

luce Agente fisico che rende possibile la sensazione della visione.

Spesso con il termine s'individua tanto l'agente fisico quanto la visione stessa. La confusione si fonda su un'ambiguità derivante dalla circostanza che nella nostra lingua con un identico termine s'individuano due fenomeni diversi: quello fisico e la ricettività del fenomeno operata dalla retina, mentre in latino gli stessi risultano distinti: *lumen* è l'agente fisico, *lux* la sensazione della ricezione.

Il termine luce è tuttavia tanto generico quanto improprio. Correttamente si deve parlare di *radiazione elettromagnetica luminosa*, ed impropria è anche l'espressione talvolta usata di radiazione visibile contrapposta a radiazione non visibile, in quanto la radiazione è o percepibile o non percepibile, e l'aggettivo visibile va riferito alla sensazione e non alla radiazione.

La radiazione elettromagnetica ed i suoi effetti sono qui considerati in riferimento ad implicazioni astronomiche, quali la misura del flusso, la spettroscopia, la strumentazione ausiliaria.

- *La radiazione elettromagnetica. Generalità*
 - ▶ *Indagine storica sulla natura della luce*
 - ▶ *Le esperienze di Rømer, Fizeau, Foucault e Michelson*
- *La teoria elettromagnetica*
- *I quanti di luce*
- *Il flusso luminoso*
 - ▶ *Leggi di Lambert*
- *Effetto fotoelettrico. Rinvio*
- *La radiazione luminosa nella meccanica del moto oscillatorio*
- *Rifrazione, Riflessione, Interferenza, Diffrazione, Polarizzazione. Rinvio*

■ *La radiazione elettromagnetica. Generalità.* La radiazione elettromagnetica della luce è continua da 400 nm a 700 nm circa. L'elemento che differenzia questo intervallo dello spettro elettromagnetico è la capacità delle radiazioni di stimolare la retina in modo da produrre significative sensazioni visive.

La radiazione si definisce *monocromatica* se di un'unica lunghezza d'onda, *policromatica* se presenta radiazioni di più d'una lunghezza d'onda, *coerente* se composta di un'insieme di radiazioni elementari di eguale frequenza e fase.

Il cammino rettilineo lungo il quale si propaga la luce emessa da una sorgente prende il nome di *raggio luminoso*.

La propagazione si propaga in modo diverso dalle emissioni di altre sorgenti, come ad esempio il suono che si propaga unicamente attraverso i corpi (solidi, liquidi o gassosi).

Il raggio luminoso si propaga infatti anche nel vuoto, ma non attraversa ogni corpo che incontra, perché se sul suo cammino s'interpone uno schermo opaco, questo ne impedisce il passaggio.

Si ha così un'ulteriore indiretta distinzione con riferimenti ai corpi a seconda che si lascino attraversare o meno dal raggio luminoso.

I corpi che non si lasciano attraversare dalla luce si dicono *opachi*, quelli che si lasciano attraversare, come il vetro, si dicono *trasparenti*, ed infine quelli che pur lasciandosi attraversare dalla luce non consentono all'osservatore di distinguere la forma degli oggetti, si dicono *traslucidi*.

Queste distinzioni non posseggono comunque alcun carattere d'assolutezza, perché un mezzo trasparente come l'acqua, se considerato in grandi masse (strati) si comporta come un corpo opaco: la luce del Sole affievolisce man mano che si scende sotto la superficie marina.

La luce (per la sua propagazione rettilinea) genera attorno ai corpi illuminati un'ombra dovuta ai raggi tangenti al contorno

del corpo emessi dalla sorgente. La zona di spazio compresa fra uno schermo in cui si proietta l'ombra ed il retro della superficie dell'oggetto illuminato prende il nome di *di cono d'ombra*, che si ha quando la sorgente luminosa è così piccola da poter essere considerata puntiforme.

Se la sorgente è estesa come il Sole, il contorno dell'ombra è sfumato, ed attorno alla zona d'ombra centrale (nella quale non giunge alcun raggio emesso dalla sorgente), si osserva una zona debolmente illuminata, la *zona di penombra*, cui appartengono i punti dello schermo che ricevono luce soltanto da alcuni punti della sorgente. L'applicazione di questi fenomeni fisici si riscontra nelle eclissi.

