



La storia della luce

CORSO DI EPISTEMOLOGIA E STORIA DELLA FISICA

Professor Lenisa Paolo

Presentazione a cura di :

**Moreno Arcieri, Anna Claudia Chierici, Nicola Carollo,
Roberto Compagno**

**– TFA A049 –
- Università di Ferrara -**





Sommario

- Ottica geometrica (dall'antichità al '600)
- Ottica fisica (da Huygens a Maxwell)
- Ottica quantistica
- Il colore
- Astronomia

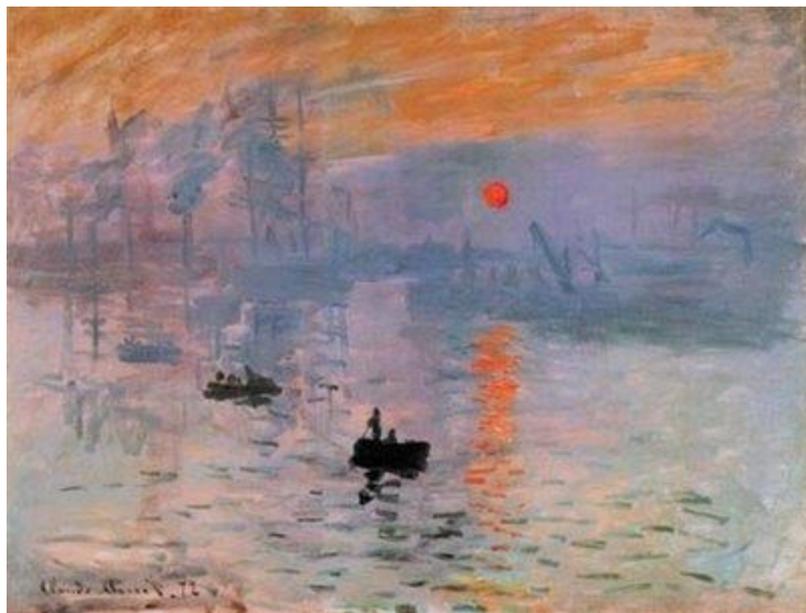
L'uomo e la luce



L'uomo resta meravigliato di fronte alla
bellezza della luce



Grandi artisti ne hanno riprodotto la bellezza



Mattino
M'illumino
D'immenso

Il Sole in antichità

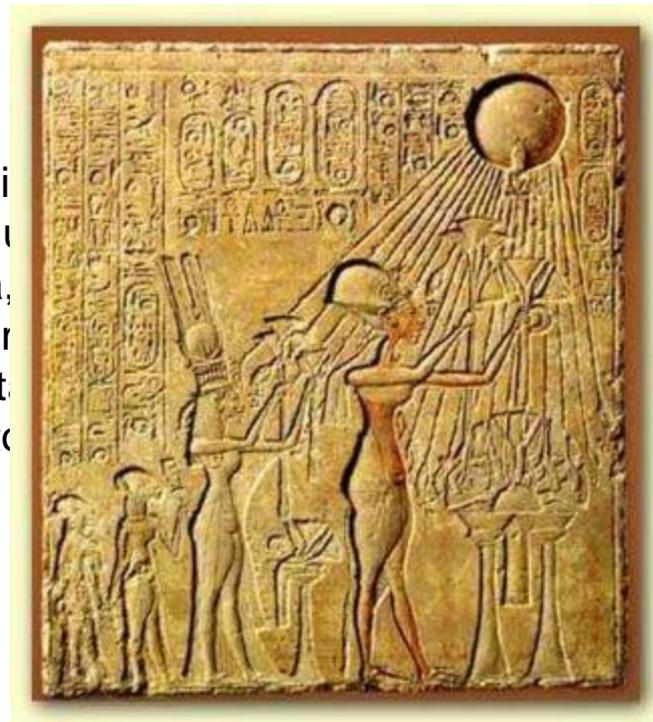


L'uomo riconosce nel Sole la principale fonte di luce, senza il Sole non ci sarebbe vita. Per questo il Sole, in antichità, è visto come una divinità presso vari popoli.



Per esempio:

Il culto del sole fu quello prevalente nella religione egizia, adorato come Ra, raffigurato in genere come un falco con un disco rosso sul cielo su una barca. Nella diciottesima dinastia, il politeismo egizio venne rimpiazzato da Aton, la divinità del sole. A differenza delle altre divinità, Aton era raffigurato solo come un disco, simbolo del sole.



e
il
re
i
la

Per i Greci il dio Elio (sole) ogni giorno al canto del gallo (animale a lui sacro) correva sulla biga trainata da quattro cavalli da est verso ovest decidendo così l'alternarsi del buio e della luce.

Per i Romani, il sole era Febo-Apollo, di una bellezza sconvolgente e luminosa, era il dio della luce, al quale erano intitolate le arti, la musica, della divinazione e della giustizia (le sue frecce d'oro erano come raggi di sole).





La luce nell'Antica Grecia

- I primi a porsi degli interrogativi sulla natura della luce furono i **Pitagorici**, nel V secolo avanti Cristo, sostenendo si trattasse di un fluido emesso dagli occhi.
- Nel IV secolo a.C. **Democrito (atomista)** sviluppò una teoria in base alla quale erano gli oggetti ad emanare "eidola", ovvero immagini che si propagavano nell'aria per essere poi percepite dagli organi sensoriali.
- Nello stesso periodo **Platone** ed **Euclide** affermarono che la teoria pitagorica era valida solo in presenza del sole, il quale attivava il fluido luminoso emesso dagli occhi, per cui l'atto di "vedere" si riduceva sostanzialmente a un'attività diurna, resa possibile di notte solo grazie alla presenza di fonti d'illuminazione artificiali.

L'approccio sulla visione che hanno i Presocratici e Platone si chiama estromissivo perché basato sul fatto che un fuoco esce dall'occhio, mentre quello di Democrito intromissivo.

Euclide (325-265 a.C.) scrive il primo trattato di ottica; tratta questa materia dal punto di vista geometrico, assume dei postulati nei quali si può riconoscere la:

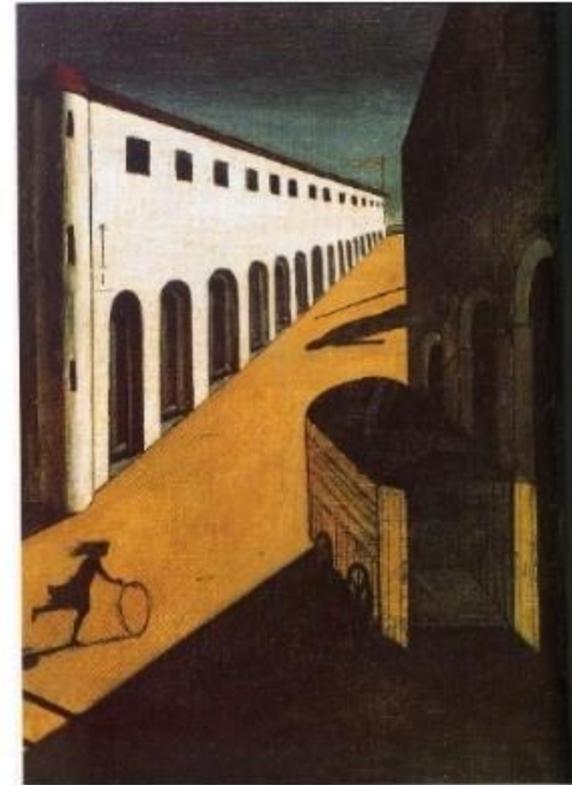
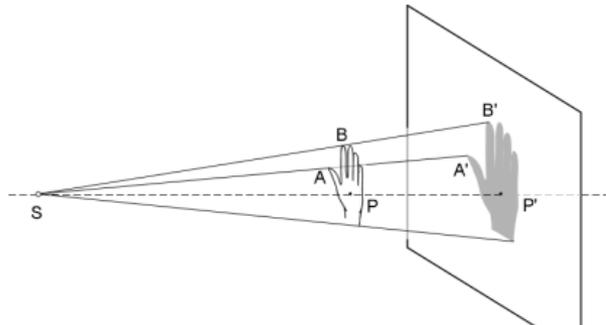
Legge della propagazione rettilinea:

nel vuoto la luce si propaga lungo linee rette.

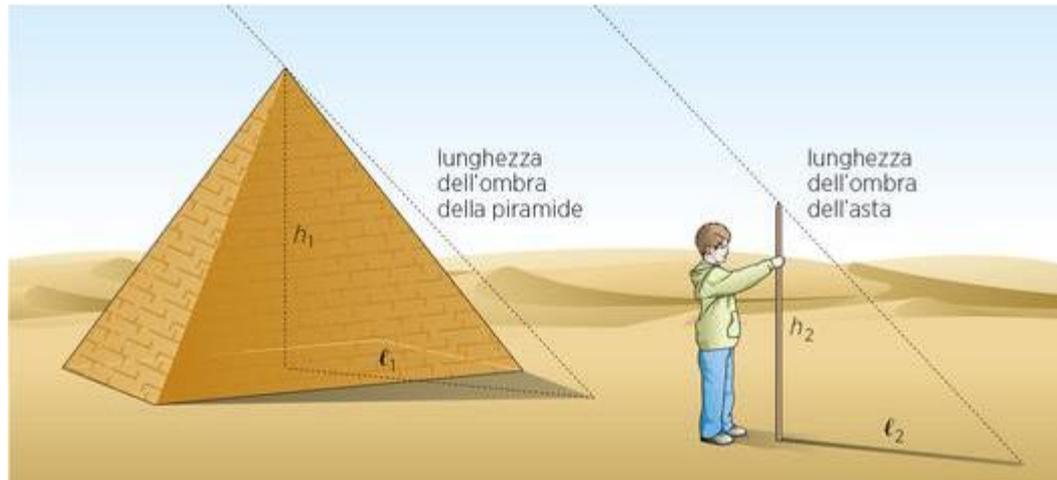
Come conseguenza costruisce il cono visivo:

Supponiamo di proiettare come in figura su uno schermo luce proveniente da una sorgente approssimativamente puntiforme.

