietà di un'onda elettromagnetica che, *plausibilmente*, non esiste nel Mondo.
- In generale, le teorie indicano cosa misurare e suggeriscono, usando eventualmente la conoscenza di sfondo, come effettuare le misure.

Che cosa misuriamo?

- Maxwell ha misurato il valore di una grandezza fisica - **la rigidità dell'Etere** - cioè una proprietà di un qualcosa che non esiste nel Mondo.
- Quando misuriamo una lunghezza d'onda di una radiazione luminosa, misuriamo una proprietà di un qualcosa che, plausibilmente, non esiste nel Mondo
- Goulielmakis E et al. hanno misurato il valore di una grandezza fisica - **il campo elettrico** - cioè una proprietà di un'onda elettromagnetica che, *plausibilmente*, non esiste nel Mondo.
- In generale, le teorie indicano cosa misurare e suggeriscono, usando eventualmente la conoscenza di sfondo, come effettuare le misure.
- L'asserzione dell'esistenza nel Mondo di una entità teorica - Etere, onda elettromagnetica, elettrone - deve essere compatibile con l'intera conoscenza acquisita.

Che cosa misuriamo?

- Maxwell ha misurato il valore di una grandezza fisica - **la rigidità dell'Etere** - cioè una proprietà di un qualcosa che non esiste nel Mondo.
- Quando misuriamo una lunghezza d'onda di una radiazione luminosa, misuriamo una proprietà di un qualcosa che, plausibilmente, non esiste nel Mondo
- Goulielmakis E et al. hanno misurato il valore di una grandezza fisica - **il campo elettrico** - cioè una proprietà di un'onda elettromagnetica che, *plausibilmente*, non esiste nel Mondo.
- In generale, le teorie indicano cosa misurare e suggeriscono, usando eventualmente la conoscenza di sfondo, come effettuare le misure.
- L'asserzione dell'esistenza nel Mondo di una entità teorica - Etere, onda elettromagnetica, elettrone - deve essere compatibile con l'intera conoscenza acquisita.
- Asserzioni di esistenza nel Mondo sono solo **plausibili**. Una asserzione di esistenza che persiste nel tempo, diventa verosimile o altamente probabile.

Esempio: asserzione dell'esistenza dell'elettrone. I

- Ai primi del Novecento, l'elettrone era dotato di massa e di carica, ma il suo ruolo nella costituzione della materia era ancora incerto, se non oscuro.

Esempio: asserzione dell'esistenza dell'elettrone. I

- Ai primi del Novecento, l'elettrone era dotato di massa e di carica, ma il suo ruolo nella costituzione della materia era ancora incerto, se non oscuro.
- Progressivamente, l'elettrone è divenuto parte integrante degli atomi ed ha acquisito tre nuove proprietà descritte da tre nuove grandezze fisiche: il momento angolare intrinseco (spin), il momento magnetico intrinseco e la lunghezza d'onda di de Broglie.

Esempio: asserzione dell'esistenza dell'elettrone. I

- Ai primi del Novecento, l'elettrone era dotato di massa e di carica, ma il suo ruolo nella costituzione della materia era ancora incerto, se non oscuro.
- Progressivamente, l'elettrone è divenuto parte integrante degli atomi ed ha acquisito tre nuove proprietà descritte da tre nuove grandezze fisiche: il momento angolare intrinseco (spin), il momento magnetico intrinseco e la lunghezza d'onda di de Broglie.
- Nel frattempo, le teorie che lo hanno descritto sono mutate e possiamo presumere che muteranno ancora.

Esempio: asserzione dell'esistenza dell'elettrone. I

- Ai primi del Novecento, l'elettrone era dotato di massa e di carica, ma il suo ruolo nella costituzione della materia era ancora incerto, se non oscuro.
- Progressivamente, l'elettrone è divenuto parte integrante degli atomi ed ha acquisito tre nuove proprietà descritte da tre nuove grandezze fisiche: il momento angolare intrinseco (spin), il momento magnetico intrinseco e la lunghezza d'onda di de Broglie.
- Nel frattempo, le teorie che lo hanno descritto sono mutate e possiamo presumere che muteranno ancora.
- Ciò non ostante, l'asserzione di esistenza dell'elettrone non solo è rimasta plausibile, ma la sua verosimiglianza si è consolidata nel tempo.

Esempio: asserzione dell'esistenza dell'elettrone. II

- In generale, la verosimiglianza dell'asserzione di esistenza di una entità teorica, cioè della sua trasformazione in un oggetto del Mondo, è accompagnata dalla capacità di manipolare questo oggetto.

Esempio: asserzione dell'esistenza dell'elettrone. II

- In generale, la verosimiglianza dell'asserzione di esistenza di una entità teorica, cioè della sua trasformazione in un oggetto del Mondo, è accompagnata dalla capacità di manipolare questo oggetto.
- I fisici hanno imparato ad estrarre elettroni dagli atomi (effetto fotoelettrico), ad usarli come sonde per studiare le proprietà della materia (diffrazione di elettroni), come sostituti dei fotoni nel microscopio elettronico, a pilotarli nei transistor o nei superconduttori.

Esempio: asserzione dell'esistenza dell'elettrone. II

- In generale, la verosimiglianza dell'asserzione di esistenza di una entità teorica, cioè della sua trasformazione in un oggetto del Mondo, è accompagnata dalla capacità di manipolare questo oggetto.
- I fisici hanno imparato ad estrarre elettroni dagli atomi (effetto fotoelettrico), ad usarli come sonde per studiare le proprietà della materia (diffrazione di elettroni), come sostituti dei fotoni nel microscopio elettronico, a pilotarli nei transistor o nei superconduttori.
- Tuttavia, la capacità di manipolare una entità teorica non rende plausibile la sua esistenza nel Mondo.

Esempio: asserzione dell'esistenza dell'elettrone. II

- In generale, la verosimiglianza dell'asserzione di esistenza di una entità teorica, cioè della sua trasformazione in un oggetto del Mondo, è accompagnata dalla capacità di manipolare questo oggetto.
- I fisici hanno imparato ad estrarre elettroni dagli atomi (effetto fotoelettrico), ad usarli come sonde per studiare le proprietà della materia (diffrazione di elettroni), come sostituti dei fotoni nel microscopio elettronico, a pilotarli nei transistor o nei superconduttori.
- Tuttavia, la capacità di manipolare una entità teorica non rende plausibile la sua esistenza nel Mondo.
- Esempi: onde elettromagnetiche, buche nei solidi cristallini.

Le buche.

- Se, nella banda di valenza di un semiconduttore manca un elettrone, diciamo che nella banda di valenza c'è una **buca**.

Le buche.

- Se, nella banda di valenza di un semiconduttore manca un elettrone, diciamo che nella banda di valenza c'è una **buca**.
- Stiamo parlando di una descrizione teorica, **NON** di ciò che esiste nel Mondo.

Le buche.

- Se, nella banda di valenza di un semiconduttore manca un elettrone, diciamo che nella banda di valenza c'è una **buca**.
- Stiamo parlando di una descrizione teorica, NON di ciò che esiste nel Mondo.
- Delle buche misuriamo diverse proprietà: carica elettrica ($+e$), massa effettiva, mobilità elettrica.

Le buche.

- Se, nella banda di valenza di un semiconduttore manca un elettrone, diciamo che nella banda di valenza c'è una **buca**.
- Stiamo parlando di una descrizione teorica, NON di ciò che esiste nel Mondo.
- Delle buche misuriamo diverse proprietà: carica elettrica ($+e$), massa effettiva, mobilità elettrica.
- Ciò non ostante, non è ragionevole affermare che le buche esistono nel Mondo.

Le buche.

- Se, nella banda di valenza di un semiconduttore manca un elettrone, diciamo che nella banda di valenza c'è una **buca**.
- Stiamo parlando di una descrizione teorica, **NON** di ciò che esiste nel Mondo.
- Delle buche misuriamo diverse proprietà: carica elettrica ($+e$), massa effettiva, mobilità elettrica.
- Ciò non ostante, non è ragionevole affermare che le buche esistono nel Mondo.
- Come nel caso della rigidità dell'Etere, misuriamo proprietà di qualcosa che, plausibilmente, non esiste nel Mondo.

Buche e connessioni causali

- Non ostante che le buche, plausibilmente, non esistono, esse entrano in connessioni causali operanti nelle nostre descrizioni teoriche.

Buche e connessioni causali

- Non ostante che le buche, plausibilmente, non esistono, esse entrano in connessioni causali operanti nelle nostre descrizioni teoriche.
- La polarizzazione diretta di una giunzione p - n **causa** il passaggio di buche dalla parte p alla parte n e di elettroni dalla parte n alla parte p.

Buche e connessioni causali

- Non ostante che le buche, plausibilmente, non esistono, esse entrano in connessioni causali operanti nelle nostre descrizioni teoriche.
- La polarizzazione diretta di una giunzione p - n **causa** il passaggio di buche dalla parte p alla parte n e di elettroni dalla parte n alla parte p.
- La ricombinazione di un elettrone con una buca **causa** l'emissione di un fotone.

Buche e connessioni causali

- Non ostante che le buche, plausibilmente, non esistono, esse entrano in connessioni causali operanti nelle nostre descrizioni teoriche.
- La polarizzazione diretta di una giunzione p - n **causa** il passaggio di buche dalla parte p alla parte n e di elettroni dalla parte n alla parte p.
- La ricombinazione di un elettrone con una buca **causa** l'emissione di un fotone.
- Plausibilmente, nel Mondo, operano connessioni causali corrispondenti a quelle previste dalla teoria **interpretata**.

L'invenzione di h (Planck, 1900)

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

L'invenzione di h (Planck, 1900)



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



$$u(\nu, T) = Z(\nu) \bar{n}(\nu, T) h\nu \quad (3)$$

L'invenzione di h (Planck, 1900)

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

- $$u(\nu, T) = Z(\nu) \bar{n}(\nu, T) h\nu \quad (3)$$

- $Z(\nu)$ numero di accettori per unità di volume e di frequenza

L'invenzione di h (Planck, 1900)

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

- $$u(\nu, T) = Z(\nu) \bar{n}(\nu, T) h\nu \quad (3)$$

- $Z(\nu)$ numero di accettori per unità di volume e di frequenza
- $\bar{n}(\nu, T)$ numero medio di quanti $h\nu$ per ogni accettore di quanti $h\nu$

L'invenzione di h (Planck, 1900)

-

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

-

$$u(\nu, T) = Z(\nu) \bar{n}(\nu, T) h\nu \quad (3)$$

- $Z(\nu)$ numero di accettori per unità di volume e di frequenza
- $\bar{n}(\nu, T)$ numero medio di quanti $h\nu$ per ogni accettore di quanti $h\nu$
- $h\nu$ energia di un quanto

I diversi significati di $Z(\nu)$

- Per Planck (1900), $Z(\nu)$ è il numero degli oscillatori contenuti nella cavità, per unità di volume e di frequenza.

I diversi significati di $Z(\nu)$

- Per Planck (1900), $Z(\nu)$ è il numero degli oscillatori contenuti nella cavità, per unità di volume e di frequenza.
- Per Debye (1910), $Z(\nu)$ è il numero delle frequenze permesse delle onde stazionarie contenute nella cavità per unità di volume e di frequenza.

I diversi significati di $Z(\nu)$

- Per Planck (1900), $Z(\nu)$ è il numero degli oscillatori contenuti nella cavità, per unità di volume e di frequenza.
- Per Debye (1910), $Z(\nu)$ è il numero delle frequenze permesse delle onde stazionarie contenute nella cavità per unità di volume e di frequenza.
- Per Bose (1924), $Z(\nu)$ è il numero di celle di volume h^3 , *moltiplicato per due*, contenute nello spazio delle fasi per unità di volume dello spazio delle fasi.

Derivazione della formula di Planck



Le aste verticali individuano Z_s accettori **distinguibili**. Allora, le aste sono $Z_s - 1$; le palline rappresentano come N_s quanti di energia $h\nu_s$ **indistinguibili** possono essere suddivisi tra Z_s accettori **distinguibili**.

- Numero dei modi R_s in cui N_s quanti di energia $h\nu_s$ indistinguibili possono essere distribuiti tra Z_s accettori distinguibili:

$$R_s(N_s, Z_s) = \frac{[(Z_s - 1) + N_s]!}{(Z_s - 1)! N_s!} \quad (4)$$

Derivazione della formula di Planck



Le aste verticali individuano Z_s accettori **distinguibili**. Allora, le aste sono $Z_s - 1$; le palline rappresentano come N_s quanti di energia $h\nu_s$ **indistinguibili** possono essere suddivisi tra Z_s accettori **distinguibili**.

- Numero dei modi R_s in cui N_s quanti di energia $h\nu_s$ indistinguibili possono essere distribuiti tra Z_s accettori distinguibili:

$$R_s(N_s, Z_s) = \frac{[(Z_s - 1) + N_s]!}{(Z_s - 1)! N_s!} \quad (4)$$

- Numero dei modi W in cui i quanti di energia possono essere distribuiti su tutti gli accettori:

$$W = \prod_s R_s = \prod_s \frac{(Z_s + N_s - 1)!}{(Z_s - 1)! N_s!} \quad (5)$$

Derivazione della formula di Planck



Le aste verticali individuano Z_s accettori **distinguibili**. Allora, le aste sono $Z_s - 1$; le palline rappresentano come N_s quanti di energia $h\nu_s$ **indistinguibili** possono essere suddivisi tra Z_s accettori **distinguibili**.

- Numero dei modi R_s in cui N_s quanti di energia $h\nu_s$ indistinguibili possono essere distribuiti tra Z_s accettori distinguibili:

$$R_s(N_s, Z_s) = \frac{[(Z_s - 1) + N_s]!}{(Z_s - 1)! N_s!} \quad (4)$$

- Numero dei modi W in cui i quanti di energia possono essere distribuiti su tutti gli accettori:

$$W = \prod_s R_s = \prod_s \frac{(Z_s + N_s - 1)!}{(Z_s - 1)! N_s!} \quad (5)$$

- L'entropia dell'insieme dei quanti è data da

$$S = k_B \ln W$$

Derivazione della formula di Planck



Le aste verticali individuano Z_s accettori **distinguibili**. Allora, le aste sono $Z_s - 1$; le palline rappresentano come N_s quanti di energia $h\nu_s$ **indistinguibili** possono essere suddivisi tra Z_s accettori **distinguibili**.

- Numero dei modi R_s in cui N_s quanti di energia $h\nu_s$ indistinguibili possono essere distribuiti tra Z_s accettori distinguibili:

$$R_s(N_s, Z_s) = \frac{[(Z_s - 1) + N_s]!}{(Z_s - 1)! N_s!} \quad (4)$$

- Numero dei modi W in cui i quanti di energia possono essere distribuiti su tutti gli accettori:

$$W = \prod_s R_s = \prod_s \frac{(Z_s + N_s - 1)!}{(Z_s - 1)! N_s!} \quad (5)$$

- L'entropia dell'insieme dei quanti è data da

$$S = k_B \ln W$$

- Si tratta allora di trovare il massimo di $\ln W$ facendo variare N_s , sotto la condizione che l'energia totale $E = \sum_s N_s h\nu_s$ rimanga invariata

Derivazione della formula di Planck



Le aste verticali individuano Z_s accettori **distinguibili**. Allora, le aste sono $Z_s - 1$; le palline rappresentano come N_s quanti di energia $h\nu_s$ **indistinguibili** possono essere suddivisi tra Z_s accettori **distinguibili**.

