

L'atmosfera come laboratorio di ottica

Michael Berry

Per gli astronomi l'atmosfera terrestre è una gran seccatura. La luce proveniente dagli oggetti celesti, dopo essere passata attraverso turbolenti strati d'aria, forma immagini poco nitide al telescopio. Si perdono così preziosi dettagli; dettagli che teoricamente sono risolvibili dallo strumento stesso. Tuttavia l'atmosfera è responsabile di una vasta serie di meravigliosi e talvolta straordinari fenomeni, che tuttora giocano un ruolo importante nello sviluppo dell'ottica. Non è esagerato dire che il cielo costituisce un immenso laboratorio nel quale si possono osservare, dipinti dalla luce, tutti quei fenomeni che raggi e onde producono: rifrazione, riflessione, focalizzazione, dispersione, polarizzazione, interferenza, diffrazione, assorbimento, diffusione, risonanza...

Iniziamo la rassegna di questi fenomeni ottico-meteorologici con l'*arcobaleno*, che, come Francis Bacon puntualizzò, "si manifesta nel cielo quando l'aria è satura di gocce d'acqua". La corretta interpretazione della comparsa di questi enormi archi colorati fu data da Cartesio nel 1637. I raggi di luce provenienti dal Sole nell'attraversare una goccia d'acqua di forma sferica (fig. 1) subiscono fenomeni di rifrazione e riflessione per cui riemergono da essa in determinate direzioni. In effetti, i raggi luminosi emessi da ciascuna gocciolina sono distribuiti in un cono (fig. 2) e guardando in direzione opposta al Sole possiamo vedere, intensamente illuminate, tutte quelle goccioline i cui coni si trovano sulla linea di vista dei nostri occhi. Inoltre a causa del fenomeno della dispersione la luce bianca dei raggi solari viene scomposta nei suoi componenti, e poiché la luce rossa viene rifratta meno di quella blu si osserva allora una serie di archi colorati, ciascuno corrispondente ad un colore dello spettro ottico. In conclusione l'*arcobaleno* è un effetto puramente geometrico che richiede per la sua interpretazione solo la teoria geometrica della luce, mentre la natura ondulatoria dà luogo solo a tenui effetti di interferenza che sono comunque di scarsa rilevanza. Qualche volta anche la luce riflessa dalla Luna può

Fig. 1 Focalizzazione angolare di raggi che hanno subito un processo di rifrazione, riflessione e ancora rifrazione da parte di una gocciolina d'acqua. I raggi riflessi dalla superficie esterna della goccia o che subiscono due volte la rifrazione senza la riflessione, non vengono focalizzati e quindi non contribuiscono alla formazione dell'arcobaleno. I raggi, invece, che subiscono due riflessioni interne (disegno piccolo) focalizzano dando luogo ad un arcobaleno secondario.

