

O13 - L'ARCOBALENO fatto in casa

Tutti conoscono questo fenomeno naturale ed è inutile descriverlo. Del resto, proprio in questo sito, nella serie "Approfondimenti di Scienze Naturali", esiste una descrizione più precisa dell'arcobaleno, che dà conto delle sue caratteristiche principali (A13 - "I meccanismi di formazione dell'ARCOBALENO").

E poi, un arcobaleno artificiale può essere realizzato da chiunque disponga di un giardino e di un tubo di gomma per innaffiare: con un'apposita "lancia" o semplicemente strizzando l'estremità del tubo fra le dita, è possibile realizzare una pioggerella artificiale e, in presenza di sole, un pezzetto d'arcobaleno.

Ora vogliamo invece riprodurre con mezzi "casalinghi" ciò che avviene all'interno di ogni singola goccia di pioggia e verificare il valore degli angoli calcolati nell'articolo citato sopra.

Riprendiamo le figure 1 e 3a presenti in quell'articolo, che illustrano l'andamento essenziale del fenomeno.

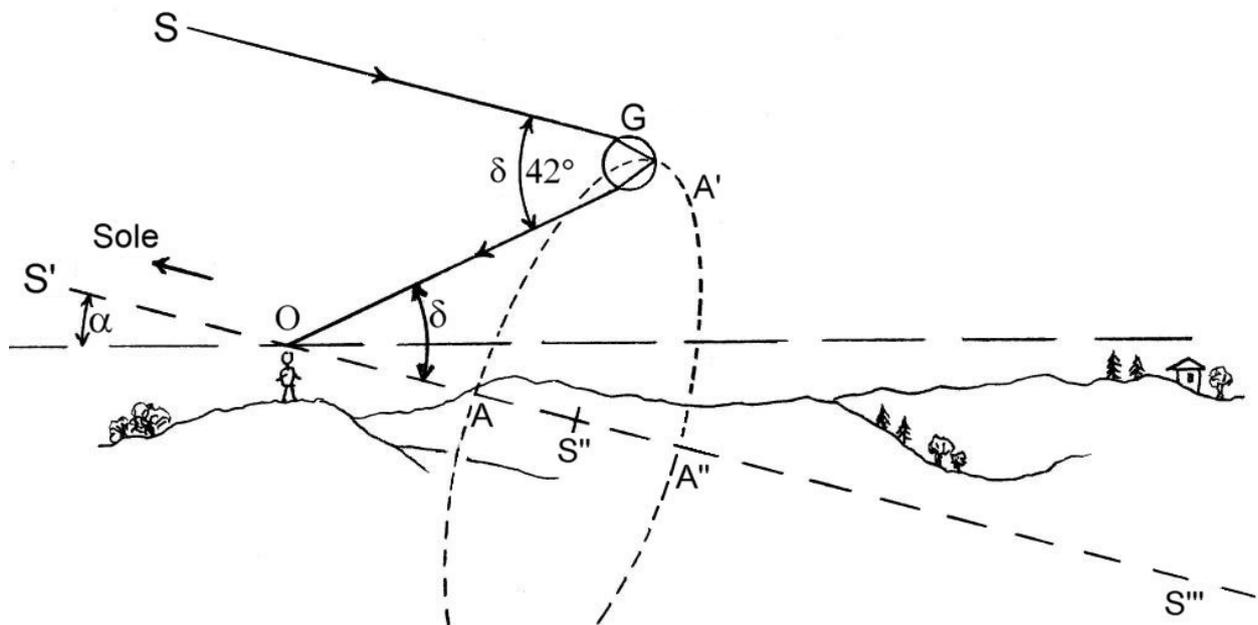


Fig. (1) 205 - Schema di formazione dell'arcobaleno. G rappresenta una generica goccia d'acqua di pioggia. La linea orizzontale a tratteggio lungo rappresenta l'orizzonte dell'osservatore. SG o S'O rappresentano la direzione da cui proviene la radiazione solare.