- Numero dei modi R_s in cui N_s quanti di energia $h\nu_s$ indistinguibili possono essere distribuiti tra Z_s accettori distinguibili:

$$R_s(N_s, Z_s) = \frac{[(Z_s - 1) + N_s]!}{(Z_s - 1)! N_s!} \quad (4)$$

- Numero dei modi W in cui i quanti di energia possono essere distribuiti su tutti gli accettori:

$$W = \prod_s R_s = \prod_s \frac{(Z_s + N_s - 1)!}{(Z_s - 1)! N_s!} \quad (5)$$

- L'entropia dell'insieme dei quanti è data da

$$S = k_B \ln W$$

- Si tratta allora di trovare il massimo di $\ln W$ facendo variare N_s , sotto la condizione che l'energia totale $E = \sum_s N_s h\nu_s$ rimanga invariata
- Si ricava così che

$$\bar{n}(\nu, T) = \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

dove $\bar{n}(\nu, T)$ è il numero medio di quanti $h\nu$ per ogni accettore di quanti di energia $h\nu$

Approssimazione di Rayleigh - Jeans e di Wien

- La formula di Planck, per $h\nu \gg k_B T$, assume la forma:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} h\nu e^{-h\nu/k_B T}; \quad h\nu \gg k_B T$$

detta di Wien,

Approssimazione di Rayleigh - Jeans e di Wien

- La formula di Planck, per $h\nu \gg k_B T$, assume la forma:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} h\nu e^{-h\nu/k_B T}; \quad h\nu \gg k_B T$$

detta di Wien,

- Mentre per $h\nu \ll k_B T$ assume la forma:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k_B T; \quad h\nu \ll k_B T$$

detta di Rayleigh - Jeans

Approssimazione di Rayleigh - Jeans e di Wien

- La formula di Planck, per $h\nu \gg k_B T$, assume la forma:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} h\nu e^{-h\nu/k_B T}; \quad h\nu \gg k_B T$$

detta di Wien,

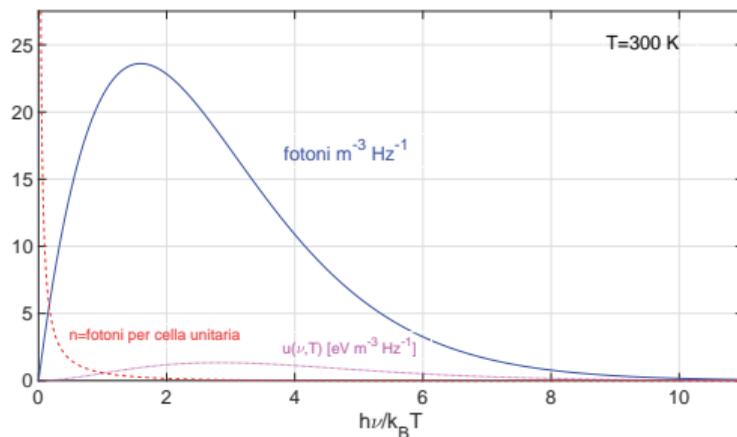
- Mentre per $h\nu \ll k_B T$ assume la forma:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k_B T; \quad h\nu \ll k_B T$$

detta di Rayleigh - Jeans

- La formula di Rayleigh - Jeans è detta “classica” perché non prevede alcuna quantizzazione

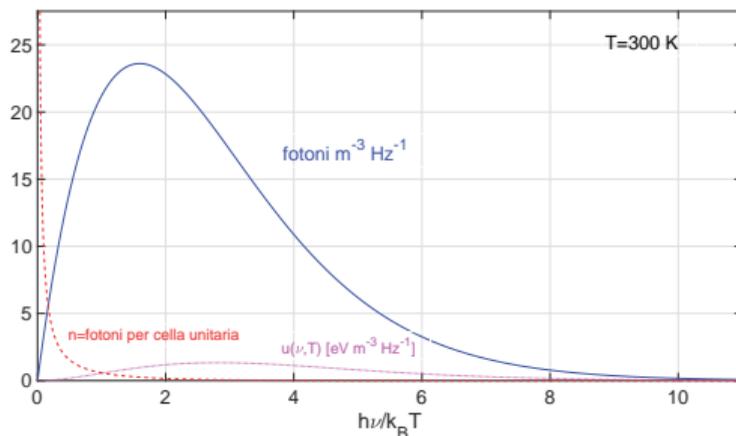
Spettro della radiazione di corpo nero - Teoria



Spettro della radiazione di corpo nero. Sulle ordinate sono rappresentate tre funzioni: Il numero di fotoni per unità di volume e di frequenza (curva blu); Il numero n di fotoni per cella unitaria di volume h^3 dello spazio delle fasi (curva rossa); la densità di energia della radiazione per unità di volume e di frequenza (curva viola).

- Quando n è piccolo la formula di Planck è approssimata da quella di Wien. In questo caso, trattato da Einstein nel 1905, la densità spaziale dei fotoni è bassa; quindi Einstein usa l'analogia quanti di luce \leftrightarrow atomi di un gas perfetto rarefatto. È necessaria una descrizione corpuscolare.

Spettro della radiazione di corpo nero - Teoria



Spettro della radiazione di corpo nero. Sulle ordinate sono rappresentate tre funzioni: Il numero di fotoni per unità di volume e di frequenza (curva blu); Il numero n di fotoni per cella unitaria di volume h^3 dello spazio delle fasi (curva rossa); la densità di energia della radiazione per unità di volume e di frequenza (curva viola).

- Quando n è piccolo la formula di Planck è approssimata da quella di Wien. In questo caso, trattato da Einstein nel 1905, la densità spaziale dei fotoni è bassa; quindi Einstein usa l'analogia quanti di luce \leftrightarrow atomi di un gas perfetto rarefatto. È necessaria una descrizione corpuscolare.
- Quando n è grande, cioè il numero dei fotoni coinvolti è statisticamente significativo, la formula di Planck è approssimata da quella di Rayleigh - Jeans. In questo caso, si può usare la descrizione ondulatoria.

Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni I

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

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

Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni I

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

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

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

Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni I

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

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

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

Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni I

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

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

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

Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni II

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

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

è stata interpretata da Einstein (1909) come la somma di due termini, uno tipico delle particelle ($\propto u$), l'altro tipico delle onde ($\propto u^2$)

Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni II

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

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

è stata interpretata da Einstein (1909) come la somma di due termini, uno tipico delle particelle ($\propto u$), l'altro tipico delle onde ($\propto u^2$)

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

Quesito

- Planck a Mosengeil (1907). Un osservatore K' si muove con velocità v rispetto a K lungo la direzione comune $x \equiv x'$. K e K' si trovano in una cavità isoterma e K è in quiete rispetto alle pareti della cavità.

Quesito

- Planck a Mosengeil (1907). Un osservatore K' si muove con velocità v rispetto a K lungo la direzione comune $x \equiv x'$. K e K' si trovano in una cavità isoterma e K è in quiete rispetto alle pareti della cavità.
- Quale temperatura misura K' ?

Quesito

- Planck a Mosengeil (1907). Un osservatore K' si muove con velocità v rispetto a K lungo la direzione comune $x \equiv x'$. K e K' si trovano in una cavità isoterma e K è in quiete rispetto alle pareti della cavità.
- Quale temperatura misura K' ?
- Risposta:

$$\nu' = \nu \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta'_o}; \quad T' = T \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta'_o}$$

dove: T è la temperatura misurata da K ; θ'_o è l'angolo formato dalla direzione di osservazione di K' con l'asse $x' \equiv x$.

Quesito

- Planck a Mosengeil (1907). Un osservatore K' si muove con velocità v rispetto a K lungo la direzione comune $x \equiv x'$. K e K' si trovano in una cavità isoterma e K è in quiete rispetto alle pareti della cavità.
- Quale temperatura misura K' ?
- Risposta:

$$\nu' = \nu \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta'_o}; \quad T' = T \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta'_o}$$

dove: T è la temperatura misurata da K ; θ'_o è l'angolo formato dalla direzione di osservazione di K' con l'asse $x' \equiv x$.

- Il risultato ottenuto da Mosengeil si applica alla radiazione cosmica di fondo.

Spettro della radiazione di corpo nero - Misura

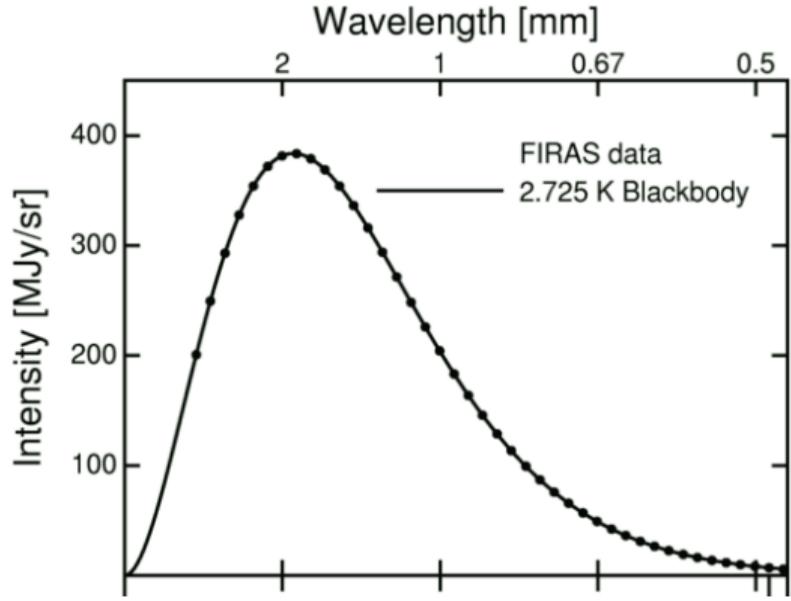


Figura: Misura effettuata con FIRAS (Far Infrared Absolute Spectrophotometer). Missione COBE (Cosmic Background Explorer).

Moto assoluto. I

- L'esistenza della radiazione cosmica di fondo permette di definire *in quiete assoluta* l'osservatore che vede la radiazione di fondo isotropa (prescindendo dalle anisotropie intrinseche). Denotiamo con O tale osservatore. Un osservatore O' (il satellite) in moto inerziale rispetto ad O , lungo il comune asse $x \equiv x'$ con velocità v vede la radiazione di fondo anisotropa per effetto Doppler. Si ha:

$$\nu' = \nu \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 + B \cos \theta'}; \quad B = \frac{v}{c}$$

dove θ' è l'angolo formato dalla direzione di propagazione della radiazione con l'asse $x' \equiv x$

Moto assoluto. I

- L'esistenza della radiazione cosmica di fondo permette di definire *in quiete assoluta* l'osservatore che vede la radiazione di fondo isotropa (prescindendo dalle anisotropie intrinseche). Denotiamo con O tale osservatore. Un osservatore O' (il satellite) in moto inerziale rispetto ad O , lungo il comune asse $x \equiv x'$ con velocità v vede la radiazione di fondo anisotropa per effetto Doppler. Si ha:

$$\nu' = \nu \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 + B \cos \theta'}; \quad B = \frac{v}{c}$$

dove θ' è l'angolo formato dalla direzione di propagazione della radiazione con l'asse $x' \equiv x$

- Questa equazione, scritta in funzione dell'angolo di osservazione $\theta'_{\text{oss}} = \pi - \theta'$, assume la forma:

$$\nu' = \nu \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta'_{\text{oss}}}$$

Moto 'assoluto'. II

Cambiando la direzione di osservazione, O' deve individuare quella per cui la frequenza misurata in una direzione e in quella opposta sia la stessa (ed uguale a $\nu\sqrt{1-B^2}$). Queste due direzioni sono perpendicolari alla sua direzione di moto rispetto all'osservatore in quiete ed alla direzione opposta. Individuate queste due direzioni, O' deve cercare la massima intensità ad una frequenza prescelta in entrambe le direzioni. Siano ν'_+ e ν'_- queste due frequenze. La più grande ν'_+ corrisponde alla sua direzione di moto; l'altra alla direzione opposta. Valgono allora le due relazioni:

$$\nu'_+ = \nu_0 \sqrt{\frac{1+B}{1-B}}$$

Moto 'assoluto'. II

Cambiando la direzione di osservazione, O' deve individuare quella per cui la frequenza misurata in una direzione e in quella opposta sia la stessa (ed uguale a $\nu\sqrt{1-B^2}$). Queste due direzioni sono perpendicolari alla sua direzione di moto rispetto all'osservatore in quiete ed alla direzione opposta. Individuate queste due direzioni, O' deve cercare la massima intensità ad una frequenza prescelta in entrambe le direzioni. Siano ν'_+ e ν'_- queste due frequenze. La più grande ν'_+ corrisponde alla sua direzione di moto; l'altra alla direzione opposta. Valgono allora le due relazioni:

- $$\nu'_+ = \nu_0 \sqrt{\frac{1+B}{1-B}}$$

- $$\nu'_- = \nu_0 \sqrt{\frac{1-B}{1+B}}$$

Moto 'assoluto'. II

Cambiando la direzione di osservazione, O' deve individuare quella per cui la frequenza misurata in una direzione e in quella opposta sia la stessa (ed uguale a $\nu\sqrt{1-B^2}$). Queste due direzioni sono perpendicolari alla sua direzione di moto rispetto all'osservatore in quiete ed alla direzione opposta. Individuate queste due direzioni, O' deve cercare la massima intensità ad una frequenza prescelta in entrambe le direzioni. Siano ν'_+ e ν'_- queste due frequenze. La più grande ν'_+ corrisponde alla sua direzione di moto; l'altra alla direzione opposta. Valgono allora le due relazioni:

- $$\nu'_+ = \nu_0 \sqrt{\frac{1+B}{1-B}}$$

- $$\nu'_- = \nu_0 \sqrt{\frac{1-B}{1+B}}$$

- $$\nu'_+ \times \nu'_- = \nu_0^2$$

Moto 'assoluto'. II

Cambiando la direzione di osservazione, O' deve individuare quella per cui la frequenza misurata in una direzione e in quella opposta sia la stessa (ed uguale a $\nu\sqrt{1-B^2}$). Queste due direzioni sono perpendicolari alla sua direzione di moto rispetto all'osservatore in quiete ed alla direzione opposta. Individuate queste due direzioni, O' deve cercare la massima intensità ad una frequenza prescelta in entrambe le direzioni. Siano ν'_+ e ν'_- queste due frequenze. La più grande ν'_+ corrisponde alla sua direzione di moto; l'altra alla direzione opposta. Valgono allora le due relazioni:

- $$\nu'_+ = \nu_0 \sqrt{\frac{1+B}{1-B}}$$

- $$\nu'_- = \nu_0 \sqrt{\frac{1-B}{1+B}}$$

- $$\nu'_+ \times \nu'_- = \nu_0^2$$

- $$\frac{\nu'_+}{\nu'_-} = \frac{1+B}{1-B} \Rightarrow B = \frac{\nu'_+ - \nu'_-}{\nu'_+ + \nu'_-}$$

Moto 'assoluto'. II

Cambiando la direzione di osservazione, O' deve individuare quella per cui la frequenza misurata in una direzione e in quella opposta sia la stessa (ed uguale a $\nu\sqrt{1-B^2}$). Queste due direzioni sono perpendicolari alla sua direzione di moto rispetto all'osservatore in quiete ed alla direzione opposta. Individuate queste due direzioni, O' deve cercare la massima intensità ad una frequenza prescelta in entrambe le direzioni. Siano ν'_+ e ν'_- queste due frequenze. La più grande ν'_+ corrisponde alla sua direzione di moto; l'altra alla direzione opposta. Valgono allora le due relazioni:

$$\nu'_+ = \nu_0 \sqrt{\frac{1+B}{1-B}}$$

$$\nu'_- = \nu_0 \sqrt{\frac{1-B}{1+B}}$$

$$\nu'_+ \times \nu'_- = \nu_0^2$$

$$\frac{\nu'_+}{\nu'_-} = \frac{1+B}{1-B} \Rightarrow B = \frac{\nu'_+ - \nu'_-}{\nu'_+ + \nu'_-}$$

- Velocità della Terra: $V \approx 360 \text{ km s}^{-1}$

Spettro di emissione delle stelle

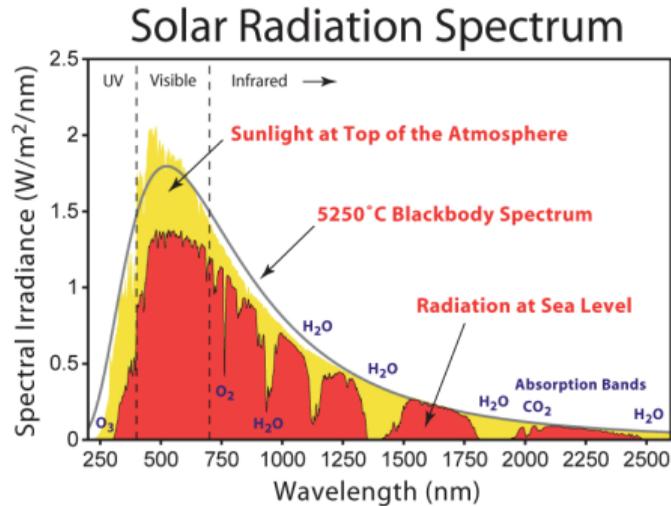


Figura tratta da: [University of Oregon](#)

- Come mostrato nella figura per il Sole, lo spettro della radiazione continua emessa dalle stelle si approssima a quella della radiazione di corpo nero

Spettro di emissione delle stelle

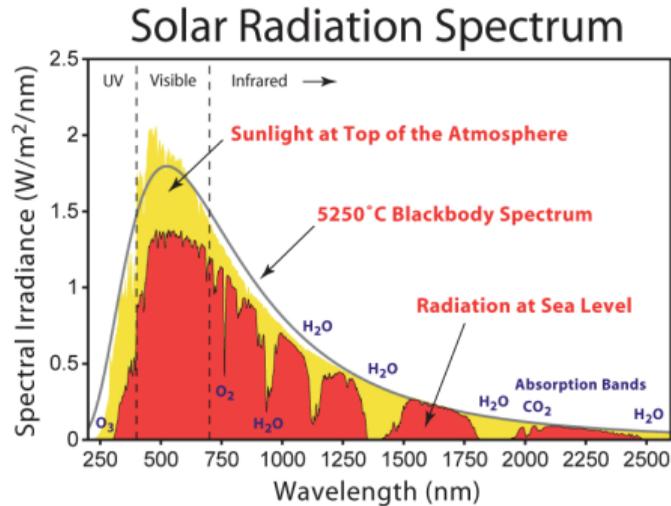


Figura tratta da: [University of Oregon](#)

- Come mostrato nella figura per il Sole, lo spettro della radiazione continua emessa dalle stelle si approssima a quella della radiazione di corpo nero
- La ragione fondamentale di questa somiglianza risiede nel fatto che, all'interno delle stelle, la radiazione è in sostanziale equilibrio termico con la materia di cui le stelle sono costituite (come avviene all'interno di una cavità isoterma)

Spettro di emissione delle stelle

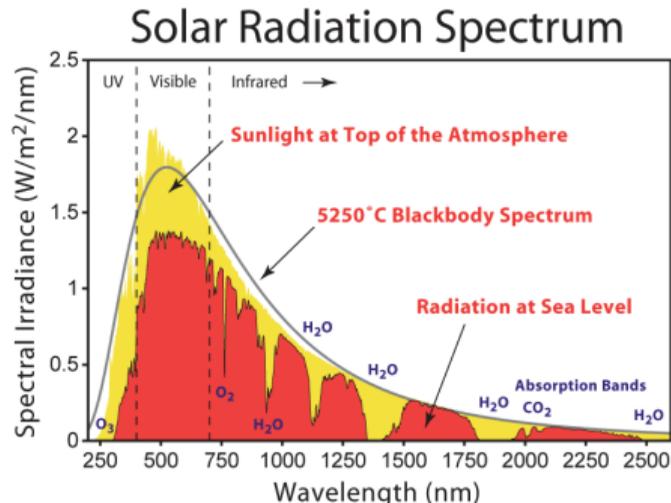


Figura tratta da: [University of Oregon](#)

- Come mostrato nella figura per il Sole, lo spettro della radiazione continua emessa dalle stelle si approssima a quella della radiazione di corpo nero
- La ragione fondamentale di questa somiglianza risiede nel fatto che, all'interno delle stelle, la radiazione è in sostanziale equilibrio termico con la materia di cui le stelle sono costituite (come avviene all'interno di una cavità isoterma)
- Naturalmente, fanno eccezione le righe di emissione e di assorbimento dovute alle parti superficiali delle

- $E_{ph} = h\nu$

I quanti di luce - 1905

- $E_{ph} = h\nu$
- Questa formula, pone in relazione l'energia di un quanto di luce, emesso o assorbito da un atomo, con la frequenza della luce, **descritta** come un'onda elettromagnetica.

