

# Spigolature astronomiche★

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna

## Illusioni, miraggi, arcobaleni

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna

È NOTO che la velocità della luce è pari a  $c = 299.792.458$  m/s (arrotondato al valore più comunemente noto di 300.000 km/s). Questo valore vale per la propagazione nel vuoto; invece il passaggio attraverso altri mezzi (aria, acqua, vetro, ecc.) avviene a velocità inferiori, dipendenti dal mezzo stesso. Nel passare da un mezzo ad un altro in cui la velocità cambia un raggio di luce subisce una deviazione: questo fenomeno è detto *rifrazione* (FIG. 1).

Una metafora spesso usata per illustrare il meccanismo della rifrazione è la seguente. Supponiamo che un gruppo di soldati schierati in linea retta (spalla a spalla) marci lungo un terreno privo di asperità. Tale terreno confina con un campo accidentato e pieno di pietre lungo una linea di demarcazione obliqua rispetto allo schieramento dei soldati. Man mano che i militari attraversano il confine sono costretti a rallentare e ridurre il passo. Il fronte dei soldati si “deforma” durante l’attraversamento perché la parte dell’allineamento che ha già attraversato il confine procede più lentamente rispetto all’ala che ancora si trova sul terreno agevole. Una volta che tutti i soldati hanno attraversato il confine, essi tornano allineati ma procedono più lentamente e lungo una direzione diversa da quella iniziale. Tanto più il campo adiacente è accidentato, tanto più i soldati devono ridurre il passo e tanto maggiore risulta il cambio di direzione.

Analogamente, il fronte di un fascio luminoso che passa da un mezzo all’altro – ad esempio dall’aria al vetro – cambia direzione perché il vetro, più

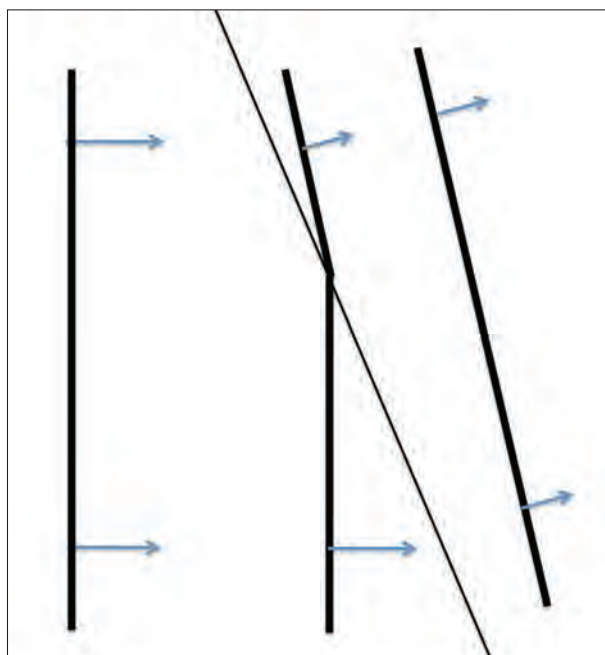


FIG. 1. Le linee marcate rappresentano schematicamente dei soldati che marciano allineati spalla a spalla, la cui velocità è indicata dalle frecce azzurre. La linea sottile indica il confine tra un terreno agevole (a sinistra) ed uno accidentato (a destra). I soldati che passano il confine sono costretti a ridurre il passo e il fronte cambia direzione e riduce la velocità. Se il terreno accidentato fosse quello di sinistra, e quello di destra fosse agevole, il fronte accelererebbe deviando diagonalmente verso il basso e non verso l’alto come in figura. Per analogia, queste stesse linee possono rappresentare un fronte luminoso che, attraversando la superficie di contatto tra due mezzi diversi, varia la propria direzione di propagazione secondo le regole della rifrazione.