In fig. 205 è indicato sommariamente lo schema di propagazione della radiazione solare che viene riportata all'indietro (GO) dopo aver attraversato una singola goccia di pioggia (G), ma descrivendo con il raggio in arrivo (SG) un angolo di circa 42° . Nella fig. 206 (la 3a dell'articolo citato), è meglio visibile il cammino di ogni "raggio" all'interno della goccia.

In questa figura, si descrive il percorso del "raggio di Cartesio", cioè quel particolare raggio solare che giunge sulla goccia con un angolo d'incidenza tale da venire riflesso internamente e poi rimandato all'indietro formando il famoso angolo $\delta = 42^\circ$ circa. La lettera greca δ ("d" minuscola o "delta") indica l'angolo costante che il raggio "rimandato indietro" (GO) forma rispetto alla direzione del sole (del raggio in arrivo dal sole: SG).

Ma, a parte l'angolo di 42° , il raggio di Cartesio, è quello, e solo quello, che emerge dalla goccia di pioggia sotto forma di fascetto di raggi paralleli. In quanto parallelo, questo fascetto può giungere al nostro occhio senza allargarsi e quindi senza perdere troppo di intensità: esso contribuisce a darci la sensazione dei vari colori dell'iride.

Tutti gli altri raggi, che incidono sulla goccia con angoli di diverso valore, emergono dalla goccia come fascio divergente (o come fascio convergente che, dopo il punto di convergenza, diventa divergente). In questo caso, per piccola che sia la divergenza, il fascio percorre anche

centinaia di metri o chilometri prima di arrivare al nostro occhio, si allarga di molto, e noi ne vediamo solo un'infinitesima parte; in altre parole, non lo vediamo.

Dunque, per descrivere l'arcobaleno, basta descrivere questo privilegiato raggio.

Noi ci proponiamo proprio di realizzare una maxi-goccia, di farla funzionare secondo lo schema di Cartesio, e dimostrare che l'angolo di deviazione δ è proprio di 42° circa; modificando anche di poco la situazione, vedremo che il fascio emergente (EO in fig. 206) diventa divergente.