Se ora intercettiamo il fascio di luce con un corpo opaco vedremo prodursi sullo schermo una macchia scura dell'oggetto, dai contorni ben delineati. Tale figura è la base del cono ideale che si ottiene considerando che passano per il punto S dov'è la sorgente, e si appoggiano al contorno del corpo opaco.

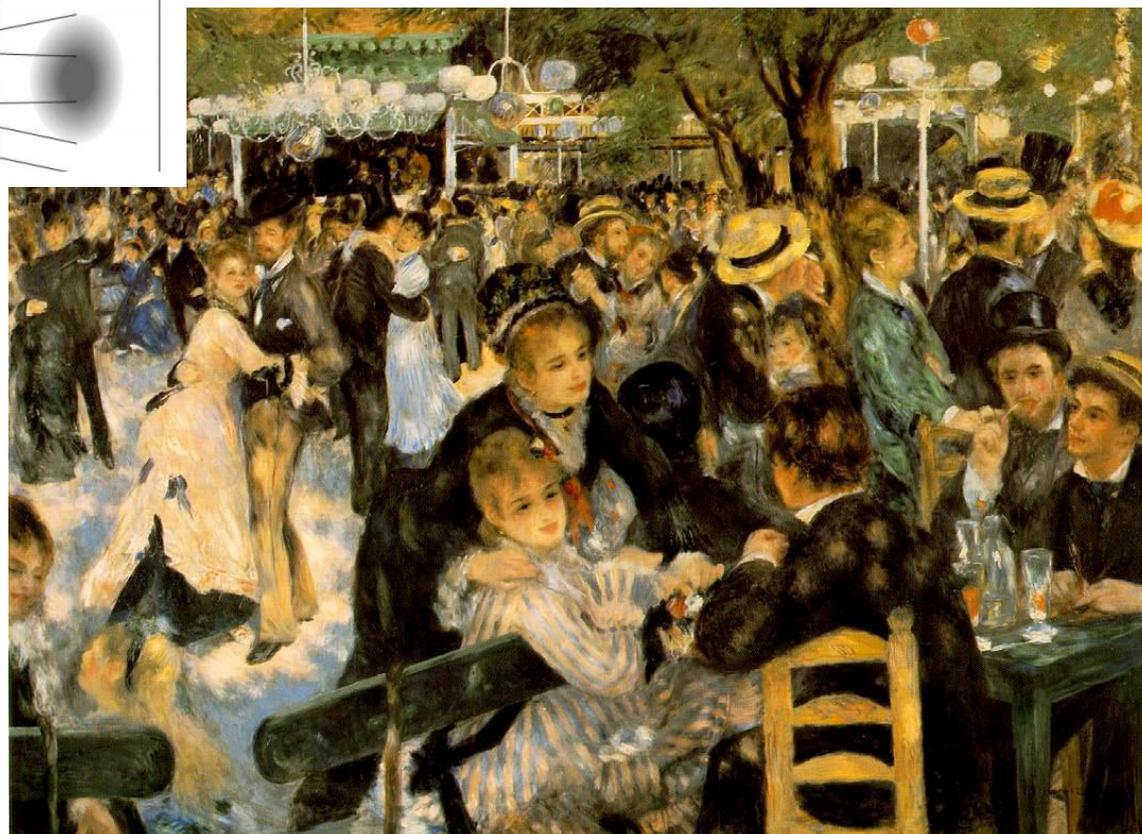
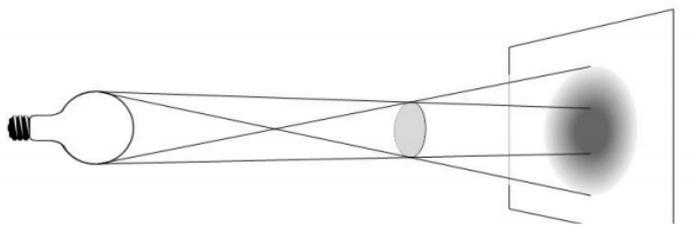


Precedentemente Talete, sfruttando la propagazione rettilinea della luce e la proporzionalità che c'è tra la lunghezza dell'ombra e l'altezza dell'oggetto nel VI sec. a.C., determina l'altezza della piramide di Cheope:

$$l_1:l_2=h_1:h_2$$


Infine, se la sorgente luminosa è più estesa del corpo, l'ombra è **convergente**.

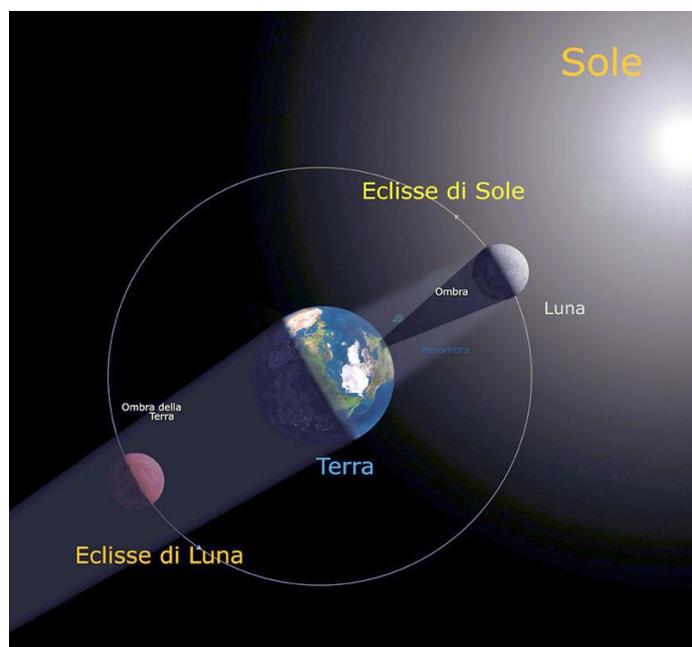
Si hanno effetti di penombra o di cancellazione totale dell'ombra netta:



Al di là del vertice P
non c'è più alcuna
ombra

Questo spiega anche il fenomeno delle **ECLISSI**. In tal caso la sorgente è il sole, il corpo opaco può essere la terra, nel caso delle eclissi di luna, oppure la luna nel caso delle eclissi di sole.

Nel secondo caso, ad esempio, se la terra viene a trovarsi, nel cono d'ombra determinato dalla Luna, nella regione della terra su cui tale cono si proietta vi sarà una eclissi totale di sole. Nelle regioni che verranno a trovarsi nelle zone di penombra, l'eclissi sarà parziale.



Di Sole: 20 marzo 2015

Di Luna: 28 settembre 2015





... continuiamo la storia

- Tutti i filosofi e gli scienziati greci e latini erano d'accordo però su una cosa, ovvero che la luce (chiamata "*lux*") e il colore fossero soggettivi, ovvero creati dall'anima per rappresentare gli stimoli che giungevano agli occhi.
- La concezione aristotelica si discostava da entrambe le teorie, in quanto egli riteneva che la visione fosse l'effetto di un'*interazione* fra l'occhio, l'oggetto veduto e *il mezzo* interposto impalpabile e immateriale



- Nel II secolo d.C. **Tolomeo** scrisse 5 libri di ottica in cui ribadiva che l'occhio, la cui sensibilità era attivata dalla luce solare, emetteva i raggi luminosi. Il trattato comprende, oltre a una sezione sulla riflessione, una trattazione dei fenomeni di rifrazione e include, in particolare, una tabella che fornisce gli angoli di rifrazione corrispondenti a vari angoli di incidenza per le coppie acqua-aria, aria-vetro e acqua-vetro. Ma di questi fenomeni ne parliamo tra un po'.

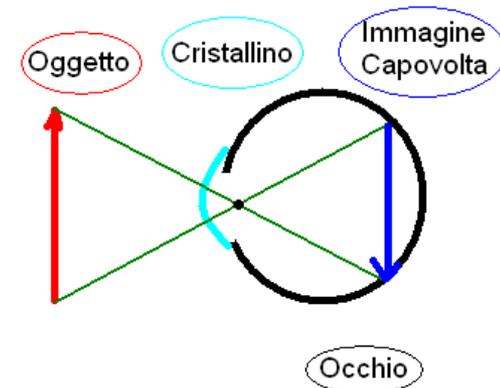
Gli Arabi

- Attorno all'anno 1000 Ibn al Haitham (Alhacen) rifiuta l'impostazione pitagorica dell'estromissione visiva:
- 1. Una persona che guardi il sole e poi chiuda gli occhi, conserva per qualche tempo l'immagine del disco solare.
- 2. Una persona che guardi direttamente il sole prova un senso di fastidio o addirittura dolore.