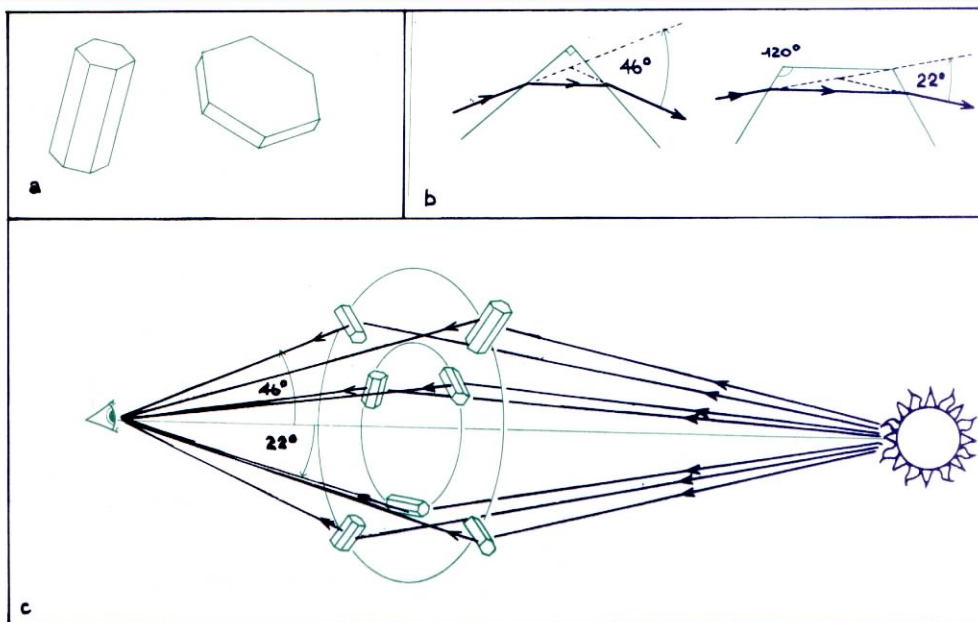
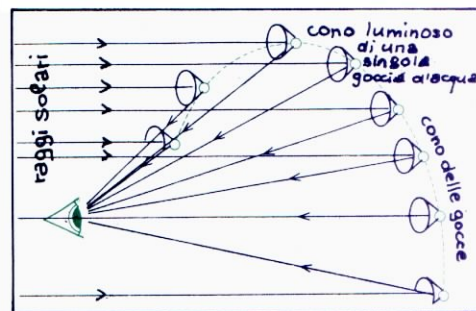
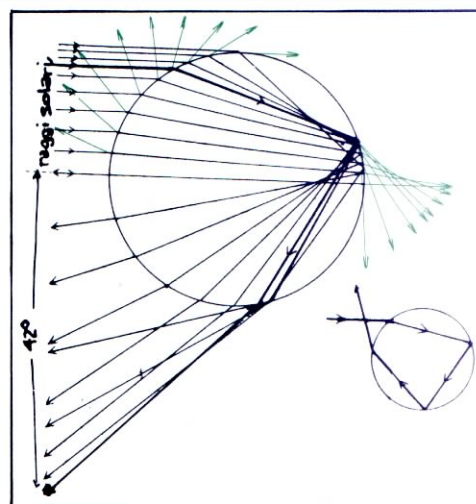
Fig. 2 I raggi focalizzati si distribuiscono secondo coni i cui vertici sono situati nelle goccioline d'acqua le quali, a loro volta, sono disposte su di un cono di vertice coincidente con l'occhio dell'osservatore e di semiapertura di 42° . L'arcobaleno è proprio questo cono visto dal vertice del cono stesso. Ciascun osservatore ha il proprio cono, formato da differenti gocce luminose, e quindi vede un proprio arcobaleno.

Fig. 3

(a) I cristalli di ghiaccio usualmente assumono la forma di prismi esagonali di tipo aghiforme o lamellare, le cui facce formano angoli di 90° e 120° .

(b) Quando la rifrazione avviene in vicinanza di due facce formanti un angolo di 90° la massima intensità di luce deflessa si ha a 46° ; mentre per spigoli formanti angoli di 120° , il massimo si ha a 22° .

(c) Gli aloni sono prodotti da cristalli di ghiaccio orientati simmetricamente e disposti lungo coni i cui vertici coincidono con l'occhio dell'osservatore. Gli angoli formati con la direzione del Sole sono di 22° e 46° .





"Esulta il mio cuore quando ammiro in cielo l'arcobaleno", William Wordsworth.

L'arcobaleno formato dalle Cascate Vittoria nello Zimbabwe.

