

L'enigma del cielo azzurro

Anna Maria Aloisi

IPSIA "A.Meucci", Cagliari,

<http://apmf.interfree.it>,

ampf@interfree.it, maloisiannamaria@progettomarte.netail

Pier Franco Nali

Regione Sardegna, Cagliari

pnali@regione.sardegna.it

Cieli azzurri, bianche nubi, rossi tramonti. Da sempre i colori della natura sono fonte d'ispirazione per artisti e poeti. Ecco, tra gli innumerevoli esempi, come Alessandro Manzoni (1785-1873) descrive nei *Promessi Sposi* i colori di una placida alba:

Il cielo prometteva una bella giornata: la luna, in un canto, pallida e senza raggio, pure spiccava nel campo immenso d'un bigio ceruleo, che, giù giù verso l'orizzonte s'andava sfumando leggermente in un giallo roseo. Più giù, all'orizzonte, si stendevano, a lunghe falde ineguali, poche nuvole, fra l'azzurro e il bruno, le più basse orlate al di sotto d'una striscia quasi di fuoco, che di mano in mano si faceva più viva e tagliente: da mezzogiorno, altre nuvole ravvolte insieme, leggiere e soffici, per dir così, s'andavano lumeggiando di mille colori senza nome...

Spesso è l'azzurro il protagonista di splendide immagini letterarie, come in questo brano tratto dalla *Donna dei miei sogni* di Massimo Bontempelli (1878-1960), dove ci viene presentata una descrizione del mare in tutta la sua luminosa bellezza:

Era azzurro infinito, e nel lontano grandi strisce d'argento lo imbiancavano lunghe fino agli estremi orizzonti. La luce saliva dal mare, scendeva dal cielo, brillava nell'aria. Il mare era quieto e sicuro, solo un tremante margine di spuma sul lido tradiva il suo piacere di vivere. Azzurro e luce volavano sopra la terra. Il mare e il cielo respiravano luce e colore e ne inondavano il mondo...

Ecco infine, in questi versi del poeta italo-americano John Ciardi (1916-1986), una fantasiosa spiegazione dell'azzurro del cielo:

*[...] Perché il cielo è blu? Perché la neve
porta via il bianco. [...]
Perché gli alberi e l'erba tolgono il verde.
Poi cominciano a maturare pere e banane
e poco a poco portano via il giallo.
I tramonti, naturalmente, tolgono il rosso
e lo riversano nel letto dell'oceano*

*o dietro i monti a occidente.
Togliete tutto questo e quel che resta
non è altro che blu [...]*

Ma il problema dell'azzurro del cielo riveste soprattutto un interesse scientifico. Anche se i colori assunti dall'atmosfera nelle differenti condizioni hanno richiamato l'attenzione degli uomini fin dalle epoche più remote, si è dovuta attendere la seconda metà del secolo XIX per avere una prima attendibile descrizione dei meccanismi fisici che ne sono all'origine, e soltanto agli inizi del XX se ne sono compresi in modo chiaro i dettagli. Per dare un'idea della portata e difficoltà del problema può essere utile, prima di svelare la soluzione scaturita dalle ricerche moderne, accennare ad alcune teorie proposte in passato per spiegare l'azzurro del cielo.

1. Un problema millenario

Tralasciando antiche credenze come quella che il cielo fosse una sorta di schermo¹ e che il colore azzurro, in quanto associato al cielo, avesse il potere di tenere lontano il male — superstizione che trova ancora oggi espressione nell'usanza di esporre un fiocco azzurro quando nasce un figlio maschio — per risalire alle prime indagini scientifiche sui colori dell'atmosfera dobbiamo tornare indietro di mille anni fino al medioevo islamico, periodo che vide la nascita di un fecondo movimento intellettuale nelle cui fila militò un drappello di precursori dell'ottica moderna.

1.1 L'età aurea dell'Islam

La figura di spicco di questo gruppo fu Alhazen (965-c. 1038), fisico, matematico e astronomo. Nato in quello che è l'attuale Iraq, visse ed operò in Egitto. I suoi contributi all'ottica, specialmente nel campo della formazione delle immagini e del meccanismo della visione, furono davvero straordinari ed ebbero un'enorme importanza per i successivi sviluppi di questa scienza. L'opera di Alhazen è considerata il culmine della scienza nell'Islam medievale.

Abū-Yūsuf Ya'qūb ibn Ishāq al-Kindī (c. 813-873), un altro antico studioso originario dell'Iraq, definito dai suoi contemporanei il “filosofo degli arabi”, compì quello che forse fu il primo serio tentativo di spiegare il colore del cielo. Egli attribuì l'azzurro del cielo a “una miscela dell'oscurità della notte con la luce delle particelle di polvere e foschia nell'aria illuminata dal sole”.

1.2 Arte e scienza: Leonardo da Vinci

Da Al-Kindī dobbiamo fare un salto in avanti di cinque secoli per incontrare il vero fondatore dell'ottica atmosferica, come viene generalmente considerato Leonardo da Vinci (1452-1529), sommo genio del nostro Rinascimento. Nei suoi manoscritti si rinvennero cognizioni scientifiche sorprendentemente moderne, spesso associate a osservazioni condotte in condizioni controllate sperimentalmente. Nel *Trattato della Pittura*, discutendo il problema della prospettiva aerea nella rappresentazione degli edifici, Leonardo ci offre questo esempio della sua perspicacia di artista-scienziato:

258. Della prospettiva aerea.

Evvì un'altra prospettiva, la quale chiamo aerea imperocché per la varietà dell'aria si possono conoscere le diverse distanze di varî edifici terminati ne' loro nascimenti da una sola linea, come sarebbe il veder molti edifici di là da un muro che tutti appariscono sopra l'estremità di detto muro d'una medesima grandezza, e che tu volessi in

¹ La parola inglese *sky*=cielo è connessa con una radice indoeuropea *sku*=coprire.

pittura far parer più lontano l'uno che l'altro; è da figurarsi un'aria un poco grossa. Tu sai che in simil aria le ultime cose vedute in quella, come son le montagne, per la gran quantità dell'aria che si trova infra l'occhio tuo e dette montagne, queste paiono azzurre, quasi del color dell'aria, quando il sole è per levante. Adunque farai sopra il detto muro il primo edificio del suo colore; il più lontano fallo meno profilato e più azzurro, e quello che tu vuoi che sia più in là altrettanto, fallo altrettanto più azzurro; e quello che tu vuoi che sia cinque volte più lontano, fallo cinque volte più azzurro; e questa regola farà che gli edifici che sono sopra una linea parranno d'una medesima grandezza, e chiaramente si conoscerà quale è più distante e quale è maggiore dell'altro.