Stabilisce otto condizioni essenziali per la percezione visiva, così riassumibili:

- troppa o troppo poca luce produce un effetto sulla visione, inficiandola.
- anche le dimensioni degli oggetti, siano essi troppo piccoli o troppo distanti dall'occhio, impediscono la visione.
- La luce è una proprietà insita nell'oggetto luminoso come le stelle e il Sole.
- Salta con queste osservazioni l'ipotesi dei raggi visivi. Invece, è richiesto un agente esterno che colpisca l'occhio. Un oggetto qualsiasi deve essere risolto in piccolissime unità, ciascuna delle quali emette le sue immagini in ogni direzione, una di questa colpirà il nostro occhio. Questa è una teoria corpuscolare in embrione. Alhacen si rese anche conto che, poiché le traiettorie degli eidola si intersecavano in un punto (la pupilla dell'occhio), l'immagine risultava capovolta sul fondo dell'occhio (camera oscura).

Nella seconda metà del 1200 dal polacco Witelo scrive un libro, *Perspectiva*, sullo studio dei problemi ottici (propagazione della luce, teoria della visione, fenomeni della riflessione e della rifrazione). Anche se considerato il principale testo di ottica del Medio Evo fino al XVII secolo, era in realtà poco più che un commento a quello di Alhacen



Rinascimento



- Artisti come Leon Battista Alberti e Piero della Francesca scrivono trattati di pittura formalizzando la prospettiva:
- Per **Leon Battista Alberti** la prospettiva prevede l'uso del cono visivo che richiede l'uso della geometria e non della fisiologia o della fisica della visione.
- Con **Piero della Francesca** la prospettiva assume anche un rigore matematico.
- **Leonardo** sembra accettare la teoria dell'intromissione visiva, è contro la teoria dell'emissione visiva. La sua teoria della visione è nel solco tracciato da Alhacen, Witelo. Leonardo credeva che la vista fosse governata da un principio geometrico. Leonardo diede un importante contributo allo studio dell'ottica quando capì che l'occhio e la sua pupilla si comportano come una macchina fotografica invertendo l'immagine vista.



Keplero (1571-1630)

- Nei primi anni del '600 Keplero pubblica un'opera da un lungo titolo, ma da lui abbreviato con *Optica*. Keplero rappresenta il tratto di unione tra chi teorizza la visione e coloro che la studieranno attraverso vari esperimenti. Egli rappresenta l'ultimo dei grandi pensatori del mondo antico che chiude la tradizione medioevale aprendo alla sperimentazione degli anni a seguire che porteranno alla fisica classica.



Che cos'è l'ottica?

- L'ottica è la parte della fisica che descrive il comportamento e le proprietà della luce e l'interazione della luce con la materia:
- **ottica geometrica**
 - studia i fenomeni ottici assumendo che la luce si propaghi mediante raggi rettilinei.
- **ottica fisica**
 - studia i fenomeni di interferenza, diffrazione, polarizzazione della luce ed i fenomeni per i quali non sono valide le ipotesi esemplificative dell'ottica geometrica, ma per i quali è necessario ricorrere alla descrizione del carattere ondulatorio della luce come radiazione elettromagnetica.
- **ottica quantistica** studia l'interazione della luce con la materia dal punto di vista della meccanica quantistica.



Optica di Keplero

- L'opera rappresenta l'atto di nascita della moderna ottica fisica e geometrica. In essa compaiono per la prima volta il termine "fuoco" con relative spiegazioni, la legge sulla rifrazione della luce, che, pur non completamente corretta, già si avvicina molto alla realtà. Non è solo un testo di ottica, ma anche uno studio fisiologico sull'occhio, in cui per la prima volta si descrive la funzionalità della retina e conferma l'occhio alla camera oscura.
- La natura ed il comportamento della luce ci consentono di interpretare alcuni fenomeni tramite i **raggi luminosi**, ognuno dei quali si può pensare come un segmento di retta che ha la direzione di propagazione del fronte d'onda.
- Tale modello, noto come "ottica geometrica", fu introdotto da Keplero e costituisce una buona approssimazione della realtà ed è di estrema utilità nello studio dei fenomeni di riflessione e rifrazione, nonché degli effetti prodotti dai vari tipi di specchi (piani, concavi e convessi) e dalle lenti.

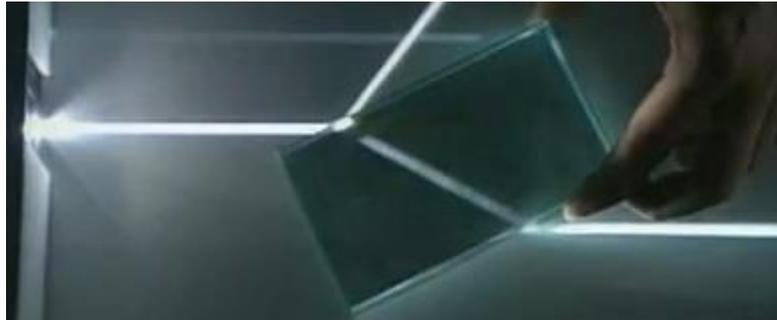


Quali sono i fenomeni luminosi che si possono spiegare con l'ottica geometrica?

- Riflessione
- Rifrazione
- Diffusione
- Dispersione

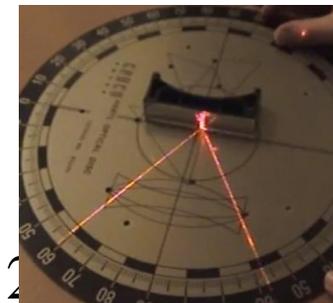


Riflessione e rifrazione



- Alla superficie di separazione tra due mezzi (sia entrambi trasparenti che uno trasparente e l'altro opaco), parte della luce che forma il fascio incidente viene rinvia (riflessa) nel mezzo dal quale proviene, parte, invece, penetra e si propaga nel secondo mezzo (luce rifratta).
- Si chiama piano di incidenza il piano che contiene il raggio incidente e la retta normale alla superficie nel punto di incontro con il raggio.
- Gli angoli sono misurati tra i raggi e la normale alla superficie di separazione.

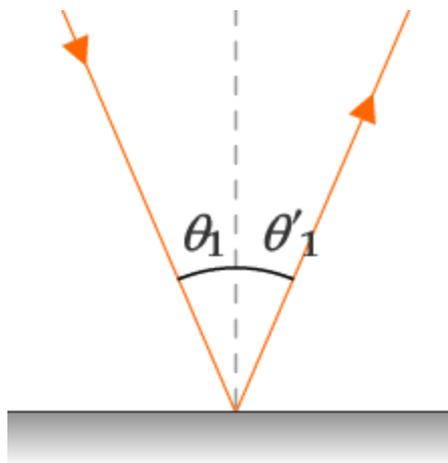
<https://www.youtube.com/watch?v=k7ohfaMmTKg>





- Le leggi della riflessione dicono che
 - il raggio riflesso giace sul piano di incidenza
 - l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza
 - il percorso raggio incidente-raggio riflesso è invertibile esattamente

http://www.claudiocancelli.it/web_education/fisica/riflessione.swf

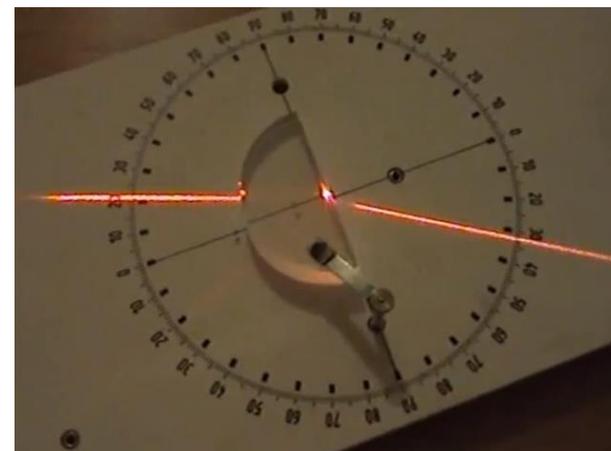
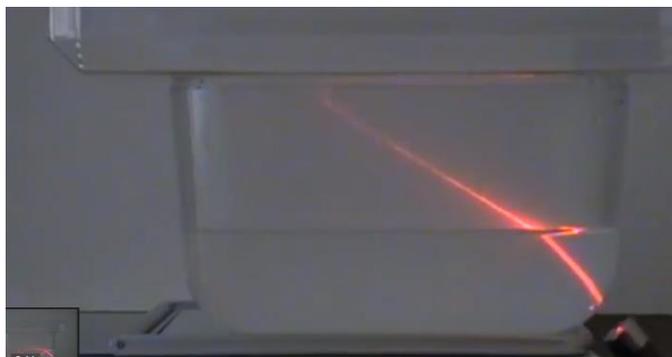




Rifrazione: la legge di Snell

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

- Il raggio rifratto giace sul piano di incidenza
- Il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è costante, si indica con n_2/n_1 (che vedremo si chiamano indici di rifrazione) ed è uguale al rapporto tra le velocità di propagazione della luce nei due mezzi v_1/v_2
- Il percorso raggio incidente-raggio rifratto è invertibile esattamente



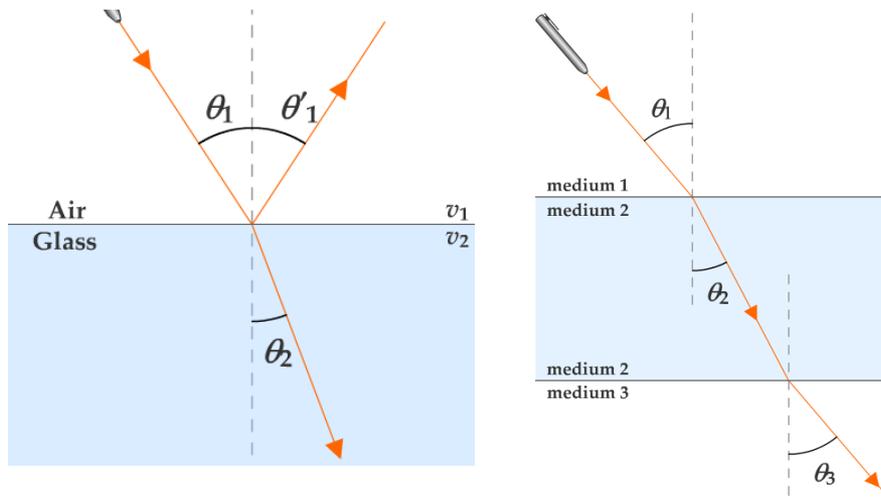
- La legge di Snell è documentata per la prima volta in un manoscritto del 984 del matematico arabo Ibn Sahl. Fu poi scoperta di nuovo da Thomas Harriot nel 1602, che però non pubblicò il suo lavoro. Nel 1621, fu scoperta ancora una volta da Willebrord Snell, in una forma matematicamente equivalente, ma rimase inedita fino alla sua morte. René Descartes derivò indipendentemente la legge in termini di funzioni sinusoidali nel suo trattato *Discorso sul metodo* del 1637 e la usò per risolvere diversi problemi di ottica. In francese la legge di Snell è chiamata "di Descartes" o "di Snell-Descartes".

