

Una storia della luce

Gianluca Introzzi

Università di Pavia

Corso di Fondamenti della Fisica

Anno accademico 2017/18

Il mistero della luce

« Io mi era tenuto tanto inhabile a poter penetrare che cosa sia il lume, che mi sarei esibito a stare in carcere in pane e acqua purché io fossi assicurato di conseguire una da me tanto disperata cognizione.»

Galileo Galilei

Cos'è la luce ?

« E' accettato da tutti che la luce consiste, o nell'emissione da una sostanza luminosa di particelle molto minute, che sono effettivamente emesse e continuano a muoversi con la velocità comunemente attribuita alla luce, o nell'eccitazione di un moto ondulatorio, analogo a quello che caratterizza il suono, in un mezzo altamente leggero ed elastico [Etere] che pervade l'universo; tuttavia i giudizi dei filosofi di ogni epoca sono stati largamente divisi sulla preferenza dell'una o dell'altra opinione.»

(Thomas Young – *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts* (1807) p.359)

Parte I

MODELLI CORPUSCOLARI della LUCE nel '600 e '700

Modelli corpuscolari della luce

- Un **modello emissivo o corpuscolare** della luce attribuisce la trasmissione del segnale luminoso **all'emissione di particelle materiali da parte dell'oggetto che irradia**. Il raggio luminoso, **fisicamente esistente**, coincide con la traiettoria di tali particelle.
- Il **processo fisico** che avviene nell'oggetto che irradia è, evidentemente, **emissivo**. Per il **soggetto vedente** si tratta, invece, di un **fenomeno immissivo** (il corpuscolo entra nell'occhio).
- Il **modello della visione** (razionale ma pre-scientifico) di **Epicuro e Lucrezio** costituisce l'**unico antecedente delle moderne teorie corpuscolari** della luce.

Pierre Gassendi

(1592-1655)



Sacerdote, ma anche studioso, filosofo, scienziato.

Si propose di diffondere le idee di Epicuro e altri filosofi antichi, senza tuttavia entrare in contrasto con la dottrina della chiesa cattolica: l'esistenza di Dio, dell'anima e il libero arbitrio non vennero da lui mai messi in discussione.

- Elabora quindi una personale teoria atomistica della materia e del vuoto, che cerca d'integrare astronomia, meccanica e ottica in un coerente progetto empirista.
- Seguendo Epicuro, la visione è descritta come un fenomeno immissivo: l'occhio riceve raggi luminosi composti da atomi (Gassendi), o atomi che formano l'immagine dell'oggetto (Epicuro: "eidola" o "simulacra") che li ha emessi.
- Si occupa anche del meccanismo fisiologico della visione, e dell'inversione dell'immagine che si forma sulla retina: attribuisce erroneamente tale funzione alla retina stessa.⁷

René Descartes

(1596-1650)



- «Descartes fu il più autorevole esponente di un nuovo approccio alla filosofia naturale, la “filosofia meccanica”, che sosteneva che tutti i fenomeni naturali dovevano essere spiegati soltanto con la materia e i suoi movimenti, escludendo ogni riferimento a cause immateriali, come le forze, le forme e le specie della Scolastica.»
(A.E. Shapiro – “*Ottica*”)
- Nel suo libro del 1637 “*Dioptrique*” sintetizzò e approfondì le teorie ottiche di Keplero, dal meccanismo della visione alla molatura di lenti per telescopi. Il suo risultato nuovo più rilevante è la formula della rifrazione, oggi nota come “legge di Snell” perché scoperta da entrambi, in modo indipendente, attorno al 1620.
- Cartesio cercò di spiegare tale legge con l'analogia di una palla che entri in acqua. Ma mentre una palla rallenta, la luce avrebbe dovuto aumentare velocità nel mezzo più denso, per giustificare in tal modo la legge di Snell.

Galileo Galilei

(1564-1642)



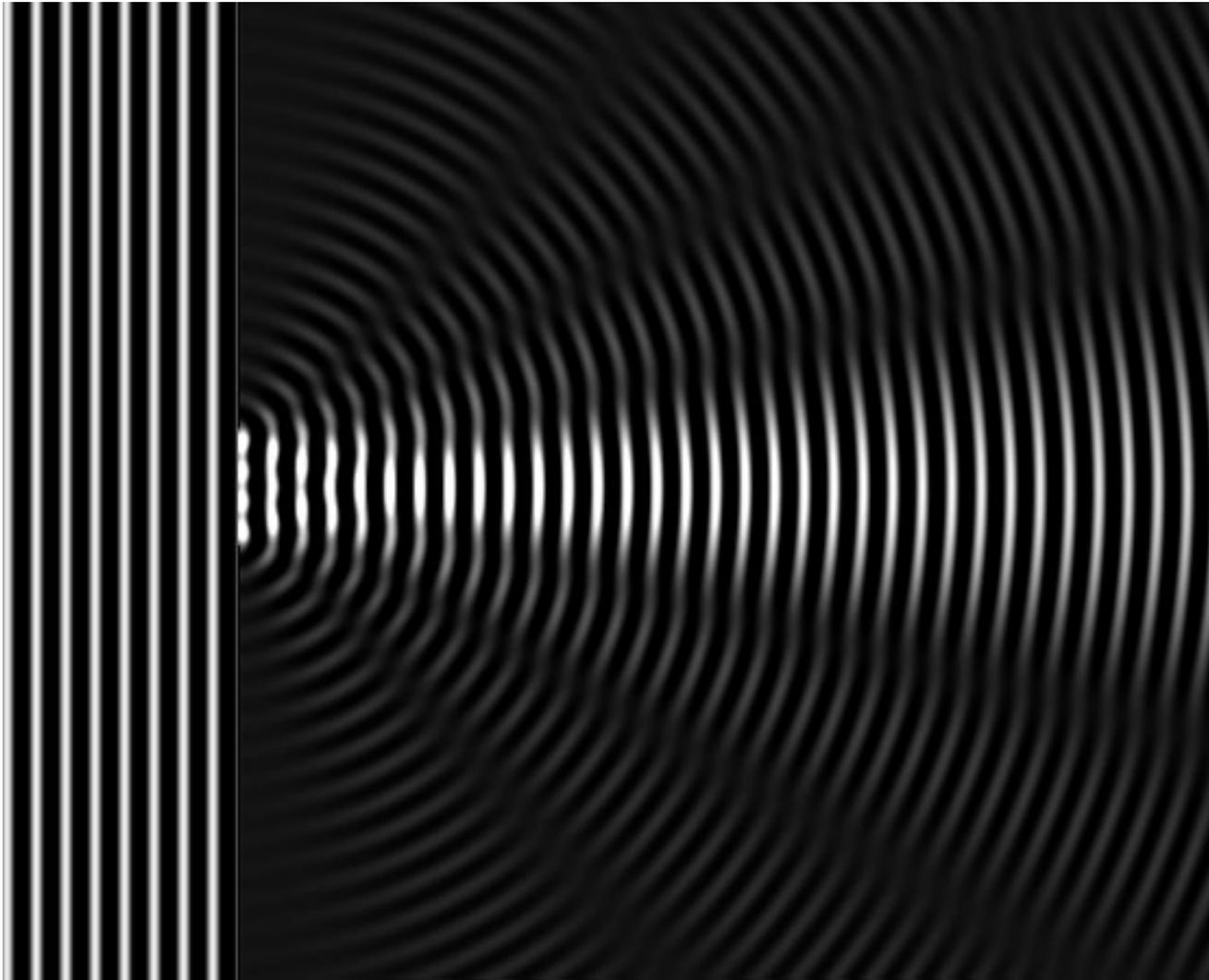
- **Spiegazione corpuscolare e meccanica del calore:** un corpo che noi riteniamo caldo è in realtà soltanto «una moltitudine di corpicelli minimi, in tale e tal modo figurati, mossi con tanta e tanta velocità.»
- Nel **1611** portò a Roma non solo il cannocchiale realizzato nel **1609** ma anche un minerale, **solfo di bario**, allora noto come “**spongia solis**”. Se esposto al Sole e poi portato al buio, il **BaS** emette una luce fredda. Forse la luce, come il calore, era spiegabile come effetto corpuscolare e meccanico... Galileo suggerì che la luce venga prodotta quando una sostanza è ridotta ad **atomi indivisibili**.
- Dalla Via Lattea (da poco osservata col cannocchiale) al più piccolo atomo di luce, **ogni cosa è materiale e**, di conseguenza, **suscettibile di indagine scientifica**.

Francesco Maria Grimaldi (1618-1663)



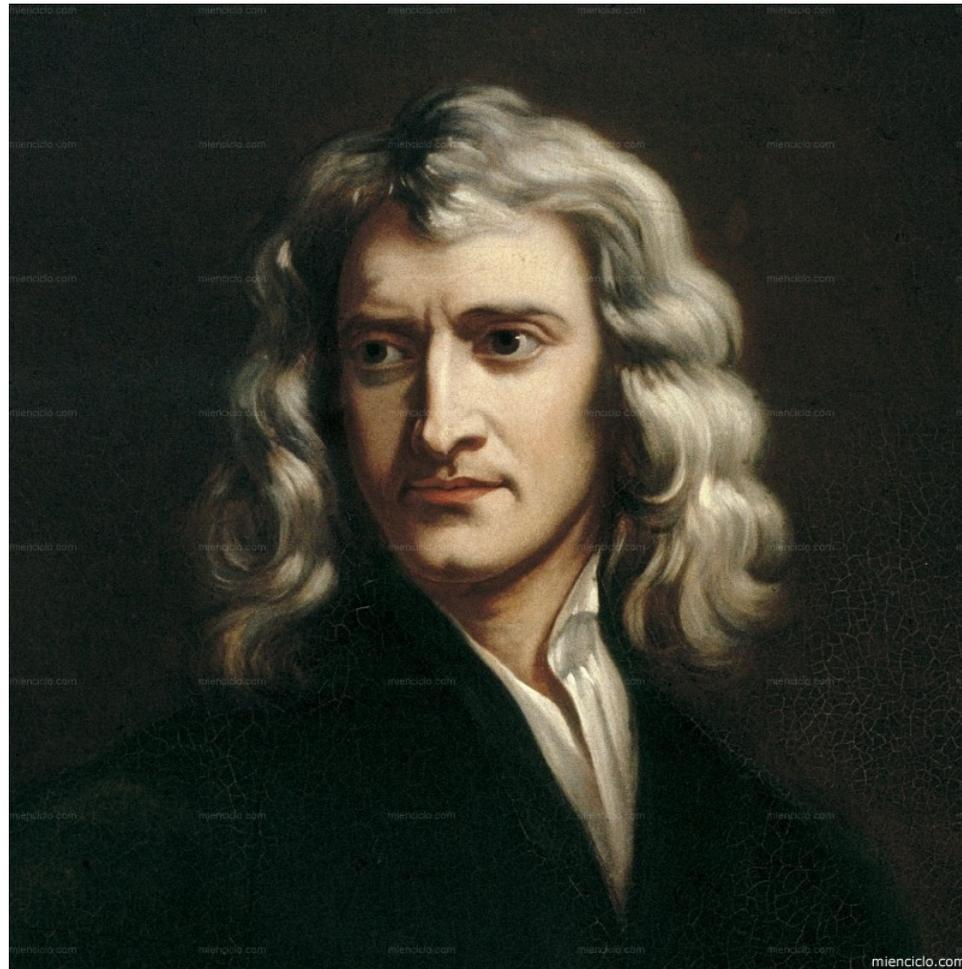
- Fu un gesuita bolognese, fisico e astronomo, la cui fama è legata alla scoperta della **diffrazione della luce**, un quarto modo di propagazione della luce, nuovo rispetto a quelli noti sin dall'antichità: **diretta, riflessa, rifratta**.
- «Questa straordinaria penombra non può in alcun modo essere attribuita ai comuni principî della luce ma a qualche nuova proprietà, in virtù della quale la luce devia dalle linee rette.» (**R. Hooke**, 1675)
- Tentò di spiegare la diffrazione ipotizzando che la **luce** fosse un **fluido corpuscolare** che si **spandeva** o **diffondeva** quando incontrava un ostacolo (aggirandolo).
Il suo trattato **“Physico-mathesis de lumine”** fu pubblicato nel **1665**, due anni dopo la morte dell'autore. La sua opera, che ebbe scarsa risonanza, era tuttavia conosciuta da **Newton**, e probabilmente nota a **Hooke**.¹³

Diffrazione di un'onda piana



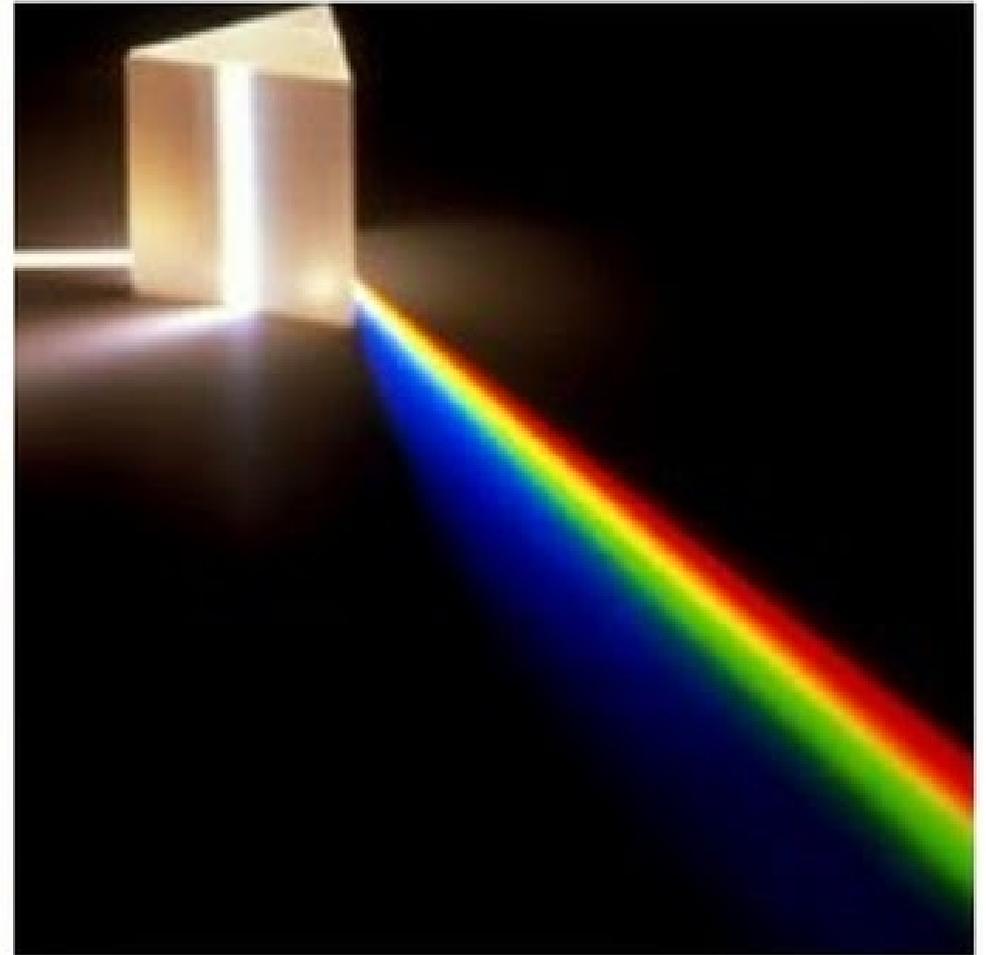
Isaac Newton

(1642-1727)