I quanti di luce - 1905

- $E_{ph} = h\nu$
- Questa formula, pone in relazione l'energia di un quanto di luce, emesso o assorbito da un atomo, con la frequenza della luce, **descritta** come un'onda elettromagnetica.
- Questa formula ha un significato fisico diverso da quella di Planck $E = h\nu$.

I quanti di luce - 1905

- $E_{ph} = h\nu$
- Questa formula, pone in relazione l'energia di un quanto di luce, emesso o assorbito da un atomo, con la frequenza della luce, **descritta** come un'onda elettromagnetica.
- Questa formula ha un significato fisico diverso da quella di Planck $E = h\nu$.
- Nella descrizione di Planck, $h\nu$ è la quantità minima e discreta di energia che può essere attribuita agli oscillatori di frequenza ν presenti nel suo **modello** di cavità isoterma.

I quanti di luce - 1905

- $E_{ph} = h\nu$
- Questa formula, pone in relazione l'energia di un quanto di luce, emesso o assorbito da un atomo, con la frequenza della luce, **descritta** come un'onda elettromagnetica.
- Questa formula ha un significato fisico diverso da quella di Planck $E = h\nu$.
- Nella descrizione di Planck, $h\nu$ è la quantità minima e discreta di energia che può essere attribuita agli oscillatori di frequenza ν presenti nel suo **modello** di cavità isoterma.
- “È mia opinione che le considerazioni svolte sopra non falsificano la teoria della radiazione di Planck; piuttosto, esse mi sembrano indicare che il signor Planck, con la sua teoria della radiazione abbia introdotto nella fisica un nuovo, ipotetico elemento: l'ipotesi dei quanti di luce.” [A. Einstein, Sulla teoria dell'emissione e dell'assorbimento della luce, 1906.]

Johannes Stark, 1909: $h\nu/c$. I

- Raggi X prodotti da un anticatodo possono estrarre elettroni da una lamina metallica, posta molto distante dall'anticatodo, con una energia cinetica paragonabile a quella degli elettroni incidenti sull'anticatodo (Einstein, 1909)

Johannes Stark, 1909: $h\nu/c$. I

- Raggi X prodotti da un anticatodo possono estrarre elettroni da una lamina metallica, posta molto distante dall'anticatodo, con una energia cinetica paragonabile a quella degli elettroni incidenti sull'anticatodo (Einstein, 1909)
- Questa osservazione sperimentale appare incompatibile con l'idea che i raggi X siano emessi sotto forma di onde EM, perché l'intensità di queste onde diminuisce secondo l'inverso del quadrato della distanza

Johannes Stark, 1909: $h\nu/c$. I

- Raggi X prodotti da un anticatodo possono estrarre elettroni da una lamina metallica, posta molto distante dall'anticatodo, con una energia cinetica paragonabile a quella degli elettroni incidenti sull'anticatodo (Einstein, 1909)
- Questa osservazione sperimentale appare incompatibile con l'idea che i raggi X siano emessi sotto forma di onde EM, perché l'intensità di queste onde diminuisce secondo l'inverso del quadrato della distanza
- Stark ipotizza quindi che i raggi X siano emessi sotto forma di quanti aventi energia $h\nu$ e quantità di moto

$$\left(\frac{h\nu}{c^2}\right) c$$

- Si noti come il termine $\left(\frac{h\nu}{c^2}\right)$ abbia le dimensioni di una massa

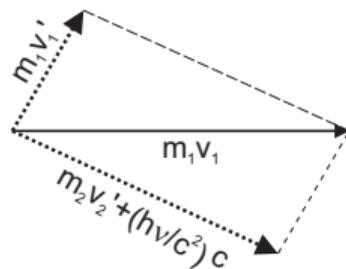
Johannes Stark, 1909: $h\nu/c$. I

- Raggi X prodotti da un anticatodo possono estrarre elettroni da una lamina metallica, posta molto distante dall'anticatodo, con una energia cinetica paragonabile a quella degli elettroni incidenti sull'anticatodo (Einstein, 1909)
- Questa osservazione sperimentale appare incompatibile con l'idea che i raggi X siano emessi sotto forma di onde EM, perché l'intensità di queste onde diminuisce secondo l'inverso del quadrato della distanza
- Stark ipotizza quindi che i raggi X siano emessi sotto forma di quanti aventi energia $h\nu$ e quantità di moto

$$\left(\frac{h\nu}{c^2}\right) c$$

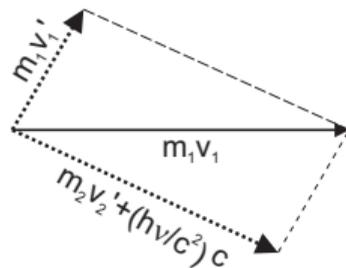
- Si noti come il termine $\left(\frac{h\nu}{c^2}\right)$ abbia le dimensioni di una massa
- Stark descrive l'urto di un elettrone emesso dal filamento del tubo a raggi X con una non specificata 'particella' dell'anticatodo. Scrive quindi l'equazione di conservazione della quantità di moto in forma newtoniana.

Johannes Stark, 1909: $h\nu/c$. II



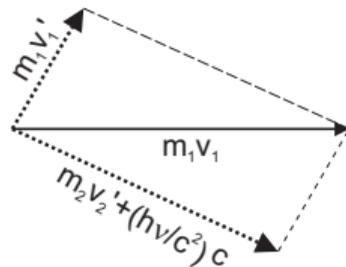
- Questa figura si riferisce al caso particolare in cui si suppone che il quanto X sia emesso nella direzione di moto della 'particella' dell'anticatodo dopo l'urto con l'elettrone incidente, e che la particella dell'anticatodo sia in quiete prima dell'urto.

Johannes Stark, 1909: $h\nu/c$. II



- Questa figura si riferisce al caso particolare in cui si suppone che il quanto X sia emesso nella direzione di moto della 'particella' dell'anticatodo dopo l'urto con l'elettrone incidente, e che la particella dell'anticatodo sia in quiete prima dell'urto.
- Non scrivendo l'equazione di conservazione dell'energia, Stark non era in grado di trovare la soluzione matematica del problema. Stark si limitò quindi a sviluppare considerazioni qualitative sui quanti X emessi

Johannes Stark, 1909: $h\nu/c$. II



- Questa figura si riferisce al caso particolare in cui si suppone che il quanto X sia emesso nella direzione di moto della 'particella' dell'anticatodo dopo l'urto con l'elettrone incidente, e che la particella dell'anticatodo sia in quiete prima dell'urto.
- Non scrivendo l'equazione di conservazione dell'energia, Stark non era in grado di trovare la soluzione matematica del problema. Stark si limitò quindi a sviluppare considerazioni qualitative sui quanti X emessi
- La proposta di Stark generò una discussione 'vivace' con Sommerfeld, che in risposta, sviluppò la teoria della 'Bremsstrahlung', basata sull'idea che i raggi X sono emessi dall'anticatodo sotto forma di onde elettromagnetiche e che questa emissione sia dovuta al 'frenamento' (decelerazione) degli elettroni che penetrano nell'anticatodo [ERQ, pp. 126 - 127]

I quanti di luce, Einstein (1916 - 1917)



$$p = \frac{h\nu}{c}$$

I quanti di luce, Einstein (1916 - 1917)

- $$p = \frac{h\nu}{c}$$

- L'attribuzione della quantità di moto $h\nu/c$ ad un quanto di luce è condizione **sufficiente** affinché in una cavità all'equilibrio termico contenente molecole la distribuzione delle velocità delle molecole sia quella maxwelliana

I quanti di luce, Einstein (1916 - 1917)

$$p = \frac{h\nu}{c}$$

-
- L'attribuzione della quantità di moto $h\nu/c$ ad un quanto di luce è condizione **sufficiente** affinché in una cavità all'equilibrio termico contenente molecole la distribuzione delle velocità delle molecole sia quella maxwelliana
- Einstein avrebbe potuto attribuire la quantità di moto $h\nu/c$ ad un quanto di luce già precedentemente trattando il quanto come una particella relativistica di massa nulla, oppure usando il fatto che ad un'onda elettromagnetica piana è associata una densità di quantità di moto esprimibile in termini di quanti di luce

$p = h\nu/c$: perchè no nel 1905 (circa)?



$$\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m^2 c^2$$

da cui, essendo $m = 0$ per un quanto di luce, si ricava immediatamente $p = h\nu/c$.

$p = h\nu/c$: perchè no nel 1905 (circa)?

•

$$\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m^2 c^2$$

da cui, essendo $m = 0$ per un quanto di luce, si ricava immediatamente $p = h\nu/c$.

- Ad un'onda elettromagnetica piana monocromatica è associata una densità di quantità di moto il cui valor medio è dato da

$$\langle g \rangle = \frac{\langle u \rangle}{c}$$

$p = h\nu/c$: perchè no nel 1905 (circa)?

•

$$\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m^2 c^2$$

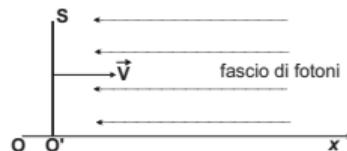
da cui, essendo $m = 0$ per un quanto di luce, si ricava immediatamente $p = h\nu/c$.

- Ad un'onda elettromagnetica piana monocromatica è associata una densità di quantità di moto il cui valor medio è dato da

$$\langle g \rangle = \frac{\langle u \rangle}{c}$$

- Se poniamo $\langle u \rangle = \langle n \rangle h\nu$, segue immediatamente che ad un quanto dobbiamo associare una quantità di moto pari a $h\nu/c$

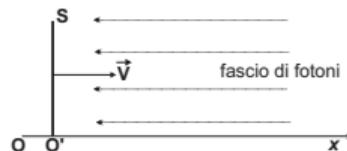
Emden, 1921. Conservazione della quantità di moto, I [ERQ, pp. 135 - 137]



- La superficie S , completamente assorbente, assorbe in un secondo, tutti i fotoni contenuti in un volume $S'c$

$$F'_x = \frac{dP'}{dt'} = -n' \left(\frac{h\nu'}{c} \right) c S'$$

Emden, 1921. Conservazione della quantità di moto, I [ERQ, pp. 135 - 137]

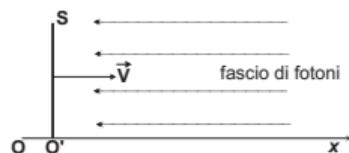


- La superficie S , completamente assorbente, assorbe in un secondo, tutti i fotoni contenuti in un volume $S'c$

$$F'_x = \frac{dP'}{dt'} = -n' \left(\frac{h\nu'}{c} \right) c S'$$

- Quindi, la variazione della quantità di moto della superficie S' è data da:

Emden, 1921. Conservazione della quantità di moto, I [ERQ, pp. 135 - 137]

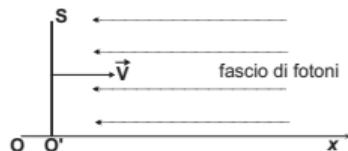


- La superficie S , completamente assorbente, assorbe in un secondo, tutti i fotoni contenuti in un volume $S'c$

$$F'_x = \frac{dP'_x}{dt'} = -n' \left(\frac{h\nu'}{c} \right) c S'$$

- Quindi, la variazione della quantità di moto della superficie S' è data da:
- Nel sistema di riferimento del laboratorio, la superficie S assorbe, in un secondo, tutti i fotoni contenuti nel volume la cui base è S e la cui altezza, in metri, è $S(c + V)$.

Emden, 1921. Conservazione della quantità di moto, I [ERQ, pp. 135 - 137]



- La superficie S , completamente assorbente, assorbe in un secondo, tutti i fotoni contenuti in un volume $S'c$

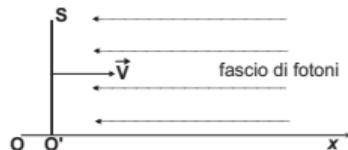
$$F'_x = \frac{dP'}{dt'} = -n' \left(\frac{h\nu'}{c} \right) c S'$$

- Quindi, la variazione della quantità di moto della superficie S' è data da:
- Nel sistema di riferimento del laboratorio, la superficie S assorbe, in un secondo, tutti i fotoni contenuti nel volume la cui base è S e la cui altezza, in metri, è $S(c + V)$.
- Quindi, la variazione della quantità di moto della superficie S è data da:

$$F_x = \frac{dP}{dt} = -n \frac{h\nu}{c} (c + V) S$$

dove n è la densità dei fotoni.

Emden, 1921. Conservazione della quantità di moto, I [ERQ, pp. 135 - 137]



- La superficie S , completamente assorbente, assorbe in un secondo, tutti i fotoni contenuti in un volume $S'c$

$$F'_x = \frac{dP'}{dt'} = -n' \left(\frac{h\nu'}{c} \right) c S'$$

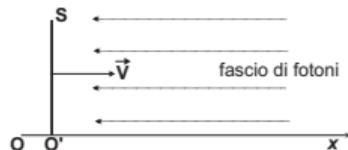
- Quindi, la variazione della quantità di moto della superficie S' è data da:
- Nel sistema di riferimento del laboratorio, la superficie S assorbe, in un secondo, tutti i fotoni contenuti nel volume la cui base è S e la cui altezza, in metri, è $S(c + V)$.
- Quindi, la variazione della quantità di moto della superficie S è data da:

$$F_x = \frac{dP}{dt} = -n \frac{h\nu}{c} (c + V) S$$

dove n è la densità dei fotoni.

- Poiché, secondo la relatività speciale, $F_x = F'_x$, $S = S'$ e $n' = n\sqrt{1 - V^2/c^2}$, otteniamo immediatamente:

Emden, 1921. Conservazione della quantità di moto, I [ERQ, pp. 135 - 137]



- La superficie S , completamente assorbente, assorbe in un secondo, tutti i fotoni contenuti in un volume $S'c$

$$F'_x = \frac{dP'}{dt'} = -n' \left(\frac{h\nu'}{c} \right) c S'$$

- Quindi, la variazione della quantità di moto della superficie S' è data da:
- Nel sistema di riferimento del laboratorio, la superficie S assorbe, in un secondo, tutti i fotoni contenuti nel volume la cui base è S e la cui altezza, in metri, è $S(c + V)$.
- Quindi, la variazione della quantità di moto della superficie S è data da:

$$F_x = \frac{dP}{dt} = -n \frac{h\nu}{c} (c + V) S$$

dove n è la densità dei fotoni.

- Poiché, secondo la relatività speciale, $F_x = F'_x$, $S = S'$ e $n' = n\sqrt{1 - V^2/c^2}$, otteniamo immediatamente:

$$\nu = \nu' \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 + V/c}$$

Emden, 1921. Conservazione della quantità di moto, II [ERQ, pp. 135 - 137]

- Se la direzione del fascio di fotoni forma un angolo θ' con l'asse $x \equiv x' \dots$

Emden, 1921. Conservazione della quantità di moto, II [ERQ, pp. 135 - 137]

- Se la direzione del fascio di fotoni forma un angolo θ' con l'asse $x \equiv x' \dots$
- ... Allora:

$$\nu = \nu' \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta}$$

Emden, 1921. Conservazione della quantità di moto, II [ERQ, pp. 135 - 137]

- Se la direzione del fascio di fotoni forma un angolo θ' con l'asse $x \equiv x' \dots$
- ... Allora:

$$\nu = \nu' \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta}$$

- Per ottenere questa formula è necessario usare la relazione dell'aberrazione della luce:

$$\cos \theta' = \frac{\cos \theta - B}{1 - B \cos \theta}$$

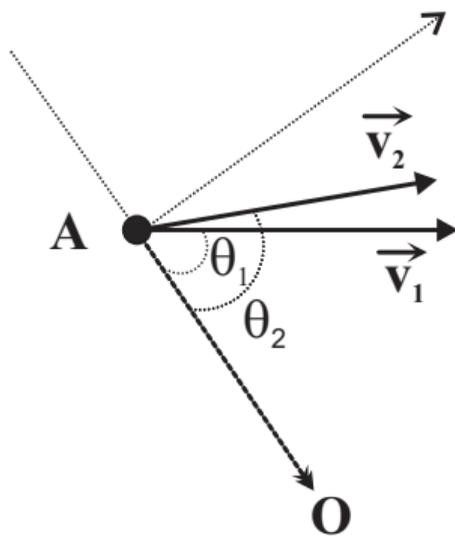
Schrödinger, 1922: conservazione dell'energia e della quantità di moto [ERQ, pp. 137 - 143]

- "...è concepibile che una teoria della luce basata su funzioni spaziali continue porti a contraddizioni con l'esperienza se la si applica ai fenomeni della **generazione** e della trasformazione della luce [Einstein, 1905]."