Per la misura della radiazione luminosa → fotometria.

▶ *Indagine storica sulla natura della luce.* La natura della luce ha coinvolto nel tempo in pari modo filosofia e scienza confondendosi sempre i due aspetti (speculazione filosofica e scientifica) come il dritto ed il rovescio della stessa medaglia. Dal secolo XVII due teorie si sono contese il campo: la *teoria corpuscolare* e la *teoria ondulatoria*.

Secondo la teoria corpuscolare, di cui Newton fu il più valido propugnatore, la luce sarebbe composta di una miriade di corpuscoli elastici che eccitano la sensazione visiva.

Secondo la teoria ondulatoria che trovò in Huygens il proprio propositore, la radiazione luminosa sarebbe dovuta a vibrazioni longitudinali dell'→ *etere*, l'impalpabile mezzo che si supponeva riempisse gli spazi vuoti e penetrasse ovunque nell'universo.

La teoria corpuscolare fu a lungo in auge sia per l'autorità del proponente, sia perché si poneva come una derivazione delle concezioni degli atomistici classici. In aggiunta, la mancanza di adeguate conoscenze matematiche scientifiche e tecniche non permettevano di dimostrarne la teoria ondulatoria.

La disputa fu risolta agli albori del XIX secolo ad opera soprattutto di Joung e Fresnel che nelle loro dimostrazioni poterono disporre di un apparato matematico-sperimentale idoneo.

Gli elementi decisivi a favore della teoria ondulatoria furono soprattutto due: l'→ interferenza e la → diffrazione, fenomeni che non si potevano ammettere postulando la teoria corpuscolare.

Ogni ipotesi sulla natura della luce deve tener conto infatti dei fenomeni che la luce stessa produce quando ad essa s'applichi l'ottica geometrica: a) la propagazione rettilinea, b) la riflessione, c) la rifrazione. Di questi fenomeni fu tentata la spiegazione sia con la teoria corpuscolare, sia con la teoria ondulatoria.

Entrambe le teorie potevano spiegare la propagazione rettilinea e la riflessione, ma la rifrazione risultò incoerente con la teoria corpuscolare, a meno che non si fosse ammesso che la velocità di propagazione aumenti da un mezzo ad un altro: nell'ipotesi ondulatoria la velocità deve diminuire.

Sul terreno della misura della velocità di propagazione nei diversi mezzi si misura la disputa finale fra le due teorie.