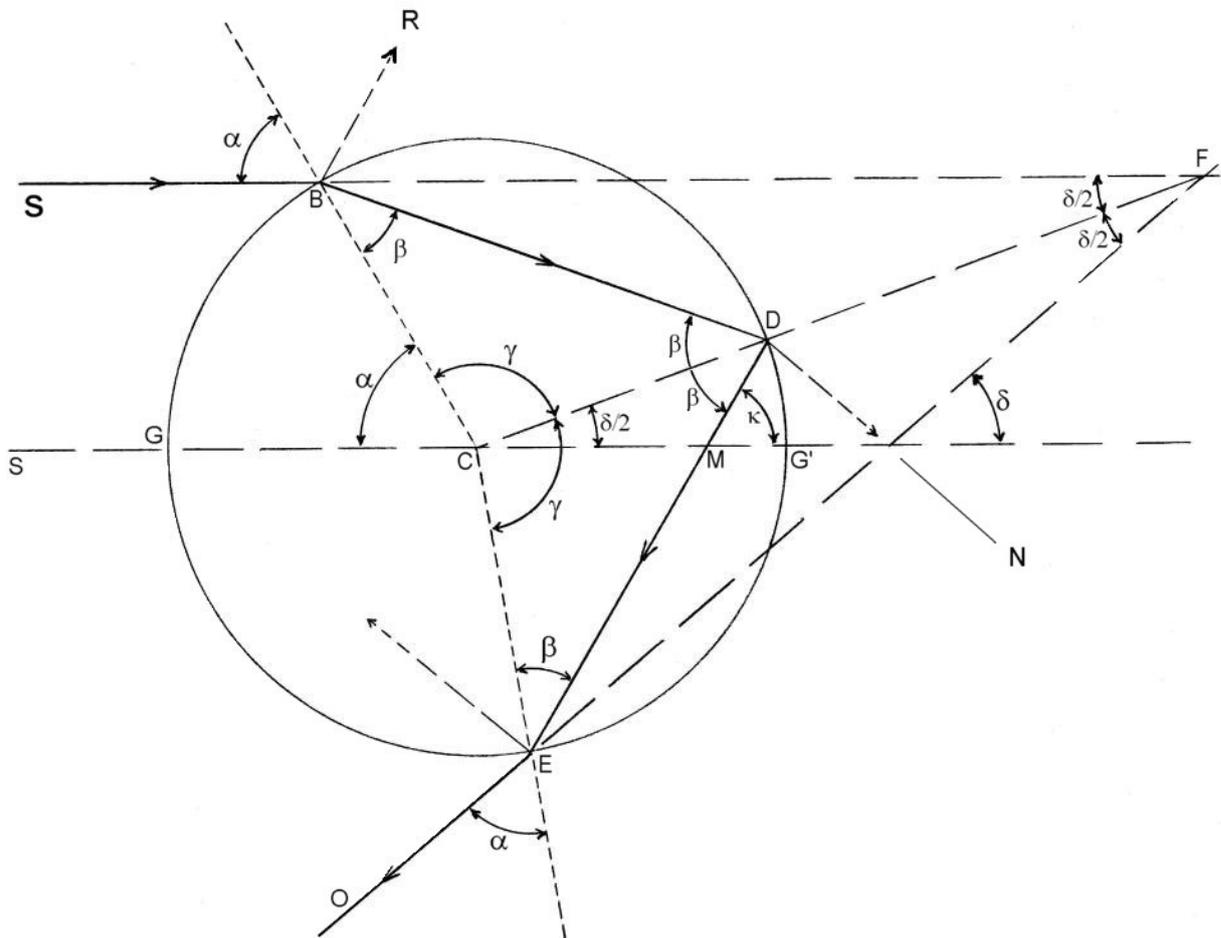


Fig. (3a) 206 - Schema del percorso di un raggio solare generico (SB) in una goccia d'acqua di pioggia, supposta sferica. Tutto il percorso si svolge in un piano che passa per il centro C della sfera. Negli altri percorsi, le cose si complicano.

L'angolo d'incidenza $\alpha = 60^\circ$ è vicino a quello del "raggio di Cartesio". L'angolo di deviazione che ne risulta è $\delta = 42,0704^\circ$, nella supposizione di considerare l'indice di rifrazione dell'acqua $n_D = 1,333$ a 20° C e la lunghezza d'onda della luce in arrivo pari a 589 nm (giallo).

Per realizzare il nostro modello, essendo difficile trovare un recipiente sferico, e comunque trovandosi il raggio di Cartesio in un piano meridiano della goccia di pioggia, è sufficiente utilizzare un recipiente cilindrico.

Si cerchi allora un recipiente cilindrico in vetro o plastica trasparente, del diametro da 5 a 15 cm; la superficie delle parete cilindrica dovrà essere la più regolare e la più liscia possibile, pena una forte dispersione del fascio. Può andar bene una "scatola di Petri" in plastica o un "crystalizzatore", da reperire nella vetreria per laboratorio di biologia o di chimica. Anche certi recipienti di plastica o vetro di uso domestico vanno bene, purché trasparenti e con pareti lisce: bottiglie, bicchieri, scatole di cioccolatini e contenitori vari.

Il recipiente deve avere un'altezza di almeno un centimetro. Esso va colmato con acqua alla quale si aggiunge una gocciolina di inchiostro di china bianca. Si rimescoli bene la sospensione, ricordando che è facile eccedere: si cominci con mezza gocciolina e, semmai, si aggiunga altro inchiostro finché il raggio del laser (vedi sotto) diventa visibile (vedi la fig. 209). Le pareti esterne del recipiente siano pulite ed asciutte. È sottinteso che il recipiente va disposto in posizione orizzontale su un qualunque supporto, ad un'altezza tale che il fascio laser penetri qualche mm sotto la superficie superiore della massa d'acqua. Sotto di esso, un pezzo di carta o stoffa nera.

Nel giro di mezz'ora le particelle d'inchiostro tendono a precipitare sul fondo, per cui questo dispositivo va realizzato subito prima dell'utilizzo.

