

La luce

Le descrizioni ondulatoria e corpuscolare

Giuseppe Giuliani

Pavia, 22 novembre 2017

Suggerimento

Si consiglia di usare l'articolo "Wave and photon descriptions of light: historical highlights, epistemological aspects and teaching practices" di Biagio Buonaura e Giuseppe Giuliani come testo di riferimento e approfondimento.

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*:

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

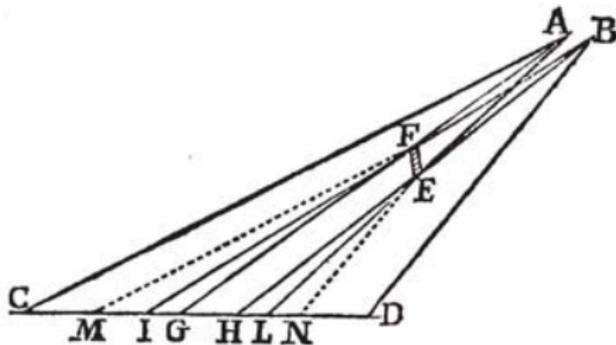
- Seicento anni dopo. . .
- **1621. Willebrord van Roijen Snell** (1580 - 1626, Olanda) scopre la *legge della rifrazione*:

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

- **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 $1/n$

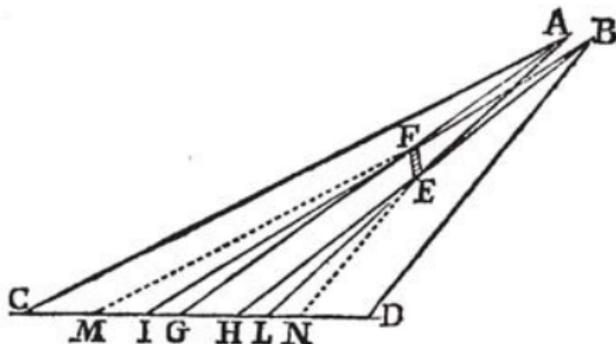
Diffrazione

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



- “Lumen propagatur seu deffunditur non solum Directe, Refracte, ac Reflexe, sed etiam alio quodam Quarto modo, DIFFRACTE”
[Propositio I]

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.

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.”

Interferenza: esperimento

- "...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]

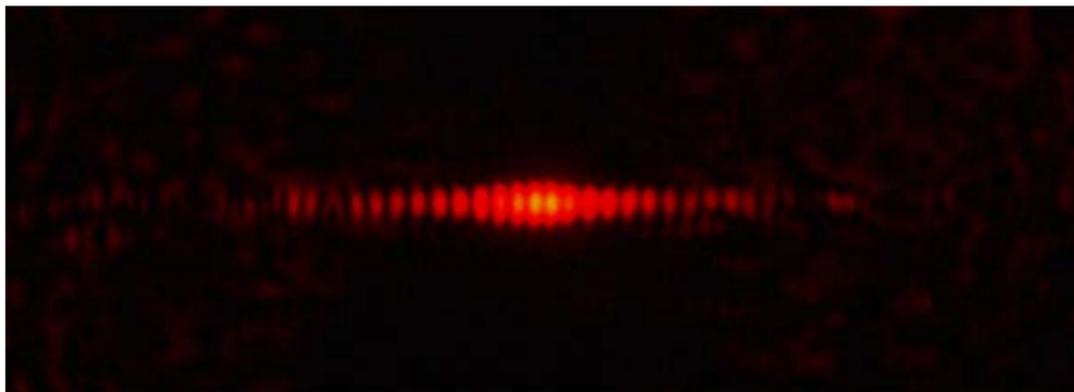


Figura: Interferenza alla Young. Laser Elio - Neon; spessore cartoncino: 0.5 mm

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) possieda 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) possieda una rigidità sufficiente da permettere, come in un solido, vibrazioni trasversali.
- **1873. James Clerck Maxwell** (1831 - 1879). Viene pubblicato il [Treatise of Electricity and Magnetsim](#). 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) possieda una rigidità sufficiente da permettere, come in un solido, vibrazioni trasversali.
- **1873. James Clerck Maxwell** (1831 - 1879). Viene pubblicato il [Treatise of Electricity and Magnetsim](#). 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.