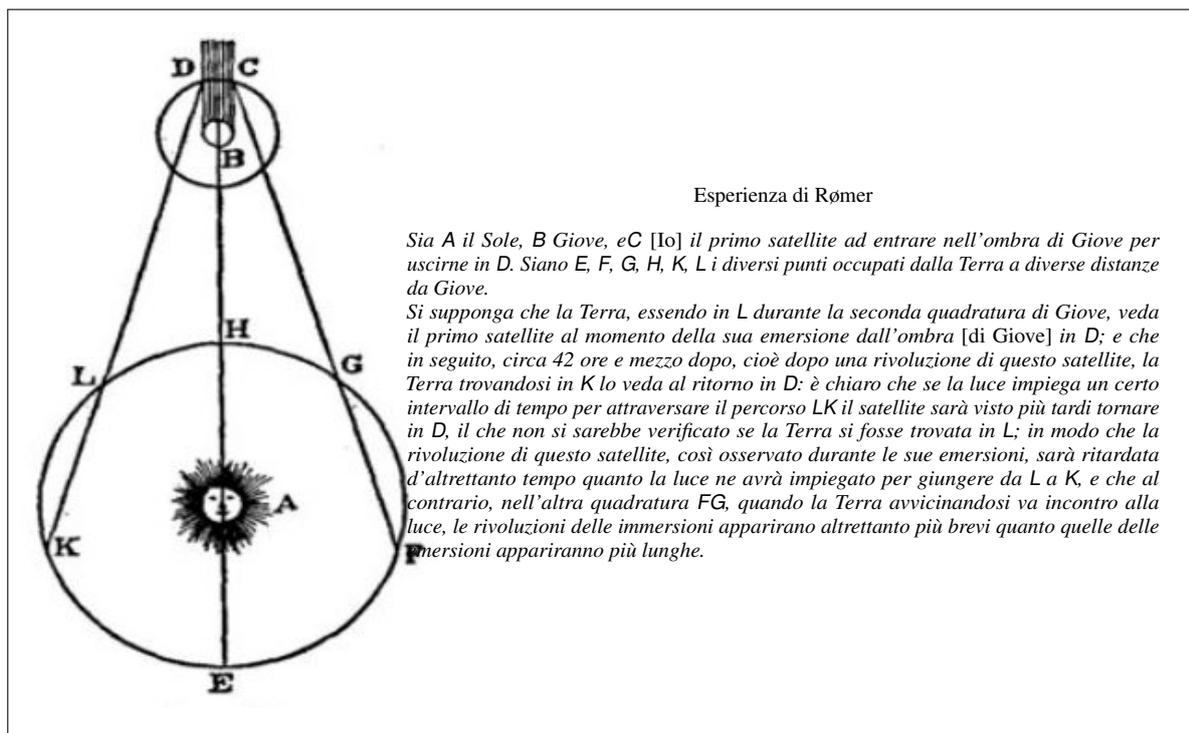
Rilevando che una sorgente luminosa è percepita immediatamente anche a grande distanza, il primo problema da risolvere riguardò la velocità, se questa fosse cioè finita (pur essendo altissima) o infinita.

▶ *Esperienze di Rømer, Fizeau, Foucault, Michelson.*

● Se si trascurano alcuni esperimenti di Galilei (di sola rilevanza storica perché non condussero a valori apprezzabili in quanto la base di distanza adottata era troppo piccola), Ole C. Rømer fu il primo dei moderni a misurare scientificamente la velocità della luce fondandosi su osservazioni astronomiche.

Sfruttando per l'esperienza le eclissi dei satelliti di Giove che si presentano con notevole periodicità e servendosi delle effemeridi di G. D. Cassini, Rømer osservò che queste fornivano valori corretti in prossimità delle → quadrature fra Giove e il Sole, ma

- ▼ Disegno del Rømer e traduzione dell'estratto del rapporto sulla stima della velocità della luce pubblicato sul *Journal des sçavants*, 7 dicembre 1676, pag. 234.



non in prossimità delle congiunzioni od opposizioni, presentando uno scarto temporale. Il satellite preso in considerazione fu Io.

Il fenomeno era già stato osservato nel 1675 da Cassini, che pure aveva ipotizzato la riconducibilità del ritardo al tempo impiegato dalla luce per giungere dal satellite all'osservatore, ma non essendone del tutto convinto trascurò di approfondire l'ipotesi.

Fu allora che Rømer tentò questa via per indagare la velocità della luce aiutato nella ricerca dall'abate Jean-Felix Picard, un astronomo esperto in misurazioni che aveva effettuato la prima stima moderna della diametro della Terra.

Posto il diametro dell'orbita terrestre $d = 300\,000\,000$ km, e pensando che la luce per raggiungere l'osservatore impiegasse maggior tempo nel primo caso che non nel secondo, stimò il ritardo in $1320''$, pervenendo al primo risultato di misura della velocità di propagazione della luce fornendo un valore di

$$c = 227\,272 \text{ km/s}$$

dividendo i due operandi noti.

I testi sono discordi sulla misura ottenuta dal Rømer, indicando ciascuno un risultato diverso; ma credo che questo debba essere considerato, con buona approssimazione, il valore ottenuto sulla base delle esperienze condotte.

Va comunque ricordato che gli orologi dell'epoca non avevano la precisione richiesta per queste misure ed anche il valore temporale rilevato (circa 11 min) fu un'extrapolazione delle osservazioni effettuate negli anni 1671 - 1673.

Nel riquadro mostrato in questa pagina è mostrato il disegno originale del Rømer per spiegare l'esperienza condotta e la traduzione della descrizione apparsa sulla rivista citata.