In questo brano si trova il concetto che oggetti lontani, come le montagne, appaiono bluastri a causa dell'atmosfera interposta, mentre quelli vicini mantengono il loro colore reale.

In un altro passo del *Trattato* Leonardo fornisce una spiegazione della relazione tra la torbidità atmosferica e la colorazione assunta dal cielo vicino all'orizzonte:

147. Come l'aria si deve far più chiara quanto più la fai finire bassa.

Perché quest'aria è grossa presso alla terra, e quanto più si leva e più s'assottiglia, quando il sole è per levante riguarderai il ponente, partecipante di mezzodì e tramontana, e vedrai quell'aria grossa ricevere più lume dal sole che la sottile, perché i raggi trovano più resistenza. E se il cielo alla vista tua terminerà con la bassa pianura quella parte ultima del cielo sarà veduta per quell'aria più grossa e più bianca, la quale corromperà la verità del colore che si vedrà per suo mezzo, e parrà lì il cielo più bianco che sopra te, perché la linea visuale passa per meno quantità d'aria corrotta da grossi umori. E se riguarderai inverso levante, l'aria ti parrà più scura quanto più s'abbassa, perché in dett'aria bassa i raggi luminosi meno passano.

Leonardo osserva che vicino alla linea dell'orizzonte il cielo viene visto attraverso un'atmosfera più densa e biancastra che ne altera il colore reale; in questa regione il cielo appare perciò più chiaro rispetto alla regione di cielo soprastante, dove la linea visuale attraversa un minor spessore d'aria carica di vapori condensati ("grossi umori").

Anche sull'origine del colore del cielo Leonardo dà dimostrazione della sua penetrante capacità d'intuizione, giungendo a deduzioni suggestive, anche se non del tutto corrette. Le osservazioni che lo condussero a formulare la sua teoria dell'azzurro del cielo furono compiute intorno all'anno 1500, nel corso di un'ascensione alpina nella zona del Monte Rosa, come egli stesso racconta in quest'altro brano famoso:

Dico, l'azzurro in che si mostra l'aria, non essere suo proprio colore, ma è causato da umidità calda, vaporata in minutissimi e insensibili atomi, la quale piglia dopo sé la percussione de' raggi solari e fassi luminosa sotto la oscurità delle immense tenebre della regione del fuoco, che di sopra le fa coperchio. E questo vedrà come vid'io, chi andrà sopra Momboso, giogo dell'Alpi che dividono la Francia dalla Italia,[...]; e vidi l'aria sopra di me tenebrosa; e'l sole, che percotea la montagna, essere più luminoso quivi assai, che nelle basse pianure, perché minor grossezza d'aria s'interponea in fra la cima d'esso monte e'l sole.

Leonardo vede il cielo diventare via via più scuro durante la salita e ne spiega il motivo con la rarefazione dell'aria con l'altitudine, concludendo correttamente che al di sopra dell'atmosfera il cielo apparirebbe nero. Quanto al resto, invece, ha ragione solo in parte: riconosce che l'azzurro non è il colore intrinseco dell'atmosfera, ma sbaglia ad attribuirlo all'azione di minuscole goccioline impercettibili ("atomi") costituenti l'umidità dell'aria, le quali, quando vengono colpite dai raggi solari, appaiono luminose per contrasto con l'oscurità della regione di cielo al di sopra dell'atmosfera ("regione del fuoco").

1.3 Un'ipotesi sui colori: Newton

Leonardo riteneva che il mezzo diffusore che conferisce al cielo il suo colore azzurro fosse costituito da minuscole goccioline d'acqua disperse nell'atmosfera. Come vedremo quest'idea è sbagliata e fuorviante. Malgrado ciò essa ha resistito per altri 400 anni fino alla fine del XIX secolo ed è stata accettata per tutto quel tempo come spiegazione standard dell'azzurro del cielo. Neppure il grande Isaac Newton (1642-1727) seppe darne una migliore; fu però il primo a intuire la dipendenza spettrale della luce diffusa dalla grandezza delle goccioline, anticipando la descrizione di quello che oggi è noto come *regime di Rayleigh*.

Intorno al 1675, presentando i risultati dei pionieristici esperimenti con le lamine sottili (o *anelli di Newton*), il sommo scienziato inglese enunciava un principio per il quale “la grandezza delle parti che compongono i corpi naturali si può congetturare dai loro colori” e lo sfruttava abilmente in un'argomentazione sull'origine dei colori del cielo: quando il vapore acqueo comincia a condensare in minuscole goccioline (“*globules of water*”), queste, via via che si accrescono, raggiungono dapprima la grandezza alla quale diffondono l'azzurro; successivamente, man mano che raggiungono determinati requisiti dimensionali, cominciano a diffondere altri colori. L'azzurro — concludeva Newton — deve perciò essere il colore diffuso nelle regioni più pure e trasparenti dell'atmosfera, dove le goccioline sono troppo piccole per diffondere altri colori:

Il blu del primo ordine, benché molto debole e piccolo, può forse essere il colore di alcune sostanze; e specialmente sembra essere di quest'ordine il colore azzurrato dei cieli. Giacché tutti i vapori, quando cominciano a condensare e ad aggregarsi in piccoli agglomerati, diventano inizialmente, prima che possano formare coalescenze di altri colori, di quella grandezza per cui un tal azzurro debba esser riflesso. E per questo fatto di essere il primo colore che i vapori cominciano a riflettere, dovrebbe essere il colore dei cieli più puri e trasparenti, in cui i vapori non hanno raggiunto i requisiti dimensionali per riflettere altri colori, come troviamo sperimentalmente.

Si noti l'uso dei termini “riflesso” e “riflettere” per descrivere la diffusione. Per Newton il colore “riflesso” è quello “di cui appare” un corpo trasparente colpito dalla luce: nello schema dell'ottica geometrica è il colore risultante dalla riflessione sulla superficie del corpo, dalla rifrazione alle interfacce aria-corpo e dalla trasmissione attraverso il corpo.