Misura della rigidità dell'Etere

- 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

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
- 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
- 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 del campo elettrico di un impulso laser

Fig. 1. Schematic of the measurement principle. A few-cycle pulse of laser light, together with a synchronized subfemtosecond XUV burst, is focused into an atomic gas target. The XUV pulse knocks electrons free by photoionization. The light electric field $E_L(t)$ to be measured imparts a momentum change to the electrons (black arrows), which scales as the instantaneous value of the vector potential $A_L(t)$ at the instant of release of the probing electrons. The momentum change is measured by an electron detector, which collects the electrons ejected along the direction of the linearly polarized $E_L(\vec{r}, t)$.

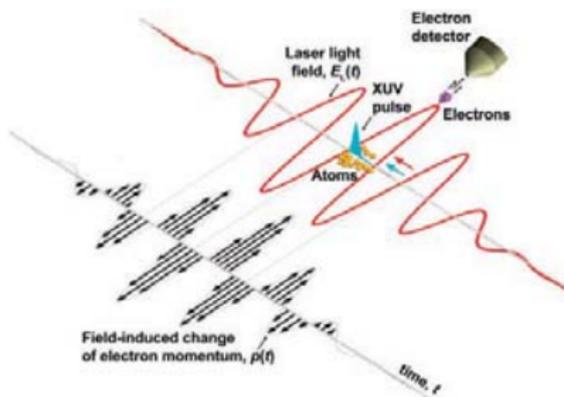


Figura: Goulielmakis E et al. 2004 Direct Measurement of Light Waves *Science* 305 1267

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

L'invenzione di h



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

L'invenzione di h



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



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

L'invenzione di h



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



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

- $Z(\nu)$ numero di accettori (oscillatori di Planck, modi di vibrazione di Debye, celle di volume h^3 di Bose) per unità di volume e di frequenza

L'invenzione di h



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



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

- $Z(\nu)$ numero di accettori (oscillatori di Planck, modi di vibrazione di Debye, celle di volume h^3 di Bose) per unità di volume e di frequenza
- $\bar{n}(\nu, T)$ numero medio di fotoni per ogni accettore

L'invenzione di h



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



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

- $Z(\nu)$ numero di accettori (oscillatori di Planck, modi di vibrazione di Debye, celle di volume h^3 di Bose) per unità di volume e di frequenza
- $\bar{n}(\nu, T)$ numero medio di fotoni per ogni accettore
- $h\nu$ energia di un fotone

Spettro della radiazione di corpo nero - Teoria

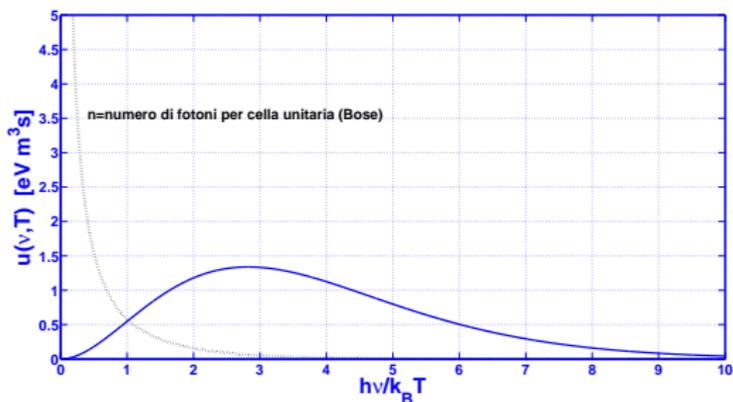


Figura: Spettro della radiazione di corpo nero.

- Quando n è piccolo la formula di Planck è approssimata da quella di Wien (descrizione corpuscolare). Quando n è grande, la formula di Planck è approssimata da quella di Rayleigh - Jeans (descrizione ondulatoria).

