

# Dal Quark al Quasar

*Pensieri di Fisica, sulla Natura e sull'Universo*

## Riflessione e rifrazione

Mercoledì 8 marzo 2006

Caro Amico,

apparentemente, il modello ondulatorio e quello corpuscolare della luce, di cui abbiamo discusso di recente, sembrano a prima vista non esaurire l'elenco di descrizioni fisiche possibili (ed utilizzate) per i fenomeni luminosi; come sempre intendiamo qui il termine "luce" con un significato più vasto, estendendolo anche al di là dei confini (puramente sensoriali) di quella che chiamiamo "luce visibile". Siamo infatti abituati a descrivere i fenomeni ottici (specchi e lenti, giusto per citare gli esempi più noti) mediante una semplice descrizione geometrica, in cui la luce è costituita da *raggi*, linee rette che vengono deviate secondo leggi note quando intersecano superfici opache ma riflettenti (e allora si parla di riflessione) oppure superfici trasparenti (e allora si parla di rifrazione). Questa interpretazione geometrica dei fenomeni luminosi è alla base dell'ottica elementare, anche detta *ottica geometrica*, che non si esaurisce certo nelle due leggi che sto per enunciare (a parole, senza formule), ma che può efficacemente essere richiamata alla mente proprio con esse:

- *legge della riflessione*: un raggio di luce che colpisce una superficie riflettente con un certo angolo rispetto alla normale alla superficie stessa sarà riflesso da essa nello stesso piano definito dal raggio incidente e dalla normale alla superficie, e con un angolo uguale a quello di incidenza; legge banale da verificare, almeno approssimativamente: basta illuminare uno specchio con una torcia elettrica (meglio se con un puntatore laser, che è più collimato) e vedere dove si va a piazzare il cerchio luminoso sulla parete di fronte;
- *legge della rifrazione*: un raggio di luce che colpisce una superficie trasparente che delimita un mezzo (ad esempio aria) con un altro (ad esempio acqua, o vetro) con un certo angolo di incidenza rispetto alla normale alla superficie lascia il mezzo di provenienza e penetra nel mezzo di destinazione deviando il proprio percorso, ovvero propagandosi con un angolo differente da quello di incidenza; una precisa legge consente di calcolare il rapporto dei seni degli angoli di incidenza e rifrazione, rispetto a due numeri (chiamati *indici di rifrazione* dei due mezzi) che sono in qualche misura legati alla velocità a cui si propaga la luce nei due mezzi. Anche questa legge è banale da verificare col tipico esperimento del cucchiaino nella tazza piena d'acqua, o del manico di scopa nella vasca da bagno, che appaiono "spezzati", ma anche l'illusione che il fondo del mare o della piscina sia più vicino di quanto in realtà sia, e anche l'efficacia che le lenti correttive della vista hanno nel risolvere i difetti visivi dei nostri occhi.

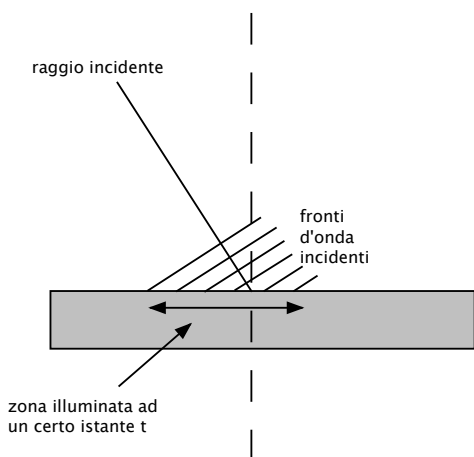
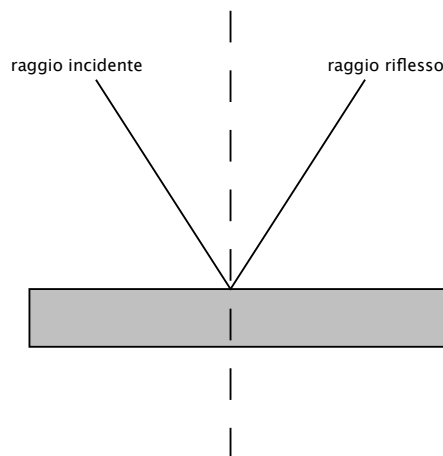
Tutto bene, quindi; fenomeni semplici da verificare, e semplici da descrivere. Ma il nostro animo non può essere soddisfatto. Infatti abbiamo sviluppato ben *tre* modelli per descrivere i fenomeni luminosi:

- il *modello ondulatorio*, per i fenomeni di interferenza e diffrazione; fondato su solide basi scientifiche (le equazioni di Maxwell di cui parleremo in futuro), è quello con la capacità descrittiva maggiore di tutti i fenomeni elettromagnetici (ivi comprese le onde radio);
- il *modello corpuscolare*, che abbiamo dovuto invocare per comprendere fenomeni come l'effetto fotoelettrico che il modello ondulatorio falliva miseramente di descrivere, e che ancora non abbiamo giustificato teoricamente in modo completo e coerente;
- il *modello geometrico*, che invochiamo per la descrizione dei fenomeni ottici elementari che, per semplicità, abbiamo ridotto a quelli comunemente noti della riflessione e della rifrazione.

Non saranno un po' troppi? Non siamo un po' delusi da questo proliferare di modelli per dei fenomeni che dovrebbero essere tutti unificati sotto un'unica descrizione, essendo tutti riconducibili alla luce? Sì, sono troppi; segno che ci sfugge qualche cosa, che ancora non abbiamo compreso interamente la profondità della natura della luce.

Ricondurre ad un unico punto di vista il modello ondulatorio e quello corpuscolare sarà possibile quando affronteremo, tra un po', le cosiddette teorie quantistiche di campo. Per oggi ci accontentiamo di mostrare come si possa ricondurre ad un unico punto di vista il modello ondulatorio e quello geometrico, secondo una procedura che sicuramente già conosci.

Partiamo dal fenomeno della riflessione. L'esperimento è semplice ed è schematizzato nella figura qui accanto. Come possiamo reinterpretare questi dati facendo uso del modello ondulatorio della luce? In realtà non è difficile. Il "raggio" di luce è evidentemente una schematizzazione, non esistendo un fascio luminoso così piccolo da avere una sezione puntiforme (e quindi priva di dimensioni) che possa incidere *in un solo punto* sulla superficie riflettente. Piuttosto, dobbiamo immaginare il "raggio" luminoso come un modo per schematizzare, semplificando il disegno, un'onda elettromagnetica: la direzione del raggio indica la direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica (i cui fronti d'onda saranno, come abbiamo visto, perpendicolari al raggio stesso), e il punto di incidenza è in realtà un punto preso a caso dei tanti (infiniti) punti in cui l'onda elettromagnetica inciderà sulla superficie riflettente. Questo modo schematico di rappresentare le cose perde tutta una serie di dettagli dell'onda elettromagnetica (frequenza, ampiezza e forma dei fronti d'onda, ecc.), ma ha il pregio della semplicità, della schematicità. Ma se è questo il modo di interpretare, fisicamente, un "raggio" di luce secondo il modello geometrico, riusciamo a descrivere il fenomeno della riflessione facendo uso del modello ondulatorio?

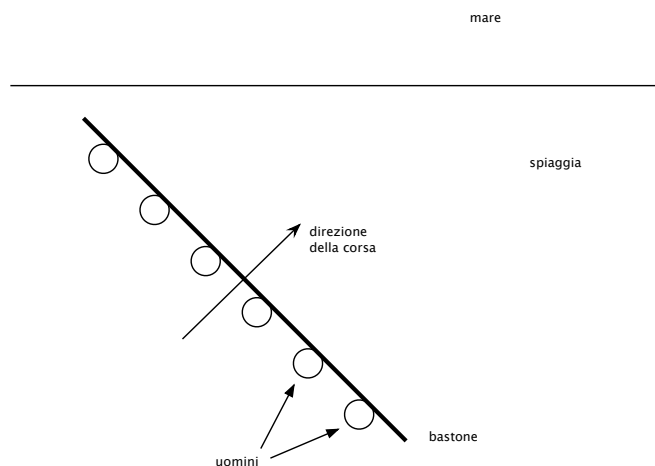
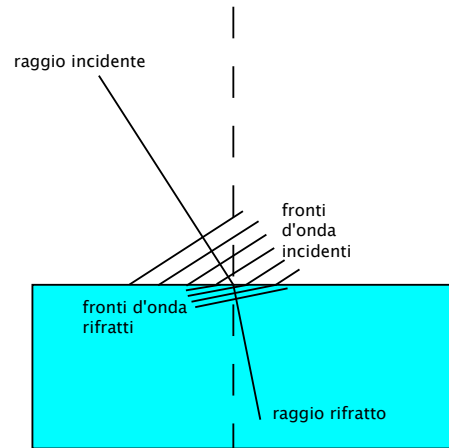