Le idee newtoniane sui colori atmosferici, derivanti come detto dalle celebri osservazioni degli anelli colorati negli esperimenti con le lamine sottili, racchiudevano senza dubbio molte intuizioni importanti. Ma, legate com'erano all'ipotesi corpuscolare e all'ottica geometrica, non potevano fornire la corretta interpretazione dei fenomeni descritti (colori delle lamine, azzurro del cielo), che richiede il concetto d'interferenza e l'idea — che Newton rifiutava — della natura ondulatoria della luce.

1.4 Indagini ad alta quota

Le prime indagini sperimentali sistematiche sulle proprietà ottiche dell'atmosfera cominciarono a fare un po' di chiarezza sul problema dell'azzurro del cielo. Il francese Pierre Bouguer (1698-1758) misurò per primo nel 1725 la trasmissione della luce attraverso l'atmosfera, ricavandone un'importante legge sull'attenuazione esponenziale (nota come legge di Bouguer-Lambert-Beer).

Nell'anno della Rivoluzione Francese (1789) lo svizzero Horace Benedict de Saussure (1740-1799) misurò sul Monte Bianco la trasparenza e le gradazioni di azzurro dell'atmosfera con un nuovo strumento da lui stesso ideato, il cianometro. Il merito principale dei due ricercatori fu quello di affrontare il problema da un

punto di vista non più soltanto fenomenologico ma rigorosamente quantitativo, acquisendo in tal modo una mole di dati sperimentali che fu fondamentale per le ricerche successive. De Saussure interpretò i risultati delle misurazioni come indicazione della quantità di goccioline d'acqua in sospensione nell'aria, che distinse dal vapore acqueo in fase gassosa.

1.5 Un ritorno alle origini: Goethe

Animato da intenti di carattere più filosofico che scientifico — in un vano e anacronistico tentativo di restaurare una visione unificante della natura contro il riduzionismo newtoniano allora dominante — e traendo ispirazione da testi antichi, Johan Wolfgang Goethe (1749-1832) formulò intorno al 1810 una singolare *Teoria dei Colori*, che attribuiva i colori e le loro tonalità all'azione della luce o dell'oscurità (considerata l'agente opposto alla luce) su una maggiore o minore torbidezza del mezzo interposto. Attraverso questa teoria intendeva dimostrare, in antitesi rispetto a Newton, che la luce bianca non era costituita da una mescolanza di colori ma da un'unica entità: i colori si manifestavano, secondo Goethe, in seguito a una trasformazione subita dalla luce (o dall'oscurità!) nell'attraversare un mezzo.

Dopo avere osservato che il passaggio di luce bianca nei mezzi torbidi produce infinite variazioni di colore, digradanti dal giallo al rosso e oltre, Goethe, presumendo che avvenisse il processo inverso al passaggio dell'oscurità, azzardava questa strampalata spiegazione dell'azzurro del cielo:

“Se invece è l'oscurità a venire osservata attraverso un mezzo torbido e illuminato da una luce incidente, appare un colore azzurro che diventa sempre più chiaro e sempre più pallido quanto più opaco può diventare il mezzo e per contro risulta più scuro e saturo quanto più trasparente diviene l'elemento torbido [...]. Quando l'oscurità dello spazio infinito viene vista attraverso vapori atmosferici illuminati dalla luce del giorno, ecco comparire l'azzurro”.

Subito dopo, per i colori di albe e tramonti forniva un'interpretazione un po' meno distante dalla descrizione moderna:

Il sole viene annunciato da un rossore in quanto ci irradia attraverso una massa di vapori più consistente. Tanto più esso sale tanto più chiara e gialla diventa la sua luce.

Benché fosse insostenibile da un punto di vista scientifico già nell'epoca in cui era stata concepita, la teoria di Goethe conserva un qualche interesse sotto il profilo storico e filosofico: essa rappresenta un nostalgico tentativo di ritorno a una visione pre-newtoniana del mondo.

1.6 La fabbrica dei tramonti

Proprio mentre Goethe era immerso nelle sue elucubrazioni affiorarono importanti indizi, che avrebbero condotto alla soluzione del problema dell'azzurro del cielo con la scoperta, da parte dell'illustre fisico francese Dominique Arago (1786-1853), che la luce del cielo diurno è polarizzata. Non possiamo dilungarci in questa sede sul problema della polarizzazione, che meriterebbe una trattazione a sé; diciamo soltanto che la scoperta di Arago, avvenuta nel 1809, ebbe conseguenze molto importanti: permise di dimostrare, come vedremo tra poco, che le tesi di Leonardo e Newton, che avevano attribuito la causa dell'azzurro del cielo all'azione della luce solare su goccioline d'acqua disperse nell'alta atmosfera, non erano sostenute dalle prove sperimentali.

Un altro importante contributo sperimentale meritevole di essere ricordato è legato a un episodio che ebbe come protagonista lo scozzese James David Forbes (1809-1868), singolare figura di studioso versatile e provetto alpinista. Forbes aveva osservato che il Sole appariva rossastro se visto attraverso il pennacchio di fumo di una locomotiva. Tornato in laboratorio, fece un esperimento con un piccolo bollitore a vapore, e osservò

un analogo arrossamento della luce bianca attraverso quella parte del vapore che, condensando, diveniva visibile staccandosi dal piccolo pennacchio emesso dal bollitore. Forbes dedusse perspicacemente di aver ricreato il processo che produce il color rosso cremisi dei tramonti, in cui le componenti blu della luce solare vengono in gran parte diffuse lontano dal fascio primario e non raggiungono l'osservatore.

1.7 Goccioline, bolle ecc.

A metà Ottocento si verificarono significativi sviluppi teorici. Nella sua dissertazione di dottorato del 1847 il giovane Rudolf Clausius (1822-1888), che sarebbe in seguito divenuto uno dei padri fondatori della termodinamica, aveva sviluppato matematicamente le idee di Newton sui colori del cielo che abbiamo già ricordato. Per determinare quali colori sarebbero comparsi, Clausius aveva supposto che il vapore, anziché nelle goccioline sferiche immaginate da Newton, potesse condensare in minuscole "bolle d'acqua", che in analogia con le bolle di sapone potevano essere studiate come lamine sottili. Risultava allora che il blu del cielo era proprio "il blu del primo ordine" della scala di Newton.