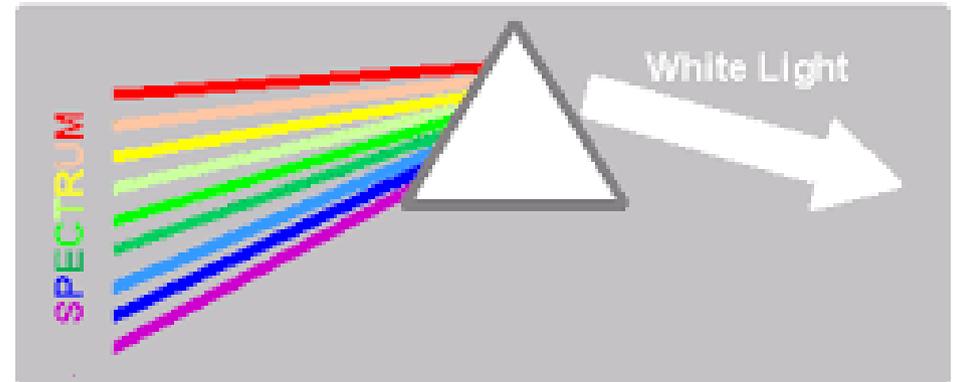
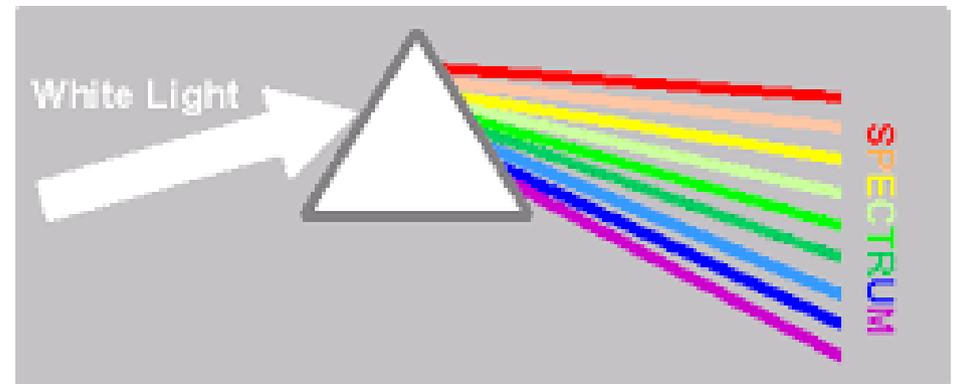
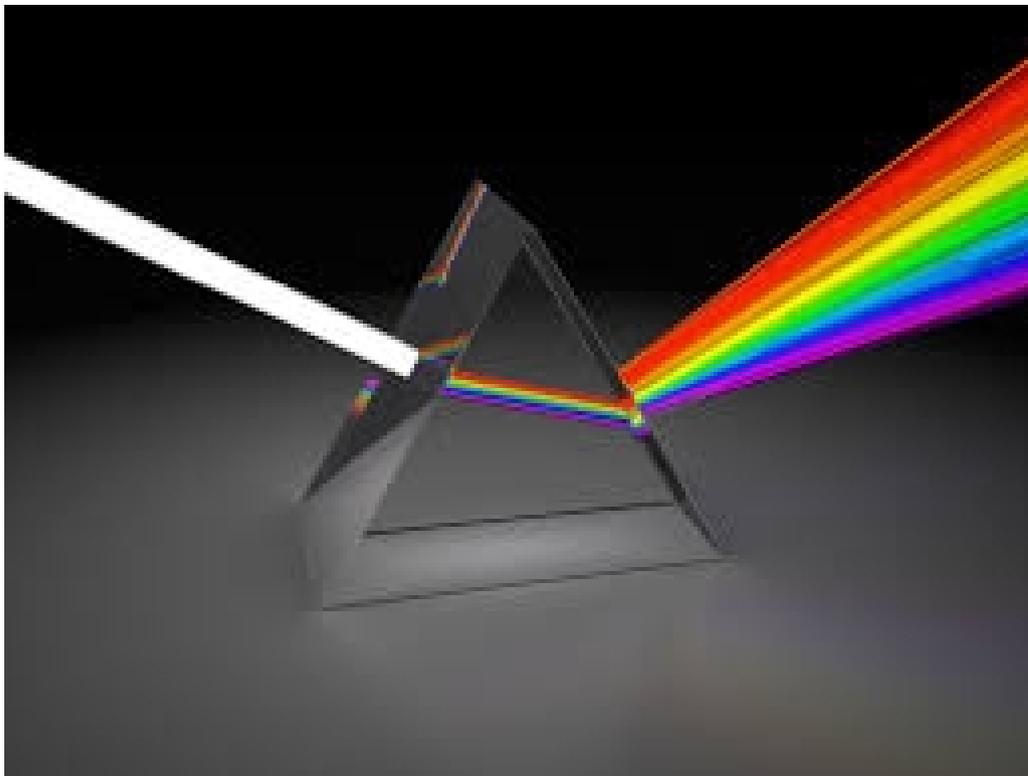


- I primi e famosi esperimenti di Newton con la luce sono del 1666: scomposizione della luce bianca (semplice e pura, secondo una tradizione letteraria e religiosa vecchia di secoli) mediante un prisma nei 7 colori primari (violetto, indaco, blu, verde, giallo, arancio, rosso). Quindi la ricomposizione, mediante un secondo prisma, dello spettro colorato a formare luce bianca.
- Newton credeva che i raggi di luce fossero costituiti da particelle o “corpuscoli”, «corpi piccolissimi emessi da sostanze luminose.» (“*Hypothesis of light*”, 1675). Era convinto che una teoria emissiva spiegasse il fenomeno: la diversa traiettoria dei raggi colorati nel prisma (“dispersione cromatica”, minima per il rosso e massima per il violetto) dipendeva secondo lui dalle dimensioni dei corpuscoli, crescenti dal violetto al rosso. I corpuscoli più piccoli venivano maggiormente deflessi.

Newton in “laboratorio”



L'esperienza del prisma di Newton



- Nei “*Principia*” del 1687 Newton introdusse (**Libro I, sez. XIV**) una derivazione delle leggi della rifrazione secondo un modello che prevedeva corpuscoli e forze agenti su di essi. Quindi non solo la luce era materiale, ma le sue leggi del moto non differivano da quelle che Newton aveva enunciato in Meccanica. La dinamica della luce era identica a quella dei pianeti...
- L' “*Opticks*” di Newton venne pubblicato nel 1704, quasi 40 anni dopo i suoi primi esperimenti di ottica. Tratta di raggi luminosi e del colore, di riflessione e rifrazione, di lamine sottili (“anelli di Hooke”) e spesse (“anelli di Newton”), e del fenomeno diffrattivo. L'atteggiamento di Newton circa la natura della luce si fa ora cauto e reticente. Nel testo principale non menziona mai il modello emissivo di forze e corpuscoli del **Libro I** dei “*Principia*”.

- Solo nella parte aggiunta di 31 questioni (non basate su fatti sperimentali) affronta più volte il problema, sia difendendo la tesi corpuscolare, sia cercando di screditare quella ondulatoria.
Come mai questa strana dicotomia ?
- Le carte inedite di Newton rivelano che nei primi anni del '700 aveva sviluppato un modello a corpuscoli e forze per spiegare la diffrazione, facendo anche calcoli accurati.«Dopo aver completato questa ricerca, eseguì un nuovo esperimento, i cui risultati confutarono in maniera definitiva il modello basato su forze e corpuscoli. Quando diede alle stampe l'Opticks, Newton la rivide eliminando i risultati che erano stati ottenuti con il modello corpuscoli-forze.» (A.E. Shapiro – “*Ottica*”)
- Newton era quindi consapevole del fallimento della teoria emissiva da lui propugnata nei “*Principia*”.

Proprietà della luce - 1

CORPUSCOLARI

Riflessione

Rifrazione

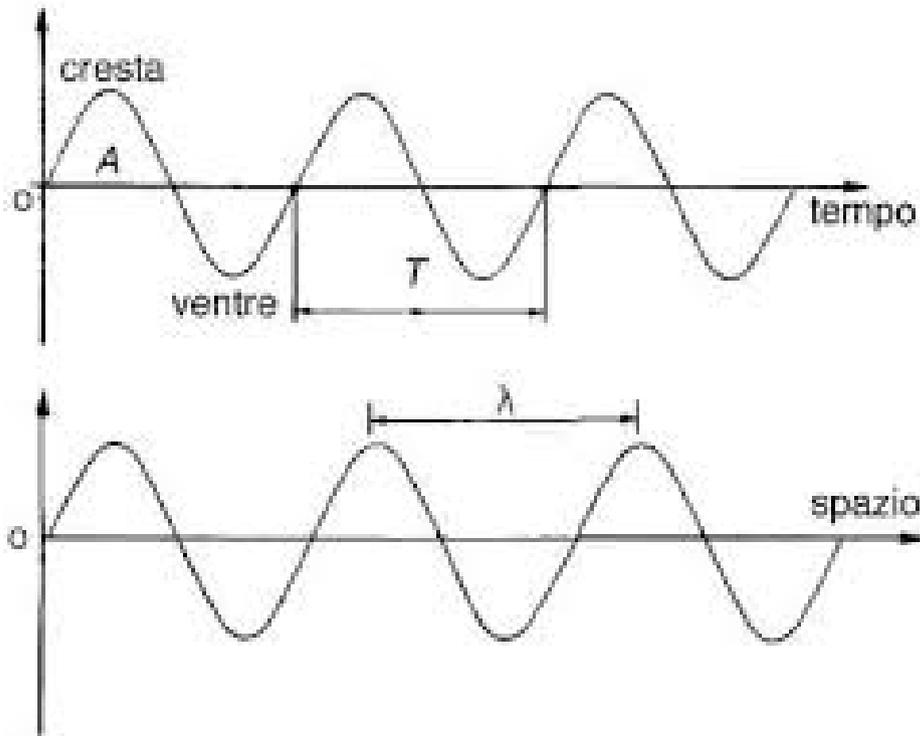
Parte II

TEORIE ONDULATORIE della LUCE nel '600 e '700

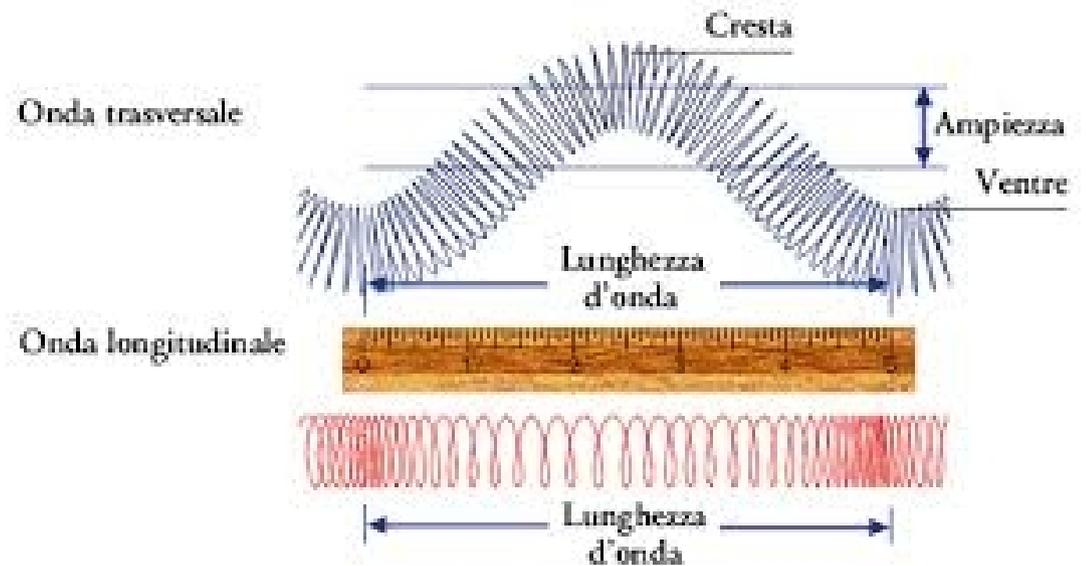
Fenomeni luminosi ondulatori

- Una **teoria ondulatoria** descrive la propagazione, a velocità finita, di uno **stato fisico** (di moto o di pressione) attraverso un mezzo circostante, **senza alcun trasporto di materia**. Ogni fenomeno ondulat. è caratterizzato da:
 - 1) **fronte d'onda** (**fisico**: regione del moto del fluido);
 - 2) **raggio di propagazione** (**linea geometrica** perpendicolare in punto ogni al fronte d'onda);
 - 3) **periodicità spaziale e temporale** del fenomeno.
- **Cartesio**, con l'ipotesi meccanicistica della **sola azione per contatto**, **rese possibile** lo sviluppo di **una teoria ondulatoria della luce**. **Tutto lo spazio** deve essere **permeato da materia** (***res extensa***) e, anche ove ci appaia vuoto, **deve** comunque **essere riempito** (***continuum***) da **una sostanza** (l'**etere**, fluido rarefatto, elastico e privo di massa) **in grado di trasmettere l'azione a distanza**.