La risposta, come ben sai, è affermativa. In realtà, il fenomeno della riflessione non è nient'altro che un fenomeno di interferenza: l'onda elettromagnetica giunge sulla superficie riflettente con un certo angolo, facendo sì che, ad ogni istante di tempo, siano presenti sulla superficie riflettente infiniti punti del fascio luminoso caratterizzati tutti da una fase diversa l'uno dall'altro, dal momento che non appartengono tutti allo stesso fronte d'onda. Nella figura qui di fianco è mostrato, a titolo di esempio, il medesimo raggio incidente di prima, ma questa volta sono mostrati anche alcuni fronti d'onda (parte di essi) dell'onda incidente, ed è mostrata la porzione di superficie riflettente illuminata ad un certo istante di tempo. Come si vede, punti diversi della superficie riflettente sono illuminati da punti dell'onda elettromagnetica con fasi diverse: tutte le intersezioni tra i fronti d'onda e la superficie avranno la stessa fase, naturalmente (chiamiamola 0), ma tra un fronte d'onda e l'altro tutti i

valori rimanenti (fino a  $2\pi$ ) dell'angolo che compare nella funzione seno (che ti ricordo descrivere i fenomeni ondulatori) fanno la loro comparsa. Come abbiamo visto, possiamo immaginare che ogni punto di un'onda elettromagnetica sia a sua volta sorgente di un'altra onda elettromagnetica sferica; e sarà l'interferenza tra le infinite onde così prodotte a determinare la forma del fronte d'onda che, al passare del tempo, si propaga. Ecco allora che, se per ogni punto della superficie riflettente illuminata all'istante  $t$  dall'onda incidente generassimo un'onda sferica che parte, all'istante  $t$  stesso, con la stessa fase dell'onda incidente, e lasciassimo passare un po' di tempo, vedremmo comparire dei nuovi fronti d'onda, che chiameremo *riflessi*, con la medesima frequenza (la luce, quindi, non cambia colore), propagantisi lungo una direzione posta rispetto alla normale al medesimo angolo che aveva l'onda elettromagnetica incidente; e se ritrasponiamo questa onda elettromagnetica riflessa nello schema offertoci dal modello geometrico, otteniamo proprio il raggio riflesso mostrato nella figura in alto con la ben nota legge della riflessione sull'uguaglianza tra l'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione.

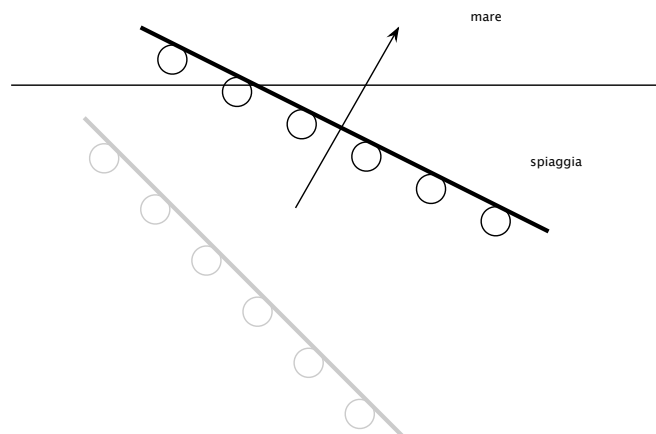
Diverso, e proprio per questo non meno interessante, il discorso che riguarda il fenomeno della diffrazione. In questo caso il raggio di luce non incide su una superficie riflettente, ma sulla superficie che separa due mezzi diversi, che avranno due *indici di rifrazione* diversi. Quali proprietà fisiche della materia siano responsabili dell'indice di rifrazione di un mezzo sarà oggetto di discussione quando parleremo finalmente delle equazioni di Maxwell; per ora prendiamo come un dato di fatto che mezzi diversi (trasparenti) come aria, acqua, vetro, quarzo, plexiglass e così via hanno ognuno un indice di rifrazione diverso. Orbene, secondo il modello geometrico della luce, al passaggio da un mezzo ad un altro, il raggio di luce

