

di **Ciro A. R. Abilitato**

STORIA DELLA SCIENZA

COME SI GIUNSE ALLA CORRETTA FORMULAZIONE DELLA LEGGE DELLA RIFRAZIONE DI SNELL-DESCARTES E ALLE PRIME IPOTESI SULLA NATURA DELLA LUCE

L'*ottica scientifica*, ossia quel campo della fisica moderna nel cui ambito cominciarono a delinearsi le prime teorie sulla natura della luce, ebbe ufficialmente inizio con le ricerche di Newton e dei suoi contemporanei Rømer¹, Hooke, Huygens, Grimaldi, Fermat, ecc. Il primo importante passo in questo campo di studio fu compiuto nel XVII secolo attraverso il riesame critico, condotto in prospettiva sperimentalista, dei risultati a cui erano pervenuti gli antichi. Vennero quindi assiduamente cercate e studiate le opere di ottica di Euclide (323 – 285 a.C.), di Archimede (287 – 212 a.C.), di Erone (vissuto tra il I e il II sec. a.C.) e di Tolomeo (100 ca. – 175 ca.), alle quali si aggiungevano gli studi dell'iracheno Alhazen², fatti conoscere in Occidente nel XIII secolo dal monaco polacco Vitellione³. Fu così che, tra il 1621 e il 1637, il matematico olandese Willebrord Snell⁴ e il filosofo e matematico francese René Descartes⁵ giunsero entrambi, l'uno indipendentemente dall'altro, a verificare su base sperimentale e ad enunciare i principi generali dell'ottica geometrica e le due leggi fondamentali della catottrica e della diottrica, vale a dire la legge della riflessione, già dimostrata da Euclide e da Archimede, e la legge

¹ Si scrive anche Rømer, Røemer o Roemer.

² **Abu Alì al-Hasan ibn al-Hasan Ibn al-Haitham** (Bàssora, Iraq, 965 – Il Cairo, Egitto, 1038), chiamato in occidente *Avenatan* o, più comunemente, *Alhazen* (latinizzato in *Alhazenus*).

³ **Erazmus Ciolek Witelo** (Legnica, presso Breslavia, 1230 – ? tra il 1280 e il 1314) conosciuto anche come *Vitellione*, *Vitellio*, *Vitello*.

⁴ **Willebrord Snell van Royen** (o *Roijen*). Matematico, astronomo e fisico olandese (Leida 1580 – ivi, 30 ottobre 1626). Il suo nome latinizzato, secondo l'uso umanistico, è *Willebrordus Snellius*, che è quello col quale vennero pubblicate tutte le sue opere.

⁵ **Louis René Des Cartes** (pronuncia: *lùì rené de kart*). Filosofo e matematico francese (La Haye en Touraine, Francia, 31 marzo 1596 – Stoccolma, Svezia, 11 febbraio 1650). È considerato il padre della geometria analitica e della filosofia moderna, i cui inizi si fanno coincidere con la nascita del razionalismo, indirizzo che divenne noto col nome di *filosofia continentale*, in quanto fu la corrente di pensiero predominante nelle scuole continentali d'Europa nei secoli XVII e XVIII, mentre in Gran Bretagna e nei paesi di cultura anglosassone era dominante la cosiddetta *filosofia insulare*, vale a dire l'empirismo. Il cognome del filosofo di La Haye può essere scritto col trattino d'unione, *Des-Cartes*, o tutto unito, *Descartes* (la pronuncia rimane immutata). L'ultima forma è quella che è entrata sempre più nell'uso. La forma latinizzata del nome, secondo la consuetudine umanistica, è *Renatus Cartesius*, ma più spesso, nelle opere e nelle citazioni, veniva latinizzato e declinato solo il prenome, mentre veniva conservata la forma originale del cognome, nelle varianti *Des Cartes*, *Des-Cartes*, *Descartes*. Per esempio: *RENATI DES CARTES, MEDITATIONES DE PRIMA PHILOSOPHIA, 1641* (di Renato Des Cartes, Meditazioni intorno alla Filosofia Prima, 1641); *RENATI DES-CARTES* (opp. *DESCARTES*), *PRINCIPIA PHILOSOPHIAE, 1644* (di Renato Descartes, I Principi della Filosofia, 1644). La forma italianizzata, *Renato Cartesio*, era essa pure molto diffusa negli ambienti scientifici e umanistici del tempo a causa delle numerose traduzioni in italiano delle opere del filosofo francese e degli altrettanto numerosi scritti critici apparsi in Italia intorno alla sua dottrina.

della rifrazione, già descritta e dimostrata, tra il X e l'XI secolo da Alhazen, il quale, a sua volta, doveva aver conosciuto le teorie del matematico e fisico persiano Ibn Shal⁶, vissuto nel X secolo e rimasto sconosciuto in Occidente fino al 1994.

L'attuale suddivisione dell'ottica riflette in larga misura lo sviluppo storico di questo importante campo di studi, che può essere a ragione considerato come uno dei più articolati ed estesi della fisica.

L'**ottica geometrica**, o catadiottrica, è la branca dell'ottica fra tutte la più antica, le cui origini si fanno risalire a Euclide di Alessandria, vissuto nel IV secolo a.C., e che ha raggiunto il suo massimo sviluppo con gli studi di Fermat. Questo settore dell'ottica spiega il comportamento della luce a prescindere dalla sua natura, e fornisce la teoria generale degli strumenti ottici e della formazione delle immagini facendo ricorso a descrizioni di carattere puramente geometrico dei fenomeni dell'esperienza ordinaria e, di conseguenza, a dimostrazioni condotte con metodo assiomatico-deduttivo fondate sul principio della propagazione rettilinea dei raggi luminosi, per i quali valgono le leggi della riflessione e della rifrazione. Dal punto di vista dell'ottica ondulatoria, che rappresenta lo stadio di sviluppo successivo dell'ottica geometrica, il principio della propagazione rettilinea è valido solo quando la luce interagisce con oggetti di dimensioni molto maggiori della sua lunghezza d'onda. Sono branche dell'ottica geometrica la catottrica e la diottrica. La **catottrica**, detta anche scienza dei catottri o degli specchi, studia i fenomeni di riflessione della luce prodotti dalle superfici riflettenti, quali gli specchi piani e sferici. La **diottrica**, detta anche scienza dei diottri o delle lenti, studia i fenomeni di rifrazione della luce nei diottri non sferici (lastre e prismi) e nei diottri sferici (le cosiddette lenti sottili). Nell'ambito dell'ottica geometrica valgono i seguenti principi generali:

PRINCIPI GENERALI DELL'OTTICA GEOMETRICA

1) **Principio della propagazione rettilinea della luce.**

In un mezzo omogeneo la luce si propaga lungo traiettorie rettilinee:

2) **Principio dell'indipendenza dei raggi luminosi.**

Quando due raggi luminosi si intersecano lungo le loro traiettorie, rimangono immutate le loro direzioni e le loro intensità.