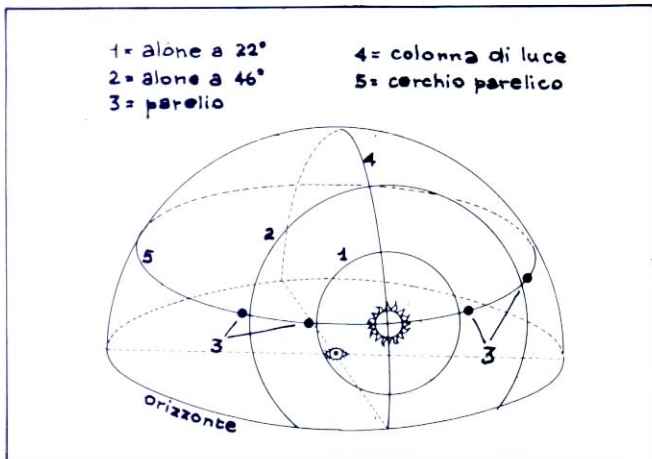


Fig. 4 In questo diagramma della sfera celeste sono schematizzati i principali fenomeni ottici cui danno luogo i cristalli di ghiaccio. La rifrazione attraverso gli spigoli formanti angoli di 120° e 90° producono gli aloni a 22° e 46°. Se i cristalli sono orientati selettivamente, alcuni punti degli aloni sono particolarmente luminosi e generano un parielio. La riflessione sulle facce quasi orizzontali dei cristalli a forma di lamina causa le brillanti colonne di luce disposte verticalmente, mentre quella sulle facce verticali origina il cerchio parelico.

L'aloni a 22°, il cerchio parelico e il parielio. (foto di R.G. Dakberg, Devon Island nell'Artico).



formare l'arcobaleno. In questo caso però il nostro occhio, a causa dell'estrema debolezza dell'immagine, non è in grado di separare i diversi colori e l'arcobaleno appare lattiginoso.

Se invece di goccioline d'acqua nell'aria sono presenti cristalli di ghiaccio allora la rifrazione attraverso essi della luce solare o di quella lunare può formare dei giganteschi *aloni*. Infatti i cristalli di ghiaccio schematizzati in figura 3a sotto forma di sottili aghi a base esagonale o di piccole lamelle, sempre a base esagonale, rifrangono la maggior parte della luce lungo due direzioni privilegiate (fig. 3b) le quali formano un angolo di 22° o di 46° con la direzione primaria. In questo modo si formano due aloni (fig. 3c) che circondano il Sole o la Luna visibili spesso nelle giornate fredde e nebbiose. Oltre a questi aloni i cristalli di ghiaccio possono dar luogo alla formazione di molti altri effetti dovuti a fenomeni di orientazione selettiva e di riflessione sulle facce orizzontali e verticali. Questi sono sintetizzati nello schema di figura 4.

Qualche volta durante una passeggiata in montagna, in particolari condizioni atmosferiche, è possibile osservare intorno alla propria ombra proiettata dai raggi solari su una nube un alone luminoso circondato da una serie di anelli diffusi e colorati di raggio angolare di pochi gradi; questo splendido effetto è la *gloria*. Lo stesso fenomeno è spesso visibile quando si osserva l'ombra dell'aereo sul quale si vola che si proietta sulle nubi sottostanti. Il primo a descrivere la gloria fu l'esploratore portoghese Ulloa nel 1735, che la osservò durante un'escursione sul Monte Pambarka in Perù, ma solo nel 1969 il fisico brasiliano Nussenzveig è stato in grado di spiegarla completamente. La gloria si forma dalla focalizzazione dei raggi solari deflessi all'indietro dalle goccioline d'acqua della nube (fig. 5). Le leggi ordinarie della rifrazione e riflessione non sono però sufficienti per spiegare questa deflessione all'indietro, ma è necessario introdurre le *onde striscianti* che si formano sulla superficie della goccia d'acqua (fig. 6). Solo per piccole gocce (raggio minore di 0,2 mm) le onde striscianti hanno intensità sufficiente per produrre una forte focalizzazione e questo spiega perché la gloria può essere vista solo quando sono presenti nubi o nebbie, ma non quando piove. La teoria delle onde striscianti (che spiega anche la formazione degli anelli della gloria) implica un formalismo matematico originariamente sviluppato da Tullio Regge per descrivere i fenomeni di diffusione delle particelle elementari!