Spettro della radiazione di corpo nero - Teoria

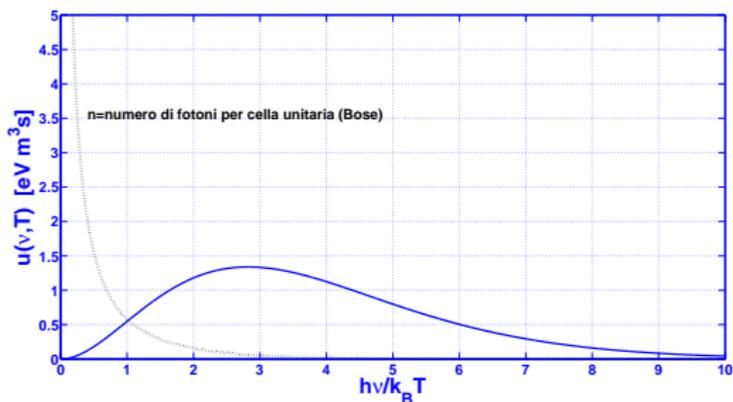


Figura: Spettro della radiazione di corpo nero.

- Quando n è piccolo la formula di Planck è approssimata da quella di Wien (descrizione corpuscolare). Quando n è grande, la formula di Planck è approssimata da quella di Rayleigh - Jeans (descrizione ondulatoria).
- Si veda, più avanti la formula delle fluttuazioni dell'energia e il rapporto tra le due descrizioni in funzione di n .

- Planck a Mosengheil (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 Mosengheil (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 Mosengheil (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:

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

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 Mosengheil (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:

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

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 Mosengheil si applica alla radiazione cosmica di fondo.

Dimostrazione

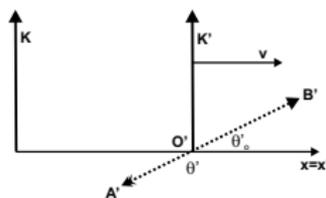


Figura: K vede la radiazione di fondo isotropa.

- $u(\nu, T) = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$. Teorema di Wien (1884)

Dimostrazione

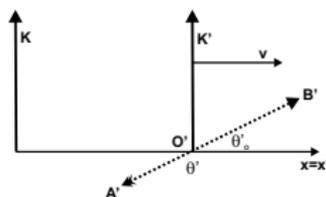


Figura: K vede la radiazione di fondo isotropa.

- $u(\nu, T) = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$. Teorema di Wien (1884)
- $\nu' = \nu \frac{\sqrt{1-B^2}}{1+B \cos \theta'}$ = $\nu \frac{\sqrt{1-B^2}}{1-B \cos \theta_0}$

Dimostrazione

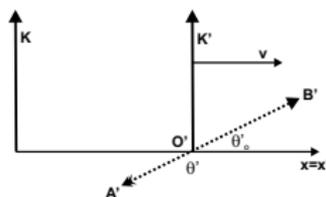


Figura: K vede la radiazione di fondo isotropa.

- $u(\nu, T) = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$. Teorema di Wien (1884)
- $\nu' = \nu \frac{\sqrt{1-B^2}}{1+B \cos \theta'} = \nu \frac{\sqrt{1-B^2}}{1-B \cos \theta'_0}$
- Siccome la legge di Wien vale in ogni SRI, la dipendenza di $u(\nu, T)$ da T è identica a quella da ν

Dimostrazione

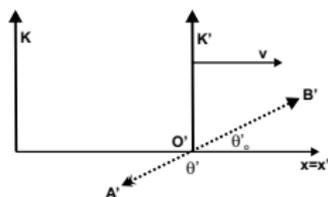


Figura: K vede la radiazione di fondo isotropa.

- $u(\nu, T) = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$. Teorema di Wien (1884)
- $\nu' = \nu \frac{\sqrt{1-B^2}}{1+B \cos \theta'} = \nu \frac{\sqrt{1-B^2}}{1-B \cos \theta'_o}$
- Siccome la legge di Wien vale in ogni SRI, la dipendenza di $u(\nu, T)$ da T è identica a quella da ν
- Pertanto: $T' = T \frac{\sqrt{1-B^2}}{1-B \cos \theta'_o}$