viene deflesso secondo una legge nota che coinvolge i seni degli angoli prima e dopo la deflessione (rispetto alla normale alla superficie nel punto di incidenza) e gli indici di riflessione. Un esempio schematico è dato nella figura qui di fianco. Il medesimo raggio incidente ora raggiunge la superficie di separazione tra due mezzi con differente indice di rifrazione; nel mezzo inferiore (quello azzurrino), il raggio rifratto ha, rispetto alla normale alla superficie di delimitazione, un angolo minore. Riconvertendo lo schema proposto dal modello geometrico in un modello ondulatorio, i fronti d'onda sulla superficie di discontinuità tra i due mezzi si flettono pure loro; l'effetto geometrico, ben visibile dalla figura, è che nel mezzo inferiore i fronti d'onda rifratti appaiono più ravvicinati. Come ben sai, la distanza tra i fronti d'onda altro non è che la lunghezza d'onda dell'onda elettromagnetica; accorciarla sembrerebbe voler dire che ne abbiamo aumentato la frequenza (la luce incidente è rossa, ad esempio, ma propagandosi nel mezzo sottostante diventa di colore blu, sempre ad esempio). Questo naturalmente è contrario all'esperienza (oltre ad introdurre qualche problema di conservazione dell'energia), per cui deve succedere qualche cos'altro; ciò che accade è che, passando nel mezzo sottostante, la luce cambia velocità; nell'esempio riportato, essa *va più piano*. Ma com'è possibile?



Immagina un lungo bastone rigido. A reggerlo, in orizzontale, sono molti uomini, che corrono tutti alla stessa velocità sulla spiaggia. Gli uomini reggono il bastone trasversalmente, come schematizzato in figura, che raffigura la scena vista dall'alto. Il bastone rappresenta il fronte dell'onda elettromagnetica; ognuno degli uomini schematizza il principio secondo il quale ogni punto di un'onda elettromagnetica è a sua volta un "generatore" di un'altra onda elettromagnetica; il meccanismo di interferenza che fa mantenere al fronte d'onda la sua forma mentre si propaga è dato dalla rigidità del bastone. Ora gli uomini corrono tutti insieme reggendo orizzontalmente il bastone, e

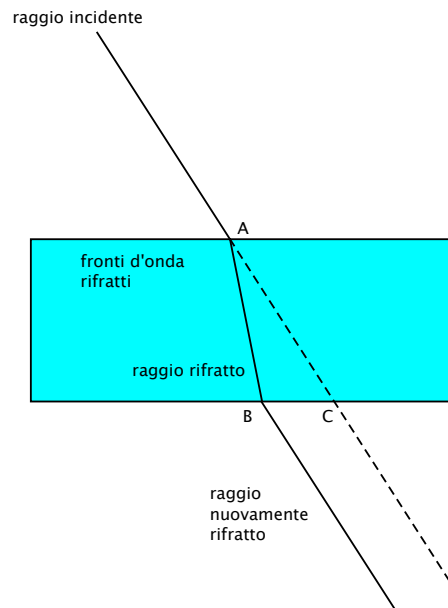
questo pertanto si muove come un fronte d'onda. Ad un certo punto l'uomo più a sinistra raggiunge il delimitare tra la spiaggia e il mare (immaginiamo che ci sia una linea di separazione netta e ben definita tra i due "mezzi di propagazione"). Correre con i piedi e le gambe a mollo nel mare è più difficile che correre sulla spiaggia, e benchè l'uomo ci metta tutto il suo impegno, dovrà rallentare l'andatura. Gli altri, però, non rallenteranno, e allora il bastone inizierà a ruotare e la sua direzione di propagazione inizierà a variare. Il fenomeno proseguirà a mano a mano che gli altri uomini entrano anche loro in mare; poi, immaginando che la profondità del mare sia costante e consenta sempre agli uomini di continuare a correre, quando tutti loro saranno entrati in acqua, torneranno a correre tutti alla stessa velocità (più piano di prima), la direzione di propagazione del bastone non cambierà più, ma intanto sarà diversa da quella che aveva inizialmente.