3) **Principio dell'invertibilità del cammino ottico.**

Qualunque sia il percorso di un raggio luminoso tra un punto A e un punto B dello spazio (ossia qualunque sia il tipo e il numero dei mezzi trasparenti e riflettenti interposti tra A e B), il percorso del raggio luminoso sarà sempre lo stesso, sia che il raggio abbia origine nel punto A, sia che abbia origine nel punto B, sicché il senso del suo percorso può sempre essere invertito, tanto nell'esperienza reale quanto nel ragionamento ipotetico.

LEGGI FONDAMENTALI DELL'OTTICA GEOMETRICA

⁶ La legge della rifrazione era già stata dimostrata nel X secolo, cioè prima di Alhazen, dal matematico e fisico persiano Ibn Shal [Abu Sa'd al-Alà Ibn Sahl; Persia, 940 d.C. – 1000 d.C.]. L'unica opera completa di questo scienziato arabo che sia giunta fino a noi è il *Libro sugli strumenti ustori*, reso noto per la prima volta, insieme ad altri scritti sopravvissuti, dallo storico della scienza Roshdi Rashed, autore di diverse pubblicazioni riguardanti la matematica e la fisica araba, quali *A pioneer in anaclastics: Ibn Sahl on burning mirrors and lenses*, 1990; *Géométrie et dioptrique au X^e siècle: Ibn Sahl, al-Quhi et Ibn al-Haytham*. 1993; *The development of Arabic mathematics* 1994. Gli scritti di questo autore dimostrano quanto fosse sviluppata e come fosse rimasta apparentemente ignota la scienza dell'ottica nella cultura araba già prima degli importanti contributi di Alhazen, che divennero noti in Europa sin dal medioevo. Gli scritti di Ibn Sahl dovevano essere certamente noti ad Alhazen e agli studiosi arabi successivi. Non sappiamo quando la sua opera cominciò a cadere in oblio e se qualche informazione sul suo contenuto abbia potuto raggiungere, nel XVII secolo, l'Occidente e gli scopritori comunemente noti della legge della rifrazione.

Com'è noto, se un raggio luminoso è inviato obliquamente su una superficie riflettente quale quella di uno specchio piano, esso si flette bruscamente nel punto di incidenza, ritornando, lungo una nuova direzione, nel semispazio attraversato dal raggio incidente, sicché la traiettoria del raggio luminoso apparirà nell'insieme, per chi osservi il fenomeno ponendosi frontalmente al piano individuato dal raggio incidente e dal raggio riflesso, come costituita da due segmenti di retta aventi origine nel punto di incidenza e ugualmente inclinati rispetto alla normale alla superficie riflettente passante per il punto d'incidenza (riferimento questo valido per qualsiasi tipo di superficie, piana o sferica che sia). In altre parole, nella riflessione di un raggio luminoso obliquo, la retta normale alla superficie riflettente nel punto di incidenza può essere considerata come la bisettrice dell'angolo compreso tra la traiettoria del raggio incidente e la traiettoria del raggio riflesso, con la conseguenza che le due traiettorie appariranno ad un osservatore posizionato frontalmente al piano individuato dai due raggi come speculari l'una all'altra.

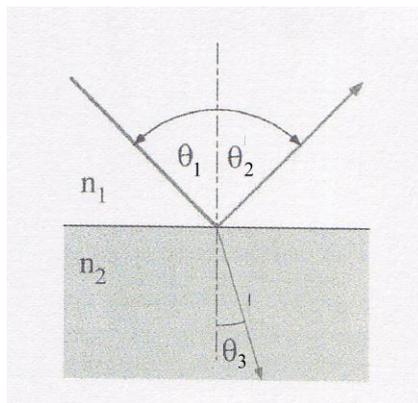


Fig. 1

Se il raggio incidente è normale alla superficie riflettente (angolo d'incidenza 0 gradi), il raggio riflesso coincide con quello incidente. È questo l'unico caso in cui il raggio torna indietro seguendo lo stesso cammino dell'andata. Simili osservazioni erano già state fatte da Archimede, e stanno alla base della I legge della Catottrica, che può a ragione essere chiamata Legge di Archimede-Snellius della riflessione.

1ª LEGGE DELLA CATOTTRICA O LEGGE DI ARCHIMEDE-SNELLIUS DELLA RIFLESSIONE

L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza e si trova nello stesso piano individuato dal raggio incidente e dalla normale alla superficie riflettente nel punto di incidenza.

$$\Theta_1 = \Theta_2$$

Per quanto riguarda la rifrazione, si osserva che se un raggio luminoso di colore definito incide perpendicolarmente sulla superficie di separazione di due mezzi diversi (per es. aria e acqua), esso passa nel secondo mezzo continuando senza flettersi lungo il prolungamento della traiettoria rettilinea descritta nel primo mezzo, per cui non si ha rifrazione. Se però il raggio luminoso è inviato obliquamente sulla superficie di separazione dei due mezzi, esso si flette bruscamente nel punto di passaggio dal primo al secondo mezzo, proseguendo in quest'ultimo lungo una nuova direzione, sicché la traiettoria del raggio luminoso apparirà nell'insieme, per chi osservi il fenomeno ponendosi frontalmente al piano individuato dal raggio incidente e dal raggio rifratto, come una linea spezzata costituita dai due raggi diversamente inclinati rispetto alla normale alla superficie di separazione dei due mezzi passante per il punto di incidenza. Osservazioni di questo tipo erano state fatte già dal persiano Ibn Shal, e stanno alla base della I Legge della Diottrica, che può a ragione essere chiamata Legge di Ibn Shal-Snellius della riflessione.