Schrödinger, 1922: conservazione dell'energia e della quantità di moto [ERQ, pp. 137 - 143]

- "...è concepibile che una teoria della luce basata su funzioni spaziali continue porti a contraddizioni con l'esperienza se la si applica ai fenomeni della **generazione** e della trasformazione della luce [Einstein, 1905]."
- "...sulla base data da Einstein alla teoria della radiazione, il quanto emesso $h\nu$ porta con sé sempre – e in particolare in ogni sistema di riferimento – l'impulso lineare $h\nu/c$, il massimo che in linea di principio possa essere associato a questo ammontare di energia. Nel seguito dimostriamo che il "salto di velocità" prodotto in tal modo per la condizione delle frequenze di Bohr dà proprio lo spostamento Doppler, **con tutte le sottigliezze che sono richieste dalla teoria della relatività.**" [Schrödinger E 1922 Dopplerprinzip und bohrsche frequenzbedingung *Physik. Zeits.* **23** 301; trad. it. a cura di Antoci S **qui**]

Emissione di un fotone. I



Emissione di un fotone. II

- Conservazione dell'energia:

$$E_{ph} = \gamma_1 E_1 - \gamma_2 E_2; \quad \gamma_i = \frac{1}{\sqrt{1 - B_i^2}}; \quad B_i = \frac{v_i}{c}; \quad i = 1, 2$$

Emissione di un fotone. II

- Conservazione dell'energia:

$$E_{ph} = \gamma_1 E_1 - \gamma_2 E_2; \quad \gamma_i = \frac{1}{\sqrt{1 - B_i^2}}; \quad B_i = \frac{v_i}{c}; \quad i = 1, 2$$

- Conservazione della quantità di moto:

$$\begin{aligned} \gamma_1 \frac{E_1}{c^2} v_1 \cos \theta_1 &= \gamma_2 \frac{E_2}{c^2} v_2 \cos \theta_2 + \frac{E_{ph}}{c} \\ \gamma_1 \frac{E_1}{c^2} v_1 \sin \theta_1 &= \gamma_2 \frac{E_2}{c^2} v_2 \sin \theta_2 \end{aligned}$$

Emissione di un fotone. III



$$\begin{aligned} E_{ph}^{emi} &= \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2E_1^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1} \\ &= E_{emi}^0 \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c} \end{aligned}$$

Emissione di un fotone. III



$$\begin{aligned} E_{ph}^{emi} &= \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2E_1^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1} \\ &= E_{emi}^0 \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c} \end{aligned}$$

- $\Delta E = E_1 - E_2$ è un invariante relativistico.

Emissione di un fotone. III



$$\begin{aligned} E_{ph}^{emi} &= \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2E_1^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1} \\ &= E_{emi}^0 \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c} \end{aligned}$$

- $\Delta E = E_1 - E_2$ è un invariante relativistico.



$$E_{emi}^0 = \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2E_1^{emi}} \right) < \Delta E$$

è un invariante relativistico.

Emissione di un fotone. III



$$\begin{aligned} E_{ph}^{emi} &= \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2E_1^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1} \\ &= E_{emi}^0 \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c} \end{aligned}$$

- $\Delta E = E_1 - E_2$ è un invariante relativistico.



$$E_{emi}^0 = \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2E_1^{emi}} \right) < \Delta E$$

è un invariante relativistico.

- Se $\Delta E \ll Mc^2$, possiamo porre $\Delta E/2E_1^{emi} = \Delta E/2Mc^2$. In generale, questa approssimazione è valida per transizioni tra due livelli atomici, ma non per transizioni tra due livelli nucleari. L'energia $E_R = \Delta E^2/2Mc^2$ è chiamata energia di rinculo. Esattamente, essa è l'energia cinetica di un atomo dopo l'assorbimento di un fotone se esso era a riposo prima dell'assorbimento; e, se vale la disuguaglianza $\Delta E \ll Mc^2$, è anche l'energia cinetica dell'atomo dopo l'emissione di un fotone se esso era a riposo prima dell'emissione.

Emissione di un fotone. IV

- L'energia del fotone emesso può essere espressa anche in funzione della velocità dell'atomo **dopo** l'emissione. Ciò è dovuto al fatto che, dati i parametri prima dell'emissione, quelli dopo l'emissione sono determinati dalle leggi di conservazione.

Emissione di un fotone. IV

- L'energia del fotone emesso può essere espressa anche in funzione della velocità dell'atomo **dopo** l'emissione. Ciò è dovuto al fatto che, dati i parametri prima dell'emissione, quelli dopo l'emissione sono determinati dalle leggi di conservazione.

$$E_{ph}^{emi} = \Delta E \left(1 + \frac{\Delta E}{2E_2^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_2^2}}{1 - B_2 \cos \theta_2}$$

Emissione di un fotone. IV

- L'energia del fotone emesso può essere espressa anche in funzione della velocità dell'atomo **dopo** l'emissione. Ciò è dovuto al fatto che, dati i parametri prima dell'emissione, quelli dopo l'emissione sono determinati dalle leggi di conservazione.

$$E_{ph}^{emi} = \Delta E \left(1 + \frac{\Delta E}{2E_2^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_2^2}}{1 - B_2 \cos \theta_2}$$

- Questa equazione va confrontata con

$$E_{ph}^{emi} = \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2E_1^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}$$

Emissione di un fotone. IV

- L'energia del fotone emesso può essere espressa anche in funzione della velocità dell'atomo **dopo** l'emissione. Ciò è dovuto al fatto che, dati i parametri prima dell'emissione, quelli dopo l'emissione sono determinati dalle leggi di conservazione.

$$E_{ph}^{emi} = \Delta E \left(1 + \frac{\Delta E}{2E_2^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_2^2}}{1 - B_2 \cos \theta_2}$$

- Questa equazione va confrontata con

$$E_{ph}^{emi} = \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2E_1^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}$$

$$E_1^{emi} = mc^2 + \Delta E \quad E_2^{emi} = mc^2$$

Assorbimento di un fotone

Dopo avere opportunamente riscritto le equazioni di conservazione, si ottiene:



$$\begin{aligned} E_{ph}^{abs} &= \Delta E \left(1 + \frac{\Delta E}{2E_1^{abs}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1} \\ &= E_{abs}^0 \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c} \end{aligned}$$

Assorbimento di un fotone

Dopo avere opportunamente riscritto le equazioni di conservazione, si ottiene:

$$\begin{aligned} E_{ph}^{abs} &= \Delta E \left(1 + \frac{\Delta E}{2E_1^{abs}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1} \\ &= E_{abs}^0 \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c} \end{aligned}$$

$$E_{abs}^0 = \Delta E \left(1 + \frac{\Delta E}{2E_1^{abs}} \right)$$

è un invariante relativistico.

Assorbimento di un fotone

Dopo avere opportunamente riscritto le equazioni di conservazione, si ottiene:

$$\begin{aligned} E_{ph}^{abs} &= \Delta E \left(1 + \frac{\Delta E}{2E_1^{abs}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1} \\ &= E_{abs}^0 \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c} \end{aligned}$$

$$E_{abs}^0 = \Delta E \left(1 + \frac{\Delta E}{2E_1^{abs}} \right)$$

è un invariante relativistico.

$$E_R = \frac{\Delta E^2}{2E_1^{abs}} = E_R = \frac{\Delta E^2}{2mc^2}$$

è l'energia di rinculo dell'atomo

Assorbimento di un fotone: dinamica newtoniana

- È interessante trattare l'assorbimento di un fotone da parte di un atomo in moto con la dinamica newtoniana.

Assorbimento di un fotone: dinamica newtoniana

- È interessante trattare l'assorbimento di un fotone da parte di un atomo in moto con la dinamica newtoniana.
- Nel caso semplice in cui l'atomo assorbe un fotone in una collisione frontale, si ottiene:

$$E_{ph} = \Delta E(1 + B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

Assorbimento di un fotone: dinamica newtoniana

- È interessante trattare l'assorbimento di un fotone da parte di un atomo in moto con la dinamica newtoniana.
- Nel caso semplice in cui l'atomo assorbe un fotone in una collisione frontale, si ottiene:

$$E_{ph} = \Delta E(1 + B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

- Se l'atomo è inizialmente in quiete, dopo l'assorbimento la sua energia cinetica (energia di rinculo) è:

$$E_R = \frac{\Delta E^2}{2mc^2}$$

Assorbimento di un fotone: dinamica newtoniana

- È interessante trattare l'assorbimento di un fotone da parte di un atomo in moto con la dinamica newtoniana.
- Nel caso semplice in cui l'atomo assorbe un fotone in una collisione frontale, si ottiene:

$$E_{ph} = \Delta E(1 + B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

- Se l'atomo è inizialmente in quiete, dopo l'assorbimento la sua energia cinetica (energia di rinculo) è:

$$E_R = \frac{\Delta E^2}{2mc^2}$$

- Come si vede, in una trattazione newtoniana compare l'energia a riposo dell'atomo mc^2 .

Assorbimento di un fotone: dinamica newtoniana

- È interessante trattare l'assorbimento di un fotone da parte di un atomo in moto con la dinamica newtoniana.
- Nel caso semplice in cui l'atomo assorbe un fotone in una collisione frontale, si ottiene:

$$E_{ph} = \Delta E(1 + B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

- Se l'atomo è inizialmente in quiete, dopo l'assorbimento la sua energia cinetica (energia di rinculo) è:

$$E_R = \frac{\Delta E^2}{2mc^2}$$

- Come si vede, in una trattazione newtoniana compare l'energia a riposo dell'atomo mc^2 .
- Ciò è dovuto al fatto che, nell'equazione di conservazione della quantità di moto è stata inserita la quantità di moto del fotone E_{ph}/c .

Emissione e assorbimento di un fotone: risonanza.

- Supponiamo che un atomo **E** in quiete emetta un fotone di energia E_{emi}^0 lungo la direzione positiva dell'asse x

Emissione e assorbimento di un fotone: risonanza.

- Supponiamo che un atomo **E** in quiete emetta un fotone di energia E_{emi}^0 lungo la direzione positiva dell'asse x
- L'energia del fotone emesso è data da:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{emi} - E_R; \quad \text{se } \Delta E \ll mc^2$$

Emissione e assorbimento di un fotone: risonanza.

- Supponiamo che un atomo **E** in quiete emetta un fotone di energia E_{emi}^0 lungo la direzione positiva dell'asse x
- L'energia del fotone emesso è data da:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{emi} - E_R; \quad \text{se } \Delta E \ll mc^2$$

- Se un atomo identico **A**, posto in quiete sull'asse x , assorbe il fotone emesso da **E**, deve essere:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{abs} + E_R$$

Emissione e assorbimento di un fotone: risonanza.

- Supponiamo che un atomo **E** in quiete emetta un fotone di energia E_{emi}^0 lungo la direzione positiva dell'asse x
- L'energia del fotone emesso è data da:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{emi} - E_R; \quad \text{se } \Delta E \ll mc^2$$

- Se un atomo identico **A**, posto in quiete sull'asse x , assorbe il fotone emesso da **E**, deve essere:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{abs} + E_R$$

- Quindi: $\Delta E_{abs} - \Delta E_{emi} = -2E_R$

Emissione e assorbimento di un fotone: risonanza.

- Supponiamo che un atomo **E** in quiete emetta un fotone di energia E_{emi}^0 lungo la direzione positiva dell'asse x
- L'energia del fotone emesso è data da:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{emi} - E_R; \quad \text{se } \Delta E \ll mc^2$$

- Se un atomo identico **A**, posto in quiete sull'asse x , assorbe il fotone emesso da **E**, deve essere:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{abs} + E_R$$

- Quindi: $\Delta E_{abs} - \Delta E_{emi} = -2E_R$
- Cioè l'energia di transizione tra due livelli energetici NON può essere esattamente definita: deve esistere una **larghezza naturale** della riga di emissione/assorbimento.

Energia di rinculo

- L'energia di rinculo è di 3.49×10^{-9} eV per l'emissione da parte di un atomo di idrogeno di un fotone corrispondente alla riga a 486.133 nm

Energia di rinculo

- L'energia di rinculo è di $3.49 \times 10^{-9} \text{ eV}$ per l'emissione da parte di un atomo di idrogeno di un fotone corrispondente alla riga a 486.133 nm
- Nel caso dell'atomo di idrogeno, l'energia di rinculo è trascurabile rispetto alla larghezza naturale della riga

Energia di rinculo

- L'energia di rinculo è di $3.49 \times 10^{-9} \text{ eV}$ per l'emissione da parte di un atomo di idrogeno di un fotone corrispondente alla riga a 486.133 nm
- Nel caso dell'atomo di idrogeno, l'energia di rinculo è trascurabile rispetto alla larghezza naturale della riga
- L'energia di rinculo è di $4.68 \times 10^{-2} \text{ eV}$ per l'emissione di un fotone gamma di 129 KeV da parte di un nucleo di ^{191}Ir

Energia di rinculo

- L'energia di rinculo è di $3.49 \times 10^{-9} \text{ eV}$ per l'emissione da parte di un atomo di idrogeno di un fotone corrispondente alla riga a 486.133 nm
- Nel caso dell'atomo di idrogeno, l'energia di rinculo è trascurabile rispetto alla larghezza naturale della riga
- L'energia di rinculo è di $4.68 \times 10^{-2} \text{ eV}$ per l'emissione di un fotone gamma di 129 KeV da parte di un nucleo di ^{191}Ir
- Nel caso del nucleo di iridio, l'energia di rinculo è grande rispetto alla larghezza naturale della riga

Emissione e assorbimento di un fotone: difetto di massa.

- Durante l'emissione, la massa dell'atomo **E** diminuisce di una quantità pari a $\Delta E_{emi}/c^2$,
se $\Delta E \ll mc^2$

Emissione e assorbimento di un fotone: difetto di massa.

- Durante l'emissione, la massa dell'atomo **E** diminuisce di una quantità pari a $\Delta E_{emi}/c^2$,
se $\Delta E \ll mc^2$
- Durante l'assorbimento, la massa dell'atomo **A** aumenta di $\Delta E_{abs}/c^2$

Emissione e assorbimento di un fotone: difetto di massa.

- Durante l'emissione, la massa dell'atomo **E** diminuisce di una quantità pari a $\Delta E_{emi}/c^2$,
se $\Delta E \ll mc^2$
- Durante l'assorbimento, la massa dell'atomo **A** aumenta di $\Delta E_{abs}/c^2$
- Durante l'intero processo, è stata persa una massa pari $2E_R/c^2$

Emissione e assorbimento di un fotone: difetto di massa.

- Durante l'emissione, la massa dell'atomo **E** diminuisce di una quantità pari a $\Delta E_{emi}/c^2$,
se $\Delta E \ll mc^2$
- Durante l'assorbimento, la massa dell'atomo **A** aumenta di $\Delta E_{abs}/c^2$
- Durante l'intero processo, è stata persa una massa pari $2E_R/c^2$
- L'energia corrispondente a questa massa ed uguale a $2E_R$ è finita in energia cinetica di rinculo dei due atomi.

Emissione e assorbimento di un fotone: difetto di massa.

- Durante l'emissione, la massa dell'atomo **E** diminuisce di una quantità pari a $\Delta E_{emi}/c^2$,
se $\Delta E \ll mc^2$
- Durante l'assorbimento, la massa dell'atomo **A** aumenta di $\Delta E_{abs}/c^2$
- Durante l'intero processo, è stata persa una massa pari $2E_R/c^2$
- L'energia corrispondente a questa massa ed uguale a $2E_R$ è finita in energia cinetica di rinculo dei due atomi.
- La trasformazione massa \longleftrightarrow energia opera anche nei processi di emissione o assorbimento di fotoni da parte di atomi o nuclei e non solo nei processi di fissione o fusione di nuclei.

Emissione e assorbimento di un fotone: difetto di massa.

- Durante l'emissione, la massa dell'atomo **E** diminuisce di una quantità pari a $\Delta E_{emi}/c^2$,
se $\Delta E \ll mc^2$
- Durante l'assorbimento, la massa dell'atomo **A** aumenta di $\Delta E_{abs}/c^2$
- Durante l'intero processo, è stata persa una massa pari $2E_R/c^2$
- L'energia corrispondente a questa massa ed uguale a $2E_R$ è finita in energia cinetica di rinculo dei due atomi.
- La trasformazione massa \longleftrightarrow energia opera anche nei processi di emissione o assorbimento di fotoni da parte di atomi o nuclei e non solo nei processi di fissione o fusione di nuclei.
- Naturalmente, gli ordini di grandezza delle energie coinvolte nei due processi sono assai diversi.