- Nel 1849 Fizeau ottenne un dato più preciso, ed a lui, al di là del valore ottenuto, va il merito di aver atteso a misure sulla velocità della luce basandosi su un modello terrestre, calcolando la distanza di due località della Francia (Montmartre e Suresnes) collocate a 8633 m l'una dall'altra.

Fizeau fornì un valore di

$$c = 313\,000 \text{ km/s}$$

- Nel 1850 Foucault, servendosi esclusivamente di un banco ottico, ottenne risultati ancora più precisi, e riuscì a dimostrare in laboratorio che la velocità di propagazione della luce, diminuendo al crescere dell'indice di rifrazione, è minore nell'acqua rispetto alla velocità di propagazione nell'aria, risolvendo in tal modo la secolare disputa a favore della teoria ondulatoria, e fornendo un valore di:

$$c = 298\,000 \text{ km/s}$$

dato assai prossimo a quello reale.

- Michelson infine nel 1887, basandosi su uno schema ottico simile a quello del Foucault, usò come base (22 km) la distanza fra Monte Wilson e Monte Sant'Antonio, in California. Successivamente perfezionò il metodo costruendo un banco ottico lungo un miglio racchiuso in un tubo di ferro in cui era praticato il vuoto, ottenendo la misura della velocità di propagazione della luce nel vuoto con valore di:

$$c = 299\,774 \text{ km/s}$$

Da tali metodi e da altri più sofisticati condotti in seguito, è scaturita la media, accolta nel 1983 dal *Bureau International des Poids et Mesures*, che fornisce per la velocità di propagazione della luce un valore

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

L'esperimento di Michelson segnò anche la fine della teoria classica dell'etere.

Le esperienze di Fizeau, Foucault e Michelson sono complesse ad essere esaurientemente trattate e, fondandosi esclusivamente sulle proprietà dell'ottica, richiederebbero una trattazione a parte per un esauriente discorso; si ritiene pertanto che esulino da

Tabella 1: Lunghezza d'onda e frequenza dei colori fondamentali

Colore	Lunghezza d'onda in nm	Frequenza in THz
infrarosso	> 800	< 375
rosso	810 – 610	375 – 491
arancio	610 – 590	491 – 517
giallo	590 – 560	517 – 535
verde	560 – 500	535 – 600
azzurro	500 – 440	600 – 682
indaco	440 – 420	682 – 714
violetto	420 – 400	714 – 750
ultravioletto	< 400	> 750

questa trattazione e si rimanda per il loro approfondimento a fonti debite.

■ *La teoria elettromagnetica.* Se le esperienze sulla luce avevano condotto a misurarne la velocità e a ricondurne la specificità fisica al tipo ondulatorio, rimaneva ancora da spiegarne la natura. La teoria ondulatoria dava per ammessa una sostanziale analogia con i fenomeni sonori, che le onde cioè si propagassero secondo caratteristiche tipiche di questi, e si fu portati a credere che la luce si propagasse secondo vibrazioni longitudinali, seguendo il comportamento delle onde sonore in un gas.

La successiva scoperta della *polarizzazione*, indusse Fresnel ad ipotizzare che le onde luminose fossero trasversali e non longitudinali, costituite di vibrazioni su un piano perpendicolare alla direzione di propagazione.

La concezione comportava che l'ente in vibrazione in un'onda luminosa non poteva essere una *particella materiale* com'è per le onde elastiche, dal momento che la luce si propaga anche nel vuoto.

Fu allora che si formulò il concetto di *onda elettromagnetica* secondo il quale cioè che vibra è un campo elettromagnetico che non richiede un mezzo materiale per propagarsi.

In modo analogo alle onde sonore possono comunque ammettersi e definirsi la frequenza e la lunghezza d'onda.