\* Questa rubrica si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare ad un pubblico non specialistico. Questi “fondamenti di astronomia”, volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell’argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del «Giornale di Astronomia», [www.bo.astro.it/sait/giornale.html](http://www.bo.astro.it/sait/giornale.html).

denso, risulta più “accidentato” da attraversare. Assimilando la lunghezza d’onda della radiazione al passo dei soldati, possiamo dire che, se gli ostacoli nel mezzo in cui si propaga la luce sono piccoli rispetto alla lunghezza d’onda, essi verranno agevolmente scavalcati così come sassi di piccole dimensioni vengono facilmente superati dai soldati. Ma se gli ostacoli incontrati dalla luce sono dello stesso ordine di grandezza della sua lunghezza d’onda, essa troverà maggiore difficoltà a propagarsi proprio come rocce delle dimensioni del passo dei soldati rap-

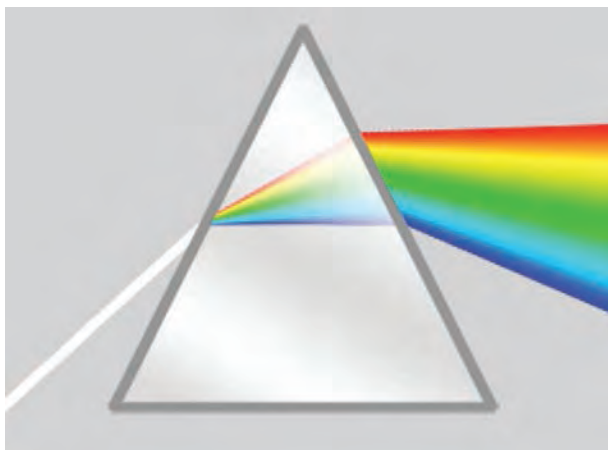


FIG. 2. Un raggio luminoso bianco viene scomposto nei suoi diversi colori a causa della rifrazione quando attraversa un prisma. Il raggio rosso, con lunghezza d'onda maggiore, devia meno di quello violetto.

presentano un intralcio assai maggiore per il procedere dei militari.

Il meccanismo della rifrazione appena illustrato ha permesso a Newton di scoprire che la luce solare, pur apparendo (quasi) bianca, è in realtà composta da radiazioni di diverse lunghezza d'onda. Già prima di Newton si era capito che un raggio luminoso assume una varietà di colori dopo aver attraversato un prisma, ma si riteneva che fosse il prisma stesso a colorare la luce. Newton interpose uno schermo alla luce in uscita dal prisma e operò una fessura in corrispondenza della traiettoria del raggio verde, facendolo dunque passare attraverso tale fessura; pose poi un secondo prisma sulla traiettoria del raggio verde e constatò che non cambiava colore dopo averlo attraversato. Non è pertanto il prisma a colorare la luce, ma i colori sono genuine componenti della luce che il prisma separa. A conferma di ciò, attraverso un'opportuna disposizione di due prismi, Newton riuscì a ricomporre, tramite il secondo prisma, il fascio di luce bianca scomposto dal primo (FIG. 2).

Limitandoci alla luce visibile, ossia alla radiazione cui il nostro occhio è sensibile, sappiamo oggi che un raggio luminoso bianco è dato dalla sovrapposizione di onde elettromagnetiche di diversa lunghezza, ognuna percepita dal nostro occhio come un colore diverso. La lunghezza d'onda maggiore è pari a  $760 \text{ nm}^1$  e ci appare rossa; il violetto corrisponde a una radiazione di lunghezza d'onda  $380 \text{ nm}$  e rappresenta la più breve visibile dall'uomo. Questo spiega, in base a quanto detto sopra, perché il raggio rosso in uscita dal prisma risulta meno deviato rispetto a quello violetto.

Fenomeni di rifrazione si verificano spesso nella nostra vita quotidiana dando luogo a manifestazioni spettacolari quali illusioni, miraggi e arcobaleni.

Un'illusione ottica familiare è data dall'aspetto spezzato di un cucchiaino all'interno di un bicchie-

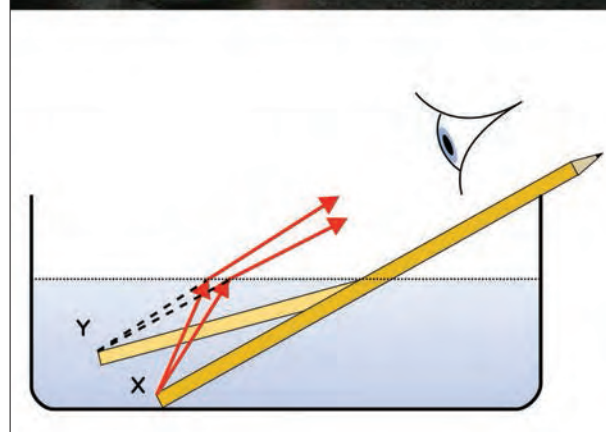


FIG. 3. La matita semi-immersa nell'acqua appare spezzata. Questa illusione è dovuta al fatto che i raggi luminosi provenienti dalla parte sommersa della matita non raggiungono l'osservatore lungo una traiettoria rettilinea, ma cambiano direzione nell'attraversare la superficie dell'acqua a causa della rifrazione. La luce che giunge all'osservatore parte da X, ma egli ha l'impressione che giunga da Y.