- applet rifrazione

http://www.claudiocancelli.it/web_education/fisica/rifrazione.swf

- applet doppia rifrazione

http://www.claudiocancelli.it/web_education/fisica/rifrazione_lastra_trasparente.swf



Riflessione totale



- Cosa succede se nel passaggio da un mezzo più rifrangente, come l'acqua, a uno meno rifrangente, come l'aria, si aumenta l'angolo di incidenza?
- Si arriverà a un angolo di rifrazione di 90° , quindi il raggio di luce rimane imprigionato nell'acqua!

rifrazione e anche riflessione totale

http://www.claudiocancelli.it/web_education/fisica/riflessione_angolo_limite.swf

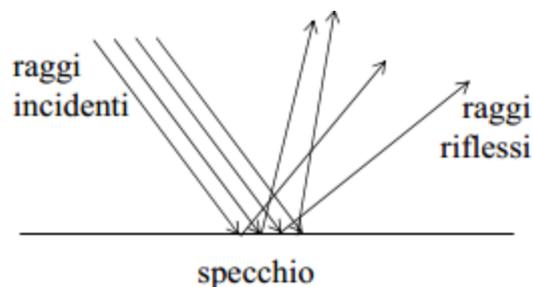


E l'uomo dei nostri giorni ci ha giocato con la rifrazione?

Le fibre ottiche trovano importanti applicazioni in telecomunicazioni, diagnostica medica e illuminotecnica.

La diffusione

- La diffusione è il fenomeno per cui i raggi di luce vengono riflessi in ogni direzione da una superficie. I raggi inizialmente paralleli vengono riflessi in ogni direzione dalla non uniformità microscopica (vi sono varie superficie riflettenti secondo angoli diversi) della superficie riflettente



Perché il cielo è azzurro?

- Parte della radiazione solare incidente viene assorbita e diffusa dall'atmosfera in tutte le direzioni. La **diffusione** è più efficiente nelle corte lunghezze d'onda, quindi quando la radiazione incidente è quasi perpendicolare (nel mezzo del giorno) la radiazione diffusa è principalmente quella blu, ma all'alba e al tramonto, quando lo strato di atmosfera da attraversare è molto più grande a causa dell'inclinazione dei raggi, anche tutte le altre radiazioni vengono diffuse, e in particolare la radiazione rossa che colora il cielo del tramonto.



Le leggi della riflessione e della rifrazione sono, all'inizio, leggi empiriche, vengono dimostrate in un secondo momento col principio di Huygens, considerando la luce come un'onda.

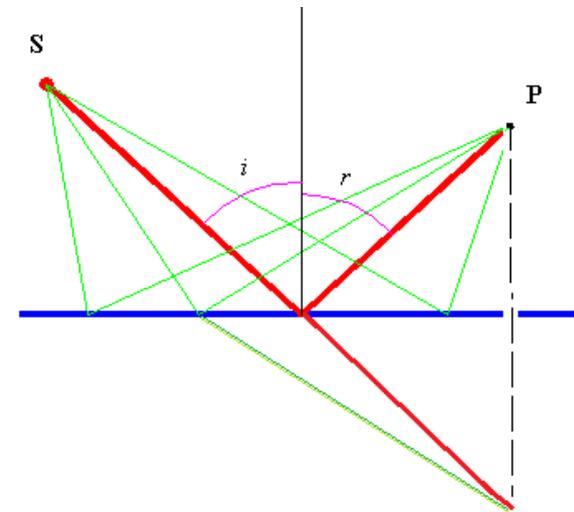
Però ...

Il principio di Fermat

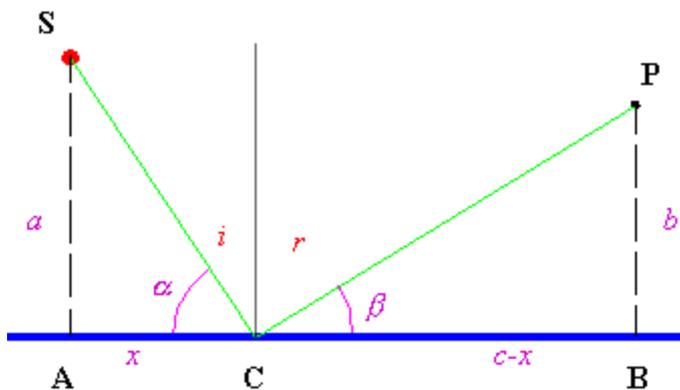
- Formulazione data da Fermat nel 1650: di tutti i possibili cammini che la luce può seguire per andare da un punto ad un altro, essa segue il cammino che richiede il tempo più breve.
- Questo principio oltre a permettere di spiegare in maniera più sintetica le principali leggi dell'ottica geometrica, permette di capire vari fenomeni naturali assai interessanti.

Caso della riflessione

- Si dimostra geometricamente che il cammino più corto per un raggio di luce che parte da S e arriva in P, essendo riflesso sulla superficie di colore blu, è quello che corrisponde all'angolo di incidenza uguale all'angolo di riflessione (notiamo che nel caso della riflessione la luce viaggia sempre nello stesso mezzo quindi non cambia velocità).



Si può anche dimostrare come problema di minimo:



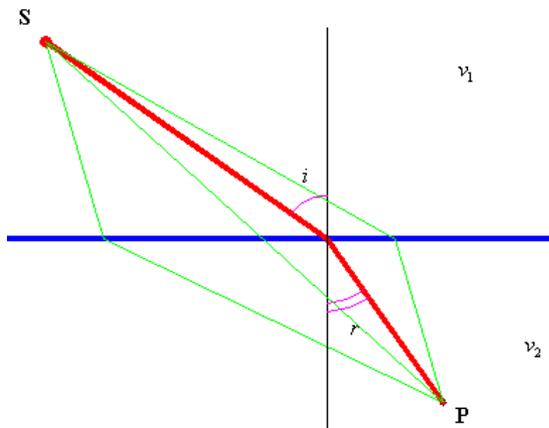
$$t_{SP} = t_{SC} + t_{CP} = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v} + \frac{\sqrt{b^2 + (c-x)^2}}{v}$$

$$t'_{SP} = \frac{1}{v} \left(\frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{c-x}{\sqrt{b^2 + (c-x)^2}} \right) = \frac{1}{v} (\cos \alpha - \cos \beta)$$

da cui $\alpha = \beta$

Il caso della rifrazione

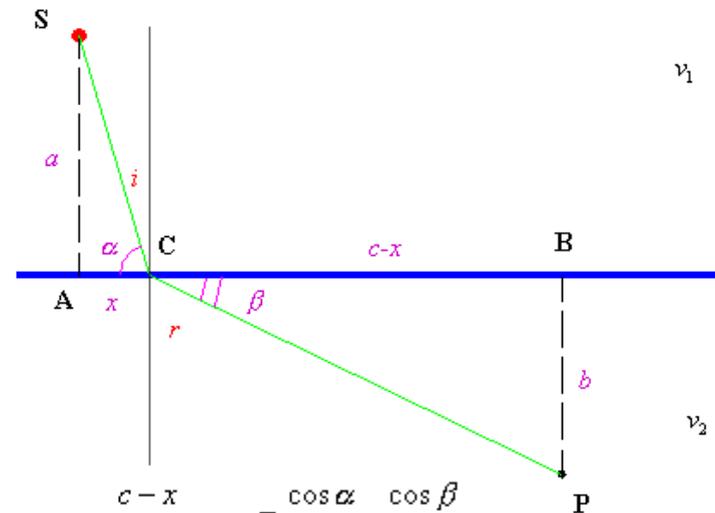
- ora l'onda viaggia con velocità, v_1 e v_2 , diverse nei due mezzi, per cui avrà "convenienza" a percorrere, a parità di altre condizioni, tratti più lunghi nel mezzo dove è più veloce, e più brevi nell'altro



$$t_{SP} = t_{SC} + t_{CP} = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{b^2 + (c-x)^2}}{v_2}$$

Uguagliando a zero si trova $\frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = \frac{v_1}{v_2}$

o anche $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$



$$t'_{SP} = \frac{x}{v_1} + \frac{c-x}{v_2} = \frac{\cos \alpha}{v_1} + \frac{\cos \beta}{v_2}$$





ososo esempio del bagnino

Per "capire" cosa ci dice il Principio di Fermat sui fenomeni di riflessione e rifrazione della luce c'è un famoso esempio di R. P. Feynman.