La frequenza (ν) di un raggio monocromatico di luce è eguale al numero delle vibrazioni al secondo, ed è l'inverso del tempo che intercorre fra due massimi successivi della vibrazione, quindi anche per la luce si avrà

$$\nu = \frac{1}{T} \tag{1}$$

e la lunghezza d'onda λ rappresenterà lo spazio percorso in un periodo, ossia

$$\lambda = c \cdot T \tag{2}$$

ove c indica la velocità della luce, e dalla equazione 1 si ha

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \tag{3}$$

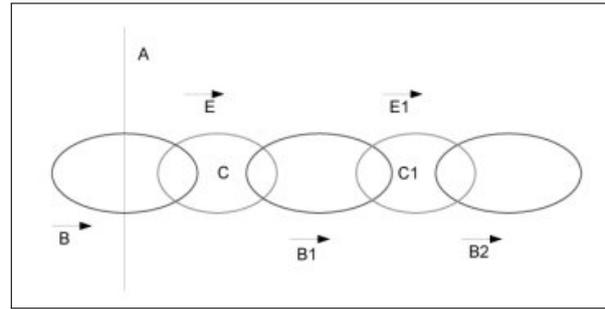
ossia la lunghezza d'onda è inversamente proporzionale alla frequenza.

Altre analogie con l'acustica emersero: a frequenze e lunghezze d'onda diverse si hanno diverse risposte, e le radiazioni luminose di diversa frequenza vengono percepite di diverso colore, cioè il colore di una sorgente luminosa dipende dalla frequenza delle vibrazioni che la costituiscono.

Questa cresce dal rosso al violetto e la lunghezza d'onda (inversamente proporzionale alla frequenza) diminuisce dal rosso al violetto: vedi tabella 1.

Nel raggiungimento di questi risultati fu fondamentale il contributo del fisico J. C. Maxwell.

▼ Propagazione del campo elettromagnetico. Le linee a tratto più scuro indicano la propagazione del campo elettromagnetico, quelle a tratto chiaro i circuiti.



Formulando le equazioni del campo che portano il suo nome, questi aveva infatti rilevato che il campo elettromagnetico si propaga per onde e che (espresso nei termini di Maxwell) “la velocità di propagazione nel vuoto fornisce il rapporto fra unità elettromagnetica ed elettrostatica di carica elettrica, rapporto numerico che coincide con la velocità della luce nel vuoto”.

Ricusando il risultato quale frutto di coincidenza, Maxwell avanzò l'ipotesi che la luce consistesse in rapidissime vibrazioni del campo elettromagnetico e che le vibrazioni luminose non sono più di natura meccanica. Maxwell ne concluse che le vibrazioni elettriche e magnetiche devono essere allora fra loro perpendicolari alla direzione del raggio, e sono quindi trasversali.

I vettori elettrico e magnetico giaceranno di conseguenza su piani fra loro perpendicolari e la direzione di propagazione dell'onda sarà l'intersezione di tali piani. Da qui la trasversalità delle onde elettromagnetiche.

Le equazioni di Maxwell avviavano ad una più completa conoscenza del fenomeno e si prestavano ad essere verificate generando artificialmente onde elettromagnetiche provocando oscillazioni in un circuito: cioè consentì in seguito ad Hertz di dimostrare che le radiazioni elettromagnetiche seguono nel comportamento la radiazione luminosa.

Il fondamentale contributo di Maxwell non risiede tanto nell'aver intuito e dimostrato che le leggi che regolano i fenomeni elettrici e magnetici sono riconducibili a sole quattro equazioni, ma — soprattutto — nel fatto che tramite queste equazioni è possibile definire la struttura del campo elettromagnetico in ogni istante ed in qualsiasi punto dello spazio, consentendo lo studio delle reciproche variazioni delle componenti vettoriali. Una descrizione chiarirà il concetto.

S'immagini un conduttore elettrico che chiameremo *antenna* (\vec{A}) percorso da una corrente alternata ad alta frequenza.

La corrente genererà attorno al conduttore un campo magnetico alternato (\vec{B}) con linee di campo circolari. Un circuito (C) posto in prossimità, subirà l'influenza del campo magnetico variabile e si troverà percorso da una corrente indotta alternata, che a sua volta creerà un campo magnetico alternato (\vec{B}_1), ... e così via dicendo.