re contenente acqua. Questo fenomeno è dovuto al fatto che i raggi luminosi provenienti dalla parte sommersa del cucchiaino non si propagano in linea retta verso l'osservatore, ma deflettono a causa della rifrazione quando attraversano la superficie dell'acqua (FIG. 3).

Un'altra illusione ottica, anch'essa alquanto comune, può verificarsi in una afosa giornata estiva quando in lontananza la strada asfaltata appare bagnata. Si tratta di un fenomeno illusorio; infatti, una volta giunti sul posto, la "pozzanghera" sparisce. Questo miraggio è dovuto al fatto che gli strati d'aria più vicini al terreno sono più caldi, e dunque meno densi, di quelli in quota. I vari strati oppongono pertanto "intralci" decrescenti alla propagazione dei raggi luminosi i quali, a causa della rifrazione, deflettono con continuità dalla traiettoria rettilinea man mano che passano da uno strato all'altro.<sup>2</sup> Può capitare che i raggi inizialmente diretti

<sup>1</sup> Il nanometro è pari a  $10^{-9} \text{ m}$ , ossia un miliardesimo di metro.

<sup>2</sup> A causa di ciò le stelle non sono viste nella loro posizione reale, ma più vicine allo zenit.

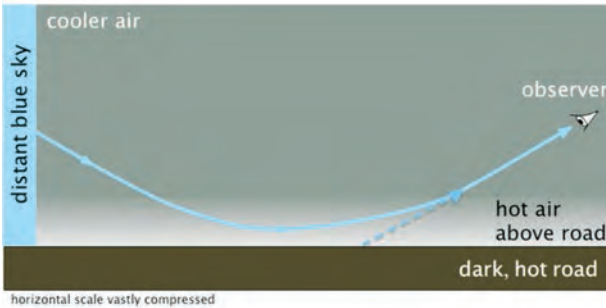


FIG. 4. Se gli strati d'aria vicini al suolo sono più caldi e meno densi di quelli in quota, i raggi luminosi provenienti dal cielo curvano a causa della rifrazione. Alcuni possono giungere all'osservatore che avrà l'impressione che arrivino da terra. Per questo motivo, a volte sembra di poter intravedere acqua (in realtà è l'azzurro del cielo) sull'asfalto in lontananza o tra le sabbie del deserto.

a terra curvino al punto da giungere all'osservatore; egli vedrà l'azzurro del cielo ma, a causa della curvatura dei raggi, avrà l'impressione che essi giungano da un punto indistinto davanti a lui, e percepirà la pozzanghera virtuale<sup>3</sup> (FIG. 4).

Infine, il più suggestivo dei miraggi di cui ci occupiamo in questa nota si verifica al termine di un acquazzone, quando il sole è basso sull'orizzonte, ed è possibile osservare in cielo un grande arco variopinto, l'arcobaleno, composto da sette colori che vanno dal rosso al violetto.<sup>4</sup> Arcobaleni possono formarsi anche in prossimità di cascate ed anche, su scala ridotta, quando innaffiamo un giardino. In generale, gli arcobaleni si formano ogni volta che nell'aria vi sono goccioline d'acqua in sospensione illuminate da raggi solari sotto un'opportuna angolazione. Da quanto detto più sopra, si intuisce facilmente che il fenomeno dell'arcobaleno si basa sulla diffrazione della luce. Ogni gocciolina d'acqua, di forma pressoché sferica, agisce come un prisma e il raggio luminoso che la attraversa, dopo una serie di

<sup>3</sup> Quello che abbiamo descritto è il cosiddetto "miraggio inferiore". Esistono altri tipi di miraggi, quali il "miraggio superiore" e la "Fata Morgana" che, pur essendo anch'essi basati sulla rifrazione, non discutiamo in questa nota.