Spettro della radiazione di corpo nero - Misura

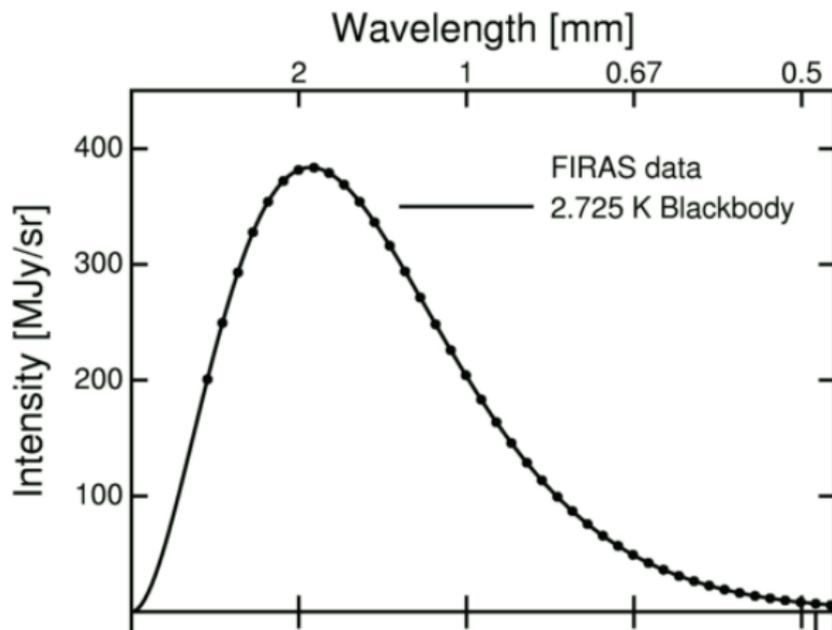


Figura: Misura effettuata con FIRAS (Far Infrared Absolute Spectrophotometer).
Missione COBE (Cosmic Background Explorer).

- **1905. Einstein.** “. . . nonostante gli esperimenti abbiano pienamente confermato la teoria della diffrazione, della riflessione, della rifrazione, della dispersione e così via, 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.”

- **1905. Einstein.** “. . . nonostante gli esperimenti abbiano pienamente confermato la teoria della diffrazione, della riflessione, della rifrazione, della dispersione e così via, 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.”
- “Secondo l'ipotesi che sarà qui considerata, quando un raggio luminoso uscente da un punto si propaga, l'energia non si distribuisce in modo continuo in uno spazio via via più grande; essa consiste invece in un numero finito di quanti di energia, localizzati in punti dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza.”

Quanti di luce

- **1905. Einstein.** “. . . nonostante gli esperimenti abbiano pienamente confermato la teoria della diffrazione, della riflessione, della rifrazione, della dispersione e così via, 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.”
- “Secondo l'ipotesi che sarà qui considerata, quando un raggio luminoso uscente da un punto si propaga, l'energia non si distribuisce in modo continuo in uno spazio via via più grande; essa consiste invece in un numero finito di quanti di energia, localizzati in punti dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza.”
- $E = h\nu$

Quanti di luce?

- Che talvolta egli abbia mancato l'obiettivo nelle sue speculazioni, come, per esempio, nella sua ipotesi dei quanti di luce, non può essere usato troppo contro di lui, perché non è possibile introdurre nuove fondamentali idee, persino nelle scienze più esatte, senza correre, di tanto in tanto, qualche rischio [Planck, Nernst, Rubens e Warburg, 1913].

Quanti di luce?

- Che talvolta egli abbia mancato l'obiettivo nelle sue speculazioni, come, per esempio, nella sua ipotesi dei quanti di luce, non può essere usato troppo contro di lui, perché non è possibile introdurre nuove fondamentali idee, persino nelle scienze più esatte, senza correre, di tanto in tanto, qualche rischio [Planck, Nernst, Rubens e Warburg, 1913].
- Questa ipotesi può ben essere definita sconsiderata innanzitutto perché una perturbazione elettromagnetica che rimane localizzata nello spazio appare come una violazione del concetto stesso di perturbazione elettromagnetica, e secondariamente perché contrasta apertamente [flies in the face of] con i ben stabiliti fatti dell'interferenza [Millikan, 1916].