Consideriamo la seguente situazione: un bagnino, che si trova sulla terraferma, deve salvare un bagnante che sta affogando (o una bella ragazza in bikini, per Mr. Feynman). Per questo dovrà correre per un certo tratto sulla sabbia, tuffarsi in acqua e percorrere un certo tratto di mare nuotando. Il nostro valido bagnino dovrà scegliere il "cammino" più "veloce" (di minor tempo) per raggiungere la povera fanciulla e trarla in salvo.



Più precisamente ...

- Per utilizzare una definizione più precisa del principio di Fermat è necessario ricordare il concetto di cammino ottico. La lunghezza del cammino ottico (OPL=Optical Path Length) è data dal prodotto tra l'indice di rifrazione del mezzo n e la lunghezza fisica del cammino percorso dalla radiazione nel mezzo stesso d

$$\text{O.P.L.} = nd$$

Dove l'indice di rifrazione è il rapporto $n=c/v$

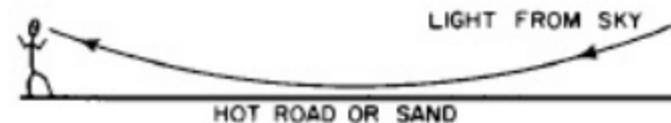
dato che il tempo t è tale che $t = \frac{d}{v}$ e $v = \frac{c}{n}$ ne segue che

$$t = \frac{1}{c}nd$$

è possibile collegare il concetto di tempo minimo a quello di cammino ottico minore,

I miraggi

- Nella figura accanto la strada sembra bagnata, in realtà quello che vediamo è il cielo, ma poiché siamo abituati a vedere il cielo specchiato sopra uno specchio d'acqua, viene naturale ritenere che il manto stradale sia bagnato.
- La spiegazione è che un raggio di luce passando dagli strati superiori a quelli inferiori più caldi, meno densi e quindi meno rifrangenti, si allontana dalla normale (rifrazione) percorrendo un cammino ottico minore.
- Talvolta si può assistere al fenomeno opposto, quando l'aria al terreno è più fredda di quella negli strati superiori. È il fenomeno detto Fata Morgana, tipico ad esempio dello stretto di Messina, grazie a cui le navi sembrano sospese nel cielo. Esso prende il nome dalla leggendaria sorella di re Artù, che era in grado di costruire i suoi castelli in aria. In tutto il mondo si usa il nome italiano, dato che una delle prime descrizioni di tale fenomeno è dovuta a padre Angelucci, che la sperimentò il 14 Agosto del 1643 guardando da Reggio Calabria lo stretto di Messina



Galileo

... ritorniamo alla nostra storia:

- Keplero ha avuto contatti epistolari con Galileo.
- Il cannocchiale era stato inventato forse da un olandese.
- Tuttavia ne fu perfezionato lo strumento da Galileo.
- **Galileo pubblicò il suo catalogo stellato**
- Il 7 gennaio 1610 pubblicò il suo catalogo di stelle visibili a occhio nudo.
- Il 7 gennaio 1610 pubblicò il suo catalogo di stelle visibili a occhio nudo.
- Il 7 gennaio 1610 pubblicò il suo catalogo di stelle visibili a occhio nudo.
- Il 7 gennaio 1610 pubblicò il suo catalogo di stelle visibili a occhio nudo.





Galileo e la luce

Galileo considerava la luce *substantia velocissima* e contrariamente ai contemporanei, come Cartesio e Keplero, egli considerava la luce dotata di una velocità finita, tanto da suggerire un esperimento che nella sua semplicità non gli riuscì. Nei *Discorsi e dimostrazioni intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica e i movimenti locali* descrive, in modo suggestivo, l'esperimento per calcolare la velocità della luce.

Due operatori entrambi dotati di una lanterna si dovevano posizionare, di notte, l'uno di fronte all'altro a una distanza di "due o tre miglia". Dopo di che avrebbero dovuto scoprire alternativamente la luce della loro lanterna in modo tale che appena l'uno avesse visto la luce dell'altro, avrebbe dovuto aprire la sua lanterna. Aggiunse, anche, che si poteva usare un telescopio per distanze maggiori di otto o dieci miglia. Ovviamente l'esperimento era inadeguato soprattutto per la velocità di reazione degli sperimentatori.



Lenti e specchi

- Con i principi della riflessione e della rifrazione si spiegano le lenti e gli specchi.
- Specchi: se ne era già interessato Platone: “E le cose che sono a destra appaiono a sinistra, in quanto avviene per contatto tra le parti opposte della vista rispetto alle parti opposte dello specchio, contrariamente al solito modo del contatto visivo (Reale)”. E dopo di lui Erone di Alessandria (10a.C.-70d.C.) e Tolomeo, dagli Arabi e da Huygens.
- Lenti: se ne interessarono gli Arabi, Maurolico nel '500, Keplero e poi Huygens



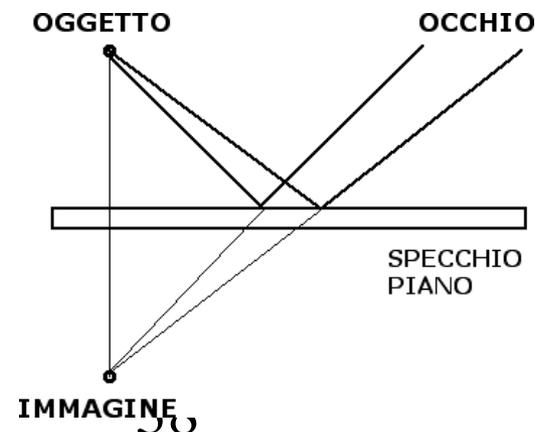
Gli specchi

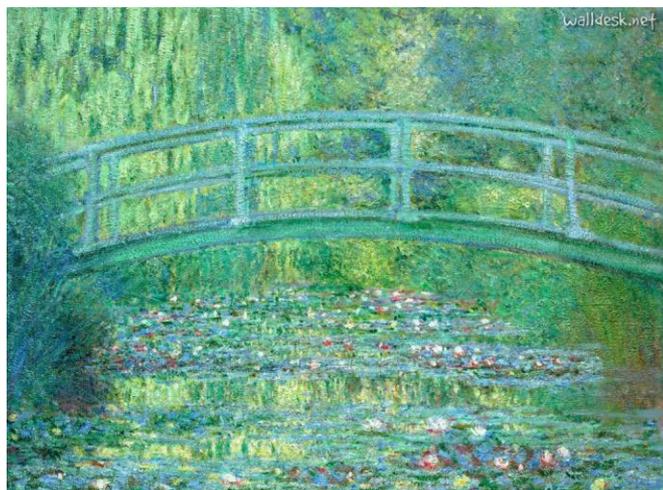
■ Formazione dell'immagine su uno specchio piano

- Se poniamo un oggetto di fronte ad uno specchio, osserviamo che la sua immagine viene riprodotta in una regione di spazio che sembra trovarsi all'interno dello specchio. Noi infatti normalmente abbiamo la visione di un oggetto grazie ai raggi che partendo da esso giungono in linea retta fino ai nostri occhi. Nel caso dello specchio i raggi giungono a noi dopo aver subito una riflessione, però noi percepiamo l'immagine ugualmente come se i raggi avessero viaggiato in linea retta, cioè come se l'oggetto si trovasse dall'altra parte della superficie. Tale immagine viene detta **Immagine virtuale** dell'oggetto.
- Si parla di immagine virtuale ogniqualvolta la sorgente dell'immagine è ottenuta prolungando all'indietro i raggi che le competono.
- Un sistema ottico che, come lo specchio piano, concentri tutti i raggi uscenti da una sorgente puntiforme in un solo punto è detto sistema stigmatico.

http://areeweb.polito.it/ricerca/qdbf/fil/indicegenerale/ottica/ottica_geometrica/Specchi.htm

Specchio piano:
l'immagine e l'oggetto
sono simmetrici rispetto
allo specchio e hanno
le stesse dimensioni.

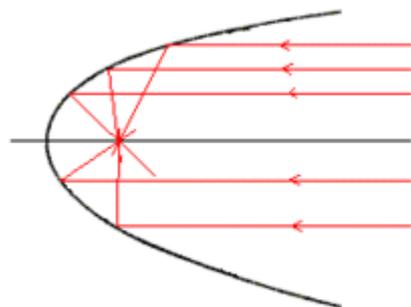




Specchi parabolici

- Come è noto, una parabola è il luogo dei punti equidistanti da un punto detto fuoco e da una retta detta direttrice. Uno specchio parabolico ha la caratteristica di far convergere nel suo fuoco (cioè di focalizzare) tutti i raggi paralleli al suo asse.

- Poiché i raggi che provengono da una sorgente posta a grande distanza (al limite infinita) dallo specchio vi giungono con inclinazioni molto poco differenti, ovvero praticamente paralleli, essi vengono focalizzati nel fuoco. In altre parole uno specchio parabolico produce un'immagine



nte posta a dista
isce i raggi rifles
gente posta in F
stigmatico alme
ella reversibilità



o concentrati nel fuoco.
o un'immagine
e è reale poiché un
ente venissero
parabolico ha la
a distanza infinita
suo fuoco.