Laser Cooling

- La variazione dell'energia cinetica di un atomo dovuta all'assorbimento di un fotone in una collisione frontale è data da

$$\Delta E_{cin} = \Delta E_M (B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E_M}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

B_T e B_1 sono parametri adimensionali

Laser Cooling

- La variazione dell'energia cinetica di un atomo dovuta all'assorbimento di un fotone in una collisione frontale è data da

$$\Delta E_{cin} = \Delta E_M (B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E_M}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

B_T e B_1 sono parametri adimensionali

- La variazione di energia cinetica dell'atomo è:

Laser Cooling

- La variazione dell'energia cinetica di un atomo dovuta all'assorbimento di un fotone in una collisione frontale è data da

$$\Delta E_{cin} = \Delta E_M (B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E_M}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

B_T e B_1 sono parametri adimensionali

- La variazione di energia cinetica dell'atomo è:
- negativa se

$$v_1 > \frac{v_R}{2} \quad v_R = \frac{\Delta E_M}{mc}$$

v_R è la velocità di rinculo dell'atomo se, prima dell'assorbimento di un fotone, era in quiete

Laser Cooling

- La variazione dell'energia cinetica di un atomo dovuta all'assorbimento di un fotone in una collisione frontale è data da

$$\Delta E_{cin} = \Delta E_M (B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E_M}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

B_T e B_1 sono parametri adimensionali

- La variazione di energia cinetica dell'atomo è:
- negativa se

$$v_1 > \frac{v_R}{2} \quad v_R = \frac{\Delta E_M}{mc}$$

v_R è la velocità di rinculo dell'atomo se, prima dell'assorbimento di un fotone, era in quiete

- nulla se

$$v_1 = \frac{v_R}{2}$$

Laser Cooling

- La variazione dell'energia cinetica di un atomo dovuta all'assorbimento di un fotone in una collisione frontale è data da

$$\Delta E_{cin} = \Delta E_M (B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E_M}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

B_T e B_1 sono parametri adimensionali

- La variazione di energia cinetica dell'atomo è:
- negativa se

$$v_1 > \frac{v_R}{2} \quad v_R = \frac{\Delta E_M}{mc}$$

v_R è la velocità di rinculo dell'atomo se, prima dell'assorbimento di un fotone, era in quiete

- nulla se

$$v_1 = \frac{v_R}{2}$$

- positiva se

$$v_1 < \frac{v_R}{2}$$

Einstein e la quantità di moto dei quanti di luce. I

Einstein affronta questo argomento nell'articolo del settembre 1905. In esso, tuttavia, coerentemente con la scelta di non mescolare relatività speciale e quanti di luce, Einstein, non parla di quanti di luce. Di seguito, sviluppiamo il ragionamento di Einstein, mescolando relatività e quanti .

- Due fotoni di eguale energia E_{ph}^0 sono emessi contemporaneamente in direzioni opposte da un corpo di massa m in quiete nell'origine del SRI O .

Einstein e la quantità di moto dei quanti di luce. I

Einstein affronta questo argomento nell'articolo [del settembre 1905](#). In esso, tuttavia, coerentemente con la scelta di non mescolare relatività speciale e quanti di luce, Einstein, non parla di quanti di luce. Di seguito, sviluppiamo il ragionamento di Einstein, mescolando relatività e quanti .

- Due fotoni di eguale energia E_{ph}^0 sono emessi contemporaneamente in direzioni opposte da un corpo di massa m in quiete nell'origine del SRI O.
- Prima dell'emissione, l'energia del corpo è mc^2 ; la sua quantità di moto è nulla. Dopo l'emissione, l'energia del sistema costituito dal corpo e dai due fotoni è ancora mc^2 e la sua quantità di moto è nulla perché il corpo emettente non rincula e la somma delle quantità di moto dei due fotoni è nulla.

Einstein e la quantità di moto dei quanti di luce. I

Einstein affronta questo argomento nell'articolo del settembre 1905. In esso, tuttavia, coerentemente con la scelta di non mescolare relatività speciale e quanti di luce, Einstein, non parla di quanti di luce. Di seguito, sviluppiamo il ragionamento di Einstein, mescolando relatività e quanti .

- Due fotoni di eguale energia E_{ph}^0 sono emessi contemporaneamente in direzioni opposte da un corpo di massa m in quiete nell'origine del SRI O.
- Prima dell'emissione, l'energia del corpo è mc^2 ; la sua quantità di moto è nulla. Dopo l'emissione, l'energia del sistema costituito dal corpo e dai due fotoni è ancora mc^2 e la sua quantità di moto è nulla perché il corpo emettente non rincula e la somma delle quantità di moto dei due fotoni è nulla.
- Il corpo ha perso una energia pari a $2E_{ph}^0$ e la sua massa è diminuita di un ammontare pari a $2E_{ph}^0/c^2$

Einstein e la quantità di moto dei quanti di luce. I

Einstein affronta questo argomento nell'articolo del settembre 1905. In esso, tuttavia, coerentemente con la scelta di non mescolare relatività speciale e quanti di luce, Einstein, non parla di quanti di luce. Di seguito, sviluppiamo il ragionamento di Einstein, mescolando relatività e quanti .

- Due fotoni di eguale energia E_{ph}^0 sono emessi contemporaneamente in direzioni opposte da un corpo di massa m in quiete nell'origine del SRI O.
- Prima dell'emissione, l'energia del corpo è mc^2 ; la sua quantità di moto è nulla. Dopo l'emissione, l'energia del sistema costituito dal corpo e dai due fotoni è ancora mc^2 e la sua quantità di moto è nulla perché il corpo emettente non rincula e la somma delle quantità di moto dei due fotoni è nulla.
- Il corpo ha perso una energia pari a $2E_{ph}^0$ e la sua massa è diminuita di un ammontare pari a $2E_{ph}^0/c^2$
- Quindi, **quando la quantità di moto del corpo emettente non varia** e il corpo emette una quantità di radiazione L , allora la sua massa diminuisce di L/c^2 .

Einstein e la quantità di moto dei quanti di luce (1921)

- Einstein considera una particella in moto che emette radiazione elettromagnetica

Einstein e la quantità di moto dei quanti di luce (1921)

- Einstein considera una particella in moto che emette radiazione elettromagnetica
- Trattando la radiazione come un'onda, Einstein scrive che la frequenza della radiazione emessa dipende dalla velocità della particella (effetto Doppler per $v \ll c$):

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right)$$

Einstein e la quantità di moto dei quanti di luce (1921)

- Einstein considera una particella in moto che emette radiazione elettromagnetica
- Trattando la radiazione come un'onda, Einstein scrive che la frequenza della radiazione emessa dipende dalla velocità della particella (effetto Doppler per $v \ll c$):

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right)$$

- “D'altra parte, se si considera la condizione di Bohr per l'emissione $E_2 - E_1 = h\nu, \dots$ si è indotti ad assegnare un'unica frequenza ad ogni processo elementare, anche quando l'atomo è in moto” Einstein, 1921

Einstein e la quantità di moto dei quanti di luce (1921)

- Einstein considera una particella in moto che emette radiazione elettromagnetica
- Trattando la radiazione come un'onda, Einstein scrive che la frequenza della radiazione emessa dipende dalla velocità della particella (effetto Doppler per $v \ll c$):

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right)$$

- “D'altra parte, se si considera la condizione di Bohr per l'emissione $E_2 - E_1 = h\nu, \dots$ si è indotti ad assegnare un'unica frequenza ad ogni processo elementare, anche quando l'atomo è in moto” Einstein, 1921
- Questa assunzione non è corretta, come Schrödinger dimostrerà subito dopo

Einstein e la quantità di moto dei quanti di luce (1921)

- Einstein considera una particella in moto che emette radiazione elettromagnetica
- Trattando la radiazione come un'onda, Einstein scrive che la frequenza della radiazione emessa dipende dalla velocità della particella (effetto Doppler per $v \ll c$):

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right)$$

- “D'altra parte, se si considera la condizione di Bohr per l'emissione $E_2 - E_1 = h\nu, \dots$ si è indotti ad assegnare un'unica frequenza ad ogni processo elementare, anche quando l'atomo è in moto” Einstein, 1921
- Questa assunzione non è corretta, come Schrödinger dimostrerà subito dopo
- È singolare che l'inventore dei quanti di luce e della relatività speciale abbia avuto simili problemi con la quantità di moto dei quanti di luce

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato

- Il lavoro di Schrödinger, se adeguatamente sviluppato, contiene molta più fisica di quella annunciata nel titolo

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato

- Il lavoro di Schrödinger, se adeguatamente sviluppato, contiene molta più fisica di quella annunciata nel titolo
- L'articolo è stato ignorato dai contemporanei e da coloro che, successivamente, hanno trattato lo stesso argomento

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato

- Il lavoro di Schrödinger, se adeguatamente sviluppato, contiene molta più fisica di quella annunciata nel titolo
- L'articolo è stato ignorato dai contemporanei e da coloro che, successivamente, hanno trattato lo stesso argomento
- Juancey G. E. M., (1926), Conservation of momentum and the Doppler principle, *Nature*, **117** 343-344. Trattazione basata, come quella di Schrödinger, sulla conservazione relativistica dell'energia e della quantità di moto.

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato

- Il lavoro di Schrödinger, se adeguatamente sviluppato, contiene molta più fisica di quella annunciata nel titolo
- L'articolo è stato ignorato dai contemporanei e da coloro che, successivamente, hanno trattato lo stesso argomento
- Juancey G. E. M., (1926), Conservation of momentum and the Doppler principle, *Nature*, **117** 343-344. Trattazione basata, come quella di Schrödinger, sulla conservazione relativistica dell'energia e della quantità di moto.
- Fermi E., (1932), Quantum theory of radiation, *Rev. Mod. Phys.*, **4**, 87-132. Tratta l'emissione di un fotone usando la dinamica newtoniana.

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato

- Il lavoro di Schrödinger, se adeguatamente sviluppato, contiene molta più fisica di quella annunciata nel titolo
- L'articolo è stato ignorato dai contemporanei e da coloro che, successivamente, hanno trattato lo stesso argomento
- Juancey G. E. M., (1926), Conservation of momentum and the Doppler principle, *Nature*, **117** 343-344. Trattazione basata, come quella di Schrödinger, sulla conservazione relativistica dell'energia e della quantità di moto.
- Fermi E., (1932), Quantum theory of radiation, *Rev. Mod. Phys.*, **4**, 87-132. Tratta l'emissione di un fotone usando la dinamica newtoniana.
- Davisson C. J. (1938). The Theory of the Transverse Doppler Effect, *Phys. Rev.*, **54** , 90-91. Trattazione basata, come quella di Schrödinger, sulla conservazione relativistica dell'energia e della quantità di moto. Non cita nè Schrödinger nè Juancey.

Applicazioni della trattazione alla Schrödinger

- La trattazione 'alla Schrödinger' descrive:

Applicazioni della trattazione alla Schrödinger

- La trattazione 'alla Schrödinger' descrive:
- tutti gli esperimenti condotti sull'effetto Doppler riguardanti atomi o nuclei. [Giuliani G., (2013), Experiment and theory: the case of the Doppler effect for photons, *Eur. J. Phys.*, **34** 1035]

Applicazioni della trattazione alla Schrödinger

- La trattazione 'alla Schrödinger' descrive:
- tutti gli esperimenti condotti sull'effetto Doppler riguardanti atomi o nuclei. [Giuliani G., (2013), Experiment and theory: the case of the Doppler effect for photons, *Eur. J. Phys.*, **34** 1035]
- l'emissione/assorbimento di fotoni gamma senza rinculo (effetto Mössbauer) su dispositivi rotanti. [Giuliani G., (2014) On the Doppler effect for photons in rotating systems, *Eur. J. Phys.*, **35** 025015]

Applicazioni della trattazione alla Schrödinger

- La trattazione 'alla Schrödinger' descrive:
- tutti gli esperimenti condotti sull'effetto Doppler riguardanti atomi o nuclei. [Giuliani G., (2013), Experiment and theory: the case of the Doppler effect for photons, *Eur. J. Phys.*, **34** 1035]
- l'emissione/assorbimento di fotoni gamma senza rinculo (effetto Mössbauer) su dispositivi rotanti. [Giuliani G., (2014) On the Doppler effect for photons in rotating systems, *Eur. J. Phys.*, **35** 025015]
- il raffreddamento laser di atomi a due livelli. [Giuliani G., (2015) Conservation laws and laser cooling of atoms, *Eur. J. Phys.*, **36** 065008]

Applicazioni della trattazione alla Schrödinger

- La trattazione 'alla Schrödinger' descrive:
- tutti gli esperimenti condotti sull'effetto Doppler riguardanti atomi o nuclei. [Giuliani G., (2013), Experiment and theory: the case of the Doppler effect for photons, *Eur. J. Phys.*, **34** 1035]
- l'emissione/assorbimento di fotoni gamma senza rinculo (effetto Mössbauer) su dispositivi rotanti. [Giuliani G., (2014) On the Doppler effect for photons in rotating systems, *Eur. J. Phys.*, **35** 025015]
- il raffreddamento laser di atomi a due livelli. [Giuliani G., (2015) Conservation laws and laser cooling of atoms, *Eur. J. Phys.*, **36** 065008]
- Tutti questi argomenti sono trattati in: Buonauro B. and Giuliani G., (2016), Wave and photon descriptions of light: historical highlights, epistemological aspects and teaching practices *Eur. J. Phys.* **37** 055303

Schrödinger, conclusione

- “ La velocità acquisita in seguito al rinculo è in generale assai piccola rispetto a quella termica. . .

Schrödinger, conclusione

- “ La velocità acquisita in seguito al rinculo è in generale assai piccola rispetto a quella termica. . .
- . . . Altrimenti sarebbe di notevole interesse verificare l'interpretazione quantistica dell'effetto Doppler qui esposta. . .

Schrödinger, conclusione

- “ La velocità acquisita in seguito al rinculo è in generale assai piccola rispetto a quella termica. . .
- . . . Altrimenti sarebbe di notevole interesse verificare l'interpretazione quantistica dell'effetto Doppler qui esposta. . .
- . . . come pure l'assai controversa presenza di un rinculo, così difficilmente conciliabile con l'ottica classica. . . ”

Schrödinger, conclusione

- “ La velocità acquisita in seguito al rinculo è in generale assai piccola rispetto a quella termica. . .
- . . . Altrimenti sarebbe di notevole interesse verificare l'interpretazione quantistica dell'effetto Doppler qui esposta. . .
- . . . come pure l'assai controversa presenza di un rinculo, così difficilmente conciliabile con l'ottica classica. . . ”
- Il rallentamento con luce laser di ioni in moto a velocità relativistiche è stato misurato nel 1990

Schrödinger, conclusione

- “ La velocità acquisita in seguito al rinculo è in generale assai piccola rispetto a quella termica. . .
- . . . Altrimenti sarebbe di notevole interesse verificare l'interpretazione quantistica dell'effetto Doppler qui esposta. . .
- . . . come pure l'assai controversa presenza di un rinculo, così difficilmente conciliabile con l'ottica classica. . . ”
- Il rallentamento con luce laser di ioni in moto a velocità relativistiche è stato misurato nel 1990
- Il raffreddamento di un gas monoatomico mediante luce laser è il regno dello scambio di quantità di moto tra fotoni e atomi

Effetto Compton. I

- Consiste nella diffusione di raggi X o gamma da parte della materia con diminuzione della lunghezza d'onda.

Effetto Compton. I

- Consiste nella diffusione di raggi X o gamma da parte della materia con diminuzione della lunghezza d'onda.
- Dopo anni di frustranti tentativi tesi a descrivere questo fenomeno sulla base dell'elettromagnetismo maxwelliano, Compton (1923) si decise a descrivere il fenomeno considerando l'interazione di un fotone con un elettrone libero e in quiete e scrivendo le equazioni di conservazione dell'energia e della quantità di moto.

Effetto Compton. I

- Consiste nella diffusione di raggi X o gamma da parte della materia con diminuzione della lunghezza d'onda.
- Dopo anni di frustranti tentativi tesi a descrivere questo fenomeno sulla base dell'elettromagnetismo maxwelliano, Compton (1923) si decise a descrivere il fenomeno considerando l'interazione di un fotone con un elettrone libero e in quiete e scrivendo le equazioni di conservazione dell'energia e della quantità di moto.

$$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

Effetto Compton. I

- Consiste nella diffusione di raggi X o gamma da parte della materia con diminuzione della lunghezza d'onda.
- Dopo anni di frustranti tentativi tesi a descrivere questo fenomeno sulla base dell'elettromagnetismo maxwelliano, Compton (1923) si decise a descrivere il fenomeno considerando l'interazione di un fotone con un elettrone libero e in quiete e scrivendo le equazioni di conservazione dell'energia e della quantità di moto.

- $$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

- La grandezza

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = 2.426 \times 10^{-12} \text{ m}$$

si chiama lunghezza d'onda di Compton. $\Delta\lambda$ non dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente, ma solo dall'angolo θ di diffusione del fotone. Inoltre, la variazione di lunghezza d'onda è nulla per $\theta = 0$ e massima ed uguale a λ_C per $\theta = \pi/2$.

Effetto Compton. I

- Consiste nella diffusione di raggi X o gamma da parte della materia con diminuzione della lunghezza d'onda.
- Dopo anni di frustranti tentativi tesi a descrivere questo fenomeno sulla base dell'elettromagnetismo maxwelliano, Compton (1923) si decise a descrivere il fenomeno considerando l'interazione di un fotone con un elettrone libero e in quiete e scrivendo le equazioni di conservazione dell'energia e della quantità di moto.

●

$$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

- La grandezza

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = 2.426 \times 10^{-12} \text{ m}$$

si chiama lunghezza d'onda di Compton. $\Delta\lambda$ non dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente, ma solo dall'angolo θ di diffusione del fotone. Inoltre, la variazione di lunghezza d'onda è nulla per $\theta = 0$ e massima ed uguale a λ_C per $\theta = \pi/2$.