Onde fisiche

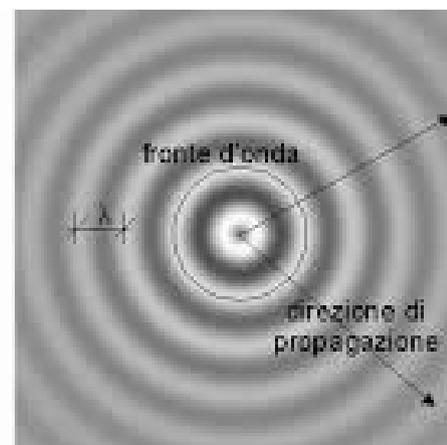
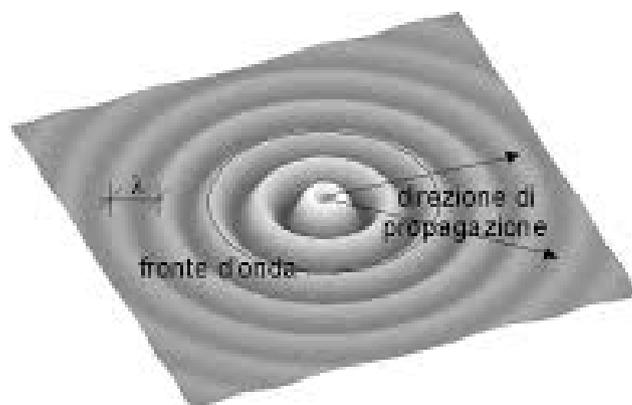
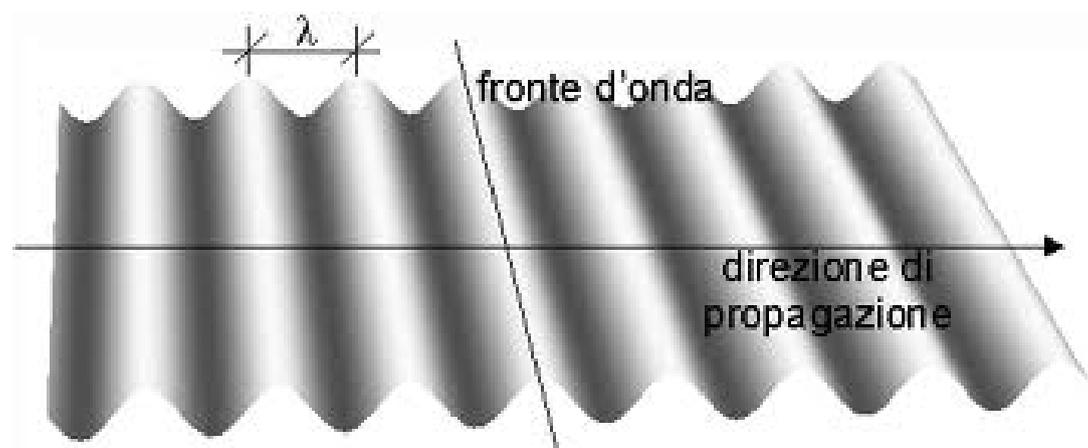


Periodo T
Lunghezza d'onda λ



Onda trasversale
Onda longitudinale

Onde longitudinali e circolari



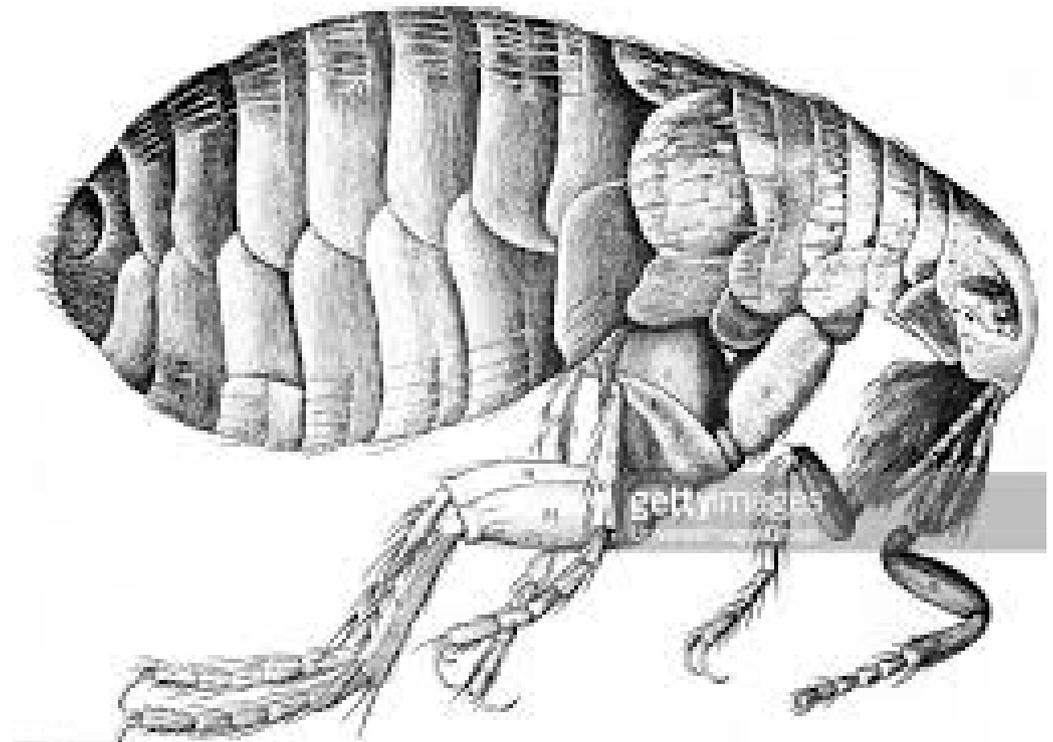
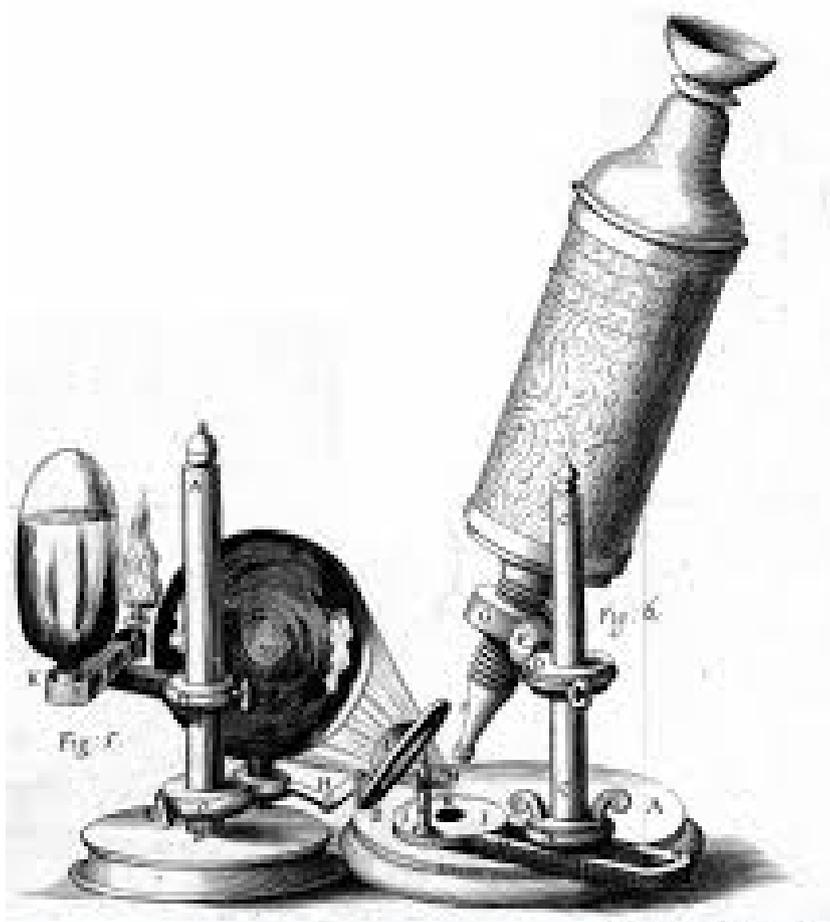
Robert Hooke

(1635-1703)

«Hooke era morto nel marzo del 1703 e Newton, il quale sostanzialmente si era tenuto alla larga dalla Royal Society finché c'era stato d'attorno Hooke, che praticamente l'aveva creata, fu eletto presidente nel novembre di quell'anno... Newton diresse la Royal per i due successivi decenni con la sua consueta meticolosa attenzione per i particolari. ... Una delle operazioni cui dovette sovrintendere, nel 1710, fu il trasferimento dagli angusti locali presso il Gresham College agli edifici più spaziosi di Crane Court. ... C'erano molti ritratti da trasportare ... e della cosa si occupò l'ossessivamente pignolo Sir Isaac Newton. L'unico che andò perduto, e non si ritrovò mai più, fu quello di Hooke: non ci è pervenuto nessun suo ritratto. Se Newton giunse fino a questo punto per cercare di sminuire il ruolo di Hooke nella storia, questi deve essere stato davvero uno scienziato di prima grandezza.»

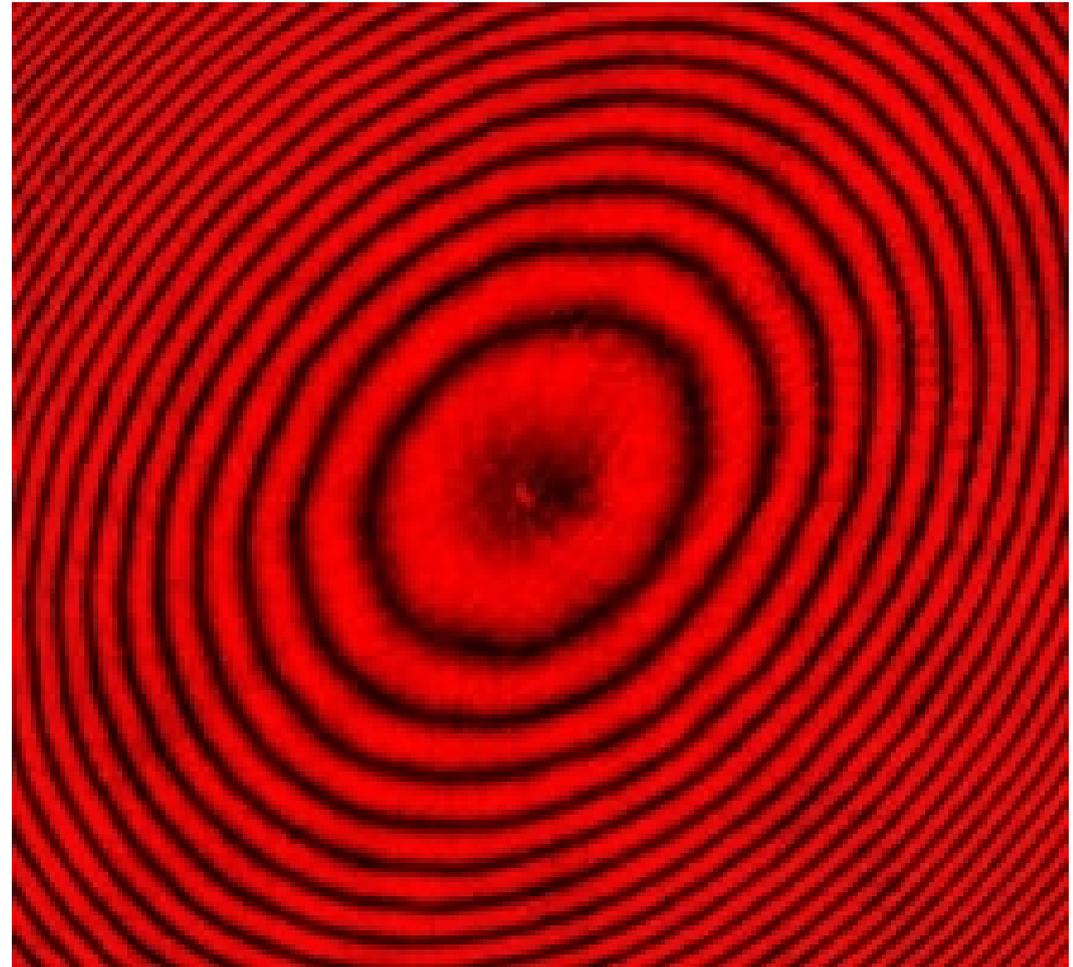
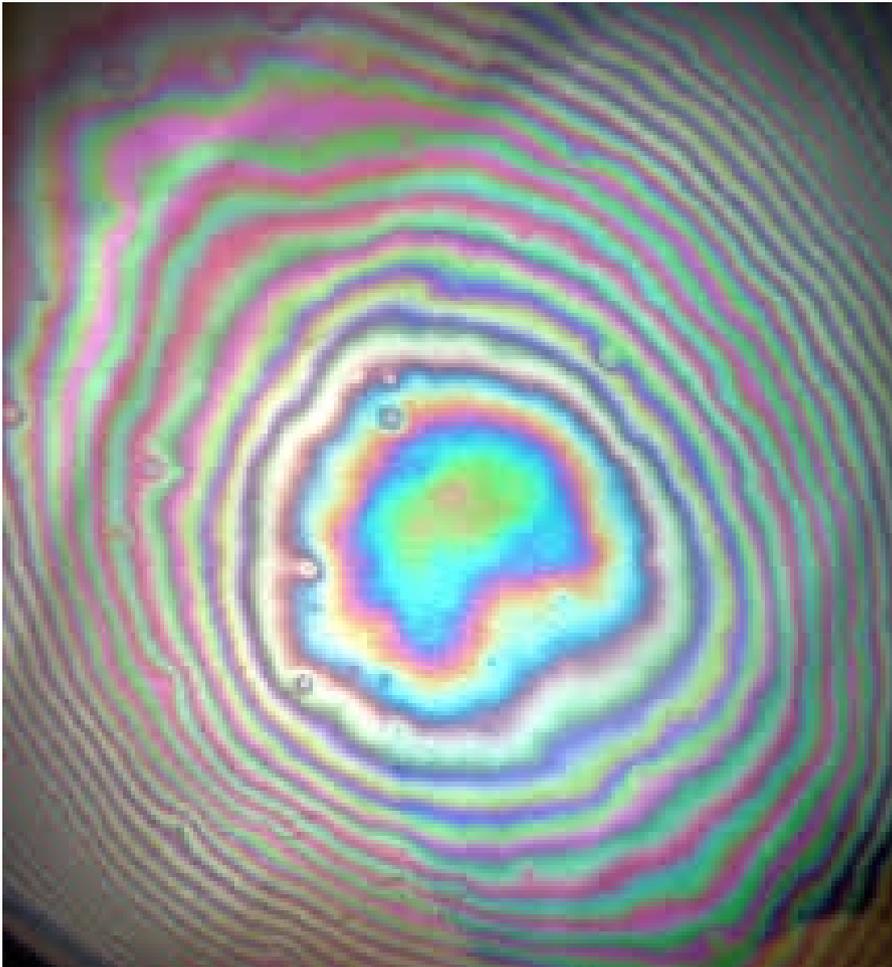
(J. Gribbin – “L'avventura della scienza moderna”)