1ª LEGGE DELLA DIOTTRICA O LEGGE DI IBN SHAL-SNELLIUS DELLA RIFRAZIONE

Per due determinati mezzi materiali, il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è costante, e uguale al rapporto tra l'indice di rifrazione assoluto del secondo mezzo e l'indice di rifrazione assoluto del primo mezzo. Il raggio rifratto si trova nello stesso piano individuato dal raggio incidente e dalla normale alla superficie di separazione dei due mezzi nel punto di incidenza.

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_3$$

da cui:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_3}$$

da cui:

$$n_{21} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_3}$$

Quest'ultima equazione, alla quale si approdò dopo molti vani tentativi da parte di numerosi ricercatori, non escluso Keplero, fornisce la relazione tra l'angolo di incidenza e l'angolo di rifrazione di un raggio di luce che attraversi due mezzi omogenei e trasparenti tra loro otticamente diversi (costituiti da materiali diversi o aventi diversa densità). In particolare, l'equazione afferma che il rapporto tra il seno trigonometrico dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione che il raggio forma con la normale alla superficie di separazione dei due mezzi nel punto di incidenza, assume un valore caratteristico e costante per i mezzi considerati. Tale valore è espresso da un numero puro, detto *indice di rifrazione relativo del secondo mezzo rispetto al primo*. Se il primo mezzo è il vuoto, l'indice di rifrazione del secondo mezzo è detto *indice di rifrazione assoluto del mezzo considerato*, o semplicemente *indice di rifrazione* del dato materiale.

La legge di Snell, data in questa forma, che non tiene conto della velocità del raggio luminoso nei due mezzi, ma solo delle direzioni che esso presenta nell'uno e nell'altro, è una legge formulata su basi esclusivamente fenomenologiche, e perciò empirica. Essa servì in origine unicamente a calcolare la misura dell'angolo di rifrazione in un dato materiale, e venne perciò impiegata soprattutto dagli ottici per la costruzione di lenti. Determinando l'indice di rifrazione di vari materiali rispetto al vuoto, cioè il loro indice di rifrazione assoluto, tali materiali potevano essere distinti gli uni dagli altri e opportunamente classificati per essere poi utilizzati nella fabbricazione di dispositivi ottici.

LA TEORIA DI DESCARTES DELL'AZIONE A DISTANZA

Descartes, nella sua verifica della legge della rifrazione, condotta autonomamente da Snell, associò all'indice di rifrazione la velocità del raggio luminoso, ipotizzando che essa aumentasse nel mezzo più denso, sicché espose nella seguente forma la legge della costanza del rapporto dei seni degli angoli di incidenza e di rifrazione:

LEGGE DI DESCARTES DELLA RIFRAZIONE

Per due determinati mezzi materiali, il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è costante, e uguale, oltre che al rapporto tra l'indice di rifrazione assoluto del secondo mezzo e l'indice di rifrazione assoluto del primo mezzo, anche al rapporto tra la velocità del raggio rifratto e la velocità del raggio incidente. In altre parole, il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno

dell'angolo di rifrazione è costante e indipendente dall'inclinazione dei raggi; esso è uguale sia al rapporto inverso degli indici di rifrazione assoluti dei due mezzi, sia al rapporto inverso della velocità della luce negli stessi mezzi. Il raggio rifratto si trova nello stesso piano individuato dal raggio incidente e dalla normale alla superficie di separazione dei due mezzi nel punto di incidenza.

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_3}$$

da cui:

$$v_2 = \frac{n_2}{n_1} v_1 = \frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_3} v_1$$

A differenza della legge di Snell, la legge di Descartes non è più soltanto una legge empirica, ma una legge legata ad una teoria fisica, secondo la quale la velocità della luce aumenta nel mezzo ottico che ha indice di rifrazione maggiore. Per spiegare questo comportamento Cartesio avanza nella *Dioptrique* (1637) una prima teoria sulla natura della luce, sostenendo che la luce non è una sostanza e perciò non consiste di particelle in movimento da una parte all'altra dello spazio. Essa si trasmette per mezzo di un'azione a distanza, cioè senza spostamento di materia, e può essere immaginata come una perturbazione che si propaga in linea retta in un mezzo materiale; una perturbazione pragonabile ad una specie di pressione, la quale produce, nella materia attraversata, un movimento locale simile ad una vibrazione. Infatti, dice Cartesio, come il bastone del cieco trasmette impulsi da una estremità all'altra senza che si abbia spostamento di materia, consentendo al cieco di percepire la presenza di un ostacolo attraverso un insieme di sensazioni non visive, così avviene per i raggi luminosi. In altre parole il filosofo francese ipotizza che la luce consista in un fenomeno di propagazione simile a quello delle onde che si generano sulla superficie di uno stagno, quando in esso è fatto cadere un sassolino. Solo che nel caso della luce, la trasmissione della perturbazione da un punto a un altro del mezzo attraversato è istantanea (perché la sua velocità di propagazione è comunque molto elevata). Questa teoria, secondo la quale la materia è pura estensione e il vuoto non esiste, ha come conseguenza che la luce possa propagarsi solo in mezzi materiali, come si ha per il suono, e che la sua velocità dipende dalla natura del mezzo. La rifrazione è in tal modo spiegata come un fenomeno legato alle diverse proprietà elastiche dei mezzi attraversati dal raggio luminoso.

LA TEORIA DI NEWTON DELL'EMISSIONE

Secondo Newton, invece, ogni sorgente di luce emette un gran numero di minutissime particelle, le quali si spostano in linea retta nello spazio a velocità costante. Anche secondo questa teoria la velocità della luce aumenta nel mezzo ottico che ha indice di rifrazione maggiore. Questo comportamento sarebbe dovuto ad una accelerazione che il raggio luminoso subisce nel momento del suo passaggio dal mezzo meno denso a quello più denso, e ciò a causa di una più forte attrazione gravitazionale che le minutissime particelle del raggio subirebbero da parte degli atomi del mezzo più denso nel momento del primo contatto con esso. Una volta che il raggio luminoso sia penetrato all'interno del mezzo più denso, le forze esercitate dagli atomi di questo, equilibrandosi fra di loro, farebbero sì che il raggio proseguiva lungo la nuova traiettoria impressagli dalla sua accelerazione iniziale, senza più accelerare, ma ad una velocità maggiore rispetto a quella che esso aveva nel primo mezzo.