Tutti noi conosciamo la *scintillazione della luce stellare*. Le fluttuazioni della intensità luminosa sono provocate da processi di rifrazione causati dalla turbolenza dell'aria. Si formano pertanto delle irregolarità il cui comportamento è assimilabile a quello di deboli lenti che concentrano o

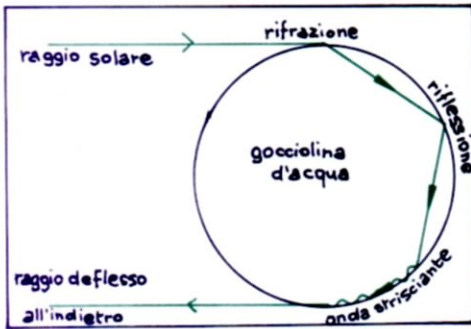
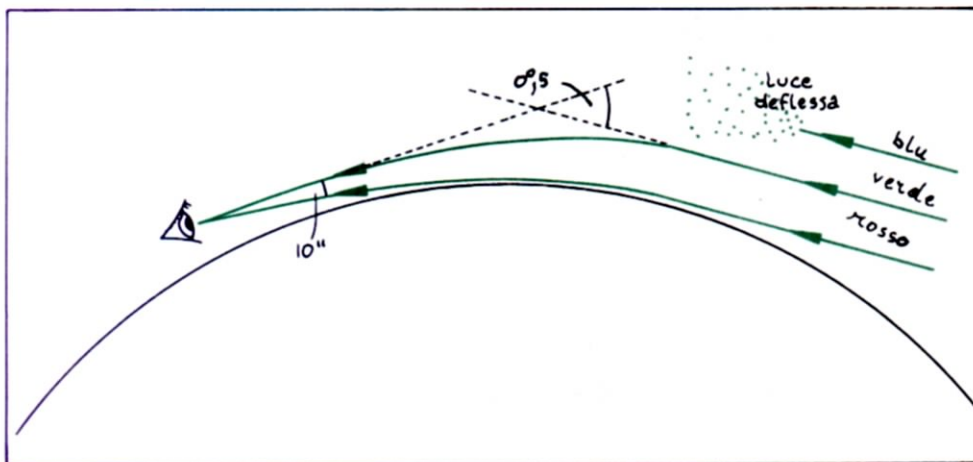


Fig. 6 La deflessione all'interno richiede, oltre alla rifrazione e riflessione, l'introduzione delle "onde striscianti" che si muovono sulla superficie della gocciolina.

Fig. 8 Meccanismo di formazione del raggio verde. La componente blu della luce solare è eliminata per diffusione mentre la rifrazione separa la luce rossa da quella verde. A causa poi della dispersione, il "Sole verde" è leggermente più alto sull'orizzonte del "Sole rosso" e quindi rimane visibile per alcuni istanti dopo che esso è tramontato.



ghezza d'onda della radiazione incidente: è massimo per piccole lunghezze d'onda e minimo per quelle grandi. Già nel secolo scorso il fisico inglese Rayleigh aveva calcolato che l'intensità della radiazione è inversamente proporzionale alla quarta potenza della lunghezza d'onda, cosicché la luce rossa è diffusa 16 volte meno di quella blu. In effetti, viene diffusa soltanto la luce blu e proprio per questo il cielo appare azzurro nelle zone lontane dal Sole. All'alba e al tramonto, quando la luce solare attraversa tangenzialmente un notevole spessore di atmosfera, praticamente tutta la luce blu viene diffusa e perciò il Sole appare rosso.

L'atmosfera terrestre, oltre a produrre la "diffusione di Rayleigh" della luce blu, si comporta anche come una gigantesca lente il cui effetto è quello di deviare di circa mezzo grado i raggi con incidenza radente alla superficie terrestre verso le regioni in cui l'aria è più densa. Durante