Microscopio e disegno di una pulce

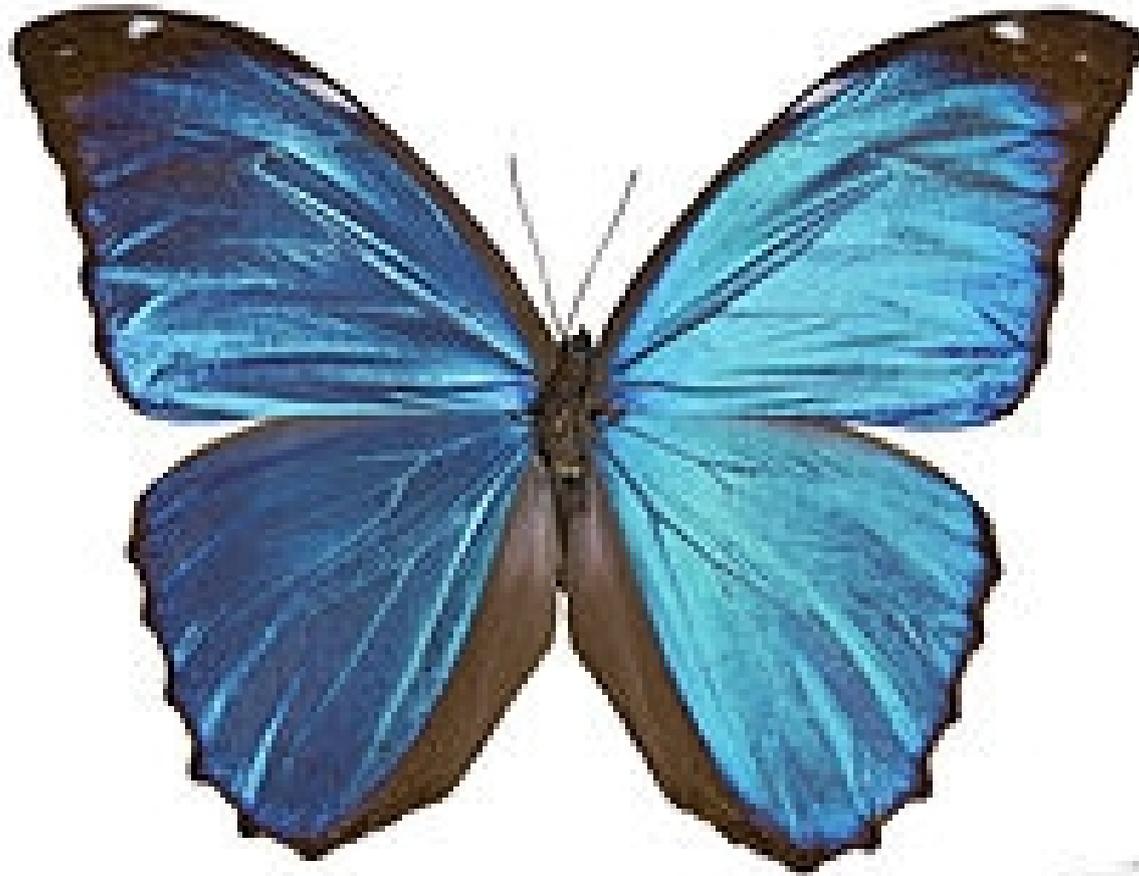


- Il suo **trattato di microscopia** animale, vegetale e minerale del **1667**, “**Micrographia**” comprende parti dedicate alla **luce e al colore**.
- Introdusse una **teoria meccanicista ma non ondulatoria** (raggi di propagazione obliqui) per spiegare la formazione del **colore per diffrazione**.
- Lo studio delle **lamine sottili** (di mica, vetro, bolle di sapone o ali di farfalle) lo portò alla scoperta degli “**anelli di Hooke**” e all'uso di una **teoria ondulatoria per spiegarne i colori**. Comprese inoltre che in tal caso i colori **non** erano **dovuti a rifrazione, ma** a un altro tipo di fenomeno (ora noto come **interferenza**). Applicò infine la **teoria ondulatoria** allo studio del **colore dei corpi**.
- Nel **1675** pubblicò anche un **trattato sulla diffrazione**, senza tuttavia arrivare alla sua comprensione fisica.

Anelli di Hooke



Colori delle ali di farfalla (interferenza e nanocristalli fotonici)

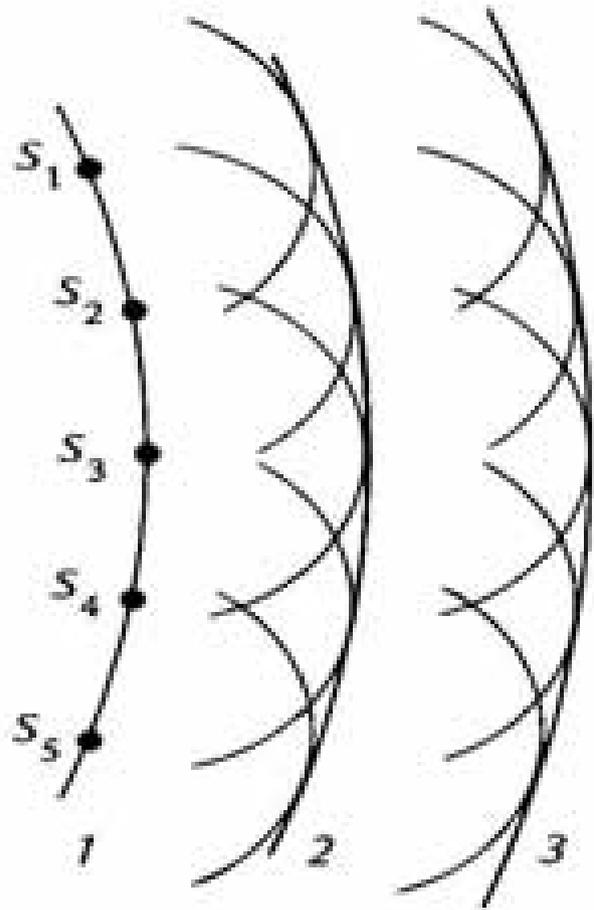


Christiaan Huygens (1629-1695)



- Nel “*Traité de la lumière*” (scritto nel 1678 ma pubblicato nel 1690), formulò in modo chiaro e rigoroso i concetti di “raggio di propagazione” e di “fronte d'onda”, oltre a un risultato fondamentale per la teoria ondulatoria, noto come “principio di Huygens”: ogni elemento di un fronte d'onda si può considerare formalmente come una sorgente secondaria di onde sferiche.
- Il suo approccio alla teoria della luce, compiutamente cinematico e meccanicista, si basa su tre assunzioni:
 - 1) velocità finita della luce (O.C. Rømer, 1676);
 - 2) che l'etere fosse formato da microsferre elastiche;
 - 3) che ciascun punto di un corpo luminoso vibrasse e inviasse onde - o piuttosto impulsi, poiché negava la periodicità della luce - attraverso l'etere.

Principio di Huygens - Birifrangenza



- Huygens spiegò con il suo modello ondulatorio la riflessione e rifrazione, spiegabili anche nel contesto di una teoria corpuscolare. Annunciò la scoperta di un nuovo fenomeno: la polarizzazione della luce. Non si occupò invece degli altri campi allora noti dell'ottica: il colore, la diffrazione, le lamine sottili e spesse.
- Il suo risultato scientifico più notevole fu la comprensione della birifrangenza (nota dal 1669) prodotta da un cristallo raro, lo spato d'Islanda. Tale fenomeno, non spiegabile mediante una teoria corpuscolare, risultò cruciale per la diffusione del modello ondulatorio.
- «Lo sforzo attuato da Newton per screditare la spiegazione di Huygens della doppia rifrazione ... rende evidente la consapevolezza della sua importanza.»

(A.E. Shapiro – “Ottica”)

Proprietà della luce - 2

ONDULATORIE

Riflessione

Rifrazione

Birifrangenza

CORPUSCOLARI

Riflessione

Rifrazione

Leonhard Euler

(1707-1783)



- E' considerato il più importante matematico dell'Illuminismo, e si occupò di molti problemi di fisica matematica. Nel 1746 scrisse “**Nuova teoria della luce e del colore**”, tra i pochissimi testi del '700 a sostenere la **teoria ondulatoria della luce**.
- Confutò innanzi tutto **la prevalente concezione corpuscolare newtoniana**, in modo più sistematico di quanto fatto fino a quel momento. Le sue obiezioni:
 - 1) **manca di una spiegazione per la birifrangenza;**
 - 2) **la continua emissione di corpuscoli dovrebbe portare all'esaurimento della sorgente luminosa (Sole);**
 - 3) **se la luce è formata da corpuscoli materiali, cosa accade quando due raggi opposti si scontrano ?**
 - 4) **come possono esserci dei corpi solidi trasparenti ? Sono dotati di “fori” per lasciar passare i corpuscoli ?**

- Nonostante l'anatema di Newton: «Giammai s'è vista la luce seguire vie tortuose o inflettersi nell'ombra [come il suono]», utilizzò l'analogia tra suono e luce: gli oggetti luminosi “vibrano”, e l'etere trasporta queste vibrazioni all'occhio come l'aria trasporta il suono all'orecchio. Riteneva erroneamente - come Huygens prima di lui - che la luce fosse dovuta a onde longitudinali (di rarefazione e compressione), come quelle sonore.
- Tra il 1760 e il 1762 scrisse una serie di lettere d'argomento scientifico, poi pubblicate come “**Lettere a una principessa tedesca**”. Il testo ebbe 36 edizioni in 9 lingue. Vi si legge: «sembra così del tutto sicuro che la luce sia, rispetto all'etere, la stessa cosa che è il suono relativamente all'aria» e che «il sole dovrebbe essere simile a una campana che suonasse senza interruzione.»

Parte III

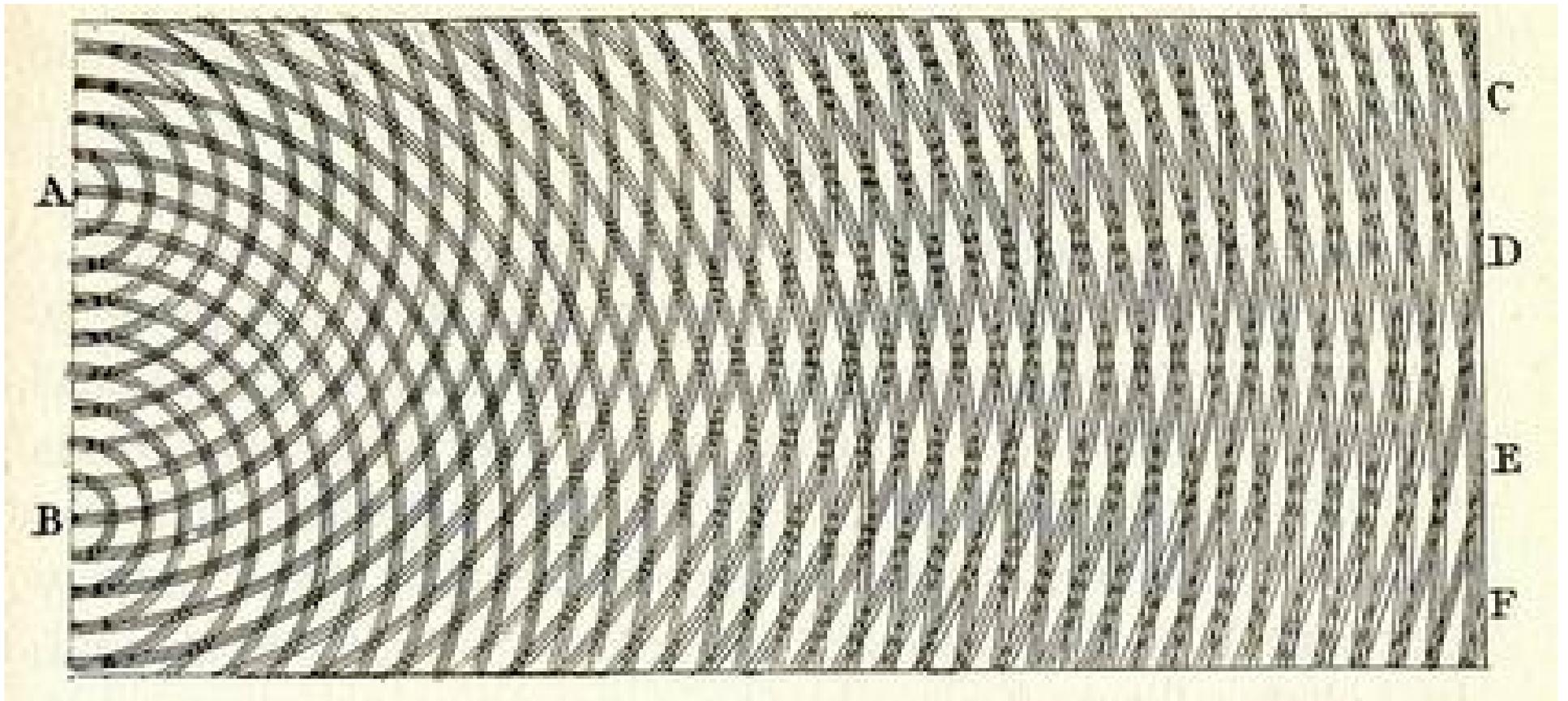
TEORIE ONDULATORIE della LUCE nell'800

Thomas Young (1773 -1829)

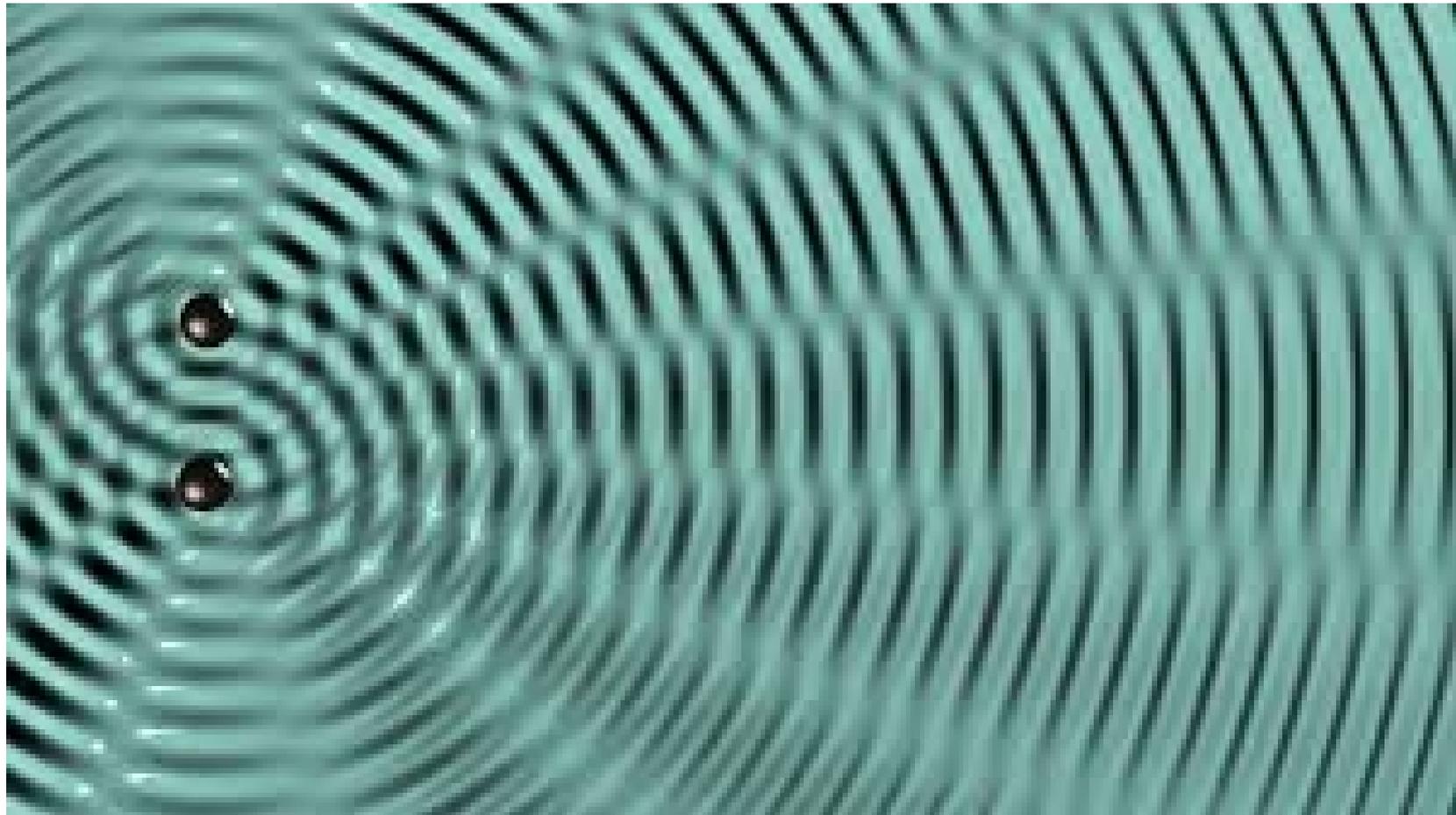


- **Genio precoce** (legge a 2 anni); **linguista** che parla molte lingue antiche e moderne; **egittologo** (stele di Rosetta, 1819); **medico e fisiologo**:
 - 1) meccanismo dell'occhio per la **messa a fuoco**;
 - 2) spiegazione dell'**astigmatismo** e del **daltonismo**;
 - 3) **visione dei colori** dovuta a **3 recettori** nell'occhio (**coni**) sensibili ai **3 colori primari** (ora: **rosso**, **verde**, **blu**)
- Come fisico studia: **dimensione delle molecole**, **teoria dell'elasticità** (“modulo di Y.”), **tensione superficiale**.
Influenzato da Eulero, sostiene la **teoria ondulatoria della luce** e l'esistenza dell'**etere luminifero**: «Quando un corpo diventa luminoso, vengono eccitate delle ondulazioni in questo etere e le diverse frequenze di vibrazione corrispondono alle sensazioni dei diversi colori percepiti dalla retina dell'occhio.» (**S. Boffi**, 1999)
Usando dati di Newton, associa i colori alle lunghezze d'onda dello spettro: $\lambda_{\text{viola}} = 440 \text{ nm}$; $\lambda_{\text{rosso}} = 650 \text{ nm}$. 41