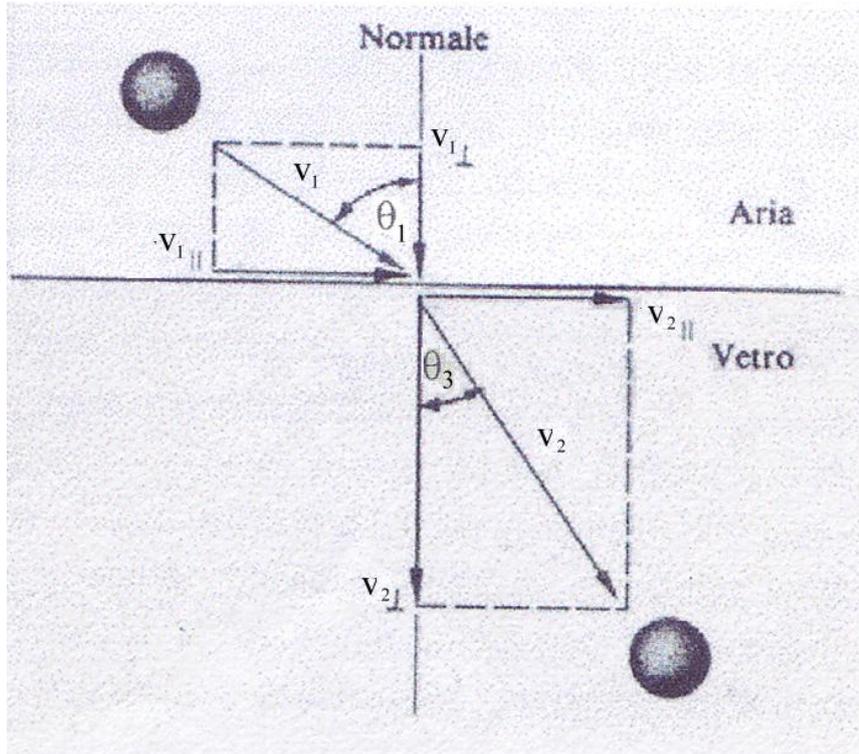


Fig. 2

Indichiamo con v_1 la velocità dei corpuscoli di luce nel primo mezzo e con v_2 quella nel secondo mezzo, mentre $v_{1\parallel}$ rappresenta la componente della velocità dei corpuscoli nel primo mezzo parallela alla superficie di separazione dei due mezzi dati (aria il primo e vetro il secondo).

L'indice di rifrazione nel passaggio del raggio luminoso dal primo al secondo mezzo è dato dal rapporto:

$$n = \frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_3}$$

Dove:

$$\text{sen}\theta_1 = \frac{v_{1\parallel}}{v_1} \quad \text{e} \quad \text{sen}\theta_3 = \frac{v_{2\parallel}}{v_2}$$

Da cui:

$$n_{21} = \frac{v_{1\parallel}}{v_1} / \frac{v_{2\parallel}}{v_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Da ciò si deduce che l'indice di rifrazione è indipendente dall'angolo di incidenza ed è espresso dal rapporto tra la velocità dei corpuscoli di luce nel secondo mezzo e quella (più piccola) nel primo mezzo.

Se invece un raggio luminoso cade sulla superficie liscia di un corpo molto compatto, le minute particelle che compongono il raggio, non riuscendo a penetrare all'interno del corpo, a causa della resistenza opposta dalle masse degli atomi di questo, come anche a causa degli stretti spazi tra di essi,

rimbalzano sulla superficie liscia del corpo come palle da biliardo, ossia seguendo le leggi dell'urto elastico, sicché vengono rinviate indietro in un'altra direzione, avendosi così la riflessione del raggio luminoso. La velocità del raggio riflesso risulterà uguale a quella del raggio incidente perché la componente perpendicolare alla superficie del corpo riflettente del vettore velocità delle particelle di luce (v_{\perp}) viene contrastata dalla reazione uguale e contraria degli atomi che compongono il corpo e quindi invertita, mentre la componente parallela alla superficie riflettente (v_{\parallel}) della velocità delle particelle rimane invariata durante l'urto elastico. In questo modo, l'angolo di incidenza sarà esattamente uguale all'angolo di riflessione.