Per visualizzare il fascio che si propaga nella goccia (= il nostro recipiente), occorre un fascio sottile e molto collimato, con minima divergenza. Il modo più pratico per ottenere questo è un piccolo "puntatore" a laser; si tratta di un piccolo laser a stato solido, contenuto in un tubetto grosso come un dito, assieme a tre pile a bottone. Lo si compra sulle bancarelle per pochi euro.

Un oggetto simile è stato proposto per realizzare svariate esperienze sulla diffrazione e l'interferenza (vedi gli articoli O8 ed O9 in questa medesima serie) e, date le sue caratteristiche, la sua facile reperibilità ed il basso costo, è caldamente consigliato.

Si potrebbe obiettare che esso è quasi monocromatico (la lunghezza d'onda di solito si aggira su 650 nm, nella regione del rosso) e quindi non si vedranno i colori dell'iride. Inoltre, gli angoli calcolati nell'articolo citato all'inizio andranno ritoccati poiché essi erano stati calcolati per la riga gialla del sodio (589 nm).

Tutto vero, ma è quasi impossibile con mezzi semplici realizzare un fascio bianco che sia intenso e collimato come quello del laser. Bisognerà adattarsi.

Per inciso, la presente esperienza può durare a lungo ed è bene ricorrere a due accorgimenti:

-- bloccare con un giro di nastro adesivo il pulsantino di accensione del laser, per non dover tenere un dito fisso a premerlo;

-- realizzare un piccolo alimentatore da 3,5 - 4 V in corrente continua, per ridurre la spesa delle pile.

Nell'articolo O8 ("La Diffrazione"), figure da 107 a 109, avevamo già proposto un montaggio stabile per il laser, con relativo alimentatore collegabile ad una normale presa da 220 V, ed in fig. 109 è proposto un semplice schema elettrico per l'alimentatore.

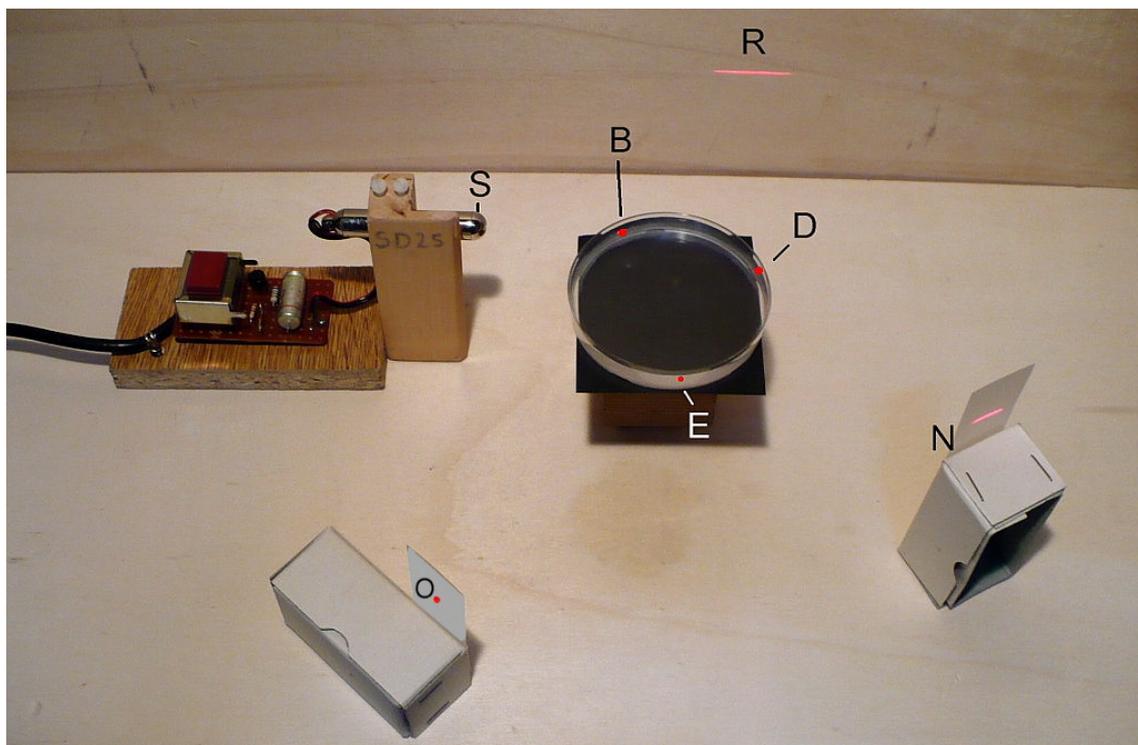
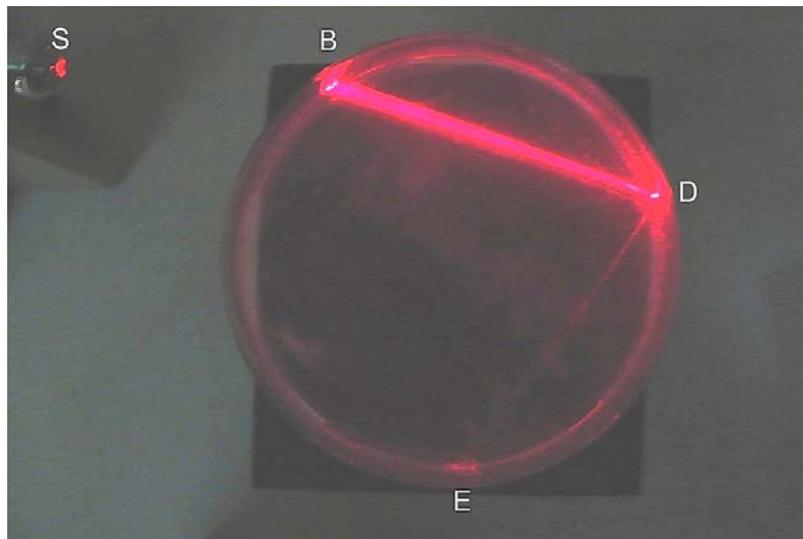