Disegno originale di T. Young

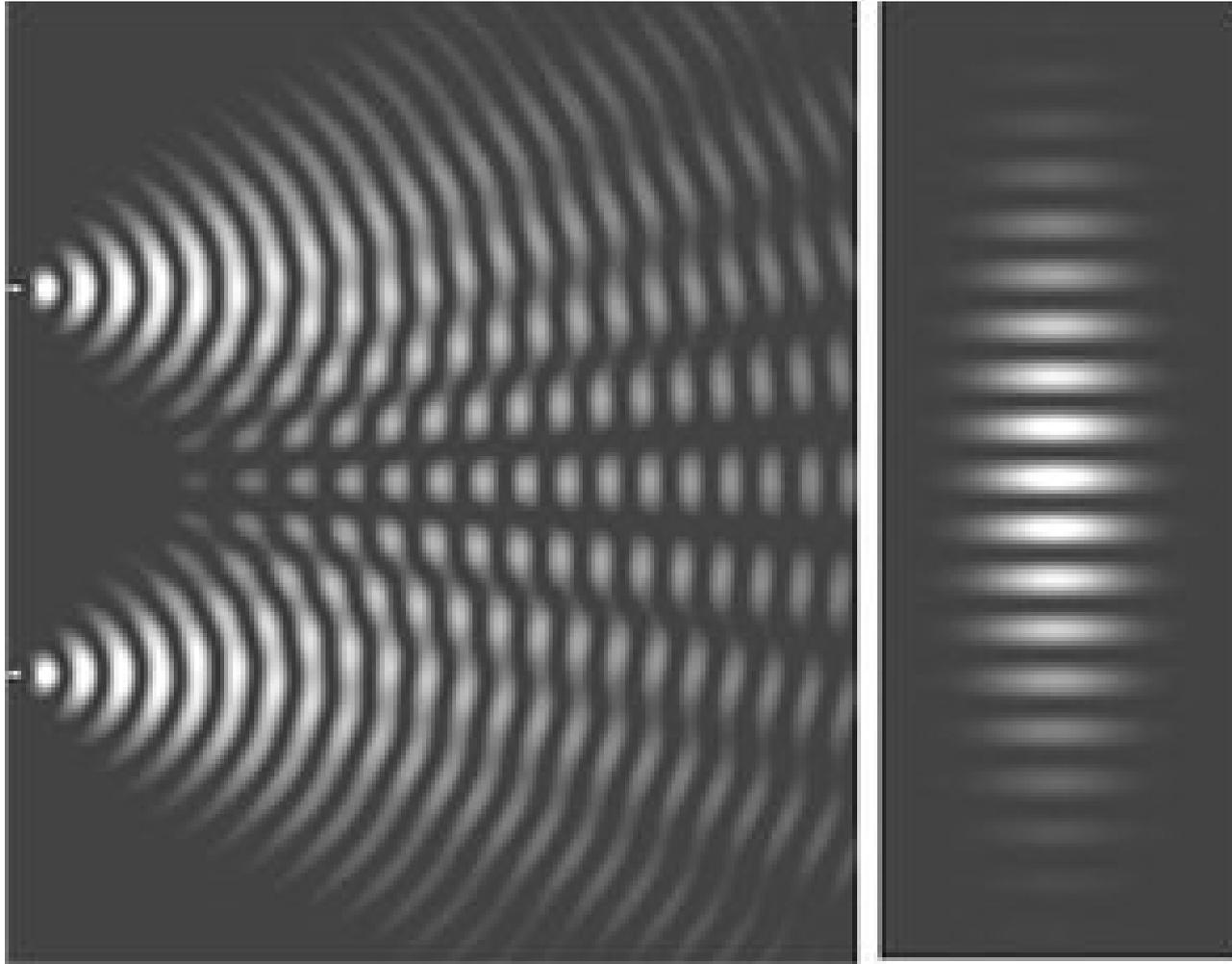


Due oscillatori nell'acqua

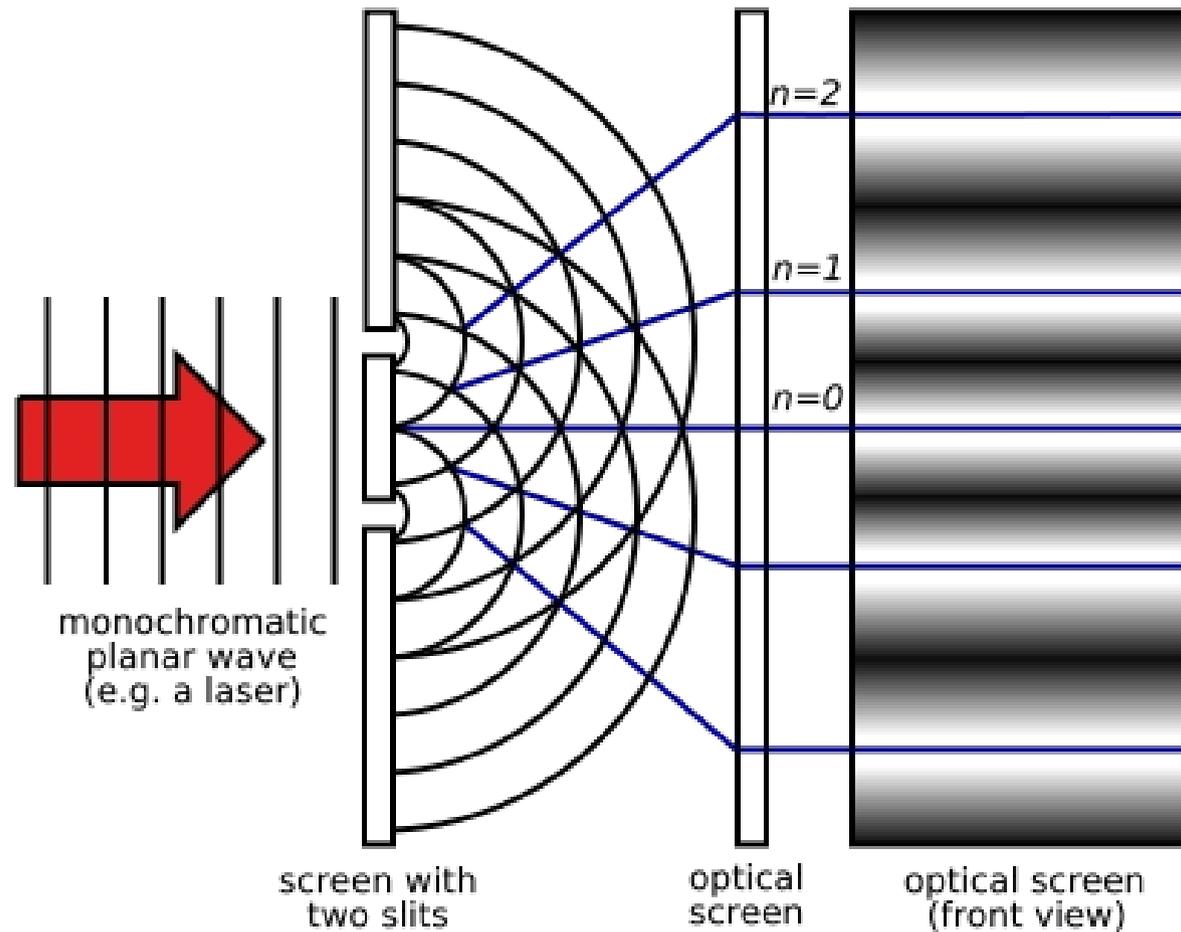


- Dopo studi ed esperimenti d'ottica fatti quando era studente a Cambridge, Young tiene nel 1801 alla Royal Society la conferenza “*On the Theory of Light and Colors*”. Rende nota la sua idea fondamentale: l'interferenza delle onde luminose (analoga a quella delle onde circolari su uno specchio d'acqua). Usa tale fenomeno per spiegare gli “anelli di Hooke”.
- L'interferenza risulta ovvia nel contesto di una teoria ondulatoria della luce (Huygens), ma impossibile da spiegare secondo un modello corpuscolare (Newton).
- Mediante esperimenti con una doppia fenditura, terminati entro il 1804, fornisce evidenza sperimentale dell'interferenza della luce.
- Nel 1817 suggerì che le onde luminose non fossero longitudinali come quelle sonore (vedi: Huygens, Eulero), ma trasversali al raggio di propagazione.

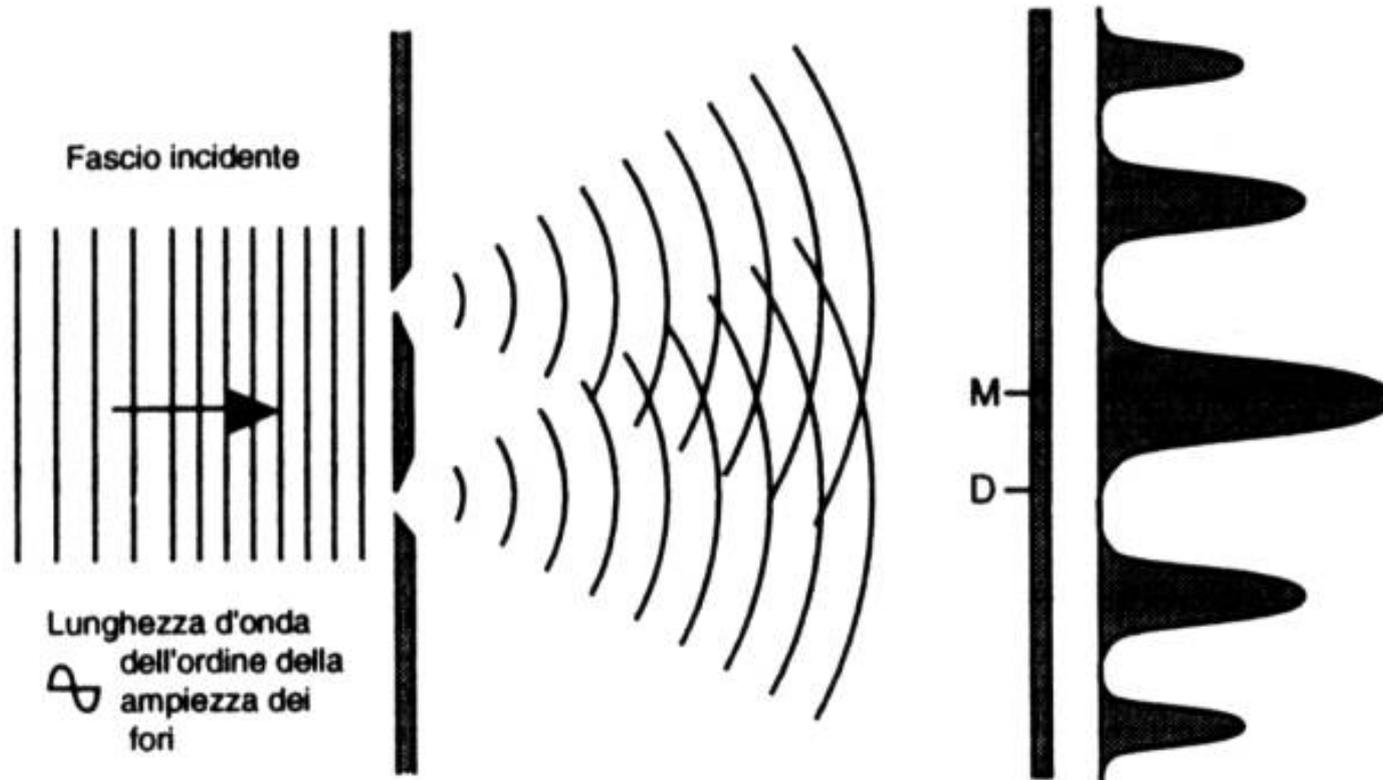
Ricostruzione d'interferenza luminosa



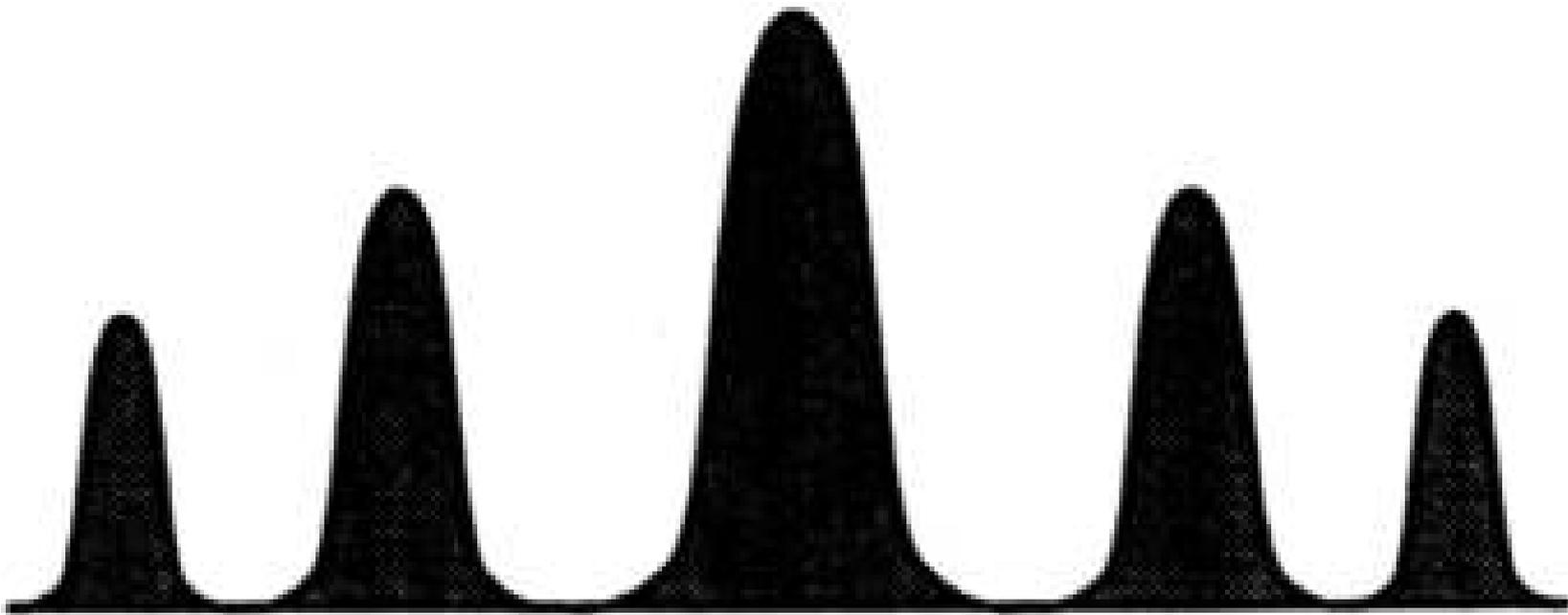
Spiegazione dell'interferenza delle onde