- Non è una misura di una proprietà di una entità teorica (di un oggetto, in una Immagine del Mondo)

Misura di h

- Non è una misura di una proprietà di una entità teorica (di un oggetto, in una Immagine del Mondo)
- h , infatti, è la costante che permette di raccordare due distinte descrizioni della luce: corpuscolare e ondulatoria

Misura di h

- Non è una misura di una proprietà di una entità teorica (di un oggetto, in una Immagine del Mondo)
- h , infatti, è la costante che permette di raccordare due distinte descrizioni della luce: corpuscolare e ondulatoria
-

$$E_{cin} = h\nu - P \Rightarrow (-e)(-V) = eV = h\nu - P \Rightarrow V = \frac{h}{e}\nu - \frac{P}{e}$$

Misura di h/e . Millikan 1916

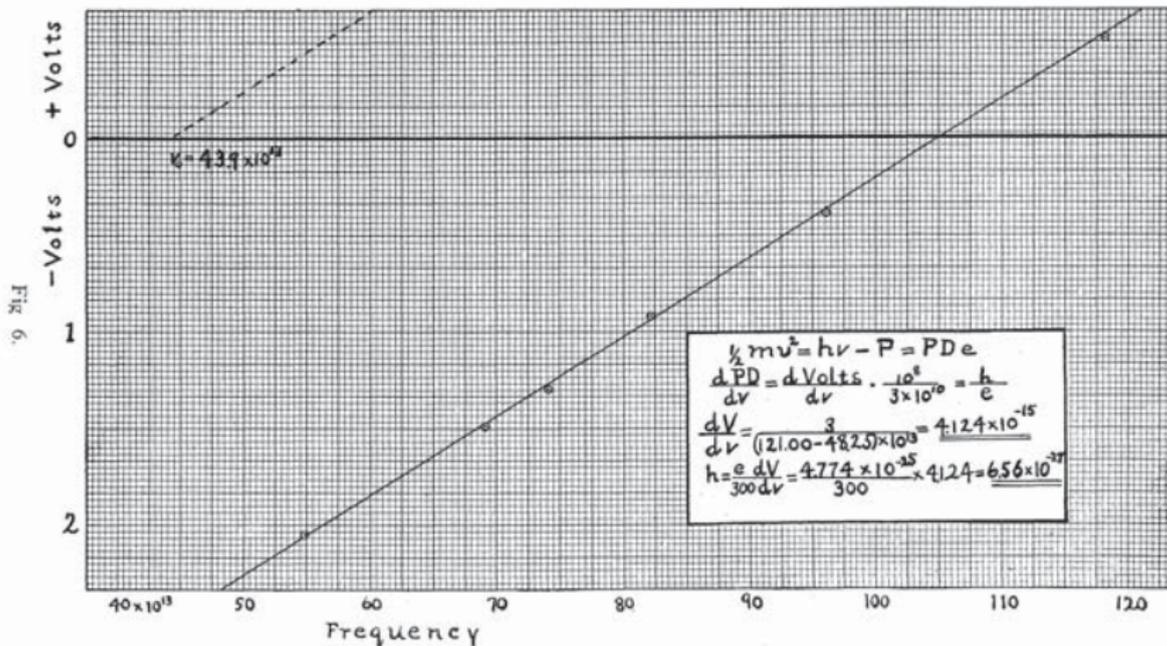


Figura: Misura di h/e

Fotoni in azione: effetto Doppler

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

Fotoni in azione: effetto Doppler

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

Fotoni in azione: effetto Doppler

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

Fotoni in azione: effetto Doppler

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

Esempio: emissione di un fotone

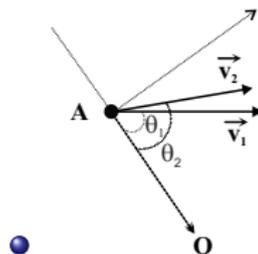


Figura: Emissione di un fotone

Esempio: emissione di un fotone

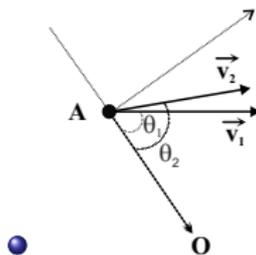


Figura: Emissione di un fotone

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

Interferenza

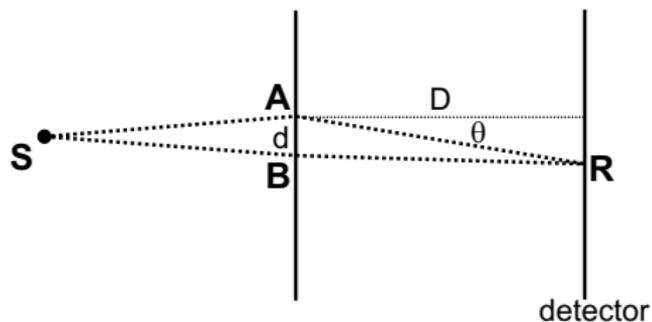