Fig. 207 - Disposizione generale per l'arcobaleno artificiale, o almeno per simulare il percorso di un raggio solare all'interno di una goccia di pioggia. I simboli inseriti nella foto corrispondono a quelli dello schema di fig. 206: S (il forellino di uscita del laser) indica la direzione di provenienza di un ideale raggio solare. B è il punto d'incidenza di tale raggio. BD è il percorso del primo raggio rifratto all'interno della "goccia". DN è il percorso del raggio che, dopo una seconda rifrazione, emerge dalla goccia e si rende visibile sullo schermino N. Così EO è il percorso finale del raggio che emerge dalla goccia e concorre alla formazione dell'arcobaleno. Il raggio SB, incidendo in B, viene parzialmente riflesso secondo il percorso BR. La sua traccia sulla parete di fondo (R) è allungata perché la superficie riflettente (quella esterna del recipiente) è cilindrica. Per ugual motivo è allungata la traccia in N. Invece, la traccia in O è ragionevolmente puntiforme poiché, con la corretta posizione del raggio SB, il raggio EO risponde alla definizione del "raggio di Cartesio".

Si disponga dunque a pochi centimetri dal recipiente il laser con il fascio orizzontale e lo si sposti finché il fascio incide sulla superficie cilindrica del recipiente secondo lo schema di fig.

206 e 207. Riferendoci alla figura 206, il fascio laser segue all'inizio il percorso SB; la diffusione operata dalla piccola quantità di china bianca sospesa nell'acqua renderà ben visibile il fascio BD, che è convergente a causa della curvatura della superficie in B. In fig. 207 si vede la disposizione concreta dell'esperimento. In fig. 208 si vede il particolare della diffusione del fascio nell'acqua intorbidata dalla china bianca. L'ambiente è stato oscurato per evidenziare i fasci.

Fig. 208 - I raggi incidente (SB) ed emergente (da E) non sono visibili poiché viaggiano in aria. BD e DE sono invece resi visibili dalla sospensione di china bianca. Il raggio BD è intenso, quanto basta per saturare il sensore CCD della fotocamera digitale (macchioline bianche in B e D). Invece il raggio DE è poco visibile poiché proviene da una riflessione interna non totale; anche il punto di emergenza (E) è poco visibile.