Intensità dei picchi d'interferenza



Intensità dei picchi d'interferenza



Proprietà della luce - 3

ONDULATORIE

Riflessione

Rifrazione

Birifrangenza

Interferenza

CORPUSCOLARI

Riflessione

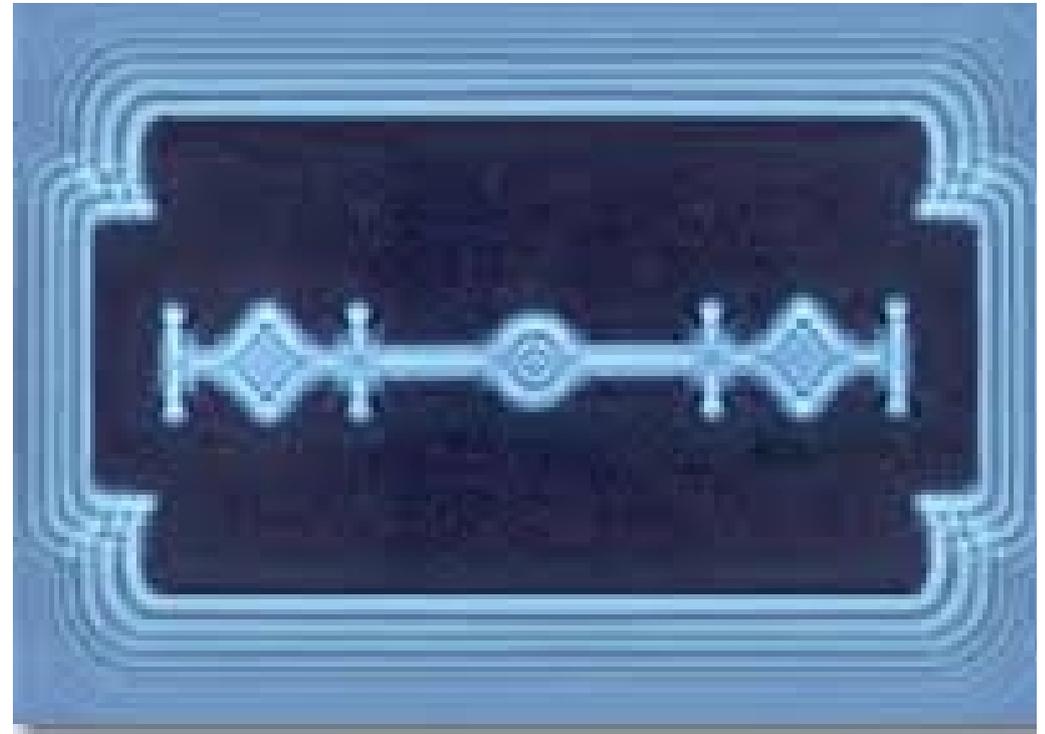
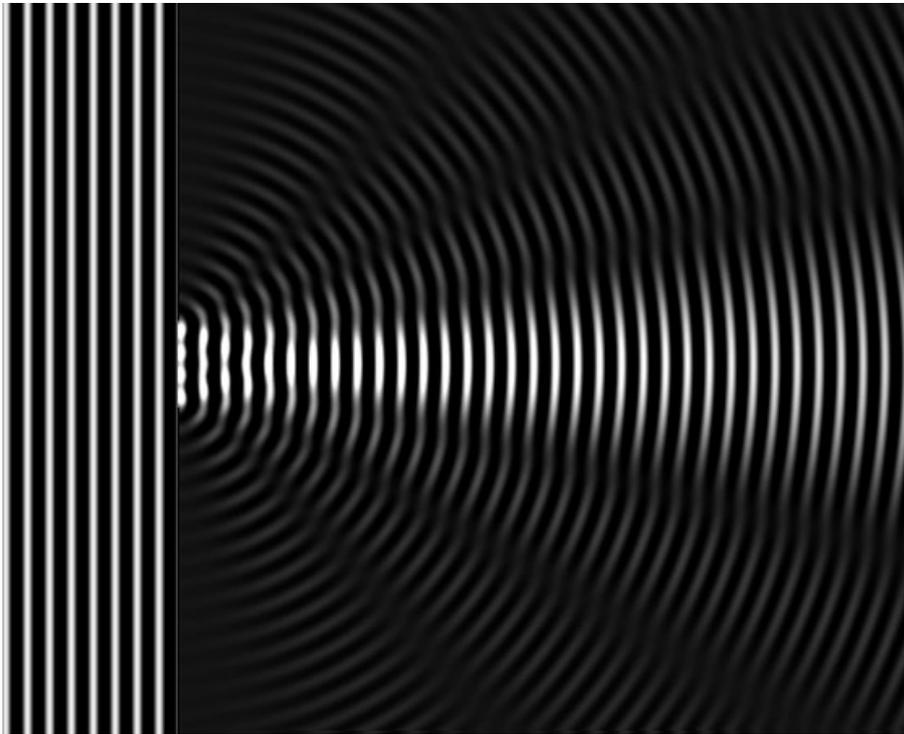
Rifrazione

Augustin Fresnel (1788-1827)

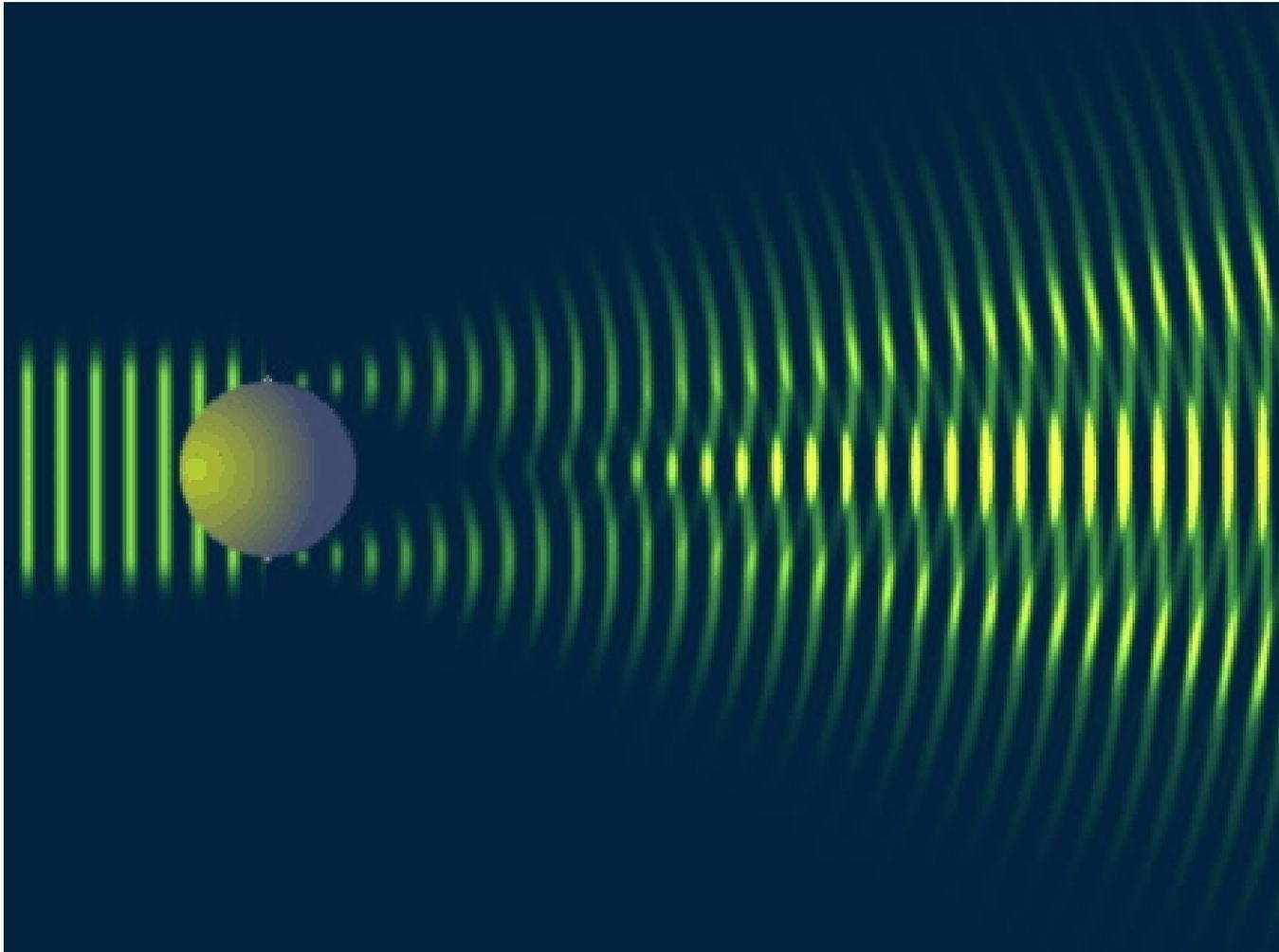


- **Ingegnere civile** di professione, si occupa d'ottica per hobby e **pare non abbia letto Huygens, Eulero, Young. Arriva alla formulazione ondulatoria, partendo dalla diffrazione da singola fenditura (Grimaldi) e da quella dovuta a una lama o un disco opaco, grazie alla sua eccellente preparazione matematica.**
- Nel **1817** l'**Académie française** mise in palio **un premio** per il miglior **saggio teorico sulla diffrazione**. Vinse **Fresnel** nel **1818**, nonostante i tre esperti (**P.-S. Laplace, S.-D. Poisson, J.-B. Biot**) fossero **newtoniani convinti**.
- **Poisson** aveva calcolato che, **secondo Fresnel**, la **zona dietro a un piccolo disco opaco illuminato frontalmente dovesse risultare illuminata**. La giuria commissionò l'**esperimento** a **F. Arago**, che concluse: **«l'osservazione ha confermato perfettamente il calcolo»**.

Diffrazione da fenditura e da lama



Ricostruzione della “macchia di Fresnel”



Proprietà della luce - 4

ONDULATORIE

Riflessione

Rifrazione

Birifrangenza

Interferenza

Diffrazione

CORPUSCOLARI

Riflessione

Rifrazione

Léon Foucault (1819-1868)



- Più conosciuto come realizzatore del famoso pendolo per la dimostrazione della rotazione della Terra, Foucault fece importanti misure della velocità della luce.
- Nel 1850 riuscì a realizzare per primo l'*experimentum crucis* per discriminare tra la teoria corpuscolare o quella ondulatoria della luce. Esse fornivano infatti predizioni opposte per la velocità della luce in aria o in acqua:
 - 1) ondulatoria: $V_{\text{aria}} > V_{\text{acqua}}$
 - 2) corpuscolare: $V_{\text{acqua}} > V_{\text{aria}}$
- Sfruttando la rapida rotazione di uno specchio, poté misurare le due velocità della luce, determinando che $V_{\text{aria}} > V_{\text{acqua}}$. In tal modo, «Foucault piantò l'ultimo chiodo nella bara della teoria corpuscolare di Newton» (J. Gribbin – “L'avventura della scienza moderna”)

Proprietà della luce - 5

ONDULATORIE

Riflessione

Rifrazione

Birifrangenza

Interferenza

Diffrazione

Velocità aria/acqua

CORPUSCOLARI

Riflessione

Rifrazione

James Clerk Maxwell

(1831 -1879)



- Matematico e fisico, diede contributi notevoli in vari campi della fisica:
 - 1) spiegò la natura degli anelli di Saturno (1859);
 - 2) teoria cinetica dei gas: indipendentemente da L. Boltzmann, trovò nel 1867 la distribuzione della velocità delle molecole di un gas;
 - 3) riprendendo gli studi di Young sui colori, identificò correttamente i 3 colori primari o tinte (rosso, verde, blu). Nel 1861 fece realizzare la prima fotografia a colori, come sovrapposizione di 3 foto in B/N scattate ciascuna con un filtro colorato diverso (R, V, B).
- Ma la più importante scoperta di Maxwell è legata all'elettromagnetismo. Egli unificò i lavori sull'elettricità e il magnetismo di tutti i suoi predecessori – C.A. de Coulomb (1785), H.C. Ørsted (1820), A.-M. Ampère (1820), C.F. Gauss (1831), M. Faraday (1831) – aggiungendovi un contributo personale: la “corrente di spostamento”⁵⁹