- La spiegazione di Compton del fenomeno che prenderà il suo nome è considerata come un punto di svolta per quanto riguarda l'accettazione dell'ipotesi del quanto di luce.

Effetto Compton. I

- Consiste nella diffusione di raggi X o gamma da parte della materia con diminuzione della lunghezza d'onda.
- Dopo anni di frustranti tentativi tesi a descrivere questo fenomeno sulla base dell'elettromagnetismo maxwelliano, Compton (1923) si decise a descrivere il fenomeno considerando l'interazione di un fotone con un elettrone libero e in quiete e scrivendo le equazioni di conservazione dell'energia e della quantità di moto.

$$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

- La grandezza

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = 2.426 \times 10^{-12} \text{ m}$$

si chiama lunghezza d'onda di Compton. $\Delta\lambda$ non dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente, ma solo dall'angolo θ di diffusione del fotone. Inoltre, la variazione di lunghezza d'onda è nulla per $\theta = 0$ e massima ed uguale a λ_C per $\theta = \pi/2$.

- La spiegazione di Compton del fenomeno che prenderà il suo nome è considerata come un punto di svolta per quanto riguarda l'accettazione dell'ipotesi del quanto di luce.
- In realtà, il processo di assimilazione del concetto di quanto di luce proseguì non senza contrasti e proposte alternative.

Effetto Compton. II

- Innanzitutto. Compton stesso usa nei suoi lavori sia la descrizione corpuscolare sia quella ondulatoria.

Effetto Compton. II

- Innanzitutto. Compton stesso usa nei suoi lavori sia la descrizione corpuscolare sia quella ondulatoria.
- Mentre l'interazione tra il fotone incidente e l'elettrone è trattata considerando il fotone e l'elettrone come due particelle, l'interazione tra i fotoni diffusi e lo spettrometro di Bragg è trattata considerando la radiazione diffusa come un'onda.

Effetto Compton. II

- Innanzitutto. Compton stesso usa nei suoi lavori sia la descrizione corpuscolare sia quella ondulatoria.
- Mentre l'interazione tra il fotone incidente e l'elettrone è trattata considerando il fotone e l'elettrone come due particelle, l'interazione tra i fotoni diffusi e lo spettrometro di Bragg è trattata considerando la radiazione diffusa come un'onda.
- Non solo. Compton dimostra che la dipendenza angolare della radiazione diffusa fornita dalla sua formula è la stessa che si ottiene con il seguente modello.

Effetto Compton. II

- Innanzitutto. Compton stesso usa nei suoi lavori sia la descrizione corpuscolare sia quella ondulatoria.
- Mentre l'interazione tra il fotone incidente e l'elettrone è trattata considerando il fotone e l'elettrone come due particelle, l'interazione tra i fotoni diffusi e lo spettrometro di Bragg è trattata considerando la radiazione diffusa come un'onda.
- Non solo. Compton dimostra che la dipendenza angolare della radiazione diffusa fornita dalla sua formula è la stessa che si ottiene con il seguente modello.
- Un elettrone, in moto lungo la direzione della radiazione incidente con velocità

$$v_{eff} = \frac{\alpha}{1 + \alpha}; \quad \alpha = \frac{h\nu_i}{m_e c^2} \quad (6)$$

e sottoposto all'onda EM incidente, irraggia **classicamente** una radiazione la cui lunghezza d'onda è data dalla formula di Compton

Non è finita. . .

- Nel 1924, Bohr, Kramers e Slater (BKS) proposero un programma di ricerca che, pur di evitare l'uso dei quanti di luce, implicava che la conservazione dell'energia e della quantità di moto fosse soddisfatta solo in media e non nei singoli processi microscopici.

Non è finita. . .

- Nel 1924, Bohr, Kramers e Slater (BKS) proposero un programma di ricerca che, pur di evitare l'uso dei quanti di luce, implicava che la conservazione dell'energia e della quantità di moto fosse soddisfatta solo in media e non nei singoli processi microscopici.
- Walther Bothe e Hans Geiger verificarono poco dopo che l'elettrone di rinculo e il fotone diffuso erano osservati in un intervallo di tempo $\leq 10^{-3}$ s, mentre nell'ipotesi di BKS la correlazione tra questi due eventi sarebbe dovuta essere solo statistica (1925).

Non è finita. . .

- Nel 1924, Bohr, Kramers e Slater (BKS) proposero un programma di ricerca che, pur di evitare l'uso dei quanti di luce, implicava che la conservazione dell'energia e della quantità di moto fosse soddisfatta solo in media e non nei singoli processi microscopici.
- Walther Bothe e Hans Geiger verificarono poco dopo che l'elettrone di rinculo e il fotone diffuso erano osservati in un intervallo di tempo $\leq 10^{-3}$ s, mentre nell'ipotesi di BKS la correlazione tra questi due eventi sarebbe dovuta essere solo statistica (1925).
- Anche Compton e Alfred Simon, confermarono, usando una camera a nebbia, la correlazione tra rinculo dell'elettrone e quanto diffuso.

Non è finita. . .

- Nel 1924, Bohr, Kramers e Slater (BKS) proposero un programma di ricerca che, pur di evitare l'uso dei quanti di luce, implicava che la conservazione dell'energia e della quantità di moto fosse soddisfatta solo in media e non nei singoli processi microscopici.
- Walther Bothe e Hans Geiger verificarono poco dopo che l'elettrone di rinculo e il fotone diffuso erano osservati in un intervallo di tempo $\leq 10^{-3}$ s, mentre nell'ipotesi di BKS la correlazione tra questi due eventi sarebbe dovuta essere solo statistica (1925).
- Anche Compton e Alfred Simon, confermarono, usando una camera a nebbia, la correlazione tra rinculo dell'elettrone e quanto diffuso.
- Schrödinger, descrivendo la radiazione incidente come un'onda elettromagnetica e l'elettrone come un'onda di de Broglie, ricava l'equazione di Compton (1927).

Non è finita. . .

- Nel 1924, Bohr, Kramers e Slater (BKS) proposero un programma di ricerca che, pur di evitare l'uso dei quanti di luce, implicava che la conservazione dell'energia e della quantità di moto fosse soddisfatta solo in media e non nei singoli processi microscopici.
- Walther Bothe e Hans Geiger verificarono poco dopo che l'elettrone di rinculo e il fotone diffuso erano osservati in un intervallo di tempo $\leq 10^{-3}$ s, mentre nell'ipotesi di BKS la correlazione tra questi due eventi sarebbe dovuta essere solo statistica (1925).
- Anche Compton e Alfred Simon, confermarono, usando una camera a nebbia, la correlazione tra rinculo dell'elettrone e quanto diffuso.
- Schrödinger, descrivendo la radiazione incidente come un'onda elettromagnetica e l'elettrone come un'onda di de Broglie, ricava l'equazione di Compton (1927).
- Il fatto che Schrödinger dopo aver trattato l'effetto Doppler luminoso con una descrizione corpuscolare, tratti l'effetto Compton usando solo descrizioni ondulatorie è un indice della vivacità e della disinvoltura teorica di quegli anni.

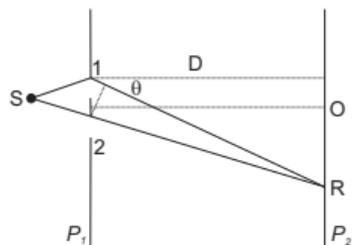
Interferenza, descrizione ondulatoria

- I fenomeni di interferenza sono dovuti alla sovrapposizione di perturbazioni elettromagnetiche: affinché possano essere osservati, occorre che la differenza di fase tra le onde sovrappoventesi sia costante nel tempo. Tratteremo il caso di **onde monocromatiche, polarizzate linearmente lungo una medesima direzione**. Da un punto di vista sperimentale, non è necessario usare onde polarizzate o dotate di elevati gradi di coerenza, purché la sorgente fisica della luce sia unica e la distanza sorgente - luogo di osservazione sia inferiore alla **lunghezza di coerenza** del fascio di luce. L'uso di sorgenti laser facilita l'osservazione dei fenomeni interferenziali.

Interferenza, descrizione ondulatoria

- I fenomeni di interferenza sono dovuti alla sovrapposizione di perturbazioni elettromagnetiche: affinché possano essere osservati, occorre che la differenza di fase tra le onde sovrappontesi sia costante nel tempo. Tratteremo il caso di **onde monocromatiche, polarizzate linearmente lungo una medesima direzione**. Da un punto di vista sperimentale, non è necessario usare onde polarizzate o dotate di elevati gradi di coerenza, purché la sorgente fisica della luce sia unica e la distanza sorgente - luogo di osservazione sia inferiore alla **lunghezza di coerenza** del fascio di luce. L'uso di sorgenti laser facilita l'osservazione dei fenomeni interferenziali.
- Tipicamente, la lunghezza di coerenza della luce emessa da un tubo a scarica è dell'ordine di 3 m se la vita media dello stato eccitato degli atomi τ è dell'ordine di 10^{-8} s. Infatti la lunghezza di coerenza è data da $L_C = c\tau$, con $\tau = 1/\Delta\nu$, dove $\Delta\nu$ è la larghezza della riga di emissione. Nel caso di un laser, se $\tau = 10^{-3}$ s, si ottiene $L_C = 3 \times 10^5$ m. Per il laser He-Ne, $L_C = 400$ m.

Interferenza prodotta da due fenditure. Descrizione in termini di onde EM

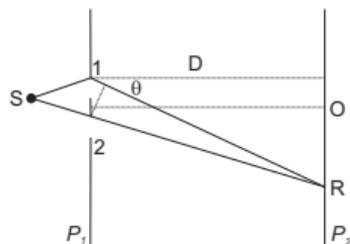


Ogni fenditura è rettangolare di lati b e l , con $b \ll l$. Il lato maggiore è perpendicolare al piano della figura. d è la distanza tra due punti omologhi delle due fenditure. Le frange di interferenza, sono osservate sullo schermo P_2 perpendicolarmente al piano della figura.

$$I = 4I_0 \left[\frac{\sin(\pi b \sin \theta / \lambda)}{\pi b \sin \theta / \lambda} \right]^2 \cos^2 \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) \quad (7)$$

dove I_0 è l'intensità massima prevista nel caso in cui sia aperta una sola fenditura e λ la lunghezza d'onda usata. Il termine **diffattivo** in \sin^2 tende a **uno** al tendere a zero della larghezza b di ogni fenditura.

Interferenza prodotta da due fenditure. Descrizione in termini di onde EM



Ogni fenditura è rettangolare di lati b e l , con $b \ll l$. Il lato maggiore è perpendicolare al piano della figura. d è la distanza tra due punti omologhi delle due fenditure. Le frange di interferenza, sono osservate sullo schermo P_2 perpendicolarmente al piano della figura.

$$I = 4I_0 \left[\frac{\sin(\pi b \sin \theta / \lambda)}{\pi b \sin \theta / \lambda} \right]^2 \cos^2 \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) \quad (7)$$

dove I_0 è l'intensità massima prevista nel caso in cui sia aperta una sola fenditura e λ la lunghezza d'onda usata. Il termine **diffattivo** in \sin^2 tende a **uno** al tendere a zero della larghezza b di ogni fenditura.

- Per i calcoli si veda: G. Giuliani e I. Bonizzoni, 2004, *Lineamenti di elettromagnetismo*, pp. 133-142 (nella biblioteca digitale).

Interferenza prodotta da due fenditure. Descrizione in termini di onde EM

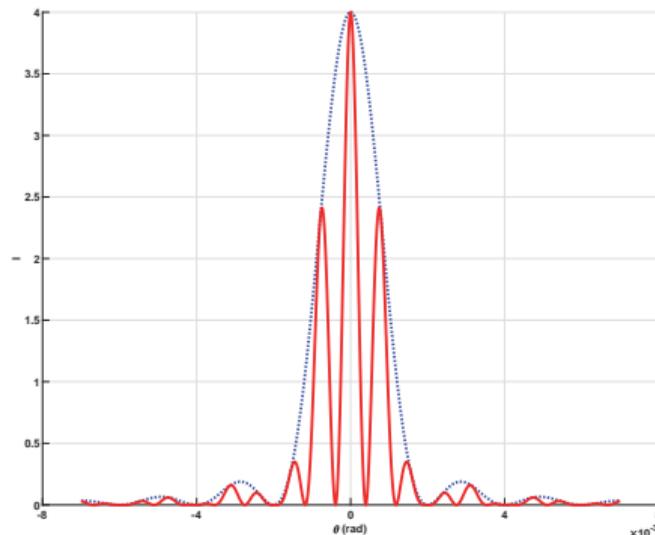


Figura di interferenza prodotta da due fenditure, in cui si è posto $I_0 = 1$. I valori dei parametri usati sono: $b/\lambda = 100$, $d/b = 8$. La curva rossa rappresenta l'intensità prevista; la curva blu (tratteggiata) il termine diffrattivo in (\sin^2) : sarebbe la curva prevista con una sola fenditura aperta la cui intensità fosse quadrupla di quella considerata.

Interferenza: fotoni

- “La spiegazione, da parte della teoria dei quanti di luce dei fenomeni sinora interpretati sulla base dell’ipotesi ondulatoria, quali l’interferenza, la diffusione, la dispersione ecc., appare come un’impresa molto impegnativa, e per realizzarla, **sarà senza dubbio necessario fare un compromesso tra la vecchia teoria e la nuova, introducendo in questa la nozione di periodicità** [de Broglie L., (1922) Sur les interférences et la théorie des quanta de lumière’ *Comptes Rendus* **175** 811].” (nella biblioteca digitale)

Interferenza: ampiezze di probabilità. I

- La *probabilità* di un processo fisico [evoluzione da uno stato iniziale ad uno stato finale] è data dal quadrato di un numero complesso $\eta = Ce^{i\varphi}$ chiamato **ampiezza di probabilità**

$$P = |\eta|^2 = C^2 \quad (8)$$

Interferenza: ampiezze di probabilità. I

- La *probabilità* di un processo fisico [evoluzione da uno stato iniziale ad uno stato finale] è data dal quadrato di un numero complesso $\eta = Ce^{i\varphi}$ chiamato **ampiezza di probabilità**

$$P = |\eta|^2 = C^2 \quad (8)$$

- Ci possono essere diversi modi (diciamo n) in cui un sistema fisico può evolvere da uno stato iniziale a uno stato finale. Ad ogni possibile modo è associata un'ampiezza $\eta_i = C_i e^{i\varphi_i}$ ($i=1,2,\dots,n$) il cui quadrato è pari alla probabilità di quel modo

$$P_i = |\eta_i|^2 = C_i^2 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

Interferenza: ampiezze di probabilità. II

- Se si effettua un esperimento in grado di determinare quale dei possibili modi di realizzazione di un processo si è effettivamente verificato, **la probabilità del processo è la somma delle probabilità di ciascun modo.**

$$P = P_1 + P_2 + \cdots + P_n \quad (10)$$

Interferenza: ampiezze di probabilità. II

- Se si effettua un esperimento in grado di determinare quale dei possibili modi di realizzazione di un processo si è effettivamente verificato, **la probabilità del processo è la somma delle probabilità di ciascun modo.**

$$P = P_1 + P_2 + \cdots + P_n \quad (10)$$

- Se si effettua un esperimento in cui è impossibile dire quale modo si sia verificato, **l'ampiezza di probabilità dell'evento è la somma delle ampiezze di ciascun modo e la sua probabilità è data dal quadrato della somma delle ampiezze di probabilità:**

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_1 + \eta_2 + \cdots + \eta_n \\ P &= |\eta_1 + \eta_2 + \cdots + \eta_n|^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Interferenza: ampiezze di probabilità. III

- Consideriamo un esperimento di interferenza attraverso due fenditure puntiformi, realizzato con un fotone alla volta (un solo fotone in volo tra la sorgente e lo schermo che rivela l'arrivo del fotone).

Interferenza: ampiezze di probabilità. III

- Consideriamo un esperimento di interferenza attraverso due fenditure puntiformi, realizzato con un fotone alla volta (un solo fotone in volo tra la sorgente e lo schermo che rivela l'arrivo del fotone).
- Ai due possibili cammini del fotone, attraverso l'una o l'altra fenditura, associamo una ampiezza di probabilità: $\eta_1 = Ce^{i\varphi_1}$ o $\eta_2 = Ce^{i\varphi_2}$. Si assume che il coefficiente C sia lo stesso per le due fenditure: ciò significa che, considerate le due fenditure puntiformi come sorgenti di luce, la loro intensità è uguale.

Interferenza: ampiezze di probabilità. III

- Consideriamo un esperimento di interferenza attraverso due fenditure puntiformi, realizzato con un fotone alla volta (un solo fotone in volo tra la sorgente e lo schermo che rivela l'arrivo del fotone).
- Ai due possibili cammini del fotone, attraverso l'una o l'altra fenditura, associamo una ampiezza di probabilità: $\eta_1 = Ce^{i\varphi_1}$ o $\eta_2 = Ce^{i\varphi_2}$. Si assume che il coefficiente C sia lo stesso per le due fenditure: ciò significa che, considerate le due fenditure puntiformi come sorgenti di luce, la loro intensità è uguale.
- La probabilità P_{12} che un fotone, partendo dalla sorgente, arrivi in un punto dello schermo sarà allora:

$$P_{12} = |\eta_1 + \eta_2|^2 = 4C^2 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (12)$$

dove φ è la differenza di fase tra le due ampiezze di probabilità, differenza di fase determinata dalla differenza di lunghezza delle traiettorie dei due fotoni.