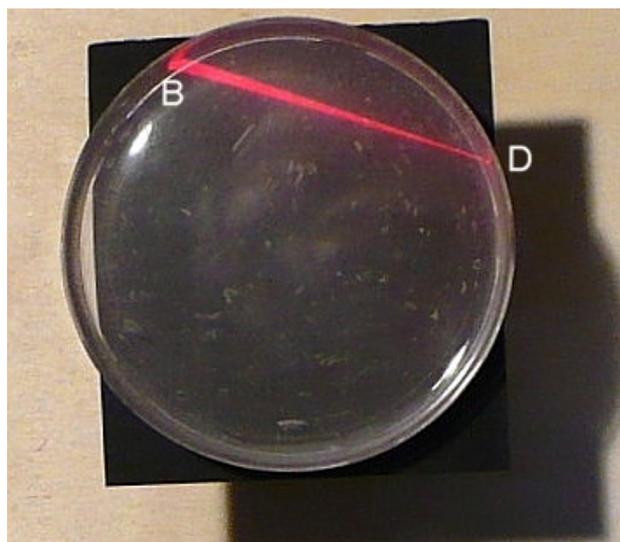


Variando le condizioni di ripresa, è possibile mettere bene in evidenza la convergenza del fascio BD, convergenza dovuta sempre alla curvatura della parete del recipiente (fig. 209).

Fig. 209 - Il fascio BD, abbastanza largo agli inizi, converge nel punto D.

Nell'osservazione diretta, si apprezzano molti più dettagli che nella fotografia, e molto dipende dalla diluizione della china bianca.

In ogni caso, per aumentare il contrasto dell'immagine, è necessario porre un cartoncino o altro foglio nero sotto il recipiente.



Torniamo alla fig. 207. Sulla parete di fondo non sarà difficile visualizzare il fascio (R), riflesso esternamente in B (fortemente sparpagliato a causa della forma cilindrica convessa della superficie riflettente, e di forte intensità poiché si tratta di riflessione radente). Con un pezzetto di carta da lucidi (presso N in fig. 207) si potrà visualizzare anche il fascio DN (sempre di forte intensità) che emerge dal cilindro in D per semplice rifrazione; anche questo fascio sarà sparpagliato per la stessa ragione sopra discussa. In D si verifica però anche una riflessione interna (non totale), che è debole data le perdite già subite dal fascio ed il piccolo angolo d'incidenza. La diffusione operata dalla sospensione renderà visibile anche il percorso del fascio DE, che è leggermente divergente. In E si ha un'ulteriore riflessione interna, debolissima e quasi invisibile, ma anche una rifrazione verso l'esterno (EO). È questo il fascio "di Cartesio", che può concorrere alla formazione dell'arcobaleno¹¹⁴. Il fascio EO si visualizza col solito pezzetto di carta da lucidi.

Con questo dispositivo si formano angoli molto simili a quelli dell'arcobaleno reale, poiché il mezzo rifrangente è proprio acqua.

Nella figura 210 è mostrato il nostro apparato, visto dall'alto. Sono stati visualizzati con ri-

¹¹⁴ Come abbiamo detto, visto che usiamo una sorgente monocromatica, non si possono vedere i colori dell'iride.

ghe celeste i fasci esterni al recipiente dell'acqua ed i loro prolungamenti; in rosso sottile è stato evidenziato anche il fascio DE. Confrontiamo questa figura con la 206. Come incontro dei prolungamenti BF e EF, è possibile identificare il punto F e, con un semplice "rapportatore", misurare l'angolo BFE, il famoso angolo δ . Se il valore misurato non corrisponde esattamente al valore teorico di 42° , si deve a varie cause:

- stiamo lavorando con una lunghezza d'onda non al centro dello spettro ottico, che corrisponde al giallo-verde;
- i mezzi elettronici di riproduzione delle immagini possono introdurre delle deformazioni;
- la forma della parete del recipiente sarà difficilmente ideale.