Specchi sferici

- Una superficie riflettente che abbia la forma di una porzione di superficie sferica (tipicamente di una calotta) viene detta specchio sferico.
- L'intersezione tra lo specchio sferico e il suo asse ottico viene detto vertice dello specchio. Ricordando che un diametro ha sempre la proprietà di essere normale alla superficie sferica, risulta chiaro che un qualunque raggio luminoso che colpisca uno specchio sferico dopo essere passato per il suo centro verrà riflesso su se stesso e ripasserà per il centro. In generale i raggi che non passano per il centro dello specchio non vengono riflessi in modo da dare ad un osservatore l'impressione che scaturiscano da un unico punto. In altre parole in generale uno specchio sferico non crea un'immagine di una sorgente puntiforme, cioè non è stigmatico. Uno specchio sferico diventa praticamente stigmatico quando si considerino solo quei raggi che sono praticamente paralleli all'asse ottico e molto vicini ad esso, ovvero parassiali. Questa condizione è nota come approssimazione di Gauss. Dal punto di vista analitico ciò può essere spiegato ricordando che una superficie sferica di dimensioni sufficientemente piccole è molto ben approssimata da una opportuna superficie parabolica. Quindi è chiaro che, rispetto a tutti quei raggi che lo colpiscano parallelamente all'asse ottico e molto vicino ad esso, uno specchio sferico si comporti praticamente come uno specchio parabolico. Il fuoco dello specchio sferico, che coincide con quello della parabola che lo approssima, si trova sull'asse del sistema, ad una distanza dal vertice pari alla metà del raggio
- http://areeweb.polito.it/ricerca/qdbf/fil/indicegenerale/ottica/ottica_geometrica/Specchi.htm



L'equazione degli specchi

- Esiste una formula importante che permette di capire dove si viene a formare l'immagine prodotta da uno specchio curvo. Indichiamo con p la distanza dell'oggetto dal vertice V , con q la distanza dell'immagine dal vertice V e con f la **distanza focale** ($=r/2$), ossia la distanza del fuoco F dal vertice V . Allora per specchi di piccola apertura vale la seguente **formula dei punti coniugati**: $1/p + 1/q = 1/f$.
- Affinché questa formula valga sia per gli specchi concavi che per gli specchi convessi è necessario stabilire la seguente convenzione: è positiva la distanza di tutto ciò che sta davanti allo specchio, è negativa la distanza di tutto ciò che sta dietro lo specchio. In base a questa convenzione la distanza p è sempre positiva, $q > 0$ se l'immagine è **reale**, $q < 0$ se l'immagine è **virtuale**, la distanza focale $f > 0$ per lo specchio **concavo**, mentre $f < 0$ per lo specchio **convesso**.

specchio	r	f
convesso	positivo	positivo
concavo	negativo	negativo

immagine	q
reale	positivo
virtuale	negativo

- È possibile definire il **fattore di ingrandimento** G come il rapporto tra le dimensioni dell'immagine e quelle dell'oggetto: $G = h_{imm} / h_{ogg}$. Tale fattore d'ingrandimento può essere riscritto in termini delle distanze p e q come $G = q/p$.



Alcuni esempi di formazione delle immagini

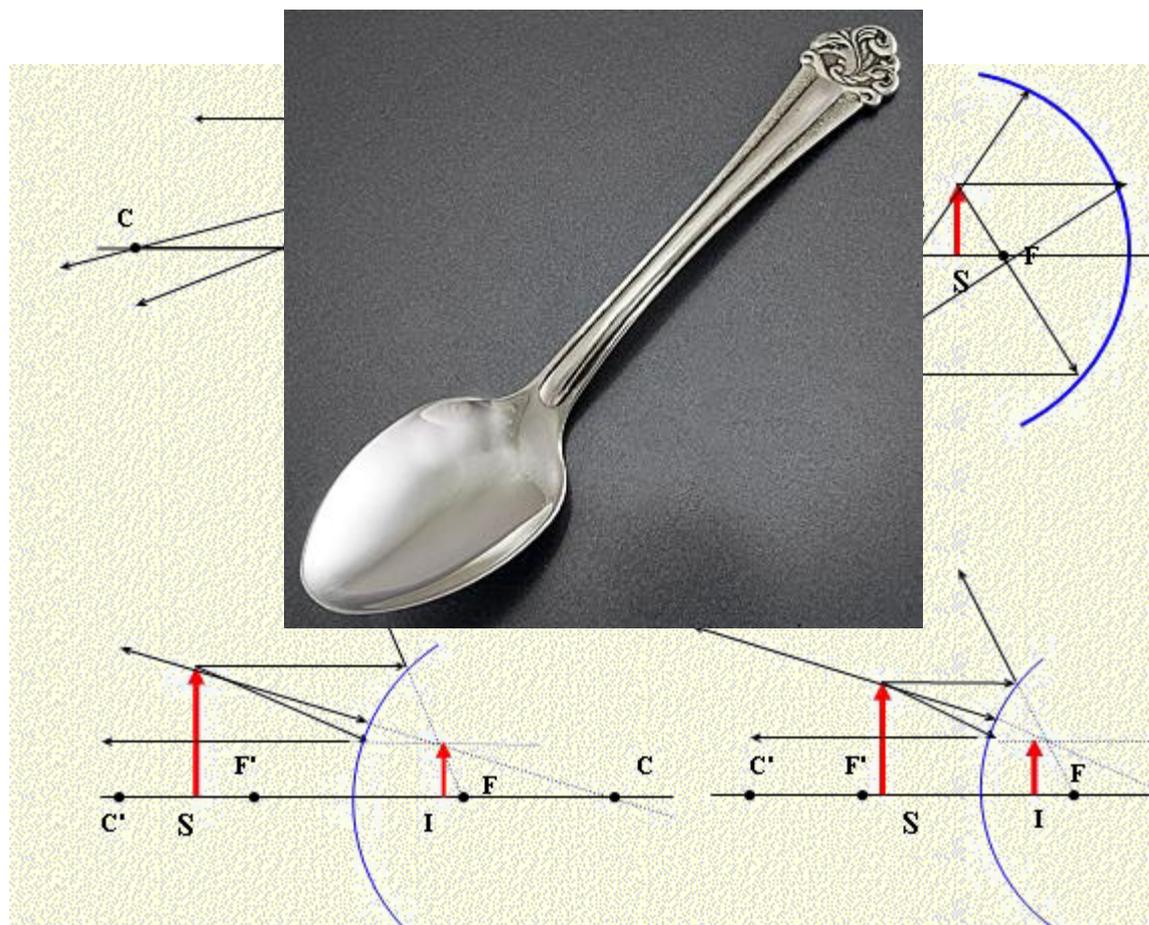


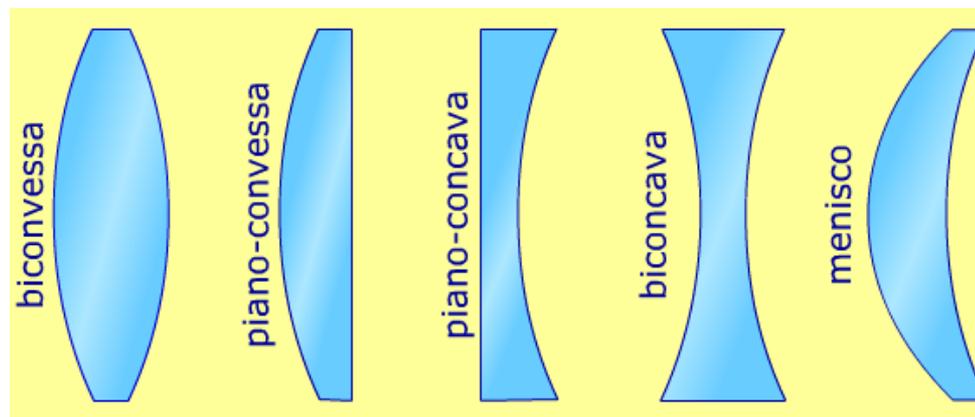


Tabella riassuntiva

Tipo di specchio	distanza p di S	distanza q di I	immagine	ingrandimento	tipo di immagine
concavo $f > 0$	$p > r$	$f < q < r$ con $q > 0$	rovesciata	rimpicciolita $q < p$	reale
concavo $f > 0$	$p < f$	$0 < q < \infty$ con $q < 0$	diritta	ingrandita $q > p$	virtuale
concavo $f > 0$	$f < p < r$	$q > r$ con $q > 0$	rovesciata	ingrandita $q > p$	reale
convesso $f < 0$	$p > r$	$q < f$ con $q < 0$	diritta	rimpicciolita $q < p$	virtuale
convesso $f < 0$	$p < f$	$q < f$ con $q < 0$	diritta	rimpicciolita $q < p$	virtuale
convesso $f < 0$	$f < p < r$	$q < f$ con $q < 0$	diritta	rimpicciolita $q < p$	virtuale

Le lenti (già Archimede se ne era occupato!)

- Un **diottra** è una superficie di contatto che separa due mezzi ottici diversamente rifrangenti, trasparenti e con diverso **indice di rifrazione**; se la superficie di separazione tra i due mezzi è una porzione di sfera, il diottra si dice *sferico*
- Si dice lente un sistema ottico costituito da due diottri, di cui almeno uno sferico. Le diverse combinazioni di diottri sferici e/o piani sono elencate nella figura successiva.