<sup>4</sup> Questa suddivisione (dovuta a Newton) nei sette colori "canonici", rosso, arancione, giallo, verde, blu, indaco e violetto, è puramente formale. In realtà i colori sfumano dall'uno all'altro in maniera continua.



FIG. 5. Mini arcobaleno creato dall'acqua di una pompa da giardino.

riflessioni e rifrazioni, torna all'osservatore scomposto nei suoi colori (FIG. 5).

Ma come avviene esattamente tutto questo? E come mai non si verifica sempre, ma solo in certe condizioni? E perché l'arcobaleno è arcuato verso il basso, e con il rosso lungo il bordo superiore e il violetto lungo quello inferiore? Una risposta a queste domande richiede una trattazione più approfondita che diamo nel livello avanzato.

*La luce nel vuoto si propaga con velocità  $c$ . In un mezzo trasparente, invece, la sua velocità è minore,<sup>5</sup> e pari a  $v = c/n$ , dove  $n$  è una caratteristica del mezzo detta indice di rifrazione. A titolo esemplificativo segnaliamo che per aria, acqua e vetro l'indice di rifrazione vale rispettivamente 1,0003, 1,3 e 1,5. Se un raggio luminoso attraversa l'interfaccia tra due mezzi di diverso indice di rifrazione, come ad esempio tra aria e vetro, esso verrà in parte riflesso e in parte rifratto, ossia attraverserà l'interfaccia deviando dalla direzione originaria. Il raggio riflesso formerà con la normale alla superficie di separazione tra i due mezzi un angolo uguale a quello del raggio incidente. L'angolo del raggio rifratto, invece, è regolato dalla legge di Snell*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1},$$

*dove  $\alpha$  e  $\gamma$  sono gli angoli di incidenza e rifrazione, ed  $n_1$  e  $n_2$  rappresentano l'indice di rifrazione dei mezzi in cui si propagano, rispettivamente, il raggio incidente e quello rifratto. Se l'angolo di incidenza è tale per cui*

<sup>5</sup> Questo è dovuto al fatto che le oscillazioni ottiche connesse con il raggio di luce incidente inducono oscillazioni forzate, di stessa frequenza, negli elettroni più periferici degli atomi (i nuclei non vengono influenzati); a loro volta ciascun atomo in oscillazione forzata induce oscillazioni forzate agli atomi vicini e così via (si noti che non vi è spostamento di materia). Pertanto, la trasmissione del moto oscillatorio nella materia richiede un tempo maggiore che nel vuoto nel quale sono assenti cariche con cui interagire.

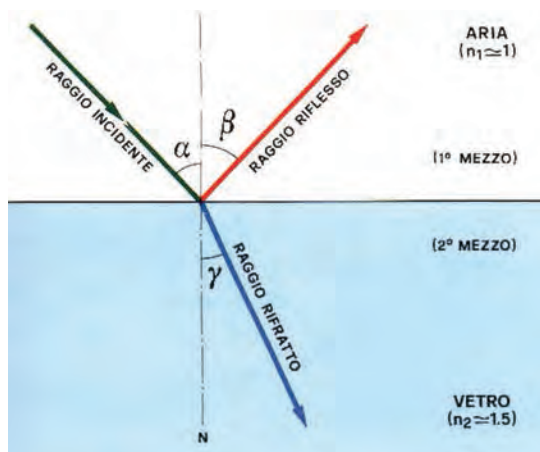


FIG. 6. Quando un raggio incide sulla superficie che separa due mezzi diversi, esso viene in parte riflesso e in parte rifratto. Il raggio riflesso forma con la linea perpendicolare alla superficie un angolo uguale a quello di incidenza:  $\alpha = \beta$ . Il raggio rifratto attraversa la superficie di contatto lungo una direzione diversa da quella iniziale. Il valore dell'angolo di rifrazione  $\gamma$  è determinato dalla legge di Snell (si veda il testo).

$$\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha > 1$$

la legge di Snell non può essere soddisfatta e la luce non si propaga nel secondo mezzo; in questo caso si ha una riflessione totale (FIG. 6).

Quanto abbiamo detto fin'ora rappresenta la base teorica necessaria per riuscire a comprendere l'arcobaleno. Una descrizione completa di tale fenomeno è tuttavia assai complessa, e ha impegnato nel corso del tempo intelletti del calibro di Aristotele, Cartesio, Newton; non si stupirà dunque il lettore se nel seguito ci limiteremo ad un'analisi puramente descrittiva (anche se alquanto approfondita).