La teoria di Clausius, pur costituendo la prima significativa applicazione dell'apparato matematico al problema dell'azzurro del cielo, presentava gravi difetti. Prima di tutto, era difficile capire come il vapore acqueo potesse condensare in bolle anziché in goccioline. Inoltre, anche particelle che *non* avevano la forma di bolle potevano diffondere la luce blu. Alcuni esperimenti di Ernst Wilhelm Ritter von Brücke (1819-1892) e John Tyndall (1820-1893) avevano infatti dimostrato che particelle gommose in sospensione prodotte per precipitazione chimica² diffondevano luce blu completamente polarizzata in direzione perpendicolare al fascio incidente, purché fossero sufficientemente piccole. Vi era infine l'obiezione cruciale — sollevata da von Brücke — che il colore del cielo è in realtà molto più ricco del blu del primo ordine.

A queste obiezioni, già di per sé sufficienti a porre seriamente in dubbio l'ipotesi delle bolle, se ne aggiunse infine un'altra dell'astronomo John Herschel (1792-1871), figlio del più famoso William, il quale fece notare che la luce solare è polarizzata a 90 gradi rispetto alla direzione del Sole, in contrasto con la previsione teorica di Clausius della massima polarizzazione della luce *riflessa* a un angolo di 76 gradi. Questa incongruenza indusse Herschel a dubitare che la *riflessione* della luce solare avvenisse su particelle (o bolle) di acqua o ghiaccio, come si credeva allora (1869), e a chiedersi se non si producesse piuttosto, in qualche modo ancora da chiarire, "in aria su aria":

La causa della polarizzazione è evidentemente una riflessione della luce solare su qualcosa. Il punto è: Su cosa? Se l'angolo di massima polarizzazione fosse 76 gradi, dovremo considerare l'acqua o il ghiaccio come corpo riflettente, per quanto l'esistenza di molecole (particelle?) d'acqua non evaporata in un'atmosfera senza nubi in un caldo giorno estivo sia inconcepibile. Ma benché avessimo un tempo questa opinione, l'osservazione accurata ci ha persuaso che 90 gradi, o pressappoco, è un angolo corretto, e che dunque, qualunque sia il corpo su cui la luce sia stata riflessa, se polarizzata da una singola riflessione, l'angolo di polarizzazione deve essere di 45 gradi, e l'indice di rifrazione, che è la tangente di quell'angolo, unitario; in altre parole, sarebbe necessario che la riflessione si producesse in aria su aria!

A quanto sembra Herschel non fu capace di trarre da questa perspicace osservazione la logica conclusione che la *riflessione*³ avviene effettivamente sull'aria (ovvero sulle molecole libere).

² Era inverosimile che le particelle prodotte mediante questo processo chimico avessero la forma di bolle.

³ Leggi: diffusione.

Non ebbe miglior fortuna Tyndall. Considerato un precursore dello sviluppo delle fibre ottiche e lo scopritore dell'effetto serra, Tyndall aveva in comune con Leonardo, de Saussure e Forbes la passione per la montagna. Furono probabilmente le numerose escursioni alpine a far nascere in lui l'interesse per l'ottica atmosferica, che successivamente coltivò dedicandosi con particolare impegno allo studio della diffusione della luce da particelle in sospensione. Sono molto note le sue indagini sulla diffusione da particelle più piccole o dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda della luce incidente, e sulla dipendenza, già nota a Newton, della diffusione dalle dimensioni delle particelle (dipendenza nota come *effetto Tyndall* o *fenomeno di Tyndall* o *regime di Rayleigh*). Le sue estese ricerche su questi temi hanno influenzato settori apparentemente distanti dalla fisica, come la medicina polmonare⁴.

Anche Tyndall credeva, come Leonardo e Newton prima di lui, che la diffusione della luce del cielo fosse causata dalla presenza di minuscole goccioline d'acqua nell'alta atmosfera, ma non riuscì mai a dimostrare sperimentalmente questa tesi. Nonostante lunghe ricerche, culminate comunque in risultati importanti, alla fine dovette arrendersi all'enigma del cielo azzurro e nel 1869 gettò definitivamente la spugna, osservando che l'aria completamente filtrata dalle particelle estranee in sospensione si comportava, nei confronti della luce, come il vuoto:

Quando l'aria veniva filtrata al punto da rimuovere completamente la materia visibile in sospensione, non esercitava più alcuna sensibile azione sulla luce, ma si comportava come un vuoto. La luce è diffusa e polarizzata da particelle, non da molecole o atomi.

L'ultima affermazione di Tyndall dimostra quanto egli fosse lontano dalla soluzione. Oggi sappiamo che è esattamente il contrario: la luce è diffusa e polarizzata da molecole o atomi, non da particelle in sospensione.

2. La soluzione dell'enigma

Finora abbiamo visto che ancora intorno al 1870, dopo dieci secoli di ricerche, gli scienziati postulavano la presenza di particelle sospese nell'alta atmosfera per spiegare il colore del cielo. Abbiamo visto che nonostante gli sforzi d'innomerevoli ricercatori, quest'ipotesi non aveva sino ad allora ricevuto una conferma sperimentale e portava a serie difficoltà sul piano teorico. Per uscire dal vicolo cieco appariva ormai inevitabile esplorare vie alternative. Fortunatamente i tempi erano maturi, i necessari ingredienti teorici disponibili e i risultati non tardarono ad arrivare.

2.1 Una teoria... elastica: Lord Rayleigh

La via d'uscita s'intravide con la discesa in campo di Lord Rayleigh (1842-1919), un altro grande personaggio della fisica. Nel 1871, applicando la teoria elastica secondo cui la luce è una perturbazione che si propaga nell'etere in modo simile alle onde sonore che si propagano nell'aria, e assumendo una distribuzione discreta della materia dell'atmosfera (particelle)⁵, Rayleigh ricavò un'equazione che descrive il comportamento della radiazione diffusa da piccole particelle investite da un'onda incidente:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{9\pi^2}{2} \left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta) \frac{nV^2}{\lambda^4 r^2}$$

⁴ Cfr. J.H. Comroe, *What Makes the Sky Blue?*, in "American Review of Respiratory Disease", 113, 1976, pp. 219-222.