Appare chiara la propagazione del campo magnetico, ed appare pure chiaro che i circuiti (C) e (C_1) fungono solo da rivelatori e se ne può fare a meno, dimostrando che il campo elettromagnetico si propaga e che il circuito (C) non serve a fini della propagazione ma assolve solo alla funzione di rivelatore.

L'esperienza permette di dedurre che si ha un trasferimento di energia dall'antenna allo spazio circostante, caratteristica propria dei fenomeni ondulatori, quindi dall'antenna emanano onde elettromagnetiche.

Le equazioni di Maxwell permettono di conoscere la struttura del campo elettromagnetico in qualunque punto dello spazio ed in qualunque istante, e questo ha permesso di verificare che la propagazione delle onde elettromagnetiche non è istantanea, impiegando nel vuoto un certo intervallo di tempo per percorrere una data distanza:

$$t = \frac{l}{c}, \quad (4)$$

ove t esprime il tempo impiegato dall'onda per recarsi dalla sorgente ad un punto distante l , e c la velocità della luce. Dalle equazioni è deducibile il valore della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto, fornendo un valore di

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (5)$$

dove $\epsilon_0 = 8,854\,187\,817\,6 \text{ pF/m}$ è la *permittività* (impropriamente e comunemente chiamata costante dielettrica) del vuoto e $\mu_0 = 400\pi \text{ nH/m}$ la sua permeabilità.

Si deduce che grazie alle equazioni di Maxwell è sufficiente conoscere il campo elettromagnetico in determinate condizioni iniziali per prevedere la sua struttura futura in qualsiasi istante (tempo) ed in qualsiasi punto (spazio).

■ *I quanti di luce.* La teoria di Maxwell fece pensare per qualche decennio che sull'intera questione fosse stata pronunciata la parola fine.

Studi più approfonditi sull'interazione fra radiazione e materia, rivelarono tuttavia alcune inadeguatezze della teoria nei confronti della totalità dei fenomeni: l'emissione del \rightarrow corpo nero non si può spiegare con la continuità dell'onda.

Si pensò allora che la luce non tanto fosse un *continuum*, piuttosto che si manifestasse come un insieme aggregato di singole unità chiamate fotoni, la cui energia E risulta espressa dall'equivalenza

$$E = h\nu \quad (6)$$

ove ν è la frequenza delle radiazioni ed h la costante di Planck: Planck trovò che l'equazione soddisfaceva i dati sperimentali assegnando alla costante il valore $h = 6,6260755 \times 10^{-34} \text{ Js}$.

Nel 1905 Einstein attribuì alla velocità della luce il valore di una costante universale ed introdusse in fisica il concetto di fotone o *quanto di luce*.

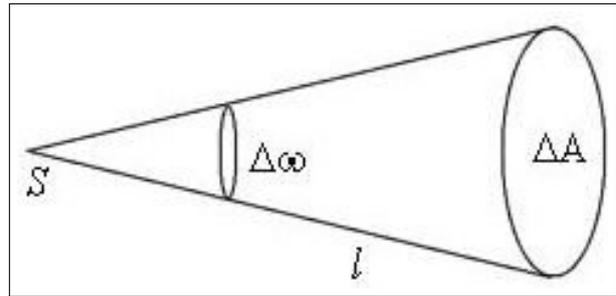
L'introduzione dei quanti di luce sembra a questo punto quasi postulare un ritorno alla teoria corpuscolare di newtoniana memoria, o quantomeno ad una sua rivisitazione, proprio cioè alla teoria che sin dalla prima parte dell'ottocento era stata relegata come non corrispondente agli esperimenti fisici effettuati.

Il discorso è un poco diverso. I fotoni, anche se sembrano comportarsi come particelle non possono essere identificati con i corpuscoli, e comunque i fenomeni che avevano visto vincente la teoria ondulatoria (interferenza, diffrazione e polarizzazione) restano inconciliabili con la teoria corpuscolare.

Quindi mentre l'interferenza e la diffrazione non lasciano dubbi sulla natura ondulatoria della radiazione elettromagnetica, altri fenomeni sembrano indirizzare verso una natura corpuscolare della luce: esperienze in tal senso ineludibili sembrano essere l'effetto \rightarrow fotoelettrico, e l'effetto \rightarrow Compton.