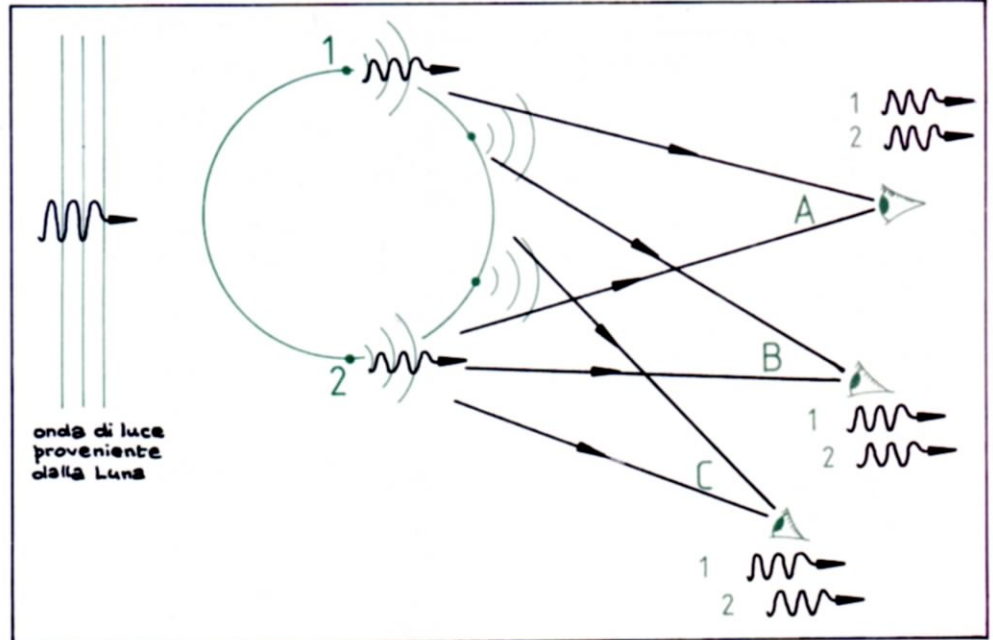


Fig. 7 Meccanismo di formazione della corona. Ogni parte di una piccola gocciola d'acqua illuminata dalla Luna emette in tutte le direzioni onde elementari che si combinano nel punto di osservazione. A seconda della posizione in cui si trova l'occhio dell'osservatore si avrà interferenza costruttiva (A e C) o distruttiva (B). Nel primo caso la gocciola appare luminosa, nel secondo c'è oscurità. Se poi le gocce d'acqua hanno tutte circa la stessa dimensione, la luce appare circondata da una serie di anelli chiari e scuri causati da questi effetti di interferenza.

questo processo di rifrazione il fenomeno della dispersione separa inoltre la luce rossa da quella blu di circa $10''$. Questi tre fenomeni (diffusione, rifrazione e dispersione), se combinati insieme, danno luogo al *raggio verde* osservabile qualche volta quando il Sole tramonta in mare. Supponiamo, per semplicità, che i raggi solari siano formati da luce blu, verde e rossa (fig. 8). La luce blu viene eliminata per diffusione; quella rossa invece viene rifratta meno di quella verde. Di conseguenza l'immagine rossa del Sole tramonta prima, lasciando visibile, solo per pochi attimi, gli ultimi raggi dell'immagine verde anch'essa ormai tramontante.

Tutti questi fenomeni contribuiscono poi alla *colorazione ramata* della Luna durante le eclissi totali (vedi la foto di copertina). Nonostante la Luna si trovi nell'ombra geometrica della Terra, è tuttavia possibile che essa sia illuminata dalla luce solare rifratta dall'atmosfera terrestre. Per

strana coincidenza la lunghezza focale della "lente atmosferica" (circa 300.000 km) è tale da concentrare la maggior parte di questa luce proprio sulla superficie lunare. La colorazione ramata dipende dal fatto che la Luna viene illuminata da luce che ha perso per diffusione la componente blu, come descritto più sopra a proposito del colore rosso del Sole alla levata e al tramonto. Se poi un osservatore si trovasse sulla superficie lunare potrebbe ammirare il raggio verde che si forma quando il Sole scompare e riappare dietro al bordo del disco terrestre durante le fasi di entrata e di uscita dall'eclisse della Luna.

A questo punto dovrebbe essere chiaro che l'ottica meteorologica riserva molte gradevoli sorprese allo studente di astronomia; sorprese che per altro si evidenziano proprio quando le condizioni atmosferiche rendono impossibili le osservazioni astronomiche. Molti fenomeni, tuttavia, ancor oggi non sono del tutto chiari (ad esempio alcuni rari tipi di aloni); ad essi forse nel passato erano associati significati religiosi o più semplicemente vengono chiamati UFO...

Ad ogni modo il fatto più significativo è, forse, che i giochi di luce nell'atmosfera illustrano pienamente tutte le leggi dell'ottica, senza la necessità di dover ricorrere a particolari e raffinate strutture di laboratorio, rendendo così questa scienza alla portata di tutti. *