⁵ Si deve ricordare che all'epoca la costituzione atomica della materia era data tutt'altro che per scontata.

dove:

I_0 = irradianza (=energia irraggiata per unità di area e per unità di tempo) incidente,

I = irradianza diffusa (calcolata a grandi distanze rispetto alla lunghezza d'onda),

ε = permeabilità elettrica (o costante dielettrica) relativa della particella diffondente,

θ = angolo di diffusione,

n = numero dei centri discreti di diffusione (particelle),

V = volume dei centri diffusori,

λ = lunghezza d'onda della luce incidente,

r = distanza dei centri diffusori dall'osservatore.

L'equazione di Rayleigh è valida per particelle sferiche molto piccole rispetto alla lunghezza d'onda della luce incidente, che è supposta non polarizzata (come è in effetti la luce solare diretta). Inoltre — sempre per la validità dell'equazione — si suppone che l'atmosfera sia un gas rarefatto ideale, in modo che la diffusione da n molecole si possa considerare pari a n volte la diffusione da una singola molecola.

È bene precisare che l'equazione non è rigorosamente esatta. Originariamente era stata ricavata nel caso di particelle dipolari (dipoli elettrici) di forma sferica, molto piccole in rapporto alla lunghezza d'onda della luce incidente. Naturalmente queste condizioni non sono mai esattamente soddisfatte (per esempio, le molecole di azoto dell'atmosfera non sono perfettamente sferiche, la “costante” dielettrica varia con la lunghezza d'onda ecc.), e in effetti le misure sperimentali forniscono valori dell'esponente di $1/\lambda$ che si discostano leggermente da 4. Ciononostante l'equazione di diffusione ha mantenuto la forma originale datale da Rayleigh e in questa forma continua a essere usata ancora oggi.

L'equazione spiega tutti i principali dettagli della diffusione della luce da particelle sferiche dipolari molto piccole rispetto alla lunghezza d'onda: confermando l'intuizione di Newton essa esprime la forte dipendenza spettrale della diffusione dalla grandezza delle particelle attraverso la sesta potenza del diametro; la simmetria angolare della radiazione diffusa viene descritta dalla dipendenza dal quadrato del coseno dell'angolo; ma quello che è forse l'aspetto più interessante è la dipendenza dall'inverso della quarta potenza della lunghezza d'onda.

È infatti proprio quest'ultimo particolare che costituisce la chiave della spiegazione dell'azzurro del cielo: poiché nella zona rossa dello spettro visibile (700 nm) la lunghezza d'onda è 1,75 volte maggiore che nella regione blu-violetta (400 nm), l'equazione di Rayleigh predice un'irradianza in quest'ultima regione $(1,75)^4$ volte — cioè circa 10 volte — maggiore che nel rosso.

Però l'equazione non spiega l'esatta natura delle particelle che fungono da centri diffusori nell'atmosfera. Che cosa sono queste particelle: goccioline, granelli di polvere, molecole... o che altro? Rayleigh si pronunciò sulla questione in un importante lavoro del 1899, dove riprendeva in esame — sembra sotto lo stimolo di una corrispondenza che era intercorsa tra lui e James Clerk Maxwell nel 1873 — il lavoro di molti anni prima sull'attenuazione subita da un fascio di luce che attraversa un mezzo contenente piccole particelle, in dipendenza dal numero e dalla dimensione di queste:

Strettamente connessa con questa è l'interessante questione se la luce del cielo può essere spiegata dalla diffusione⁶ dalle molecole d'aria stesse, o se è necessario fare appello a particelle sospese, composte di materia estranea, solida o liquida. Risulterà, credo, che anche in assenza di particelle estranee si avrebbe ancora un cielo blu.

Dunque sul finire dell'Ottocento Rayleigh era convinto che sia le molecole d'aria sia particelle di piccolissime dimensioni sospese nell'atmosfera potessero diffondere la componente blu della luce solare, e che pertanto la presenza delle particelle non fosse determinate: il colore del cielo poteva essere spiegato almeno in parte dalla diffusione molecolare. La sua conclusione che “anche in assenza di particelle estranee si avrebbe ancora un cielo blu” era sostanzialmente corretta ma non coglieva un punto cruciale: la presenza di particelle in realtà rende il cielo... *meno* blu!

Il grosso passo avanti di Rayleigh consisteva dunque nel riconoscimento che *anche* le molecole dell'atmosfera possono diffondere la luce del cielo. La teoria della diffusione molecolare non ottenne un consenso immediato. La sopravvivenza di spiegazioni alternative, ma forse più di queste lo scetticismo verso le idee atomistiche ancora diffuso alla fine dell'Ottocento, ne ostacolavano l'accettazione generale; oltre a ciò la teoria presentava dei punti deboli legati alle ipotesi semplificatrici introdotte da Rayleigh. Per queste ragioni, ancora nel 1908 la questione se le molecole dell'aria fossero il mezzo diffusore responsabile del colore del cielo rimaneva controversa.

3. La zampata del leone: Einstein

Il contributo decisivo alla soluzione dell'enigma dell'azzurro del cielo giunse ad opera di Albert Einstein (1879-1955), quando questi entrò sulla scena nel 1910 con un colpo — come suo solito — da maestro. A quel tempo il grande fisico era alle prese col problema dell'opalescenza critica. Vediamo brevemente in che cosa consiste.

Quando in un fluido avviene una transizione di fase, per esempio dell'acqua viene fatta bollire in un contenitore sigillato, il liquido gradualmente si trasforma in gas all'aumentare della temperatura, raggiungendo la densità della fase gassosa. Allo stesso tempo la densità della fase liquida diminuisce, e alla fine si raggiunge un punto (alla temperatura di circa 647 K e alla pressione di 218 atm) in cui le fasi liquida e gassosa hanno la stessa densità. A temperature prossime a questo punto critico si formano bolle di entrambe le fasi liquida e gassosa, la cui grandezza varia in un ampio intervallo di dimensioni. Quando si formano goccioline liquide delle dimensioni della lunghezza d'onda della luce visibile si verifica un forte aumento della diffusione, e il fluido, dapprima trasparente, assume un caratteristico aspetto lattiginoso⁷.