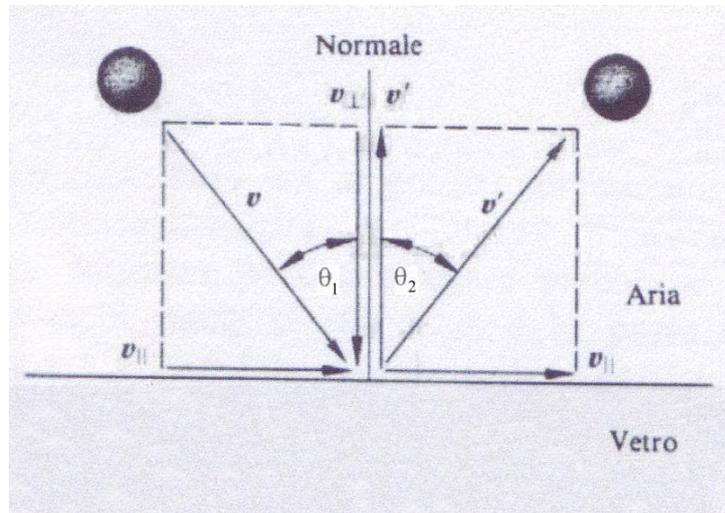


Fig. 3

Interpretazione di Newton della riflessione interna totale

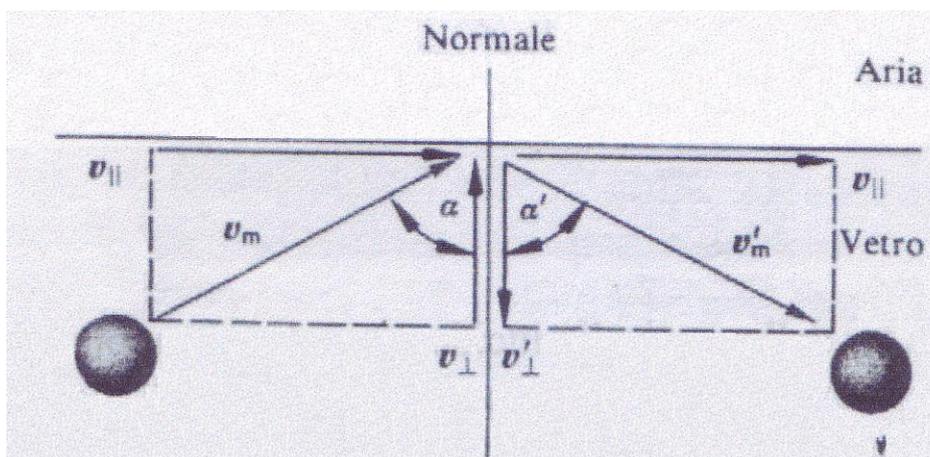


Fig. 4

Come sappiamo, nel passaggio da un mezzo più rifrangente ad uno meno rifrangente (per es. dall'acqua all'aria), si osserva che se il raggio luminoso supera una certa inclinazione, ossia se l'angolo di incidenza è molto grande, il raggio non passa più nell'altro mezzo, ma si riflette completamente verso l'interno del mezzo più denso, come se la superficie di separazione dei due mezzi fosse speculare. Newton spiegava questo fenomeno sostenendo che all'aumentare dell'angolo di incidenza, la componente perpendicolare alla superficie della velocità del raggio luminoso diviene via via più piccola, mentre aumenta la componente parallela alla superficie. Di conseguenza, oltre un certo valore dell'angolo di incidenza, le particelle di luce non hanno più la necessaria velocità di fuga per passare nell'altro mezzo, per cui esse vengono trattenute all'interno del corpo dalle forze gravitazionali degli atomi che lo costituiscono, le quali sono evidenti in

prossimità della superficie, mentre all'interno del corpo si equilibrano tra di loro. In tal modo le particelle di luce vengono a trovarsi nelle condizioni che giustificano la riflessione.

Interpretazione di Newton della diffrazione

Come è noto, la diffrazione consiste, nel suo aspetto più semplice, nel fatto che un fascio di luce, allorché incontra ostacoli dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda della radiazione componente, li contorna, portandosi anche dietro di essi, in modo che almeno una parte del fascio luminoso non sembra più propagarsi lungo la sua traiettoria rettilinea.

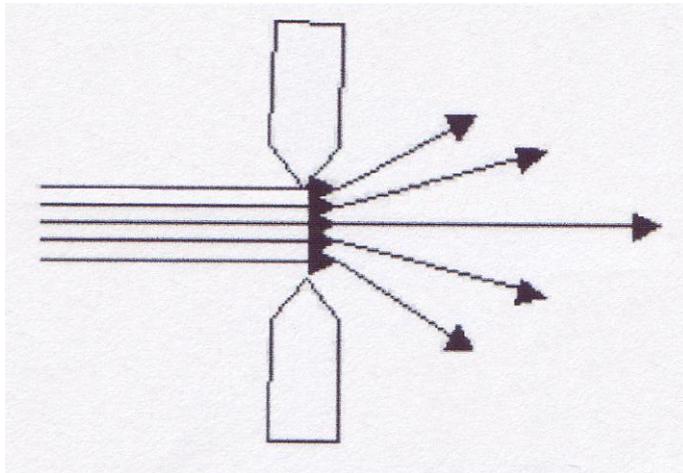


Fig. 5

Secondo Newton, i corpuscoli luminosi, nell'attraversare una fenditura sono variamente deviati, distribuendosi intorno ai bordi di questa per effetto delle forze che su di essi sono esercitate dai bordi stessi della fenditura, i quali si comportano nei confronti dei corpuscoli luminosi come delle masse materiali dotate di forza attrattiva di natura gravitazionale.

SVILUPPI SUCCESSIVI DELLE PRIME TEORIE DELLA LUCE

Poco dopo la pubblicazione della teoria di Newton nel 1672, apparve il lavoro di Christiaan Huygens, nel quale si proponeva di considerare la luce come un fenomeno ondulatorio. Le considerazioni sviluppate dal fisico olandese dimostrarono che la teoria ondulatoria da lui fondata permetteva di dedurre esattamente sia la legge della riflessione, sia quella della rifrazione, consentendo anche di spiegare la diffrazione. Inoltre, si rilevava che l'indice di rifrazione risultava essere uguale al rapporto diretto delle due velocità di propagazione delle onde nei due mezzi attraversati. La teoria ondulatoria di Huygens condusse così alla corretta formulazione della legge della rifrazione, che può a ragione essere chiamata 1^a legge della diottrica di Ibn Shal-Snell-Descartes-Huygens.

LEGGE DELLA RIFRAZIONE DI IBN SHAL-SNELL-DESCARTES-HUYGENS

Per due determinati mezzi materiali, il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è costante, ed è uguale, oltre che al rapporto tra l'indice di rifrazione assoluto del secondo mezzo e l'indice di rifrazione assoluto del primo mezzo, anche al rapporto tra la velocità del raggio incidente e la velocità del raggio rifratto. In altre parole, il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è costante e indipendente dall'inclinazione dei raggi; esso è uguale al rapporto

inverso degli indici di rifrazione assoluti dei due mezzi e al rapporto diretto della velocità della luce negli stessi mezzi.