I contributi di de Broglie, Schrödinger, Bohr ed Heisenberg proposero una trattazione rinnovata, anche se sicuramente non ancora definitiva, della teoria ondulatoria. Sulla base di questi studi in ultima analisi e, oggi come oggi, si può affermare che teoria corpuscolare e teoria ondulatoria risultano sì effettivamente incompatibili, ma solo laddove con i termini usati, per l'una come per l'altra, s'intenda strettamente quello che le parole dicono. Se si prescinde, da una parte, a localizzare energeticamente il fotone, e dall'altra a pensare alle onde come vibrazioni di un

▼ Angolo ...



ente continuo, si può anche concludere che le due teorie non tanto vanno tenute nettamente distinte quanto, piuttosto, unificate. Non è poi esatto affermare che la propagazione della luce ha natura ondulatoria anziché corpuscolare: è più corretto ammettere che l'aspetto quantistico e quello ondulatorio possono manifestarsi in diverse condizioni.

■ *Il flusso luminoso.* La misura del flusso è misurata scegliendo un campione che fornisca un'unità di misura come riferimento standard.

Come unità di misura dell'intensità luminosa fu scelta una sorgente ottenuta portando il platino alla temperatura di fusione (1733°C) posto in un particolare dispositivo (corpo nero di Burgess), una provetta di ossido di torio collocata in un crogiolo, anch'esso di ossido di torio, ove si trova il platino a temperatura di fusione.

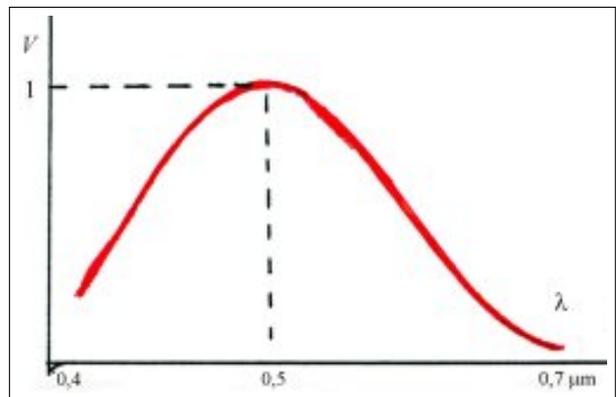
L'intero sistema è chiuso con un coperchio su cui è praticato un foro da 1 cm^2 da cui escono le radiazioni emesse dalle pareti interne della provetta che si trovano alla temperatura di fusione del platino.

La sessantesima parte dell'intensità luminosa della radiazione del corpo nero di Burgess è stata assunta come unità di misura ed è detta *candela* (simbolo: cd), che può allora definirsi come *la sessantesima parte d'intensità luminosa emessa dal corpo nero di Burgess alla temperatura di fusione del platino perpendicolarmente ad una sua superficie di 1 cm^2 .*

Nel disegno presente in questa pagina consideriamo il cono di luce emesso da una sorgente luminosa puntiforme S , d'intensità I , compreso nell'angolo solido $\Delta\omega$. Nell'intervallo di tempo t la sorgente emanerà una quantità di luce:

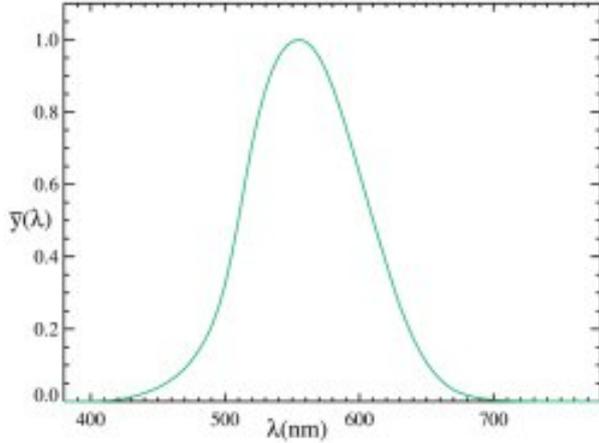
$$Q = \Delta\omega I t \quad (7)$$

La quantità di luce emessa in un secondo dalla sorgente S con vertice nel cono d'angolo solido $\Delta\Omega$ prende il nome di *flusso luminoso* e s'indica generalmente con il simbolo Φ , e si indica



▲ Misurazione dell'intensità luminosa di una sorgente

▼ Sensibilità relativa dell'occhio alle varie lunghezze d'onda.



con:

$$\Phi = I \omega \tag{8}$$

da cui per semplificare s'è omesso Δ .