Einstein calcolò, senza ricorrere direttamente all'ipotesi “molecolare” di Rayleigh, la diffusione della luce in un mezzo debolmente disomogeneo (cioè con indice di rifrazione variabile da punto a punto) e non assorbente, e trovò che questa era legata a piccole fluttuazioni di densità del mezzo. Questo implica — ed è qui il nocciolo della questione — che in un mezzo perfettamente omogeneo, ossia senza fluttuazioni, non si osserverebbe alcuna diffusione. Einstein ricavò poi, nel caso limite di un gas perfetto, una equazione in accordo

⁶ *Diffraction* nel testo originale di Rayleigh.

⁷ Ci si potrebbe chiedere perché non ci sia diffusione anche quando il fluido si trova nella fase condensata. Al riguardo bisogna tener conto che, mentre nei gas le molecole sono indipendenti, nei liquidi e nei solidi le interazioni tra molecole o atomi vicini instaurano correlazioni a corta distanza. In queste condizioni si ha interferenza distruttiva tra le onde diffuse, tranne nella direzione in avanti.

quantitativo con quella di Rayleigh: poteva essere ottenuta sommando — come aveva appunto fatto Rayleigh — le onde diffuse dalle singole molecole quando queste si consideravano distribuite a caso.

Il fisico polacco Marian Smoluchowski (1872-1917), che lavorava da tempo sull'opalescenza critica, si rese immediatamente conto dell'importanza del risultato ottenuto da Einstein in relazione al problema dell'azzurro del cielo, ma non ne comprese completamente significato. Secondo Smoluchowski l'azzurro del cielo era dovuto a due diversi fattori: la diffusione molecolare e quella dovuta alle fluttuazioni di densità. Einstein gli fece prontamente notare che in realtà si trattava dello stesso effetto in entrambi i casi.

Smoluchowski si convinse rapidamente che quella di Einstein era l'interpretazione corretta. In seguito tentò di riprodurre l'azzurro del cielo con esperimenti di laboratorio, ma morì prima di vederli completati.

3.1 Il cielo in bottiglia

L'impresa incompiuta di Smoluchowski riuscì nel 1913 al francese Jean Cabannes (1885-1959), che ottenne una delle prime conferme sperimentali che le molecole diffondono la luce obbedendo alla equazione di Rayleigh (e di Einstein). Cabannes aveva compreso che la verifica sperimentale dell'equazione di diffusione non poteva essere compiuta osservando direttamente la luce del cielo, a causa di varie complicazioni: l'aria non è un gas puro, ha una composizione variabile, racchiude delle particelle di polvere ecc. Era necessario operare con un gas puro e secco, contenuto in un recipiente sigillato, ed evitando accuratamente la luce parassita emessa dalle pareti del recipiente. Lavorando in queste difficili condizioni sperimentali, Cabannes riuscì a misurare con precisione, impiegando metodi fotografici, la debole luce azzurra che veniva diffusa, e dimostrò che essa seguiva l'equazione di Rayleigh, aumentando di molto nell'ultravioletto e sparendo completamente quando nel recipiente veniva praticato il vuoto. In questo modo Cabannes... era riuscito a riprodurre il cielo in bottiglia!

4. Perché il cielo è azzurro?

Abbiamo ora tutti gli elementi per svelare la risposta della scienza moderna al problema dell'azzurro del cielo; essa si basa sull'equazione di Rayleigh e sull'effetto delle fluttuazioni sulla diffusione atmosferica della luce descritto da Einstein e Smoluchowski. Per capire come si è pervenuti a questo esito finale è utile riprendere in esame i punti deboli delle teorie di cui abbiamo fatto la conoscenza nel nostro excursus storico.

4.1 La caduta del cielo: Leonardo, Newton & Co.

Come abbiamo visto, Leonardo e Newton — e più tardi Clausius, Tyndall, Lodge e molti altri — erano convinti che per avere un cielo azzurro fosse necessaria la presenza, nelle regioni superiori dell'atmosfera, di particelle d'acqua sotto qualche forma: goccioline, bolle, ghiaccio ecc. In realtà è l'esatto opposto: all'aumentare delle dimensioni delle particelle in sospensione la diffusione atmosferica della luce solare diventa sempre meno sensibile alle lunghezze d'onda, fino a diffonderle tutte in ugual misura, facendo tendere la colorazione del cielo al bianco. Del resto, ciò è dimostrato in modo evidente dalla colorazione bianca dei corpi nuvolosi, che sono formati da goccioline d'acqua.

Una possibile ragione fisica del persistere dell'idea erronea che l'acqua dispersa nell'atmosfera renda il cielo azzurro — nemmeno oggi del tutto scomparsa — è legata all'osservazione che la luce che attraversa alcuni metri d'acqua liquida o di ghiaccio appare blu. Tale fenomeno, però, non è dovuto alla diffusione ma all'assorbimento selettivo, che è massimo all'estremità rossa dello spettro visibile. Questo effetto — sia detto per

inciso — risponde in parte alla domanda: Perché il mare è blu? Nel caso dell'atmosfera, dove il vapore acqueo rappresenta appena lo 0,04% del totale in volume, l'effetto descritto è irrilevante.

Piuttosto recentemente è stato fatto notare che le proposte di spiegazione dell'azzurro del cielo avanzate nel passato, e basate sul postulato della presenza nell'atmosfera di acqua sotto forma di particelle, non avrebbero retto a un esame più attento neppure ai tempi in cui furono formulate, se questo fosse stato fatto. Semplici calcoli, già possibili all'epoca di Newton, suggeriscono che simili particelle non potrebbero permanere nell'atmosfera poiché, anche qualora cadessero molto lentamente, sarebbero prima o poi inglobate da goccioline d'acqua più grandi presenti nell'ambiente, e verrebbero rimosse dall'atmosfera prima che abbiano la possibilità di riformarsi. In poche parole si assisterebbe letteralmente... alla caduta del cielo!⁸

4.2 Buio a mezzogiorno

L'osservazione di Tyndall del 1869 che i gas puri si comportano nei confronti della luce “come un vuoto” sembra a prima vista facilmente confutabile. Infatti, se non si riesce a riprodurre in laboratorio il colore del cielo questo dipende, come abbiamo visto, da difficoltà di esecuzione dell'esperimento. Ma nell'aria aperta la situazione è completamente diversa. In primo luogo, il vuoto dello spazio extra-atmosferico costituisce un sfondo scuro che permette di distinguere la debole luce blu dovuta alla diffusione molecolare (questo non sarebbe possibile su uno sfondo luminoso come quello delle nuvole illuminate dal Sole). Inoltre, in un'atmosfera puramente gassosa dello spessore di alcuni chilometri come quella terrestre un numero enorme di centri diffusori si trovano allineati in ogni istante lungo ogni possibile direzione di osservazione. Queste condizioni sono sufficienti perché la debole luce diffusa dalle molecole diventi visibile all'occhio umano.