L'arcobaleno, come sappiamo, è dato dall'interazione della luce solare con le goccioline d'acqua rimaste in sospensione nell'atmosfera al termine della pioggia. Consideriamo dunque un generico raggio luminoso intercettato da una di queste goccioline d'acqua sferiche. A seguito dell'impatto con la superficie della goccia, parte della luce è riflessa. La parte non riflessa attraversa la superficie deflettendo dalla direzione originaria secondo le regole della rifrazione. Proprio come nel caso di un prisma, il raggio rifratto viene scomposto nei vari colori. La luce poi incide sulla superficie "posteriore", da cui viene in parte riflessa di nuovo all'interno della goccia, mentre la parte trasmessa fuoriesce e si allontana. La parte riflessa intercetta nuovamente la porzione "anteriore" della superficie attraversandola e abbandonando infine la goccia dopo un'ulteriore deflessione dovuta al passaggio acqua/aria. Dal momento che raggi di colori diversi vengono rifratti ad angoli leggermente diversi, nell'allontanarsi dalla goccia essi non viaggiano parallelamente, ma si aprono "a ventaglio". È pos-

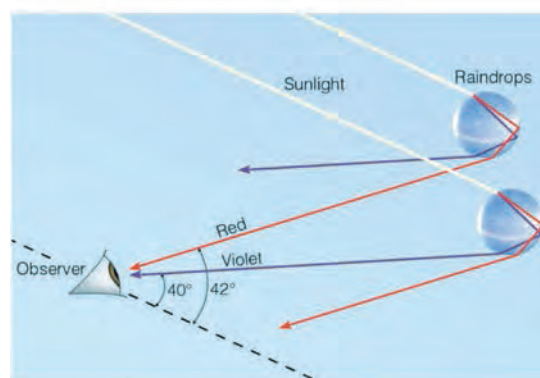
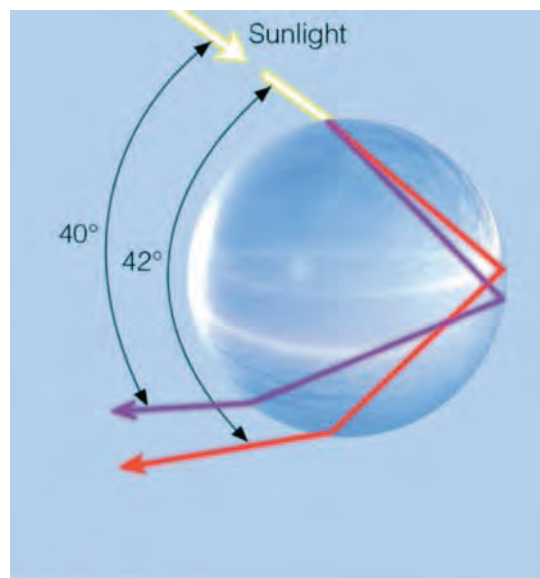


FIG. 7. La figura in alto illustra il percorso di un raggio luminoso all'interno di una goccia nel caso di riflessione totale (si veda il testo). Il raggio solare viene scomposto in raggi di vari colori (di cui vengono riportati per chiarezza solo il rosso e il violetto, mentre gli altri sono compresi tra questi due). Il raggio rosso fuoriesce con un'angolazione maggiore rispetto al violetto. Nella figura in basso, la goccia in alto è nella giusta posizione per far giungere la luce rossa all'osservatore, ma non la luce violetta, che è indirizzata più in alto. Al contrario, la goccia inferiore è posizionata in maniera opportuna per inviare all'osservatore la luce violetta, ma non quella rossa. Questo spiega perché nell'arcobaleno il rosso è "sopra" e il violetto è "sotto". Le gocce situate in posizioni intermedie tra queste due sono visibili nei colori intermedi dell'iride.

sibile ottenere un arcobaleno solo se questo "ventaglio" è sufficientemente intenso, ossia se non viene persa luce attraverso la superficie "posteriore" della goccia al momento della riflessione interna. Per la legge di Snell, questo è possibile in caso di riflessione totale. Dunque, sebbene vi siano innumerevoli percorsi che i raggi luminosi possono seguire nell'attraversare le gocce di pioggia, solo quelli che portano ad una riflessione interna totale sono rilevanti per la realizzazione dell'arcobaleno. Ogni altra traiettoria fa sì che il raggio di luce attraversi la goccia e fuoriesca posteriormente senza partecipare a tale realizzazione (FIG. 7).