Il modello ondulatorio è pertanto perfettamente in grado di spiegare anche il fenomeno della rifrazione; certo, la spiegazione, ancorché affascinante, è certamente più complicata di quella offerta dal modello geometrico (ed è per questo che spesso si preferisce questo per descrivere i fenomeni di ottica elementare), e comporta di accettare il fatto che il passaggio da un mezzo ad

un altro comporti una variazione di velocità dell'onda elettromagnetica. Se così è, la relazione  $\lambda = c / \nu$  che lega la lunghezza dell'onda elettromagnetica, la sua velocità di propagazione (nel vuoto) e la sua frequenza, diventa  $\lambda = v / \nu$ , dove (con un leggero bisticcio di simboli che spero siano rappresentati in modo sufficientemente diverso)  $\nu$  è la velocità con cui si propaga l'onda elettromagnetica in un mezzo materiale (e coincide con  $c$  nel vuoto e non può mai superare il valore di  $c$ , come vedremo parlando di teoria speciale e generale della relatività); se nel passaggio da un mezzo ad un altro  $\nu$  diminuisce, diminuirà pure  $\lambda$ , pur restando  $\nu$  costante. Per fortuna, come avremo modo di vedere parlando delle equazioni di Maxwell, le cose stanno proprio così. E allora continueremo ad usare il modello geometrico della luce tutte le volte che esso, con la sua maggiore semplicità, ci permetterà di trattare in maniera più agevole i problemi a cui siamo interessati (ad esempio potremmo voler discutere del funzionamento delle lenti degli occhiali o degli obiettivi delle macchine fotografiche), consapevoli che il modello ondulatorio della luce non è stato né spodestato, né contraddetto, né reso inutile, ma è anzi il presupposto senza il quale il modello geometrico non avrebbe consistenza teorica. Per la riunificazione tra il modello corpuscolare e quello ondulatorio, invece, dovrai aspettare ancora un po'.

Concludiamo con una piccola riflessione buttata lì, ma che presto darà i suoi frutti. Torniamo allo schema del fenomeno della rifrazione che ti ho proposto all'inizio della pagina precedente. Intenzionalmente, non ho mostrato che cosa accade al raggio rifratto quando giunge nuovamente all'interfaccia tra il mezzo azzurrino e il mezzo esterno, in cui dicevamo che la luce si propaga più in fretta. Se ora ci accingiamo ad esaminare anche questo caso, ciò che succede non desterà certo il tuo stupore: il raggio verrà nuovamente rifratto, assumendo ancora la stessa direzione che aveva inizialmente, seguendo uno schema interpretativo assolutamente analogo (ma speculare) a quello che abbiamo adottato in precedenza. Naturalmente sarà solo un po' spostato rispetto all'inizio. Orbene, c'è un altro modo di analizzare il fenomeno, che ti accenno solo, ma ne ripareremo tra non molto, al termine di una serie di epistole che inizieremo a breve sulla Meccanica Analitica (ti chiederei che cosa c'entri la Meccanica Analitica con l'Elettromagnetismo, ma in Fisica ci sono sempre tanti, inaspettati legami interessanti). Se il mezzo più rifrangente (quello azzurrino della figura qui di fianco) fosse stato assente, la luce avrebbe proseguito in linea retta lungo la linea tratteggiata. Com'è evidente dalla figura, il segmento AC è più lungo del segmento AB percorso dalla luce quando invece è presente il mezzo maggiormente rifrangente. Eppure, il *tempo* impiegato a percorrere i due segmenti è lo stesso, perché le velocità della luce nei due casi sono differenti. La grandezza che conta, in realtà, è un'altra (e non il tempo), ma stiamo aprendo una nuova prospettiva: la rifrazione della luce avviene *perché se la direzione di propagazione non cambiasse una certa grandezza* (diciamo il tempo, anche se a rigore non è esatto) *diventerebbe più grande di quanto potrebbe essere*. È solo un cenno, una frase buttata lì che mi rendo conto non ha, in questo contesto, nessun significato. Ma è qualche cosa che, tra non molto, e in un contesto molto diverso (ma molto meglio definito e rigoroso) ritroveremo.



A presto,

Marco