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_3}$$

da cui:

$$v_2 = \frac{n_1}{n_2} v_1 = \frac{\text{sen}\theta_3}{\text{sen}\theta_1} v_1$$

In pratica, mentre Huygens aveva trovato per l'indice di rifrazione $n = v_1/v_2$, per Newton doveva essere il reciproco. Poiché fra l'aria e l'acqua l'indice di rifrazione è circa 4/3, secondo Newton la luce doveva propagarsi nell'acqua con velocità di 4/3 maggiore che nell'aria, mentre per Huygens doveva essere il contrario⁷. A quel tempo era impossibile giungere ad una decisione, perché non si sapeva determinare la velocità della luce nelle diverse sostanze; anzi si era molto scettici riguardo alla scoperta, dovuta a Römer, di una velocità finita della luce (1675); scoperta che, come è noto, era stata fatta per via astronomica, studiando i satelliti di Giove. Tuttavia, per la grande autorità di Newton, e anche a motivo della maggiore evidenza e praticità della sua teoria, vinse in un primo tempo la teoria corpuscolare, o teoria dell'emissione, benché già a quei tempi fossero noti alcuni di quei fenomeni che dimostrano direttamente la teoria ondulatoria, e cioè i fenomeni di interferenza e di diffrazione. D'altra parte, né la teoria di Newton né quella di Huygens riuscivano a spiegare i fenomeni di dispersione dei colori e la formazione dello spettro; fenomeni che si verificano in ogni rifrazione, e in ragione dei quali l'indice di rifrazione assume valori caratteristici per ogni tipo di radiazione monocromatica. Quando poi, verso la fine del '700, il medico oculista inglese Thomas Young, e un po' più tardi l'ingegnere francese Augustin-Jean Fresnel (1820) mostrarono che la teoria ondulatoria permetteva di spiegare tutti i fenomeni conosciuti di interferenza e di diffrazione (colorazione delle lamine sottili, spettri dei reticoli, ecc.), mentre la teoria dell'emissione non vi riusciva affatto, le cose cambiarono. Da quel momento la teoria ondulatoria dominò incontrastata nella fisica, e non ci sarebbe stato neppure bisogno della confutazione diretta

⁷ L'indice di rifrazione è un parametro utile a definire le proprietà ottiche di un mezzo rispetto a un altro. Esso ci dice di quanto la velocità di propagazione della luce varia nel secondo mezzo rispetto a quella che essa ha nel primo mezzo. Quando l'indice di rifrazione di una sostanza è riferito al vuoto (al quale si assegna valore 1), esso è detto *indice di rifrazione assoluto*. Oltre all'indice di rifrazione assoluto, si definisce anche un *indice di rifrazione relativo*, dato dal rapporto tra gli indici assoluti di due sostanze messe tra loro a confronto (in genere, le misure relative sono misure di precisione a sei cifre decimali, per le quali la sostanza di riferimento è l'aria o un gas nobile). Quando si indica l'indice di rifrazione di una sostanza senza riferire quale sia la sostanza di riferimento, si intende rispetto al vuoto, e di conseguenza l'indice di rifrazione è inteso assoluto. In genere, l'indice di rifrazione assoluto dei gas non si discosta di molto dall'unità (quello dell'aria è 1,000293, quello dell'elio 1,000036), mentre per i liquidi e per i solidi varia da un minimo di 1,333 (i.r dell'acqua) a un massimo di circa 3,5 (i.r del fosforo di gallio). Quindi, poiché il vuoto, a cui si assegna indice di rifrazione 1, è assunto convenzionalmente come mezzo di riferimento nelle misurazioni ottiche, tutti i mezzi materiali, essendo più rifrangenti del vuoto, presentano sempre un indice di rifrazione maggiore di 1. Quando le misure richiedono un grado di approssimazione non superiore a tre cifre decimali, l'indice di rifrazione può essere indifferentemente considerato assoluto tanto se riferito al vuoto, quanto se riferito all'aria.

della teoria newtoniana mediante la determinazione della velocità della luce nell'acqua da parte di Fizeau e Foucault nel 1850, con la quale si stabilì effettivamente che, secondo la previsione di Huygens, la velocità della luce nell'acqua è più piccola che nell'aria. I fenomeni d'interferenza non potevano assolutamente essere spiegati senza un'interpretazione ondulatoria. Inoltre, come se ciò non bastasse, un esperimento eseguito nel 1895 dal fisico tedesco Otto Wiener dimostrò anche direttamente la natura ondulatoria della luce. Il Wiener, facendo riflettere della luce su di uno specchio d'argento, mise in evidenza le cosiddette onde stazionarie, con nodi e ventri, quali sono facilmente visibili in qualsiasi corda tesa, solo che in questo caso si trattava non più di onde su una retta, ma nello spazio, e perciò i nodi e i ventri non sono rappresentati da punti, bensì da superficie, le quali, come mostra la fig. 6, in cui è data una sezione del fenomeno, sono parallele al piano dello specchio.

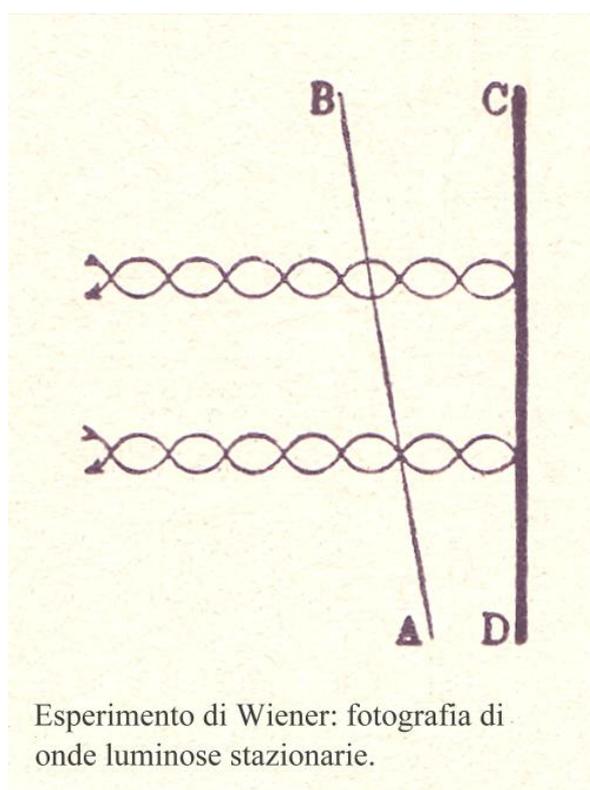


Fig. 6

Il Wiener, tagliando tutto questo sistema di nodi e ventri con una lastra fotografica (AB) avente un angolo di inclinazione molto piccolo, riuscì a fissare su di essa la loro posizione, risultando che le frange sulla lastra si presentavano tanto più distanziate quanto minore era l'inclinazione di questa. Si possono così misurare le distanze delle frange, ossia le lunghezze d'onda, oddirittura col metro. Carattere originale dell'esperimento è anche che, quando la lastra fotografica è in posizione verticale, la si può porre esattamente nel piano di un nodo. Allora essa non viene impressionata, benché la luce l'attraversi da parte a parte. Una dimostrazione più diretta non era dato di fornirla neppure per le vibrazioni di una corda.