Figura: Interferenza attraverso due fenditure

Interferenza: onde EM



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

dove I_0 è l'intensità massima prevista nel caso in cui sia aperta una sola fenditura e λ la lunghezza d'onda usata.

Interferenza: onde EM

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

dove I_0 è l'intensità massima prevista nel caso in cui sia aperta una sola fenditura e λ la lunghezza d'onda usata.

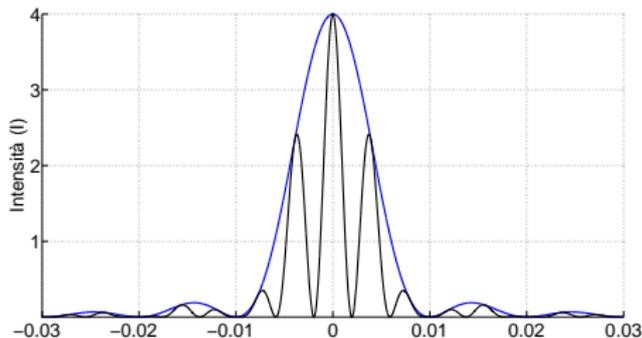


Figura: Figura di interferenza prodotta da due fenditure secondo la (4), in cui si è posto $I_0 = 1$. La curva piena rappresenta l'intensità prevista; la curva tratteggiata il termine diffrattivo in (\sin^2) : sarebbe la curva prevista con una sola fenditura aperta la cui intensità fosse quadrupla di quella considerata.

Esperimento di Geoffrey Ingram Taylor: 1908

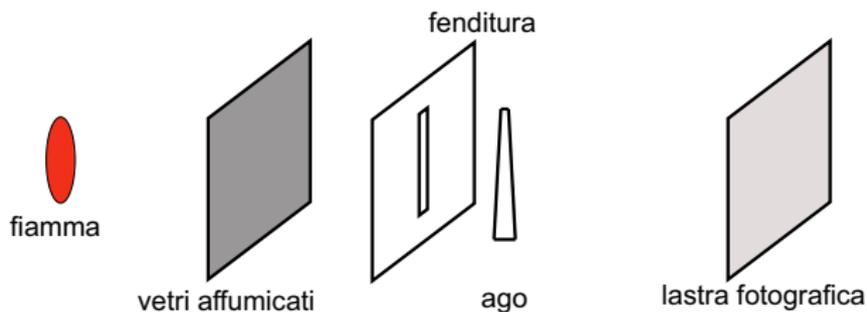


Figura: Esperimento di diffrazione a bassa intensità luminosa. Taylor G I 1908
Interference fringes with feeble light *Proc. Camb. Phil. Soc.* **15** 114

Un secolo dopo...

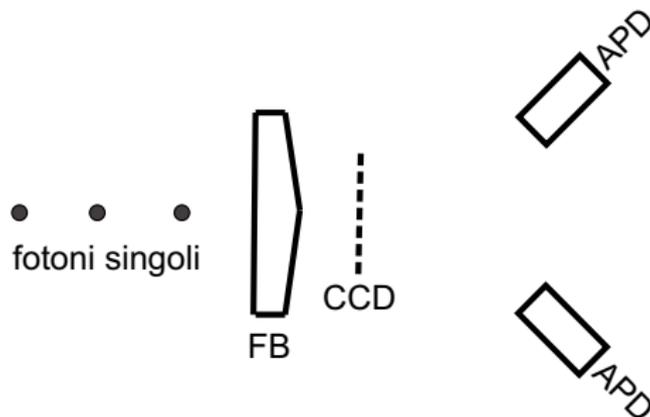


Figura: Esperimento di interferenza con un fotone alla volta (quasi). FB= biprisma di Fresnel; CCD=fotocamera a CCD 'enhanced'; APD= fotodiodi. I fotodiodi servono per verificare che il singolo fotone arrivi solo ad uno dei due (togliendo, naturalmente, la fotocamera). Jacques V, Wu E, Toury T, Treussart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