Interferenza: ampiezze di probabilità. III

- Consideriamo un esperimento di interferenza attraverso due fenditure puntiformi, realizzato con un fotone alla volta (un solo fotone in volo tra la sorgente e lo schermo che rivela l'arrivo del fotone).
- Ai due possibili cammini del fotone, attraverso l'una o l'altra fenditura, associamo una ampiezza di probabilità: $\eta_1 = Ce^{i\varphi_1}$ o $\eta_2 = Ce^{i\varphi_2}$. Si assume che il coefficiente C sia lo stesso per le due fenditure: ciò significa che, considerate le due fenditure puntiformi come sorgenti di luce, la loro intensità è uguale.
- La probabilità P_{12} che un fotone, partendo dalla sorgente, arrivi in un punto dello schermo sarà allora:

$$P_{12} = |\eta_1 + \eta_2|^2 = 4C^2 \cos^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) \quad (12)$$

dove φ è la differenza di fase tra le due ampiezze di probabilità, differenza di fase determinata dalla differente lunghezza delle traiettorie dei due fotoni.

- Per i calcoli, si veda B. Buonaura and G. Giuliani, (2016), Wave and photon descriptions of light: historical highlights, epistemological aspects and teaching practices, *Eur. J. Phys.*, **37** 055303, pp. 12-15. (Nella biblioteca digitale).

Interferenza: ampiezze di probabilità. IV

- Se ora si assume che la differenza di fase φ sia uguale a $2\pi l/\lambda_{dB}$, dove l è la differenza tra le lunghezze delle traiettorie dei due fotoni, e $\lambda_{dB} = \lambda$ la lunghezza d'onda di de Broglie ad esso associata, l'espressione della probabilità diventa:

$$P_{12} = 4C^2 \cos^2 \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) \quad (13)$$

Interferenza: ampiezze di probabilità. IV

- Se ora si assume che la differenza di fase φ sia uguale a $2\pi l/\lambda_{dB}$, dove l è la differenza tra le lunghezze delle traiettorie dei due fotoni, e $\lambda_{dB} = \lambda$ la lunghezza d'onda di de Broglie ad esso associata, l'espressione della probabilità diventa:

$$P_{12} = 4C^2 \cos^2 \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) \quad (13)$$

- Questa equazione mostra che la probabilità che un fotone arrivi in un punto del rivelatore è proporzionale all'intensità classica in quel punto:

$$I = 4I_0 \left[\frac{\sin(\pi b \sin \theta / \lambda)}{\pi b \sin \theta / \lambda} \right]^2 \cos^2 \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right)$$

perché il termine diffrattivo in \sin^2 (in rosso) tende a zero al tendere a zero della larghezza b delle due fenditure

Interferenza: onde EM e fotoni

Onde EM	Fotoni
$\lambda = c/\nu$	$\lambda = h/p = c/\nu$
Campo elettrico \vec{E}	Ampiezza di probabilità $\eta = Ce^{i\varphi}$
$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$	$\eta = \eta_1 + \eta_2$
Densità di energia $\propto E^2$	Probabilità $\propto \eta ^2$

Tabella: La descrizione classica e quantica dell'interferenza hanno la stessa struttura matematica.

Esperimento di Geoffrey Ingram Taylor: 1908

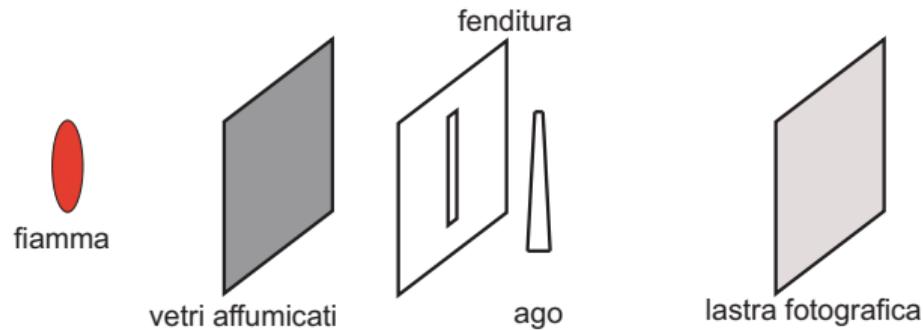


Figura: Esperimento di diffrazione a bassa intensità luminosa. Taylor G I 1908 Interference fringes with feeble light *Proc. Camb. Phil. Soc.* **15** 114

Esperimento a fotone singolo. Apparato

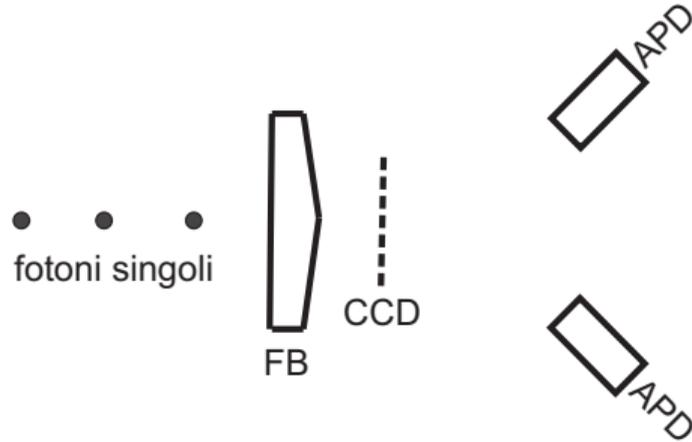


Figura: Esperimento di interferenza con un fotone alla volta (quasi). FB= biprisma di Fresnel; CCD=fotocamera a CCD 'enhanced'; APD= fotodiodi. I fotodiodi servono per verificare che il singolo fotone arrivi solo ad uno dei due (togliendo, naturalmente, la fotocamera). Jacques V, Wu E, Toury T, Treussart F, Aspect A, Grangier P and Roch JF 2005 Single - photon wavefront-splitting interference *Eur. Phys. J. D* **35** 561

Esperimento a fotone singolo. Esperimento

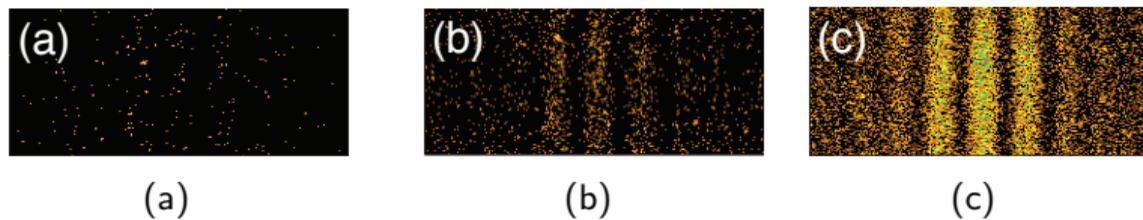


Figura: Interferenza: (a) 272 fotoni; (b) 2240 fotoni; (c) 19773 fotoni. Jacques et. al. 2005.

Onde EM e fotoni: interferenza a fotone singolo

Attenzione: per poter vedere il video sottostante scaricare nella cartella contenente questo PDF il seguente Video: [scarica](#)
Poi, per vedere il video [clicca qui](#)

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

Onde EM e fotoni: fotografie a bassa intensità luminosa

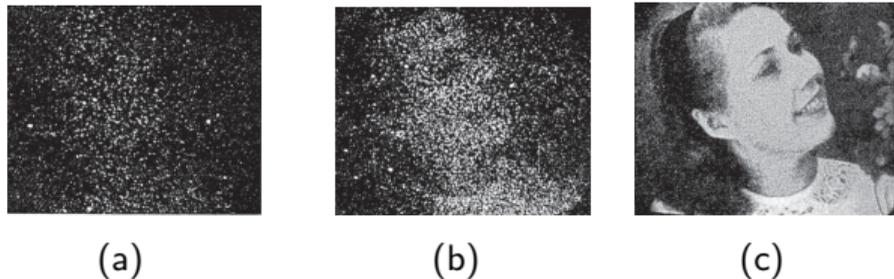


Figura: Foto con poca luce: (a) 1×10^3 fotoni; (b) 1.2×10^4 fotoni; (c) 2.8×10^7 fotoni. Rose A 1953
Quantum and Noise Limitations of the Visual Process *Josa* **43** 715.

Onde \Leftrightarrow corpuscoli

- Il raccordo tra descrizione ondulatoria e corpuscolare della luce è assicurato dalla formula magica $E = h\nu$ interpretata alla Einstein.

Onde \Leftrightarrow corpuscoli

- Il raccordo tra descrizione ondulatoria e corpuscolare della luce è assicurato dalla formula magica $E = h\nu$ interpretata alla Einstein.
- In talune situazioni sperimentali, quando il numero di fotoni coinvolti in un esperimento è statisticamente significativo – non importa se usati uno alla volta o tutti insieme – le predizioni della descrizione ondulatoria sono corroborate dall'esperimento.

Onde \Leftrightarrow corpuscoli

- Il raccordo tra descrizione ondulatoria e corpuscolare della luce è assicurato dalla formula **magica** $E = h\nu$ **interpretata alla Einstein**.
- In talune situazioni sperimentali, quando il numero di fotoni coinvolti in un esperimento è statisticamente significativo – non importa se usati uno alla volta o tutti insieme – le predizioni della descrizione ondulatoria sono corroborate dall'esperimento.
- Esempi: interferenza, fotografia, **dispersione della luce attraverso un prisma o mediante un reticolo di diffrazione con un fotone alla volta**.

Onde \Leftrightarrow corpuscoli

- Il raccordo tra descrizione ondulatoria e corpuscolare della luce è assicurato dalla formula magica $E = h\nu$ interpretata alla Einstein.
- In talune situazioni sperimentali, quando il numero di fotoni coinvolti in un esperimento è statisticamente significativo – non importa se usati uno alla volta o tutti insieme – le predizioni della descrizione ondulatoria sono corroborate dall'esperimento.
- Esempi: interferenza, fotografia, dispersione della luce attraverso un prisma o mediante un reticolo di diffrazione con un fotone alla volta.
- Tuttavia, quando l'interazione tra radiazione e materia avviene con scambio di energia a livello microscopico, è necessario usare la descrizione corpuscolare.

Onde \Leftrightarrow corpuscoli

- Il raccordo tra descrizione ondulatoria e corpuscolare della luce è assicurato dalla formula **magica** $E = h\nu$ **interpretata alla Einstein**.
- In talune situazioni sperimentali, quando il numero di fotoni coinvolti in un esperimento è statisticamente significativo – non importa se usati uno alla volta o tutti insieme – le predizioni della descrizione ondulatoria sono corroborate dall'esperimento.
- Esempi: interferenza, fotografia, **dispersione della luce attraverso un prisma o mediante un reticolo di diffrazione con un fotone alla volta**.
- Tuttavia, quando l'interazione tra radiazione e materia avviene con scambio di energia a livello microscopico, è necessario usare la descrizione corpuscolare.
- Esempi: effetto fotoelettrico, assorbimento o emissione da parte di atomi, effetto Compton.

Polarizzazione della luce

- Se la luce è descritta come un'onda elettromagnetica, la sua polarizzazione è individuata dalla direzione di oscillazione del campo elettrico.

Polarizzazione della luce

- Se la luce è descritta come un'onda elettromagnetica, la sua polarizzazione è individuata dalla direzione di oscillazione del campo elettrico.
- La luce, descritta come un'onda EM, può essere: non polarizzata, polarizzata linearmente, circolarmente D, circolarmente S o ellitticamente.

Polarizzazione della luce

- Se la luce è descritta come un'onda elettromagnetica, la sua polarizzazione è individuata dalla direzione di oscillazione del campo elettrico.
- La luce, descritta come un'onda EM, può essere: non polarizzata, polarizzata linearmente, circolarmente D, circolarmente S o ellitticamente.
- La polarizzazione di un fotone può essere solo circolare destrorsa, circolare sinistrorsa o lineare.

Polarizzazione della luce

- Se la luce è descritta come un'onda elettromagnetica, la sua polarizzazione è individuata dalla direzione di oscillazione del campo elettrico.
- La luce, descritta come un'onda EM, può essere: non polarizzata, polarizzata linearmente, circolarmente D, circolarmente S o ellitticamente.
- La polarizzazione di un fotone può essere solo circolare destrorsa, circolare sinistrorsa o lineare.
- La polarizzazione circolare di un fotone è descritta da un vettore quantità di moto angolare di modulo pari a \hbar e diretto lungo la direzione di propagazione del fotone o lungo la direzione opposta.

Polarizzazione della luce

- Se la luce è descritta come un'onda elettromagnetica, la sua polarizzazione è individuata dalla direzione di oscillazione del campo elettrico.
- La luce, descritta come un'onda EM, può essere: non polarizzata, polarizzata linearmente, circolarmente D, circolarmente S o ellitticamente.
- La polarizzazione di un fotone può essere solo circolare destrorsa, circolare sinistrorsa o lineare.
- La polarizzazione circolare di un fotone è descritta da un vettore quantità di moto angolare di modulo pari a \hbar e diretto lungo la direzione di propagazione del fotone o lungo la direzione opposta.
- La proposta di associare un momento angolare $\pm\hbar$ ad un fotone polarizzato circolarmente è dovuta a Pokrowsky (1929).

Polarizzazione della luce

- Se la luce è descritta come un'onda elettromagnetica, la sua polarizzazione è individuata dalla direzione di oscillazione del campo elettrico.
- La luce, descritta come un'onda EM, può essere: non polarizzata, polarizzata linearmente, circolarmente D, circolarmente S o ellitticamente.
- La polarizzazione di un fotone può essere solo circolare destrorsa, circolare sinistrorsa o lineare.
- La polarizzazione circolare di un fotone è descritta da un vettore quantità di moto angolare di modulo pari a \hbar e diretto lungo la direzione di propagazione del fotone o lungo la direzione opposta.
- La proposta di associare un momento angolare $\pm\hbar$ ad un fotone polarizzato circolarmente è dovuta a Pokrowsky (1929).
- La prima misura degli effetti meccanici della polarizzazione circolare di fotoni è dovuta a Richard Beth (1936)

Polarizzazione della luce. Descrizione

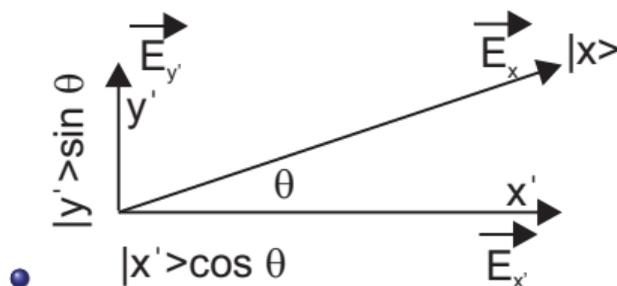
- La descrizione matematica della polarizzazione della luce ha la medesima struttura nell'elettromagnetismo maxwelliano e nella trattazione quantica

Polarizzazione della luce. Descrizione

- La descrizione matematica della polarizzazione della luce ha la medesima struttura nell'elettromagnetismo maxwelliano e nella trattazione quantica
- Esempio. Un'onda piana polarizzata linearmente può essere espressa come combinazione lineare di due onde polarizzate linearmente lungo due direzioni tra loro ortogonali

Polarizzazione della luce. Descrizione

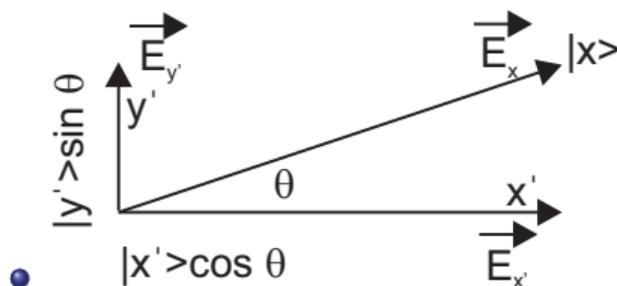
- La descrizione matematica della polarizzazione della luce ha la medesima struttura nell'elettromagnetismo maxwelliano e nella trattazione quantica
- Esempio. Un'onda piana polarizzata linearmente può essere espressa come combinazione lineare di due onde polarizzate linearmente lungo due direzioni tra loro ortogonali



Fotoni polarizzati linearmente lungo la direzione x incidono su un polarizzatore lineare con l'asse ottico orientato lungo la direzione x' . Nella figura sono mostrati gli stati di un fotone e la direzione del campo elettrico della luce per illustrare la medesima struttura matematica delle due descrizioni.

Polarizzazione della luce. Descrizione

- La descrizione matematica della polarizzazione della luce ha la medesima struttura nell'elettromagnetismo maxwelliano e nella trattazione quantica
- Esempio. Un'onda piana polarizzata linearmente può essere espressa come combinazione lineare di due onde polarizzate linearmente lungo due direzioni tra loro ortogonali



Fotoni polarizzati linearmente lungo la direzione x incidono su un polarizzatore lineare con l'asse ottico orientato lungo la direzione x' . Nella figura sono mostrati gli stati di un fotone e la direzione del campo elettrico della luce per illustrare la medesima struttura matematica delle due descrizioni.

- In generale, per quanto riguarda la polarizzazione della luce, le predizioni dell'elettromagnetismo in termini di intensità sono sostituite, nella descrizione quantica, dalle probabilità. La probabilità quantica \propto intensità classica.