Se dunque non poteva esserci più alcun dubbio riguardo alla giustezza, e non solo alla opportunità, della teoria ondulatoria della luce, essa ebbe tuttavia inizialmente da combattere contro grandi difficoltà, perché ci si sforzava invano di dare a queste onde una rappresentazione intuitiva, cioè meccanica. La fisica, come è noto, distingue le onde trasversali da quelle longitudinali. Nelle prime, come per esempio nel caso di una corda tesa vibrante, si hanno movimenti oscillatori delle singole particelle in direzione normale a quella della propagazione dell'onda. Nelle altre, come per esempio nel suono, le particelle vibrano invece nella direzione stessa della propagazione. È facile rendersi conto che le onde trasversali possono prodursi solo in mezzi dotati di elasticità di forma, e perciò non nei liquidi e nei gas. In questi ultimi possono prodursi solo onde longitudinali. Ma la luce, come mostrano in modo decisivo i fenomeni di polarizzazione, consta di onde trasversali. Tali fenomeni erano già noti a Huygens, che li sottopose anche ad un esame accurato (esperimento dello spato d'Islanda). Ciò nondimeno egli non poté decidersi a trarne la conseguenza della natura trasversale delle onde luminose, in quanto la luce ci giunge attraverso lo spazio vuoto, e non è facile attribuire a questo le caratteristiche di un corpo solido elastico, il quale sia inoltre dotato di un modulo di elasticità di grandezza enorme, data l'enorme velocità della luce. È uno dei maggiori meriti di Fresnel l'aver osato una simile ipotesi. Egli disse giustamente che più importante dell'evidenza intuitiva dei fondamenti di una teoria era la possibilità di dare alla teoria stessa uno sviluppo quantitativo. Se lo sviluppo quantitativo avesse condotto a risultati concordanti con l'esperienza, anche l'evidenza sarebbe venuta in generale più tardi da sé, se non addirittura per vie alle quali in principio non si era affatto pensato. Avvenne così anche per la teoria della luce, ma fu necessario che da tutt'altra parte si giungesse ad altri importanti risultati teorico-sperimentali perché un nuovo passo potesse essere fatto anche in questo campo di studi. Si conosceva ormai molto sul comportamento della luce, ma non si sapeva in cosa essa consistesse, e ciò impediva ulteriori progressi.

In principio si tentò di eludere il problema fondamentale della natura della luce adottando un atteggiamento di tipo positivista. Si disse: il concetto fisico della vibrazione rappresenta anzitutto un movimento di andata e ritorno, e fa pensare per lo più ad un tipo di movimento ben determinato, come quello dell'oscillazione sinusoidale, nella quale, in ogni istante, la distanza x del punto oscillante dalla sua posizione normale viene rappresentata graficamente come funzione del tempo dalla senoide disegnata nella fig. 7. Ora però questa medesima curva si può usare anche come immagine di un qualsiasi altro cambiamento periodico di stato che avvenga secondo la medesima legge. Si potrebbe per esempio far variare la temperatura all'interno di una stanza, alternandone ad intervalli regolari il riscaldamento e il raffreddamento, in modo che un termometro registrasse una tale curva. Ciò potrebbe allora considerarsi, in senso lato, come una oscillazione della temperatura o di altre grandezze; dove la parola "oscillazione" equivale a "mutamento periodico di una condizione fisica". In modo analogo, anche il concetto di onda può trovare una più larga estensione.