Malgrado ciò non potremmo comunque osservare la luce diffusa se vivessimo in un'atmosfera di densità perfettamente uniforme. In una simile atmosfera, come vedremo tra poco, le onde diffuse interferirebbero distruttivamente in tutte le direzioni tranne in quella d'incidenza e Tyndall — incidentalmente — avrebbe ragione: l'aria si comporterebbe sulla luce esattamente come il vuoto⁹ e il cielo non apparirebbe blu ma nero, anche in pieno giorno!

L'equazione di Rayleigh, nonostante il suo indubbio successo nel descrivere i dettagli della diffusione, poggiava su incerte fondamenta. Ricordiamo che una delle condizioni per la sua validità era che la diffusione da n centri si potesse considerare uguale a n volte la diffusione da un singolo centro. Per questo motivo Rayleigh aveva introdotto l'ipotesi aggiuntiva che ogni particella diffondente fosse indipendente dalle altre, e quindi diffondesse la luce in modo assolutamente casuale. Nella diffusione casuale, infatti, le fasi delle onde elementari diffuse dalle singole particelle hanno differenze molto piccole¹⁰ — positive e negative — dalla fase dell'onda incidente e queste differenze positive e negative sono ugualmente frequenti, dando in media una differenza di fase nulla. In queste condizioni non vi è interferenza distruttiva tra le onde elementari: queste si sommano costruttivamente esattamente nel modo richiesto dall'equazione di Rayleigh.

Senonché, nel caso dell'atmosfera, le cose non sono così semplici. Immaginiamo di suddividere il volume d'atmosfera contenente i centri diffusori (atomi e molecole) in volumetti di dimensioni microscopiche,

⁸ Cfr. P. Pesic, *The sky is falling: Newton's droplets, Clausius's bubbles and Tyndall's "sky matter"*, in “Eur. J. Phys.”, 26, 2005, pp. 189-193.

⁹ In realtà non sarebbe esattamente così: la diffusione in avanti introdurrebbe un ritardo di fase; ai fini della nostra discussione possiamo ignorare questo particolare.

¹⁰ Questo è valido a rigore nella diffusione coerente, qual è appunto il caso considerato da Rayleigh.

per esempio in cellette cubiche di spigolo $\lambda/2$. All'interno di una celletta la fase dell'onda incidente si può considerare la stessa in ogni punto. Si trova allora che se una celletta contiene molti atomi e molecole, l'intensità totale diffusa da molte cellette simili sarà nulla per interferenza distruttiva in tutte le direzioni eccetto in avanti, anche se la distribuzione dei centri diffusori nella celletta è casuale.¹¹ Questo effetto è simile a quello che si osserva con un reticolo monodimensionale nel quale la distanza tra centri diffusori adiacenti è piccola rispetto alla lunghezza d'onda, cioè quando vi sono molti centri nello spazio di una lunghezza d'onda. In questo caso la figura di diffrazione non compare e si ha un unico picco luminoso nella direzione in avanti, mentre tutto intorno lo schermo rimane scuro.

Questo è proprio ciò che si verifica nella diffusione atmosferica. Il numero di molecole per unità di volume (numero di Loschmidt = $2.7 \cdot 10^{19}$ molecole cm^{-3} a 0°C e 1 atm) porta alla stima di 240000 molecole per celletta di spigolo $\frac{1}{2} 400 \text{ nm}$ (consideriamo la diffusione di luce blu-violetta). Le molecole di azoto, che rappresentano la componente principale dell'atmosfera (78% in volume), hanno un diametro di 0,37 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) e un cammino libero medio (a 0°C e 1 atm) di 61 nm, corrispondente a 165 volte il diametro molecolare. Allora si può assumere che per la maggior parte del tempo le molecole non interagiscano e di conseguenza si possano considerare indipendenti e distribuite a caso. Ora, quantunque l'atmosfera si possa considerare un gas perfetto, i centri diffusori compresi nello spazio di una lunghezza d'onda sono molto numerosi (240000) e questo fa prevedere interferenza distruttiva tra le onde diffuse: si osserverebbe un unico intenso picco luminoso in corrispondenza del Sole, che apparirebbe come un disco bianco luminosissimo immerso in un cielo per il resto completamente nero anche in pieno giorno!

Ma allora, perché il cielo non è sempre nero?

E perché l'equazione di Rayleigh funziona correttamente?

Furono Einstein e Smoluchowski a rispondere a queste domande e a dare finalmente la corretta spiegazione dell'azzurro del cielo.

5. Il ruolo chiave delle fluttuazioni

La chiave della spiegazione di Einstein e Smoluchowski sta nel fatto l'atmosfera non è perfettamente uniforme e il meccanismo di interferenza distruttiva appena descritto funziona solo in parte, col risultato che non tutte le onde elementari diffuse dalle singole molecole vengono distrutte. Immaginiamo di aver suddiviso l'atmosfera nelle solite cellette di spigolo $\lambda/2$; poiché l'atmosfera non è perfettamente uniforme la densità dell'aria varia leggermente da un luogo all'altro e di conseguenza il numero di molecole per celletta è costante solo in media. Un calcolo esatto dimostra che la diffusione delle onde non cancellate per interferenza è legata alle fluttuazioni di questo numero, mentre la media dello stesso numero su molte cellette simili dà luogo a diffusione soltanto in avanti (o meglio: a trasmissione con ritardo di fase) e a interferenza distruttiva nelle altre direzioni.

¹¹ Il caso opposto, di interferenza costruttiva, si ha quando *pochi* atomi e molecole sono distribuiti a caso nelle cellette, in modo che in media vi siano sempre delle cellette vuote tra due cellette occupate. Per una discussione generale di questo problema si veda W.K.H. Panofsky e M. Phillips, *Elettricità e Magnetismo*, Ambrosiana, Milano 1966.