Nel SI posto $I = 1 \text{ cd}$ e $\omega = 1 \text{ sr}$ (sr = steradiante), si ricava (da questa equivalenza) l'unità di misura del flusso luminoso detta *lumen*, definita come la *quantità di luce emessa in un secondo, entro l'angolo solido di 1 sr, da una sorgente luminosa d'intensità 1 cd* (cioè: $1 \text{ lm} = 1 \text{ cd sr}$).

► *Leggi di Lambert.* Dal momento che non tutte le sorgenti emettono medesima quantità di luce, sorge il problema di misurare l'intensità luminosa della singola sorgente.

L'intensità luminosa è ovviamente proporzionale all'intensità della sorgente, ma, a parità d'intensità, è ovviamente anche in funzione della distanza.

Ponendo uno schermo dinanzi alla sorgente, allontanandolo ed avvicinandolo, si nota che l'intensità aumenta o decresce al variare della distanza: quindi una sorgente d'intensità q produrrà un'illuminazione q volte maggiore o minore di quella prodotta dalla sorgente campione. L'intensità di illuminazione dipende quindi anche dalla distanza della sorgente.

Una sorgente ad una distanza x produce su uno schermo l'illuminazione y . Per ottenere la stessa intensità luminosa adoperando un sistema di quattro sorgenti, ciascuna di eguale valore della prima, dovremo collocarla al doppio della distanza della prima sorgente.

L'esperienza permette di formulare che l'illuminazione prodotta da una sorgente è inversamente proporzionale al quadrato della distanza, per cui se s'indica con I l'intensità di illuminazione prodotta da una sorgente su uno schermo ad una distanza r_1 e con i l'illuminazione prodotta quando lo schermo è alla distanza r_2 , si avrà

$$\frac{I}{i} = \frac{r_2^2}{r_1^2} = r^2 \quad \text{da cui}$$

$$i = I \frac{r_1^2}{r_2^2} \tag{9}$$

L'equivalenza esprime in termini matematici la legge di Lambert, secondo la quale l'intensità d'illuminazione prodotta da una sorgente è inversamente proporzionale al quadrato della distanza da essa.

■ *Effetto fotoelettrico.* Rinvio → fotoelettrico (effetto), fotometria.

■ *Rifrazione, Riflessione, Interferenza, Diffrazione, Polarizzazione.* Rinvio. I lemmi sono trattati alle relative voci.

di 8', apportando quindi una correzione così esprimibile:

Radio onde	10^4	10^0
Micro onde	10^0	10^{-3}
Infrarosso	10^{-3}	10^{-6}
Ultravioletto	10^{-6}	10^{-8}
Radiazione X	10^{-8}	10^{-12}
Radiazione gamma	$< 10^{-12}$	

Tabella 2: Classificazione della radiazione elettromagnetica secondo la lunghezza d'onda espressa in metri

Tale ritardo fu individuato nel 1675 dal danese Ole C. Rømer che conduceva studi sulle eclissi dei satelliti gioviani per cercare di determinare, secondo un'idea di Galileo, la longitudine delle navi nell'oceano.

Servendosi delle effemeridi di Gian Domenico Cassini, Ole notò che queste fornivano valori corretti quando si avevano le quadrature fra Giove e il Sole, ma non nelle congiunzioni od opposizioni presentando uno scarto di 8', apportando quindi una correzione così esprimibile:

$$\Delta_t = \tau_a \cos(\lambda_\odot - \lambda_j)$$

ove $\lambda_\odot - \lambda_j$ indica la differenza di longitudine fra Sole e Giove, e vale 90° o 270° alle quadrature e 0° o 180° alle congiunzioni o opposizioni.