Calcoli precisi, che tengono conto della legge di Snell e della geometria sferica della goccia, mostra-

no che, nel caso di traiettorie rilevanti, l'angolo di deviazione tra il raggio in arrivo dal Sole e la luce rifratta e riflessa verso l'osservatore è pari a circa  $42^\circ$  per la luce rossa, e  $40^\circ$  per quella violetta. Questo risultato è alla base della forma arcuata dell'arcobaleno. Infatti, in assenza di questo vincolo angolare, un osservatore riceverebbe luce da tutte le gocce intorno a lui e non percepirebbe alcuna forma definita. Invece, per quanto abbiamo appena detto, egli vede solo le gocce che gli appaiono sotto un angolo di vista compreso tra  $40^\circ$  e  $42^\circ$ ; se l'osservatore fosse sospeso nell'atmosfera, questo effetto di selezione produrrebbe la percezione di un arcobaleno circolare. Un osservatore a terra vede solo la parte di cerchio sopra l'orizzonte, ed ha la sensazione di una struttura ad arco.

I vincoli angolari discussi più sopra sono anche alla base della spiegazione del fatto che il rosso appare lungo il perimetro superiore dell'arco e il violetto lungo quello inferiore. Come abbiamo visto, la luce rossa abbandona le goccioline lungo una direzione maggiormente inclinata verso il basso rispetto alla luce violetta. Pertanto, quando un osservatore guarda in alto lungo una direzione "più inclinata" – ovvero con un angolo maggiore rispetto al terreno – percepisce la luce rossa rifratta da determinate gocce lungo questa direzione. La luce violetta emessa da queste stesse gocce segue una traiettoria meno inclinata e passa sopra la testa dell'osservatore, senza che questi possa vederla. Analogamente, guardando lungo una direzione "meno inclinata" – che forma, cioè, un angolo minore col terreno – l'osservatore vede i raggi violetti

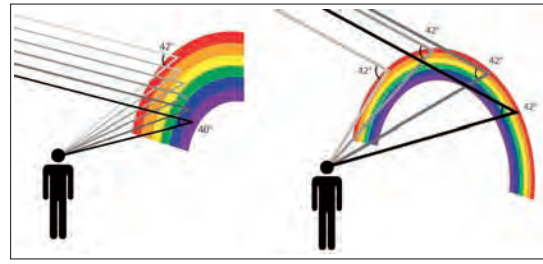


FIG. 8. Dalla figura di sinistra si capisce che l'osservatore non vede tutte le goccioline, ma solo quelle che sono sotto un angolo di vista compreso tra  $40^\circ$  e  $42^\circ$ . Se l'osservatore potesse vedere l'arcobaleno da un aeroplano, lo percepirebbe circolare perché la luce gli arriverebbe da tutte le goccioline intorno a lui. Stando a terra, invece, vede solo l'arco di cerchio sopra l'orizzonte. Da questa figura è anche evidente che, per il verificarsi di un arcobaleno, è necessario che il Sole sia alle spalle dell'osservatore. La figura di destra mostra come il colore rosso giunga solo da gocce poste sotto un angolo di vista di  $42^\circ$ . I raggi violetti (non riportati in figura) giungono invece solo da gocce poste sotto un angolo di vista di  $40^\circ$ . Questo spiega la posizione dei diversi colori nell'arcobaleno.

emessi da altre gocce di pioggia (diverse dalle precedenti) i cui raggi rossi, più angolati, sono diretti verso i piedi dell'osservatore che quindi non li vede (FIG. 8).

Riassumendo quanto abbiamo fin qui detto e in risposta alle domande con cui abbiamo terminato il livello base, possiamo dire che l'arcobaleno è visibile solo se il Sole è alle spalle dell'osservatore, perché la riflessione totale interna alle gocce rimanda sostanzialmente "indietro" la luce. La forma arcuata e la disposizione dei colori dipendono dalla selezione angolare delle gocce visibili in base alle leggi dell'ottica geometrica.