Che cosa è la luce? II

- Sulla base della conoscenza sperimentale e teorica acquisita è ragionevole affermare che la luce – nel Mondo – è costituita da quanti dotati di energia, quantità di moto e, talora, momento angolare intrinseco.

Che cosa è la luce? II

- Sulla base della conoscenza sperimentale e teorica acquisita è ragionevole affermare che la luce – nel Mondo – è costituita da quanti dotati di energia, quantità di moto e, talora, momento angolare intrinseco.
- L'interazione tra questi quanti e i rivelatori è localizzata.

Che cosa è la luce? II

- Sulla base della conoscenza sperimentale e teorica acquisita è ragionevole affermare che la luce – nel Mondo – è costituita da quanti dotati di energia, quantità di moto e, talora, momento angolare intrinseco.
- L'interazione tra questi quanti e i rivelatori è localizzata.
- In molte situazioni sperimentali, quando il numero di fotoni usati – uno alla volta o tutti insieme – è sufficientemente elevato, possiamo descrivere la radiazione come un'onda EM.

Che cosa è la luce? II

- Sulla base della conoscenza sperimentale e teorica acquisita è ragionevole affermare che la luce – nel Mondo – è costituita da quanti dotati di energia, quantità di moto e, talora, momento angolare intrinseco.
- L'interazione tra questi quanti e i rivelatori è localizzata.
- In molte situazioni sperimentali, quando il numero di fotoni usati – uno alla volta o tutti insieme – è sufficientemente elevato, possiamo descrivere la radiazione come un'onda EM.
- Ma **non sappiamo perché**

Un'altra formula magica: particella \Rightarrow onda. I

- Nel 1923, Louis de Broglie, mescolando concetti quantici e relatività speciale associò ad ogni particella materiale una lunghezza d'onda, poi chiamata di de Broglie, data da

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

dove p è la quantità di moto relativistica della particella.

Un'altra formula magica: particella \Rightarrow onda. I

- Nel 1923, Louis de Broglie, mescolando concetti quantici e relatività speciale associò ad ogni particella materiale una lunghezza d'onda, poi chiamata di de Broglie, data da

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

dove p è la quantità di moto relativistica della particella.

- de Broglie aveva, in precedenza, attribuito una massa, seppur piccolissima, ai quanti di luce

Un'altra formula magica: particella \Rightarrow onda. I

- Nel 1923, Louis de Broglie, mescolando concetti quantici e relatività speciale associò ad ogni particella materiale una lunghezza d'onda, poi chiamata di de Broglie, data da

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

dove p è la quantità di moto relativistica della particella.

- de Broglie aveva, in precedenza, attribuito una massa, seppur piccolissima, ai quanti di luce
- Fece quindi il passaggio inverso, attribuendo ad ogni particella dotata di massa un moto periodico di frequenza ν_0 data da:

Un'altra formula magica: particella \Rightarrow onda. I

- Nel 1923, Louis de Broglie, mescolando concetti quantici e relatività speciale associò ad ogni particella materiale una lunghezza d'onda, poi chiamata di de Broglie, data da

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

dove p è la quantità di moto relativistica della particella.

- de Broglie aveva, in precedenza, attribuito una massa, seppur piccolissima, ai quanti di luce
- Fece quindi il passaggio inverso, attribuendo ad ogni particella dotata di massa un moto periodico di frequenza ν_0 data da:

$$h\nu_0 = mc^2$$

Un'altra formula magica: particella \Rightarrow onda. II

- In un sistema di riferimento che vede la particella in moto con velocità v la frequenza del moto periodico attribuito alla particella sarebbe

$$\nu_1 = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

[effetto Doppler trasversale]

Un'altra formula magica: particella \Rightarrow onda. II

- In un sistema di riferimento che vede la particella in moto con velocità v la frequenza del moto periodico attribuito alla particella sarebbe

$$\nu_1 = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

[effetto Doppler trasversale]

- Ma, nello stesso sistema di riferimento, può essere attribuita alla particella la frequenza

$$\nu = \nu_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

basata sulla trasformazione dell'energia nel passaggio da un SRI all'altro.

Un'altra formula magica: particella \Rightarrow onda. II

- In un sistema di riferimento che vede la particella in moto con velocità v la frequenza del moto periodico attribuito alla particella sarebbe

$$\nu_1 = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

[effetto Doppler trasversale]

- Ma, nello stesso sistema di riferimento, può essere attribuita alla particella la frequenza

$$\nu = \nu_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

basata sulla trasformazione dell'energia nel passaggio da un SRI all'altro.

- Le due frequenze sono tra loro incompatibili. Si tratta allora di dare un significato fisico alla frequenza ν associata alla trasformazione dell'energia della particella.

Un'altra formula magica: particella \Rightarrow onda. III

- La soluzione del dilemma consiste nel considerare ν come la frequenza di un'onda 'fittizia', dotata di velocità $V = c/\beta$ avente la seguente proprietà:

Un'altra formula magica: particella \Rightarrow onda. III

- La soluzione del dilemma consiste nel considerare ν come la frequenza di un'onda 'fittizia', dotata di velocità $V = c/\beta$ avente la seguente proprietà:
- 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 [teorema dell'armonia delle fasi].

Un'altra formula magica: particella \Rightarrow onda. III

- La soluzione del dilemma consiste nel considerare ν come la frequenza di un'onda 'fittizia', dotata di velocità $V = c/\beta$ avente la seguente proprietà:
- 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 [teorema dell'armonia delle fasi].
- Usando solo la definizione della velocità della particella $v = \beta c$ e della velocità attribuita all'onda fittizia $V = c/\beta$ si ricava innanzitutto che $vV = c^2$ e che la lunghezza d'onda dell'onda fittizia associata alla particella è data da:

Un'altra formula magica: particella \Rightarrow onda. III

- La soluzione del dilemma consiste nel considerare ν come la frequenza di un'onda 'fittizia', dotata di velocità $V = c/\beta$ avente la seguente proprietà:
- 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 [teorema dell'armonia delle fasi].
- Usando solo la definizione della velocità della particella $v = \beta c$ e della velocità attribuita all'onda fittizia $V = c/\beta$ si ricava innanzitutto che $vV = c^2$ e che la lunghezza d'onda dell'onda fittizia associata alla particella è data da:

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

Un'altra formula magica: particella \Rightarrow onda. III

- La soluzione del dilemma consiste nel considerare ν come la frequenza di un'onda 'fittizia', dotata di velocità $V = c/\beta$ avente la seguente proprietà:
- 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 [teorema dell'armonia delle fasi].
- Usando solo la definizione della velocità della particella $v = \beta c$ e della velocità attribuita all'onda fittizia $V = c/\beta$ si ricava innanzitutto che $vV = c^2$ e che la lunghezza d'onda dell'onda fittizia associata alla particella è data da:

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

- de Broglie non esegue questo calcolo e non scrive **mai** questa formula sintetica con il p al denominatore.

Presentazione assiomatica di λ_{dB}

- Prima ipotesi:

$$E = mc^2 = h\nu_0$$

Presentazione assiomatica di λ_{dB}

- Prima ipotesi:

$$E = mc^2 = h\nu_0$$

- Nota. La particella è trattata, dal punto di vista energetico, come un quanto di luce:
 $E = h\nu$.

Presentazione assiomatica di λ_{dB}

- Prima ipotesi:

$$E = mc^2 = h\nu_0$$

- Nota. La particella è trattata, dal punto di vista energetico, come un quanto di luce:
 $E = h\nu$.

- Seconda ipotesi:

$$\nu = \gamma\nu_0$$

Presentazione assiomatica di λ_{dB}

- Prima ipotesi:

$$E = mc^2 = h\nu_0$$

- Nota. La particella è trattata, dal punto di vista energetico, come un quanto di luce:
 $E = h\nu$.

- Seconda ipotesi:

$$\nu = \gamma\nu_0$$

- Nota. Questa relazione non vale per alcun fenomeno ondulatorio.

Presentazione assiomatica di λ_{dB}

- Prima ipotesi:

$$E = mc^2 = h\nu_0$$

- Nota. La particella è trattata, dal punto di vista energetico, come un quanto di luce:
 $E = h\nu$.

- Seconda ipotesi:

$$\nu = \gamma\nu_0$$

- Nota. Questa relazione non vale per alcun fenomeno ondulatorio.

- Terza ipotesi:

$$\nu\lambda_{dB} = \frac{c}{\beta}$$

Presentazione assiomatica di λ_{dB}

- Prima ipotesi:

$$E = mc^2 = h\nu_0$$

- Nota. La particella è trattata, dal punto di vista energetico, come un quanto di luce:
 $E = h\nu$.

- Seconda ipotesi:

$$\nu = \gamma\nu_0$$

- Nota. Questa relazione non vale per alcun fenomeno ondulatorio.

- Terza ipotesi:

$$\nu\lambda_{dB} = \frac{c}{\beta}$$

- Risultato:

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

Presentazione assiomatica di λ_{dB}

- Prima ipotesi:

$$E = mc^2 = h\nu_0$$

- Nota. La particella è trattata, dal punto di vista energetico, come un quanto di luce:
 $E = h\nu$.

- Seconda ipotesi:

$$\nu = \gamma\nu_0$$

- Nota. Questa relazione non vale per alcun fenomeno ondulatorio.

- Terza ipotesi:

$$\nu\lambda_{dB} = \frac{c}{\beta}$$

- Risultato:

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

- Questa è veramente una formula magica.

Continuo $\xRightarrow{1905}$ Discreto $\xRightarrow{1923}$ Continuo

- Nel 1905 Einstein suggerì una descrizione discreta della luce, che poteva superare la dicotomia tra la descrizione discreta della materia e quella continua della radiazione.

Continuo $\xrightarrow{1905}$ Discreto $\xrightarrow{1923}$ Continuo

- Nel 1905 Einstein suggerì una descrizione discreta della luce, che poteva superare la dicotomia tra la descrizione discreta della materia e quella continua della radiazione.
- Nel 1923, de Broglie percorse il cammino inverso descrivendo la materia discreta con un'onda.

Continuo $\xrightarrow{1905}$ Discreto $\xrightarrow{1923}$ Continuo

- Nel 1905 Einstein suggerì una descrizione discreta della luce, che poteva superare la dicotomia tra la descrizione discreta della materia e quella continua della radiazione.
- Nel 1923, de Broglie percorse il cammino inverso descrivendo la materia discreta con un'onda.
- Le argomentazioni usate da de Broglie si basano sull'equazione ipotetica

$$h\nu_0 = mc^2$$

Esse sono tipiche del contesto della scoperta e il loro interesse è oggi limitato all'ambito storico - epistemologico.

Continuo $\xrightarrow{1905}$ Discreto $\xrightarrow{1923}$ Continuo

- Nel 1905 Einstein suggerì una descrizione discreta della luce, che poteva superare la dicotomia tra la descrizione discreta della materia e quella continua della radiazione.
- Nel 1923, de Broglie percorse il cammino inverso descrivendo la materia discreta con un'onda.
- Le argomentazioni usate da de Broglie si basano sull'equazione ipotetica

$$h\nu_0 = mc^2$$

Esse sono tipiche del contesto della scoperta e il loro interesse è oggi limitato all'ambito storico - epistemologico.

- Infatti, l'unica formula che sarà sottoposta a verifica sperimentale è $\lambda_{dB} = h/p$, formula che può essere assunta come postulato.

L'onda di de Broglie non esiste

- Il fatto di avere una velocità di propagazione superiore a quella della luce implica che l'onda di de Broglie non può esistere nel Mondo.

L'onda di de Broglie non esiste

- Il fatto di avere una velocità di propagazione superiore a quella della luce implica che l'onda di de Broglie non può esistere nel Mondo.
- de Broglie ha 'dimostrato' che un pacchetto d'onde le cui frequenze sono centrate intorno a ν (frequenza dell'onda di fase fittizia) ha una velocità di gruppo uguale alla velocità della particella.

L'onda di de Broglie non esiste

- Il fatto di avere una velocità di propagazione superiore a quella della luce implica che l'onda di de Broglie non può esistere nel Mondo.
- de Broglie ha 'dimostrato' che un pacchetto d'onde le cui frequenze sono centrate intorno a ν (frequenza dell'onda di fase fittizia) ha una velocità di gruppo uguale alla velocità della particella.
- Questo teorema è stato sottoposto a critiche non banali da parte di diversi autori [qui](#)

L'onda di de Broglie non esiste

- Il fatto di avere una velocità di propagazione superiore a quella della luce implica che l'onda di de Broglie non può esistere nel Mondo.
- de Broglie ha 'dimostrato' che un pacchetto d'onde le cui frequenze sono centrate intorno a ν (frequenza dell'onda di fase fittizia) ha una velocità di gruppo uguale alla velocità della particella.
- Questo teorema è stato sottoposto a critiche non banali da parte di diversi autori [qui](#)
- Comunque, in ogni predizione di fenomeni di interferenza di particelle materiali è usata solo la formula magica $\lambda_{dB} = h/p$ (o formule analoghe) e mai il pacchetto d'onda.

L'onda di de Broglie non esiste

- Il fatto di avere una velocità di propagazione superiore a quella della luce implica che l'onda di de Broglie non può esistere nel Mondo.
- de Broglie ha 'dimostrato' che un pacchetto d'onde le cui frequenze sono centrate intorno a ν (frequenza dell'onda di fase fittizia) ha una velocità di gruppo uguale alla velocità della particella.
- Questo teorema è stato sottoposto a critiche non banali da parte di diversi autori [qui](#)
- Comunque, in ogni predizione di fenomeni di interferenza di particelle materiali è usata solo la formula magica $\lambda_{dB} = h/p$ (o formule analoghe) e mai il pacchetto d'onda.
- Quindi il pacchetto d'onda di de Broglie può essere espunto dalle nostre descrizioni senza diminuire la capacità predittiva della teoria.

Interferenza di elettroni. Esperimenti

- Nel 1927 Davisson e Germer e nel 1928 George Paget Thomson verificarono l'efficacia della formula magica di de Broglie.

Interferenza di elettroni. Esperimenti

- Nel 1927 Davisson e Germer e nel 1928 George Paget Thomson verificarono l'efficacia della formula magica di de Broglie.
- Davisson e Germer con misure di riflessione di elettroni da parte di cristalli, Thomson con misure di diffrazione di elettroni da parte di cristalli sottili.

Interferenza di elettroni. Esperimenti

- Nel 1927 Davisson e Germer e nel 1928 George Paget Thomson verificarono l'efficacia della formula magica di de Broglie.
- Davisson e Germer con misure di riflessione di elettroni da parte di cristalli, Thomson con misure di diffrazione di elettroni da parte di cristalli sottili.
- Nel 1961 Claus Jönsson pubblicò un lavoro sulla diffrazione di elettroni attraverso due o più fenditure materiali.

Interferenza di elettroni. Esperimenti

- Nel 1927 Davisson e Germer e nel 1928 George Paget Thomson verificarono l'efficacia della formula magica di de Broglie.
- Davisson e Germer con misure di riflessione di elettroni da parte di cristalli, Thomson con misure di diffrazione di elettroni da parte di cristalli sottili.
- Nel 1961 Claus Jönsson pubblicò un lavoro sulla diffrazione di elettroni attraverso due o più fenditure materiali.
- Nel 1963, Richard Feynman, ignorando il lavoro di Jönsson, trattò – nelle sue Lezioni – l'interferenza di elettroni attraverso due fenditure con le ampiezze di probabilità, specificando che si trattava di un esperimento mentale.

Interferenza di elettroni. Esperimenti. II

- Nel 1973, a Bologna, Oriano Donati, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi realizzarono un esperimento di interferenza di elettroni attraverso due fenditure virtuali, usando un biprisma elettronico.

Interferenza di elettroni. Esperimenti. II

- Nel 1973, a Bologna, Oriano Donati, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi realizzarono un esperimento di interferenza di elettroni attraverso due fenditure virtuali, usando un biprisma elettronico.
- Tre anni dopo, Pier Giorgio Merli, Missiroli e Pozzi raffinarono l'esperimento introducendo un passaggio dinamico tra la situazione in cui sul rivelatore di elettroni compaiono spot distribuiti a caso a quella in cui compaiono frange di interferenza definite. L'esperimento fu poi documentato con un video didattico molto noto. **Attenzione:** per poter vedere il video sottostante scaricare nella cartella contenente questo PDF il seguente Video: [scarica](#)
Poi, per vedere il video [clicca qui](#)

Interferenza di elettroni. Esperimenti. II

- Nel 1973, a Bologna, Oriano Donati, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi realizzarono un esperimento di interferenza di elettroni attraverso due fenditure virtuali, usando un biprisma elettronico.
- Tre anni dopo, Pier Giorgio Merli, Missiroli e Pozzi raffinarono l'esperimento introducendo un passaggio dinamico tra la situazione in cui sul rivelatore di elettroni compaiono spot distribuiti a caso a quella in cui compaiono frange di interferenza definite. L'esperimento fu poi documentato con un video didattico molto noto. **Attenzione:** per poter vedere il video sottostante scaricare nella cartella contenente questo PDF il seguente Video: [scarica](#)
Poi, per vedere il video [clicca qui](#)
- Nel 1989, un gruppo di ricercatori della Hitachi, realizzarono un esperimento simile a quello di Bologna, in cui, tuttavia, manca il passaggio dinamico dell'esperimento italiano. **Attenzione:** per poter vedere il video sottostante scaricare nella cartella contenente questo PDF il seguente Video: [scarica](#)
Poi, per vedere il video [clicca qui](#)