Onde EM e fotoni: interferenza a fotone singolo

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

Onde EM e fotoni: interferenza

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

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

Onde EM e fotoni: interferenza

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

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

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

Onde EM e fotoni: interferenza

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

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

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

Onde EM e fotoni: fotografie e interferenza

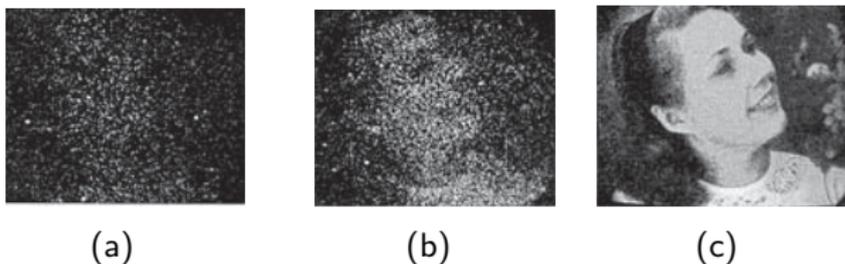


Figura: Foto con poca luce: (a) 1×10^3 fotoni; (b) 1.2×10^4 fotoni; (c) 2.8×10^7 fotoni. Rose A 1953 Quantum and Noise Limitations of the Visual Process *Josa* 43 715.

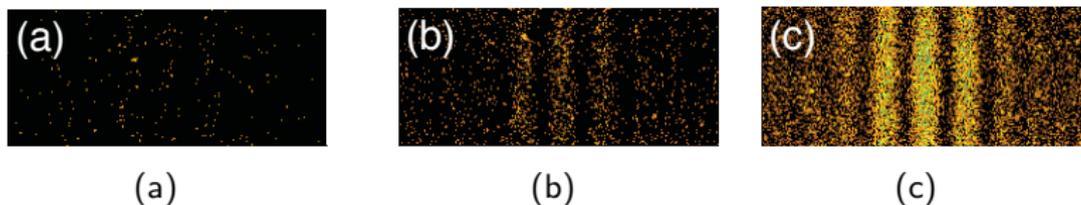


Figura: Interferenza: (a) 272 fotoni; (b) 2240 fotoni; (c) 19773 fotoni. Jacques et al 2005

Onde EM e fotoni: osservazioni

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

Onde EM e fotoni: osservazioni

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

Onde EM e fotoni: osservazioni

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

Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni I

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

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{(E - \overline{E})^2} = \overline{E^2} - \overline{E}^2 = Z(\nu)(h\nu)^2[\overline{n}(\nu, T) + \overline{n}^2(\nu, T)](v d\nu) \quad (5)$$

Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni I

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

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{(E - \overline{E})^2} = \overline{E^2} - \overline{E}^2 = Z(\nu)(h\nu)^2[\overline{n}(\nu, T) + \overline{n}^2(\nu, T)](v d\nu) \quad (5)$$

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

Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni I

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

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{(E - \overline{E})^2} = \overline{E^2} - \overline{E}^2 = Z(\nu)(h\nu)^2[\overline{n}(\nu, T) + \overline{n^2}(\nu, T)](v d\nu) \quad (5)$$

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

Onde EM e fotoni: ambigue fluttuazioni I

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

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{(E - \overline{E})^2} = \overline{E^2} - \overline{E}^2 = Z(\nu)(h\nu)^2[\overline{n}(\nu, T) + \overline{n}^2(\nu, T)](v d\nu) \quad (5)$$

- 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

Onde EM e fotoni. Interferenza e fluttuazioni: analogia

Numero di fotoni	Interferenza	Fluttuazioni
basso	spots	particelle
intermedio	frange individuabili	particelle + onde
alto	frange definite	onde

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

Che cosa è la luce? I

Dopo aver a lungo discusso delle due **descrizioni** della luce, è legittima la domanda:

Che cosa è la luce?