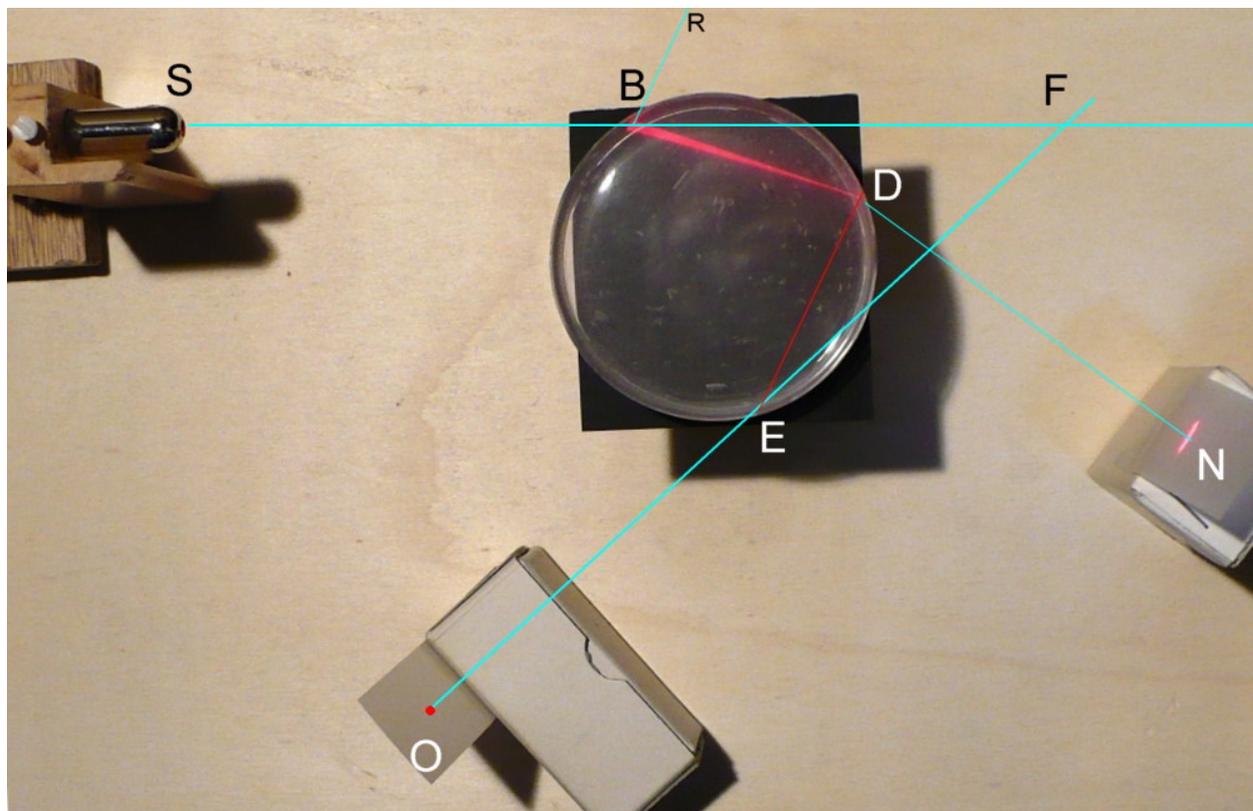


Fig. 210 - Realizzazione pratica dello schema di fig. 206. Il raggio che emerge dal laser (SB) è stato disegnato in celeste poiché, per renderlo visibile, sarebbe stato necessario inondare il locale di fumo. Così per il raggio emergente (EO). I due raggi sono stati prolungati all'indietro per individuare il loro punto d'incontro (F).

Anche il raggio riflesso internamente (DE) è stato ritoccato in rosso poiché, in queste condizioni di ripresa, sarebbe risultato quasi invisibile (vedi le figure 208 e 209). Le linee più sottili in celeste indicano rispettivamente il raggio di prima riflessione esterna (BR) ed il raggio che emerge dalla goccia dopo la seconda rifrazione (DN) ed appare infine sullo schermino in N.