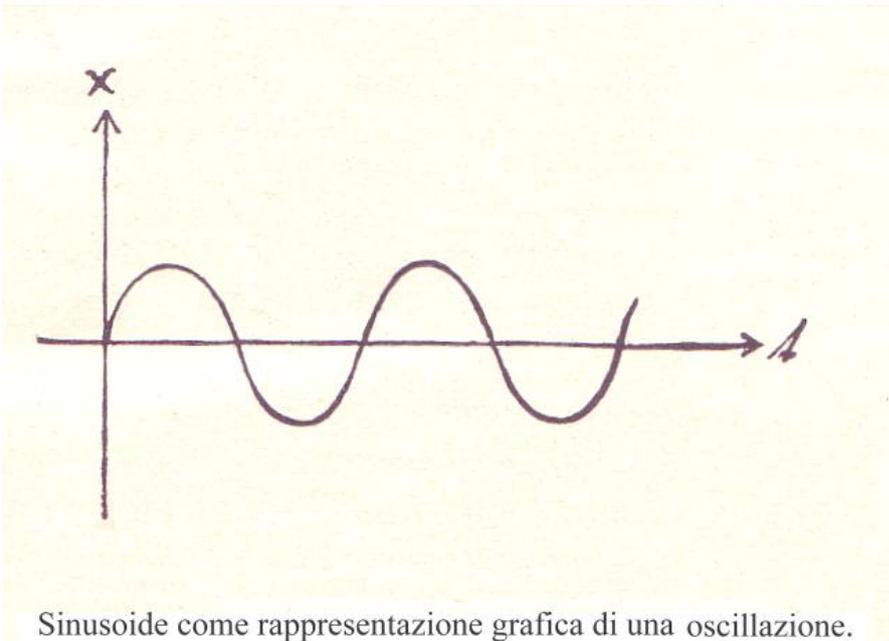


Fig. 7

Si ha un'onda, nell'ordinario senso della meccanica, quando una oscillazione che si produce in un punto dello spazio, a causa di legami elastici o di una perturbazione prodottasi nell'aria, si trasmette ai punti vicini, in modo che ciascun punto inizi ad oscillare un poco più tardi del precedente. Se qui, di nuovo, al posto dell'oscillazione intesa nel senso della meccanica, poniamo il concetto più generale di mutamento periodico di una condizione fisica, otteniamo il corrispondente concetto generalizzato di "onda". Un'onda, in senso fisico, rappresenta dunque in generale un mutamento periodico di uno stato fisico che si propaga nello spazio con velocità finita. Allora, una qualsiasi grandezza fisica, come la temperatura o un'altra a piacere, può essere sottoposta in un punto a mutamenti periodici arbitrari, i quali possono trasmettersi ai punti vicini per il sussistere di determinati legami. Di che specie sia la grandezza fisica in questione, che varia periodicamente in ciascun punto dello spazio, sempre un po' in ritardo rispetto al punto precedente, e quale sia la natura dei legami in parola, non ha importanza. La distanza di due punti che differiscono esattamente per un intero periodo si chiama, anche in questo senso più generale, la lunghezza d'onda λ della data variazione periodica. Per percorrere questo spazio, l'onda impiega evidentemente il tempo di un intero periodo di oscillazione T . Perciò per tutti i fenomeni ondulatori (e non solo per quelli meccanici) vale l'equazione $c = \lambda/T$, oppure, se si introduce, anziché il periodo di oscillazione T , il numero di oscillazioni per unità di tempo $n = 1/T$, si ha $c = n \cdot \lambda$. Chiarito allora che cosa si intendesse per *onda*, non aveva più senso domandarsi che cosa propriamente oscillasse in un fascio di luce, perché in effetti la questione rimaneva oscura e priva di risposta. Tuttavia la teoria ondulatoria spiegava meglio di altri modelli teorici i fenomeni legati alla propagazione della luce. In tal modo essa rimaneva però una teoria formale che rifletteva un atteggiamento

eccessivamente positivistic⁸ della scienza, il quale era dovuto ad un effettivo vuoto di conoscenze. Tale atteggiamento ha avuto i suoi meriti e i suoi demeriti. I primi consistono nel fatto che la formalistica teoria della luce ormai accettata, liberò effettivamente la fisica dalle difficoltà derivanti dalle pretese intuitive precedenti, troppo legate alla vecchia teoria meccanica (o elastica) della luce. Se infatti si rinuncia a domandarsi che cosa effettivamente oscilla nella luce, decretando semplicemente che tale domanda non può trovare alcuna risposta nella fisica, allora cadono naturalmente anche quelle difficoltà che nella teoria meccanica sorgevano dal fatto che allo spazio vuoto, per rendere possibili in esso le onde trasversali, venivano attribuite le caratteristiche di un corpo solido e assolutamente elastico. Già Huygens aveva immaginato lo spazio, in quanto conduttore delle onde luminose, riempito di una sostanza invisibile e imponderabile, e tuttavia esistente, quale era l'etere, che egli però, supponendo che le onde fossero solo longitudinali, si rappresentava come un gas straordinariamente sottile. Ora, questo quid inafferrabile e perciò sospetto di "ipostasi metafisica" (cioè di rappresentazione di un concetto astratto mediante un fatto concreto) veniva senz'altro eliminato. Non c'era più bisogno dell'etere, ma solo delle formule che descrivevano il comportamento osservabile della luce e che consentivano determinazioni quantitative. È perciò merito incontestabile della critica positivista l'aver liberato, in casi come questo, la teoria da elementi intuitivi ormai superflui e malcomodi per il loro stretto legame con concezioni troppo particolari. Il suo errore consiste però nell'aver ritenuto risolto un problema che con tale atteggiamento non venne neppure impostato, e che nondimeno esisteva, benché venisse messo provvisoriamente da parte. Nel nostro caso, tale problema si formula così. Di che natura è insomma quella grandezza il cui mutamento periodico dà luogo alla luce? È proibito alla fisica porsi una simile domanda? Quando il positivismo impedisce di affrontare tali quesiti, sostenendo che non si può in alcun modo rispondere a queste domande, almeno fino a che la scienza non ci fornisca ulteriori elementi di conoscenza, esso va oltre quanto che gli è consentito, trasformandosi in un dogmatismo negativo. Tale dogmatismo eliminò di fatto, e in modo del tutto arbitrario, un problema che rappresentava in definitiva la questione fondamentale su cui bisognava concentrarsi e rispetto al quale ogni puro formalismo matematico veniva ad essere non altro che una veste esteriore.

Che le cose stessero così nel caso della teoria della luce, è chiaro da quando le ricerche di Maxwell e Hertz diedero un'effettiva risposta a quelle domande intorno alla natura della grandezza che varia periodicamente nel fenomeno luminoso. Secondo la teoria puramente formalistica (cioè positivista) della luce, questo problema non avrebbe avuto alcun senso,

⁸ Positivismo – È la posizione di pensiero che si caratterizza per il suo richiamo a ciò che è posto (lat. *posito*) dalla realtà concreta dinanzi ai nostri sensi e che si conosce per mezzo dell'esperienza (*positivus* è infatti per i latini ciò che caratterizza la realtà ordinaria e convenzionale). Di conseguenza, secondo questa concezione, la forma più alta di conoscenza consiste nella semplice descrizione dei fenomeni sensibili. Da ciò deriva un atteggiamento di fiducia in tutto ciò che è posto come conoscenza sicura, fondata sull'osservazione dei fatti concreti della realtà, con esclusione di ogni motivo ideale, teorico, metafisico o di ordine personale e affettivo. In questa ottica, assumono particolare importanza gli aspetti pratici e gli interessi materiali di ogni attività. Inoltre, poiché viene posta a priori come scontata la verità e la giustezza di ogni asserzione proveniente dal campo della scienza, soprattutto se la descrizione positiva si risolve in un formalismo matematico, il positivismo tende ad una visione unica e acritica della realtà che può facilmente degenerare in un materialismo dogmatico. Il positivismo è perciò giustificabile solo in determinati ambiti di lavoro e di vita, ma non in senso generale e, soprattutto, non nel campo della scienza teorica, in cui tutto può sempre essere rimesso in discussione alla luce di nuove conoscenze.

mentre invece esso rappresentò il punto centrale di tutti gli ulteriori sviluppi della teoria della luce. In altri termini, l'ottica geometrica era giunta al suo massimo sviluppo, e più in là non poteva spingersi da sola.