Per rispondere a questa domanda, è necessario costruire una Immagine del Mondo. Una Immagine del Mondo contiene asserzioni di esistenza nel Mondo delle entità teoriche (termini teorici come elettrone, atomo, onde EM, fotone. . .) usate dalle teorie. Queste asserzioni di esistenza debbono essere compatibili con la conoscenza acquisita, ma, ovviamente, esse sono solo *plausibili* (non certe). Consideriamo, per esempio, l'asserzione "esiste l'elettrone". Questa asserzione poteva essere fatta già ai tempi della sua scoperta. La sua plausibilità era allora incerta. Con il trascorrere del tempo, sono mutate le teorie che coinvolgono in modo più o meno diretto l'elettrone, ma l'asserzione di esistenza dell'elettrone è divenuta sempre più plausibile: possiamo dire che è divenuta verosimile.

Che cosa è la luce? II

Quindi, sulla base della conoscenza acquisita possiamo affermare che la luce è costituita da fotoni, cioè da quanti di energia che sono emessi ed assorbiti per intero dalla materia (dotata di massa). Questa affermazione è, naturalmente, una asserzione di esistenza. Sempre alla luce della conoscenza acquisita, appare invece problematica una asserzione di esistenza delle onde elettromagnetiche.

- Circa due millenni e mezzo ci separano dall'ipotesi di Pitagora

Riflessioni finali

- Circa due millenni e mezzo ci separano dall'ipotesi di Pitagora
- Abbiamo appreso molte cose che hanno favorito, a partire dalla seconda metà del secolo scorso, rilevanti sviluppi tecnologici

Riflessioni finali

- Circa due millenni e mezzo ci separano dall'ipotesi di Pitagora
- Abbiamo appreso molte cose che hanno favorito, a partire dalla seconda metà del secolo scorso, rilevanti sviluppi tecnologici
- Ma alcune domande sono ancora senza risposta:

Riflessioni finali

- Circa due millenni e mezzo ci separano dall'ipotesi di Pitagora
- Abbiamo appreso molte cose che hanno favorito, a partire dalla seconda metà del secolo scorso, rilevanti sviluppi tecnologici
- Ma alcune domande sono ancora senza risposta:
- Perché, quando il numero dei fotoni coinvolti è statisticamente significativo, possiamo descrivere la luce come un'onda elettromagnetica?

Riflessioni finali

- Circa due millenni e mezzo ci separano dall'ipotesi di Pitagora
- Abbiamo appreso molte cose che hanno favorito, a partire dalla seconda metà del secolo scorso, rilevanti sviluppi tecnologici
- Ma alcune domande sono ancora senza risposta:
- Perché, quando il numero dei fotoni coinvolti è statisticamente significativo, possiamo descrivere la luce come un'onda elettromagnetica?
- L'estensione della formula $\lambda = h/p$ alle particelle materiali è essenziale per descrivere molti fenomeni, tra cui l'interferenza di particelle materiali.

Riflessioni finali

- Circa due millenni e mezzo ci separano dall'ipotesi di Pitagora
- Abbiamo appreso molte cose che hanno favorito, a partire dalla seconda metà del secolo scorso, rilevanti sviluppi tecnologici
- Ma alcune domande sono ancora senza risposta:
- Perché, quando il numero dei fotoni coinvolti è statisticamente significativo, possiamo descrivere la luce come un'onda elettromagnetica?
- L'estensione della formula $\lambda = h/p$ alle particelle materiali è essenziale per descrivere molti fenomeni, tra cui l'interferenza di particelle materiali.
- Mentre le proprietà dei fotoni sono descritte dalla QED, la lunghezza d'onda di de Broglie rimane una assunzione a sé stante non integrata in alcuna teoria.



Figura: Arcobaleno: uno dei fenomeni luminosi più studiati nel corso dei secoli.
Grazie per l'attenzione.

Riferimenti bibliografici

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