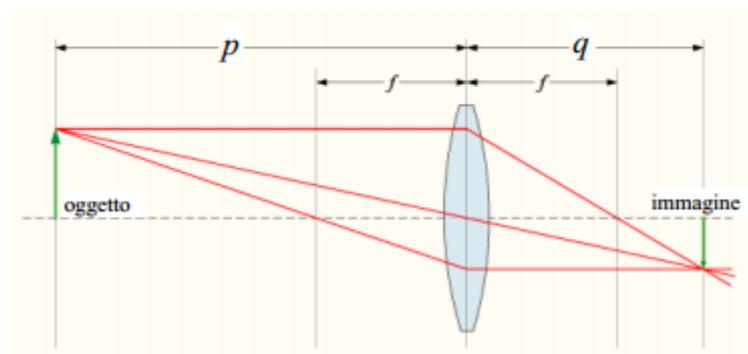


Lenti sottili

- Spesso però nella pratica ci si trova nelle condizioni di applicare la cosiddetta approssimazione delle lenti sottili. Tale approssimazione consiste nell'assumere che i vertici dei due diottri che formano la lente (le intersezioni tra diottri e asse ottico) siano in realtà un unico punto, detto centro ottico della lente. Essa è ben verificata quando la distanza tra i vertici dei diottri, ossia lo spessore della lente, è molto minore della distanza tra lente e sorgente. Ciò accade per esempio per cannocchiali e telescopi, L'approssimazione delle lenti sottili è soddisfacente anche nel caso delle lenti degli occhiali.

Costruzione dell'immagine

Per costruire l'immagine di un oggetto prodotto da una lente, si segue il cammino di due raggi particolari: quello che parte dal vertice dell'oggetto, incide sulla lente parallelamente all'asse ottico e viene quindi deviato nel fuoco, e quello che parte dal vertice dell'oggetto, passa esattamente per il centro della lente e continua il suo cammino al di là della lente senza essere deviato; l'intersezione tra i due raggi fornisce il punto immagine cercato.





Costruzione dell'immagine

Date le distanze p tra lente ed oggetto e q tra lente e immagine, per una lente di spessore trascurabile vale la formula:

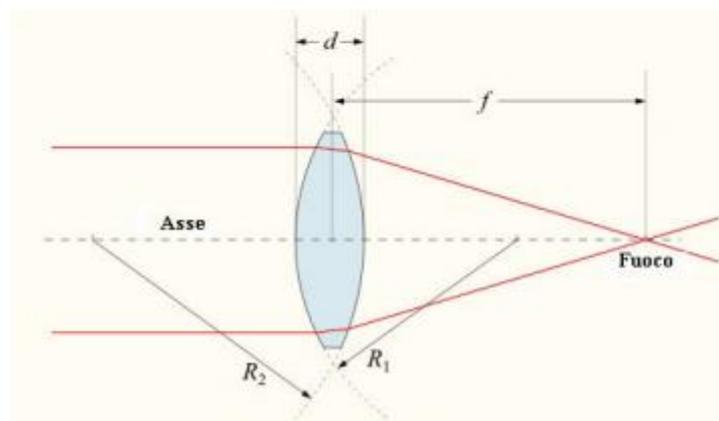
$$1/f = 1/p + 1/q$$

da cui deriva che se un oggetto è posto a distanza p sull'asse della lente positiva di focale f , su uno schermo posto a distanza q si formerà l'immagine dell'oggetto.

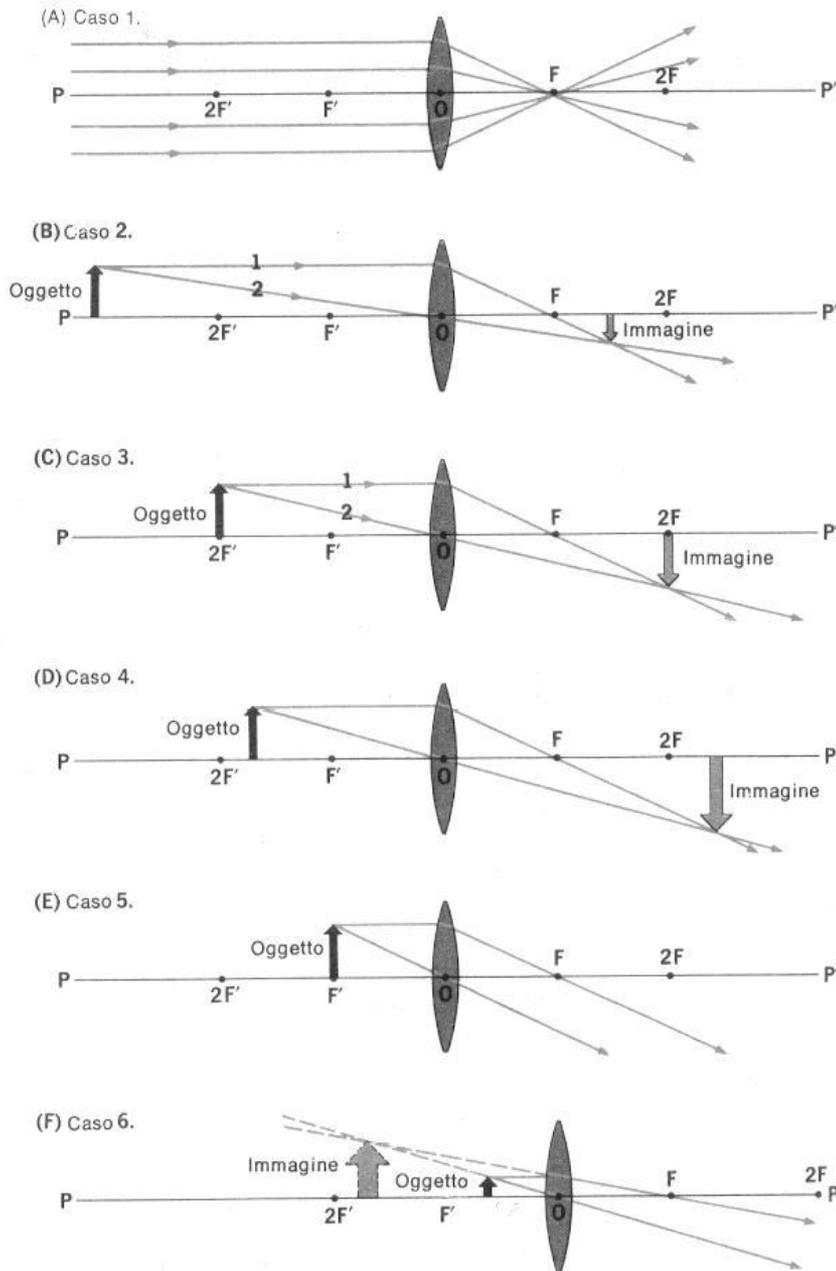
L'ingrandimento di una lente è dato da p/q

Lente convergente

Se la lente è biconvessa o piano-convessa un fascio di luce collimato o parallelo all'asse che attraversa la lente viene fatto convergere (o focalizzare) su un punto dell'asse, ad una certa distanza oltre la lente nota come distanza focale. Questo tipo di lente è detta **positiva o convergente**



Immagini formate dalle Lenti Convergenti

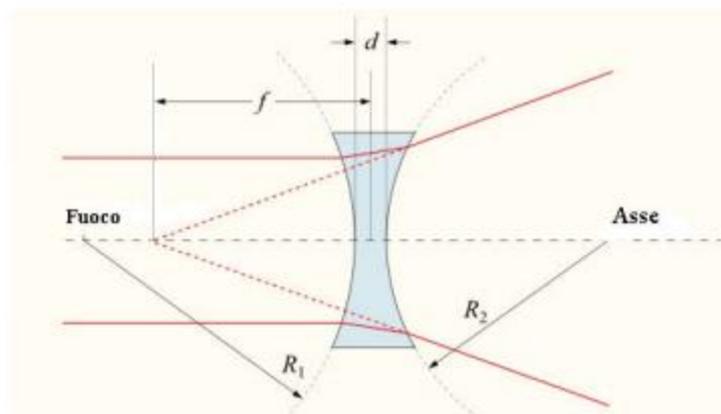


Posizione oggetto	Posizione immagine	Tipo di immagine	Applicazioni
<i>A distanza infinita</i>	<i>Sul fuoco reale</i>	<i>Un punto</i>	<i>Determinazione della distanza focale di una lente</i>
$> 2 F$	$F > \text{Imm} > 2F$	- Reale - Capovolta - Ridotta	- Macchina fotografica
$= 2 F$	$= 2 F$	- reale - capovolta - uguale	- cannocchiale terrestre
$2F > \text{Ogg} > F$	$> 2 F$	- Reale - Capovolta - ingrandita	Microscopio composto - Proiettore
$= F$		Non si crea	- Fari - Riflettori
$F > \text{Ogg} > O$	$2F > \text{Imm} > F$	- Virtuale - diritta - ingrandita	Lente d'ingrandimento

Lente divergente

Se la lente è biconcava o piano-concava, un fascio collimato è fatto divergere e la lente è perciò detta *negativa o divergente*.

Il raggio uscente dalla lente sembra provenire da un punto dell'asse antecedente la lente.





... io sono miope!