Il diagramma dei colori

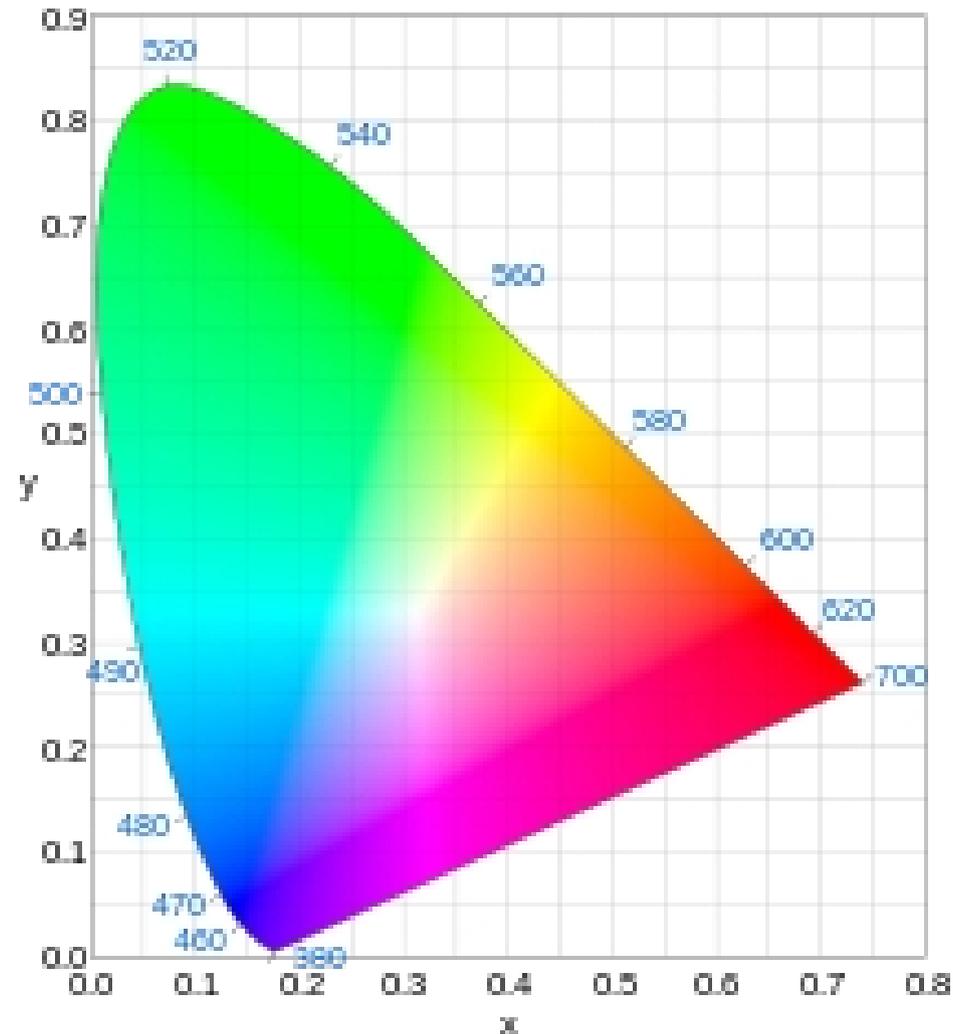


Diagramma CIE 1931 - Tinte e colori miscela 60

- Le equazioni differenziali di Maxwell (originariamente 20 scalari, poi ridotte a 2 scalari + 2 vettoriali = 8 scalari da Oliver Heaviside) furono presentate alla Royal Society nel 1864 e pubblicate l'anno dopo col titolo “*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*”. Esse descrivono il vettore elettrico **E** e quello magnetico **B** come campi nello spazio, eventualmente varianti nel tempo, oltre alle loro interazioni con la materia.
- Le equazioni prevedono l'esistenza di onde elettromagnetiche, ossia di oscillazioni periodiche del campo elettromagnetico. Maxwell cercò – sulla base di dati sperimentali – di calcolare la velocità di queste onde, ottenendo 310.740 km/s. Il valore della velocità della luce, misurato da Foucault nel 1862, era 298.000 km/s. Nel 1865 Maxwell scrisse: «Questa velocità è così vicina a quella della luce che ho ragione di supporre che la luce stessa sia un'onda elettromagnetica.»

Le equazioni di Maxwell (nella formulazione di Heaviside)

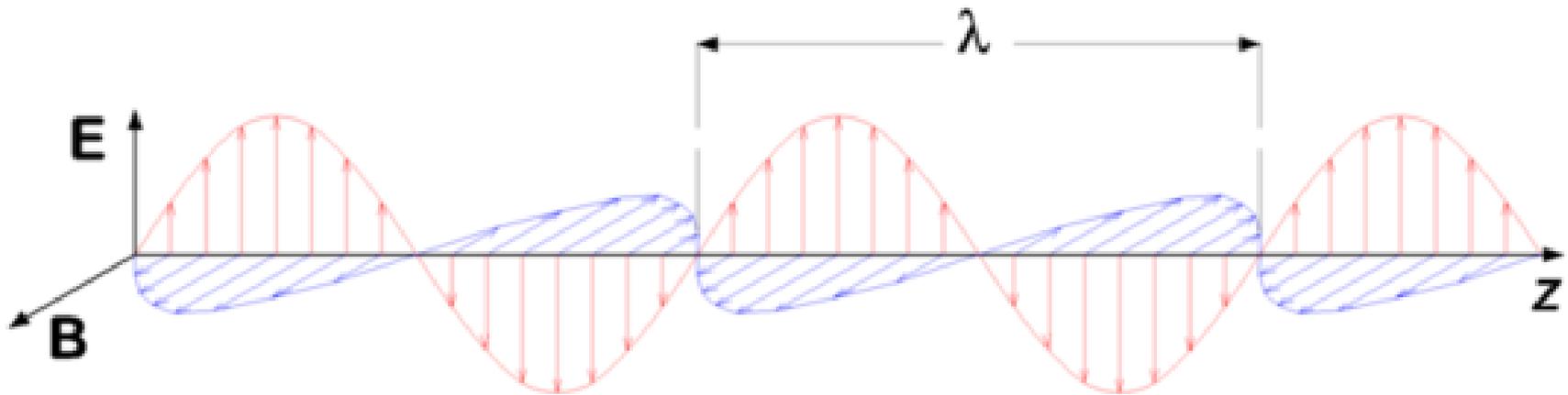
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

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

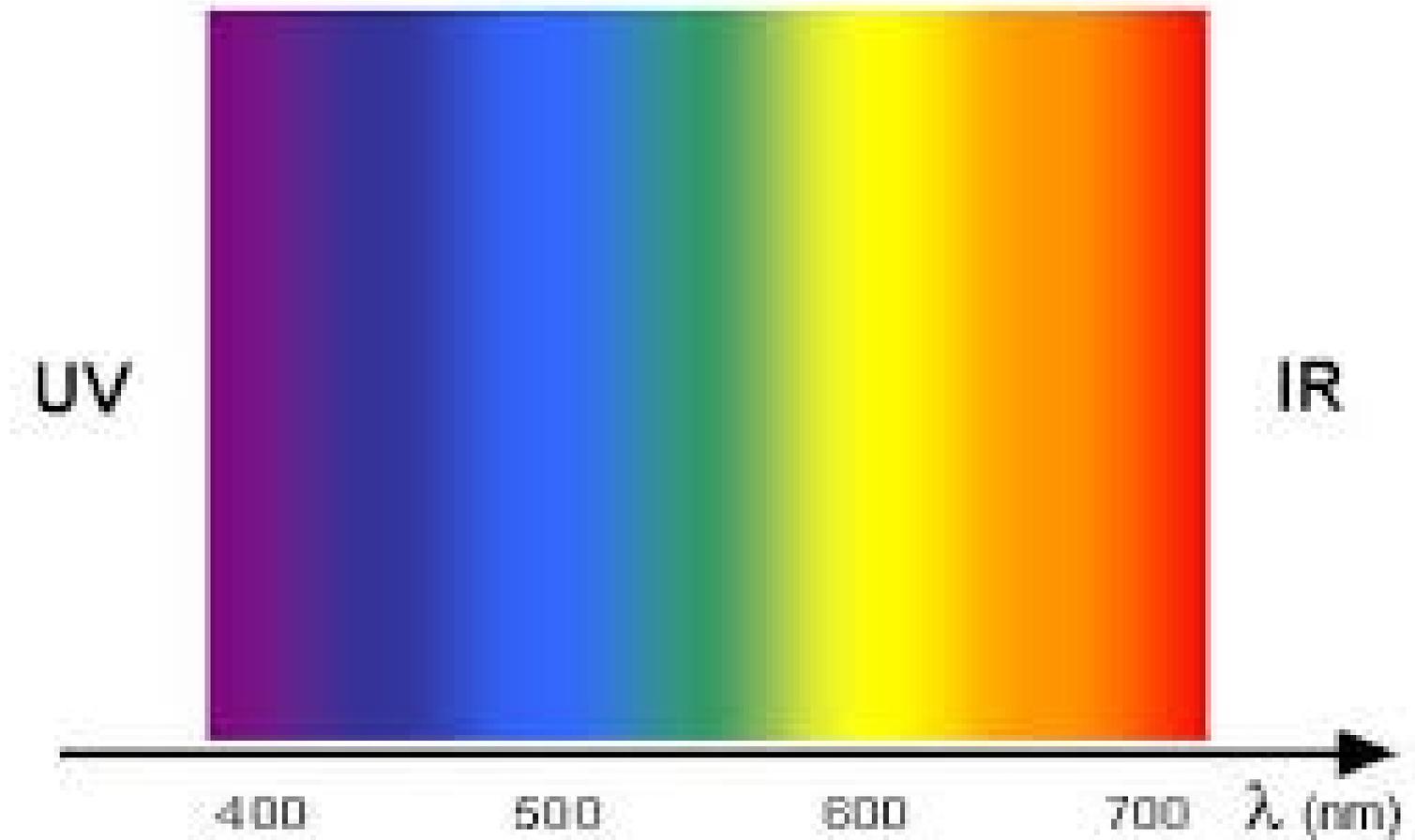
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Onda elettromagnetica

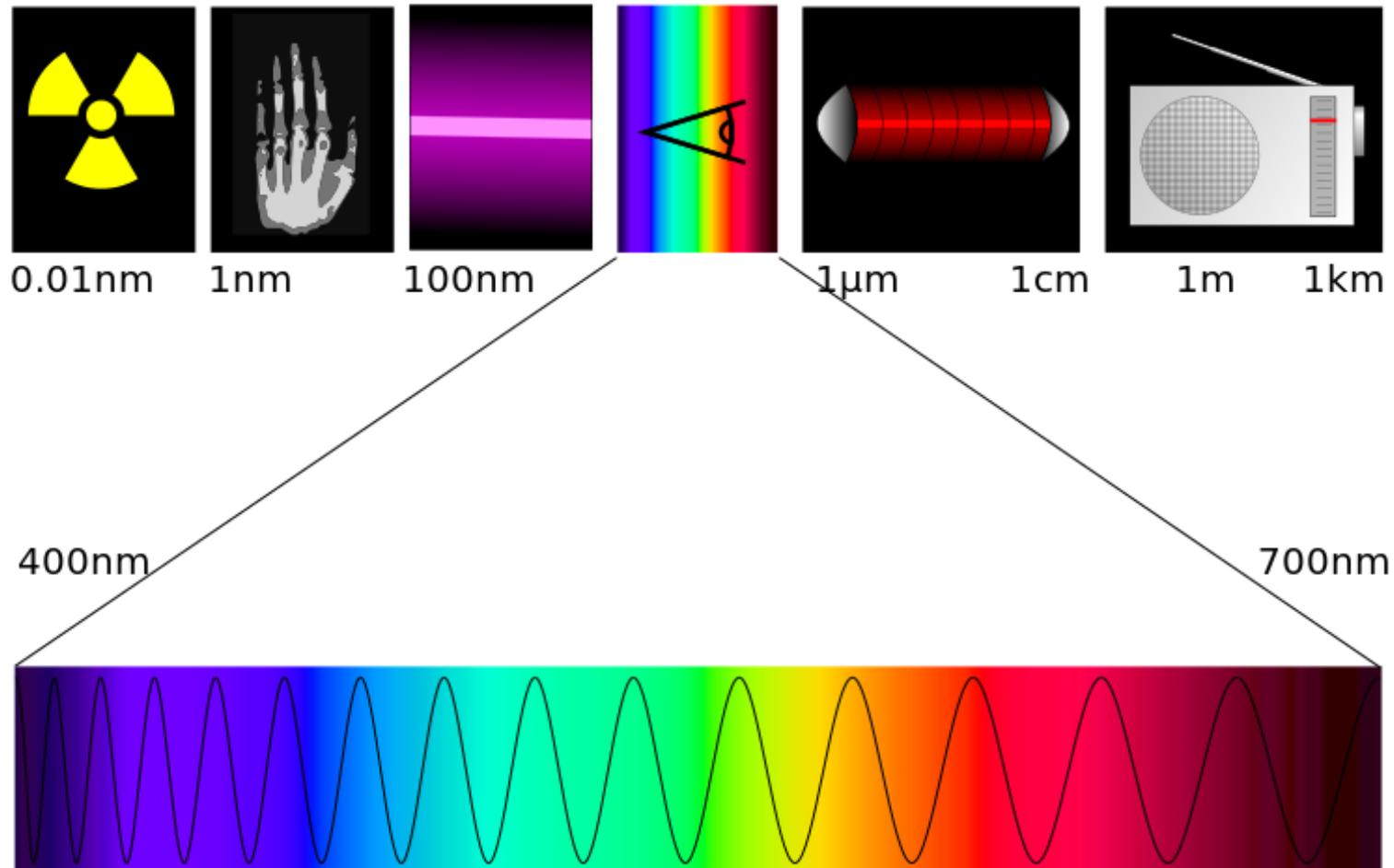


- La luce visibile è infatti un fenomeno ondulatorio (onde trasversali), dovuto all'oscillazione spazio/temporale di un campo elettrico **E** e di uno magnetico **B** perpendicolari tra loro, che produce la propagazione di un raggio luminoso.
- Oltre alle radiazioni visibili ($\lambda_{\text{viola}} = 400 \text{ nm}$; $\lambda_{\text{rosso}} = 700 \text{ nm}$), esiste un'ampia gamma di altre radiazioni elettromagnetiche, che vanno dalle onde radio (H.R. Hertz, 1885) ai raggi X (W.C. Röntgen, 1895).
- Maxwell rimase legato all'ipotesi della propagazione della luce attraverso l'etere luminifero, mezzo ineffabile e sfuggente ad ogni misurazione sperimentale, che avrebbe permeato tutto lo spazio vuoto.
- L'eliminazione dell'etere avverrà nel 1905 ad opera di A. Einstein, che concluderà il suo articolo sulla relatività con le parole: «Quindi l'etere è superfluo.»