Il percorso BD appare invece chiaramente (senza ritocchi) poiché è molto intenso e l'acqua nella vaschetta è stata intorbidata. Si noti la sua convergenza precisa nel punto D. Siamo nelle condizioni del "raggio di Cartesio" ed il fascetto emergente (EO) è ragionevolmente parallelo.

A questo punto, la parte più interessante della dimostrazione consiste nel variare il punto d'incidenza del fascio diretto del laser sulla parete cilindrica (punto B).

Se si realizzano le condizioni della figura 206, si vedrà che il fascio EO è veramente collimato: sarebbe questo il "raggio di Cartesio"; benché debole, esso rimane collimato, con sezione costante, anche a notevole distanza: conviene porre un pezzetto di carta da lucidi a qualche cm dal cilindro (fig. 211, O). Se l'immagine che si raccoglie sullo schermino non è del tutto concentrata, può dipendere dalla cattiva qualità delle superfici del cilindro.

L'interesse maggiore sta nel fatto che, appena ci si allontana dalle condizioni ideali della fig. 206, il fascio EO si allarga rapidamente diminuendo di intensità fino a divenire invisibile. È sufficiente spostare di poco il laser verso destra o verso sinistra per accorgersi del fenomeno (Fig. 212). Abbiamo consigliato di spostare il laser invece del cilindro, poiché la superficie del liquido s'incresperebbe ed il fascio ne sarebbe disturbato per un bel po' di tempo.

Fig. 211 - La traccia del fascio emergente (O) appare (quasi) puntiforme nelle condizioni ideali del "raggio di Cartesio", ma si allarga rapidamente appena si sposta il punto d'incidenza del laser, in un senso o nell'altro (fig. 212).

Si noti che il fascio riflesso esternamente (R) si sposta molto passando da una condizione all'altra: varia l'angolo d'incidenza.

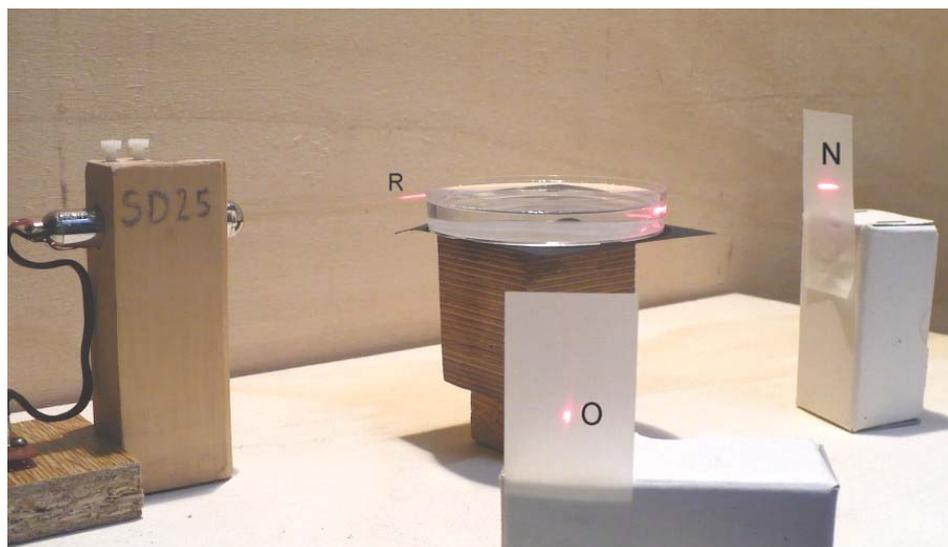


Fig. 212 - La condizione privilegiata del raggio di Cartesio è andata perduta. Il fascio emergente (in O) è molto sparpagliato.



Con questa realizzazione è dunque possibile verificare sperimentalmente quanto enunciato sul piano teorico nell'articolo generale citato all'inizio o sui trattati di fisica. Si tratta di applicare le leggi della rifrazione e della riflessione ad un oggetto trasparente sferico, tenendo conto dell'indice di rifrazione e della lunghezza d'onda della radiazione utilizzata.