- Miopia = convergenza eccessiva → le immagini di oggetti lontani si formano prima della retina, si corregge con lenti divergenti
- Ipermetropia = troppo poca convergenza → si corregge con lenti convergenti
- Astigmatismo = imperfetta sfericità di una delle superfici rifrangenti dell'occhio





Newton

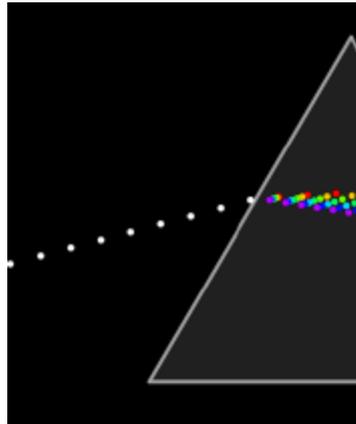
(colori e teoria corpuscolare della luce)

- ebbe per primo l'intuizione che la relazione tra lo stimolo luminoso e la percezione del colore si potesse rappresentare con un modello matematico.
- Dal 1669 al 1671 Newton scrive gli appunti delle lezioni per i suoi studenti del Trinity College di Cambridge, che rimarranno seppelliti negli archivi del College fino a quando verranno pubblicati postumi nel 1729 col titolo *Lectiones Opticæ*.
- Costruisce anche un telescopio che Barrow mostra alla *Royal Society* (Accademia delle Scienze), della quale Newton viene eletto membro il 1° gennaio del 1672. Per celebrare l'avvenimento spedisce il 30 gennaio al segretario Oldenburg una memoria di 20 pagine, oggi nota con il titolo *New Theory About Light and Colour*, nella quale compendia la sua teoria, la base della moderna scienza dei colori, in tredici punti.
- Per avere una trattazione completa dell'argomento occorrerà attendere fino al 1704, quando Newton pubblicherà il trattato *Opticks* di cui nei successivi ventitrè anni uscirono altre due edizioni in inglese (1718, 1721) e due edizioni in latino (*Optice*, 1706, 1719) e in cui verrà inserita gran parte degli appunti delle lezioni tenute dalla cattedra lucasiana (cioè di matematica a Cambridge).

La dispersione

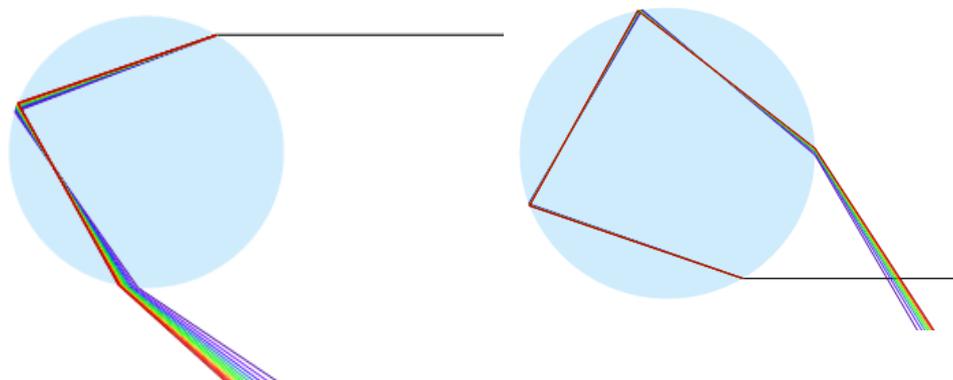
E' Newton che per primo decompone la luce facendola passare attraverso un prisma

- La dispersione è il fenomeno per cui la luce bianca, passando attraverso un prisma, si scompone nei vari colori che la compongono che vanno dal rosso al violetto, i sette colori dell'arcobaleno. La lunghezza d'onda della luce bianca. Il rosso



L'arcobaleno

- Il fenomeno è piuttosto complicato da spiegare, si può fare riferimento a questo link:
<http://www.lorenzoroi.net/arcobaleno/#intro>
- Si tratta comunque della rifrazione e riflessione totale della luce nelle goccioline d'acqua sospese nell'atmosfera dopo un temporale; essendo luce bianca ci sarà anche il fenomeno della dispersione. A seconda del numero di riflessioni totali all'interno della gocciolina avremo l'arcobaleno primario o secondario:





Newton e la teoria corpuscolare

- Newton aveva ripreso la teoria corpuscolare degli atomisti e aveva enunciato che la luce era fatta di molecole composte di aggregazioni di atomi, che si muovevano sotto l'influsso di tutte le forze, incluse quelle gravitazionali. Le differenze di colore erano dovute alle differenti masse e dimensioni molecolari. La riflessione e la rifrazione erano la conseguenza di repulsioni e attrazioni di corta distanza tra le interfacce delle molecole della luce e quelle della materia. La dispersione era la conseguenza della differente massa nelle molecole cromofore, quelle che portavano la luce.
- Il modello di Newton, soprattutto quello riferito alla teoria del colore, era convincente. Inoltre Newton era diventato importante perché aveva già spiegato la gravitazione che era stata splendidamente verificata da Halley quando la cometa vista nel 1705 ritornò, come previsto nel 1758. Newton, quindi, aveva una reputazione in campo scientifico assai elevata.
- Il *Traité de la Lumière* di Huygens, delle cui teorie parleremo tra poco, cadde nel dimenticatoio appena fu pubblicato nel 1704 il trattato di Newton intitolato *Ottica*.



... come un sasso gettato nell'acqua

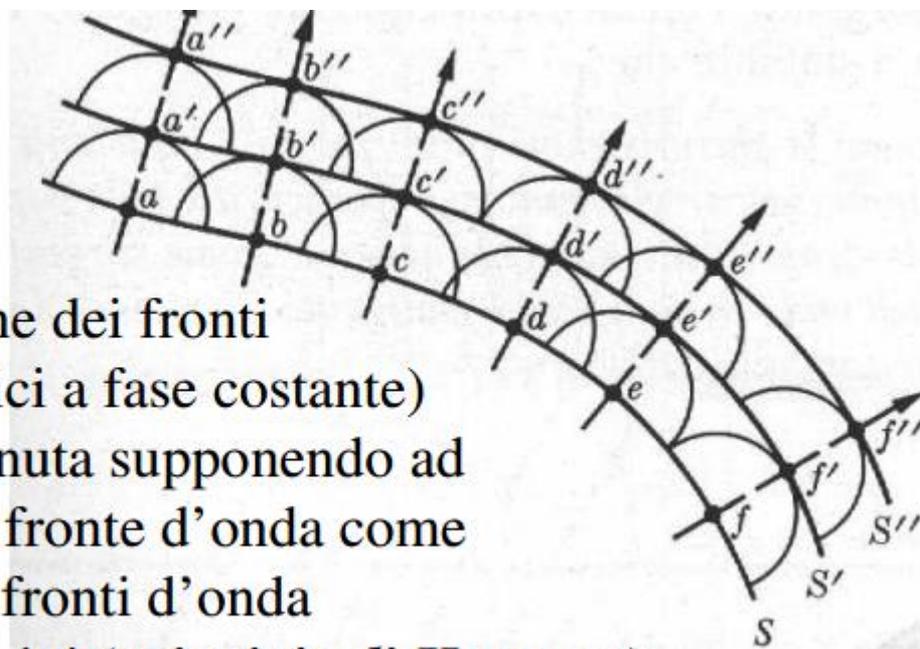
La teoria ondulatoria

Christian Huygens (1629-1695)

- La teoria ondulatoria trovò le sue basi nell'osservazione del fatto che la luce può attraversare un corpo trasparente senza interagire con le molecole che lo compongono. Inoltre, se due fasci di luce si intersecano, non modificano la loro direzione, e ciò a prova del fatto che la propagazione luminosa non comporta trasporto di materia. Pertanto, Huygens postulò che la luce, in analogia a quanto accade per il suono, si trasmette per mezzo di onde.
- Scrive Huygens nel suo **trattato della luce** del 1690:
"... Quando si consideri l'estrema velocità con cui la luce si propaga tutt'intorno, e che quando essa proviene da differenti sorgenti, anche del tutto opposte, la luce dell'una traversa quella dell'altra senza alcun perturbamento, si comprende bene che quando vediamo un soggetto luminoso, ciò non sarà dovuto a trasporto di materia che dall'oggetto luminoso viene fino a noi, nella maniera che una palla e una freccia traversa l'aria. è dunque in altra maniera che essa si propaga, e quel che può condurci a comprenderla è la conoscenza che abbiamo della propagazione del suono nell'aria....".
- La luce si comportava allo stesso modo delle onde nell'acqua e aveva velocità finita, come aveva dimostrato Roemer. Difatti le misure effettuate da Ole Roemer (1644-1710) avevano indicato che la luce si propagava a una velocità di 208.055 km al secondo, cioè seicentomila volte più veloce del suono. Il fatto che la luce si propagasse anche nel vuoto prodotto dalla pompa ad aria, quella di Boyle, dimostrava che le particelle erano trasmesse attraverso un mezzo, l'etere, assai più sottile di quello che trasportava il suono.

Il principio di Huygens

La propagazione dei fronti d'onda (superfici a fase costante) può essere ottenuta supponendo ad ogni istante un fronte d'onda come la sorgente dei fronti d'onda a istanti successivi (*principio di Huygens*).





applet principio di Huygens :

http://areeweb.polito.it/ricerca/qdbf/fil/indicegenerale/ottica/ottica_geometrica/Huygens.htm

- Huygens aggiunse un elemento essenziale per capire la luce: l'emissione luminosa. L'emissione avviene attraverso dei punti che diventano dei fronti d'onda che, a loro volta, producono altri fronti d'onda e così via, facendo sì che la propagazione dell'onda diverga sfericamente. I raggi perpendicolari al piano tangente il fronte d'onda producono riflessione, rifrazione semplice e doppia e si propagano con un ritardo temporale.



Ma cos'è la luce e quando vediamo?

- Definiamo, per ora, la luce come ciò che è in grado di stimolare la retina dell'occhio umano.
- Tutti i corpi emettono in continuazione energia come radiazione termica; se la radiazione è superiore a 520°C una parte di radiazione diventa visibile.
- Un oggetto luminoso può divenire visibile se viene illuminato perché parte della luce che lo colpisce viene riflessa

Dove si propaga la luce?

Mezzi trasparenti: lasciano vedere una sorgente attraverso di essi

Mezzi traslucidi: lasciano intravedere una sorgente senza che se ne distingua la forma.

Mezzi opachi: arrestano la luce