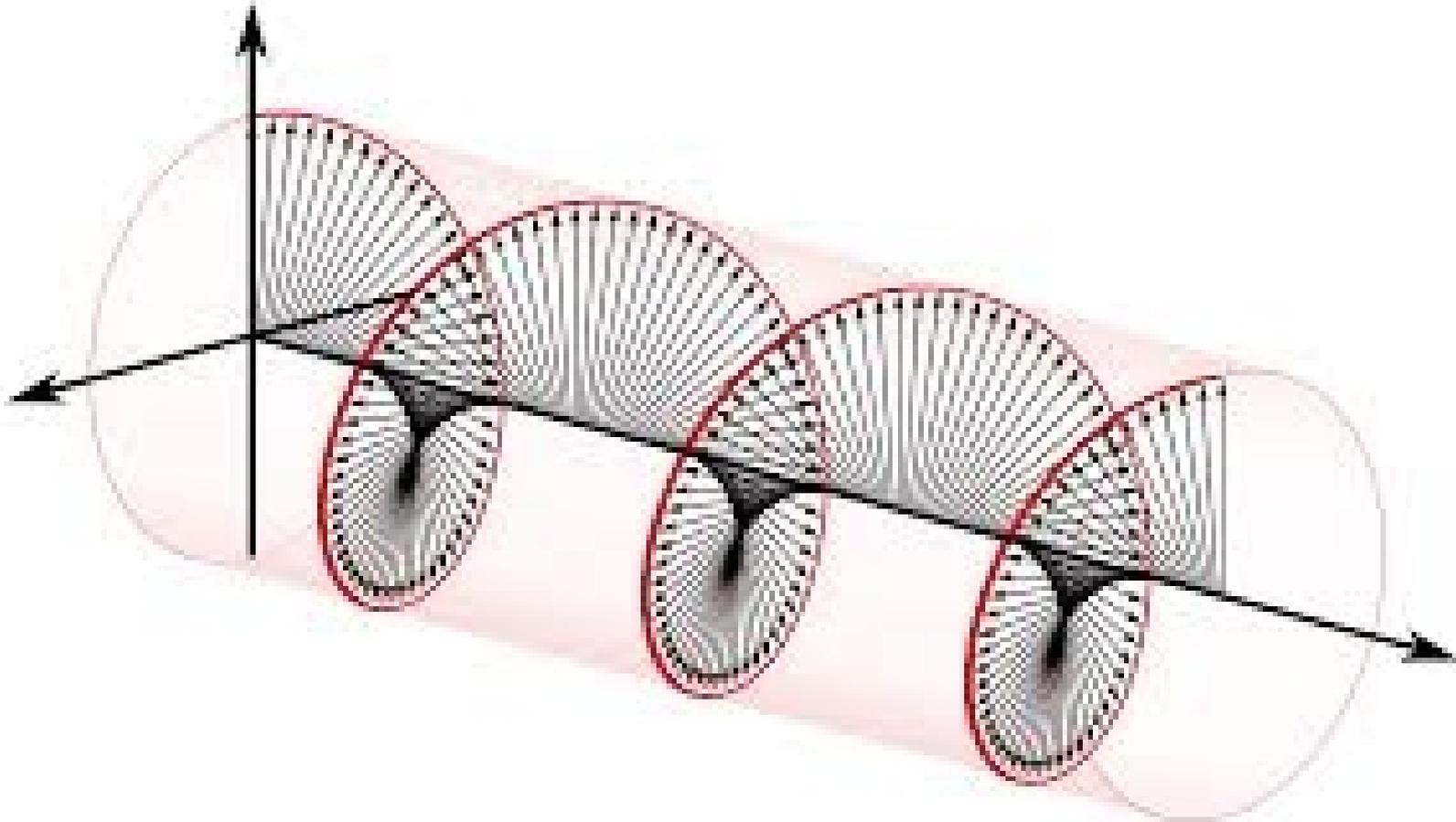
Spettro della luce visibile



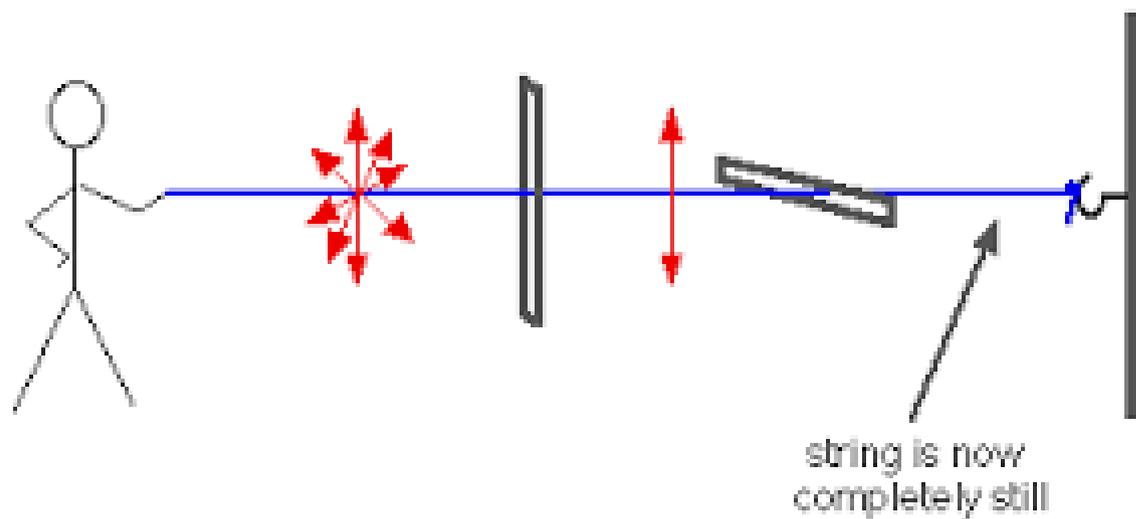
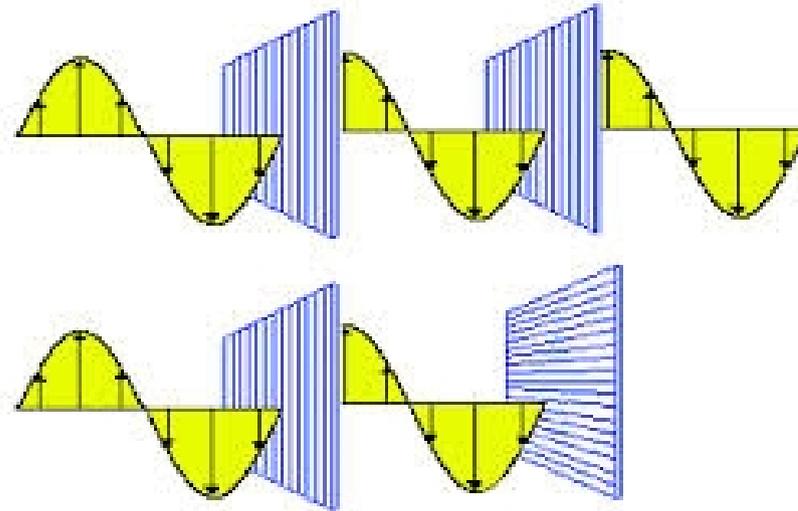
Spettro elettromagnetico



Luce polarizzata circolarmente



Polarizzazione lineare



Proprietà della luce - 6

ONDULATORIE

Riflessione

Rifrazione

Birifrangenza

Interferenza

Diffrazione

Velocità aria/acqua

Polarizzazione

CORPUSCOLARI

Riflessione

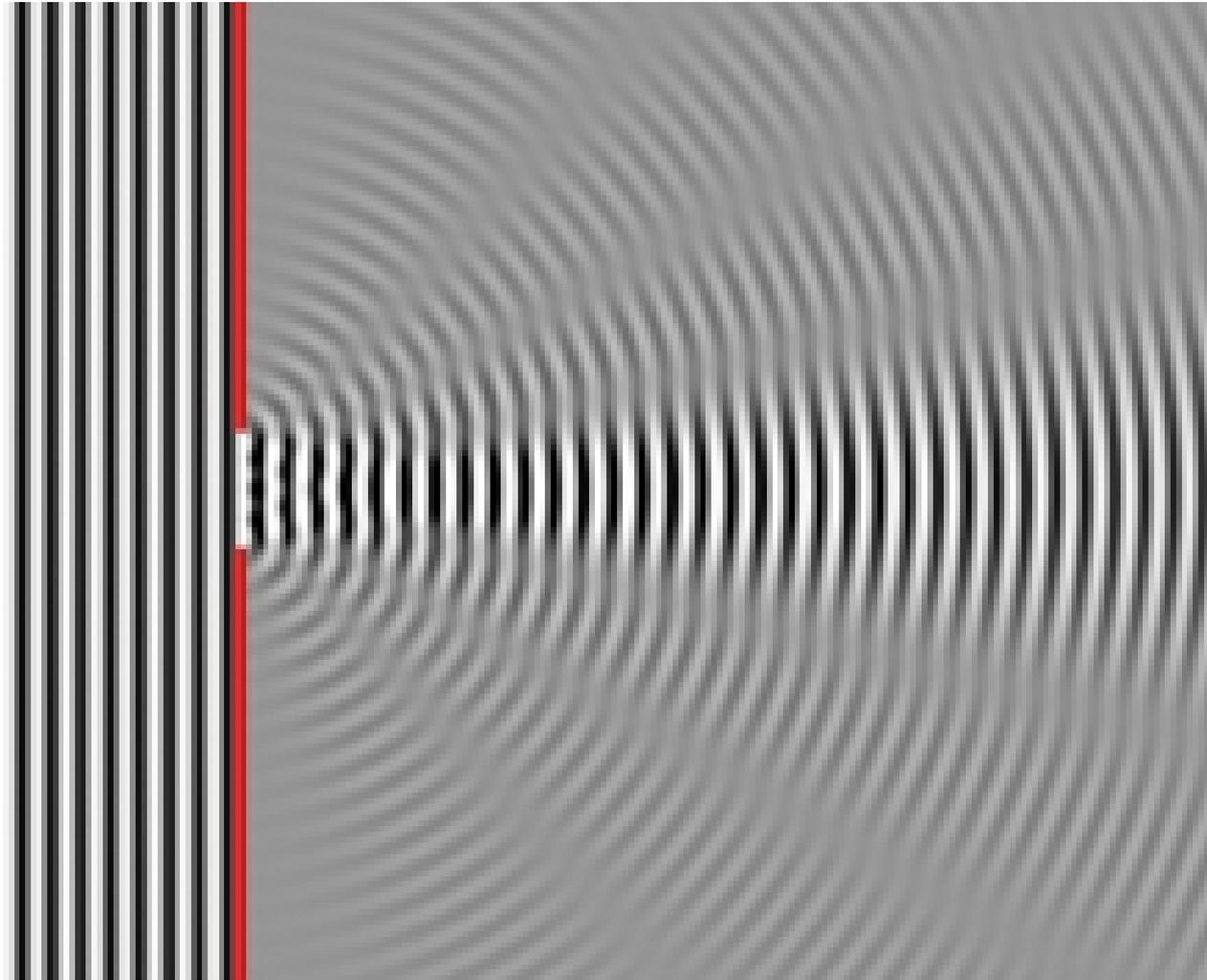
Rifrazione

La natura della luce a fine '800

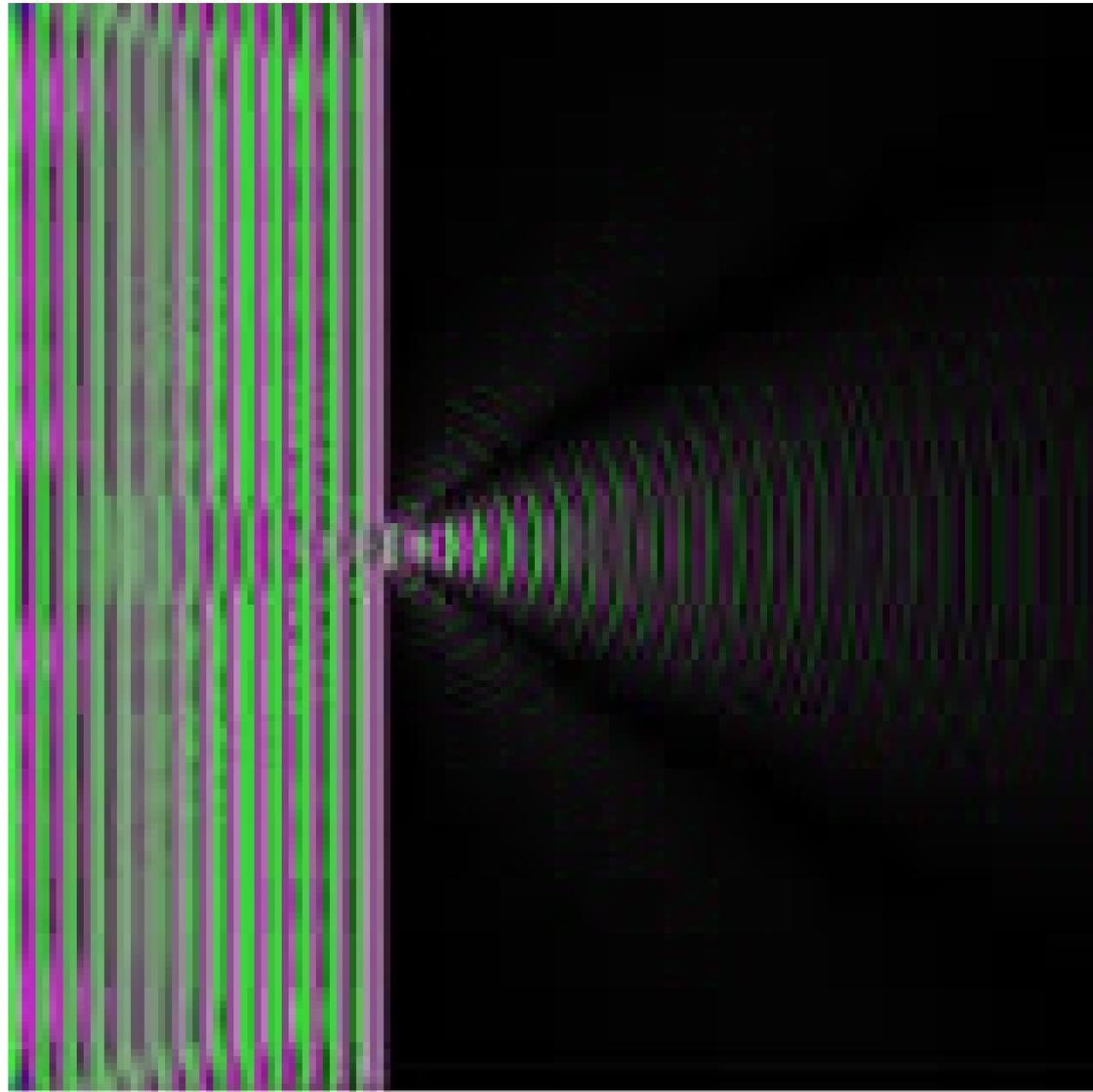
- La lunga diatriba sulla natura della luce nel '600 e primi '700 vide contrapposta l'ipotesi **corpuscolare** di **Newton** a quella **ondulatoria** di **Huygens**. Durante il resto del '700, secolo newtoniano per eccellenza, la gran parte degli scienziati propendeva per l'ipotesi corpuscolare.
- Le cose cambiarono nel corso dell'800 con l'esperimento d'**interferenza** mediante una doppia fenditura (**Young, 1804**), la “macchia di **Fresnel**” nella **diffrazione** (**1818**) e la misura della velocità della luce di **Foucault** (**1850**).
- **Maxwell** nel **1864** spiegò la luce come **onda elettromagnetica**: oscillazione di campi elettrici e magnetici perpendicolari, che si propaga nel vuoto a **300.000 Km/s**. Un trionfo della Fisica ottocentesca !

Lucidi di riserva

Diffrazione della luce - Onde



Diffrazione della luce - Colori



Newton in “laboratorio”



 campo
magnetico

 campo
elettromagnetico