Se le fluttuazioni sono piccole, come nei gas rarefatti, la diffusione è semplicemente proporzionale al numero totale di molecole, in perfetto accordo con l'equazione di Rayleigh, della quale quella di Einstein è una generalizzazione. È di estrema importanza che le fluttuazioni siano piccole. Se così non fosse l'equazione di Rayleigh non sarebbe applicabile alla diffusione atmosferica e non si avrebbe un cielo azzurro. All'altro estremo, in assenza di fluttuazioni — ovvero in un'atmosfera uniforme — si vedrebbe un cielo sempre nero.

Il ruolo fondamentale delle fluttuazioni di densità dell'aria nella diffusione atmosferica della luce solare non viene generalmente menzionato nei libri di testo in uso nelle scuole superiori, che offrono una spiegazione parziale del colore del cielo: "il colore azzurro del cielo è dovuto alla diffusione della luce solare ad opera delle molecole dell'aria"¹².

Vediamo come è possibile completarla.

6. I colori del cielo

Le molecole di azoto e ossigeno, che costituiscono insieme il 99% della nostra atmosfera, diffondono selettivamente la maggior parte della luce solare incidente, privilegiando le componenti cromatiche di piccola lunghezza d'onda. Un'altra parte della radiazione incidente viene diffusa da particelle in sospensione, mentre l'assorbimento è di solito irrilevante¹³. A livello della singola molecola il meccanismo della diffusione selettiva obbedisce all'equazione di Rayleigh, che prevede per la luce diffusa la stessa distribuzione angolare a tutte le lunghezze d'onda e una rapida diminuzione dell'intensità all'aumentare della lunghezza d'onda. Operano nell'atmosfera anche altri meccanismi di diffusione, non selettivi, che spiegano, ad esempio, il bianco delle nuvole.

Quando dal livello della singola molecola si passa a considerarne un numero enorme, distribuito in un grande volume dove sono presenti piccole fluttuazioni di densità, queste ultime fanno sì che le onde diffuse dalle molecole non si cancellino completamente per interferenza. È proprio questo effetto che dà origine all'azzurro del cielo diurno e al rosso di albe e tramonti. Il cielo diurno appare azzurro perché la componente blu della luce solare diffusa dalle molecole atmosferiche predomina nel visibile, ed è anche quella a cui l'occhio umano è più sensibile. Viceversa, quando il Sole è molto vicino all'orizzonte, il maggiore spessore dell'atmosfera lungo il percorso della luce incidente rende più efficace la diffusione delle componenti di minore lunghezza d'onda lontano dal fascio primario. Si verifica allora un forte indebolimento della componente blu, che si traduce in una predominanza di giallo, arancio e rosso nella luce di albe e tramonti.

Ora possiamo davvero enunciare la corretta spiegazione del colore del cielo:

il colore del cielo è una conseguenza della diffusione molecolare della luce solare incidente su un grande numero di molecole distribuite in un volume di atmosfera dove sono presenti piccole fluttuazioni di densità.

Bibliografia

M. Bontempelli, *La donna dei miei sogni e altre avventure moderne*, Mondadori, Milano 1925.

J. Ciardi, *Selected Poems*, University of Arkansas Press, Fayetteville 1984.

¹² Cfr. J.D. Wilson – A.J. Buffa, *Fisica*, Principato, Milano 2000 (vol. 2, p. 164).

¹³ Per la precisione: l'atmosfera assorbe selettivamente la radiazione elettromagnetica; il minimo di assorbimento si verifica in coincidenza della "finestra atmosferica" dai 400 ai 700 nm corrispondente all'intervallo di lunghezze d'onda visibili dall'occhio umano.

- L. Da Vinci, *Trattato della Pittura*, a cura di E. Camesasca, TEA Arte, Milano 1995. L'ascensione al Monte Rosa è descritta da Leonardo nei *Frammenti letterari e filosofici*, a c. di E. Solmi, Firenze 1979; un resoconto si trova anche in V. Ricci, *L'andata di Leonardo da Vinci al Monboso, oggi Monte Rosa, e la teoria dell'azzurro del cielo*, Arti grafiche F.lli Palombi, Roma 1977. Molte importanti intuizioni scientifiche sono a lungo rimaste nascoste nei manoscritti redatti da Leonardo tra il 1480 e l'anno della morte (1519) e hanno avuto scarsa influenza sullo sviluppo scientifico successivo. Oggi sappiamo che alcune sue osservazioni ed esperienze hanno anticipato ricerche e risultati della scienza moderna. È alquanto recente, ad esempio, la conferma da parte di un gruppo internazionale di ricerca di una teoria di Leonardo sull'attrito fra superfici, secondo la quale se due superfici a contatto sono geometricamente simili hanno un coefficiente d'attrito molto maggiore rispetto a due superfici dissimili, perché hanno la tendenza a incastrarsi (vedi il notiziario Scienza 7 del 2 settembre 2005 [http://ulisse.sissa.it/s7_02set06_6.jsp] e l'insero di Leo E. Ricci, *L'attrito secondo Leonardo* in "Le Scienze", n. 446, ottobre 2005, p. 22). I ricercatori hanno impiegato un quasicristallo con un reticolo periodico lungo una direzione e aperiodico lungo un'altra, scoprendo che l'attrito lungo l'asse periodico è circa otto volte maggiore di quello misurato lungo l'asse aperiodico. Il resoconto della ricerca si trova in J.Y. Park et al., *High Frictional Anisotropy of Periodic and Aperiodic Directions on a Quasicrystal Surface*, in "Science", vol. 309, n. 5739 (26 agosto 2005), pp. 1354-1356.
- A. Frova, *Luce, Colore, Visione. Perché si vede ciò che si vede*, Superbur Scienza, Rizzoli, Milano 2000, un'introduzione molto accessibile alla diffusione atmosferica della luce.
- J.W. Goethe, *Teoria dei colori. Parte didattica*, a c. di R. Troncon, Il Saggiatore, Milano 1999.
- P. Lilienfeld, *A Blue Sky History*, Optics & Photonics News, vol. 15, n. 6, giugno 2004, pp. 32-39, da cui abbiamo tratto molte notizie storiche e le citazioni di Al-Kindī e Herschel; altre notizie storiche sono state ricavate da J.A. Shaw, *A note on Lord Rayleigh*, Optics & Photonics News, vol. 15, n. 7, luglio 2004, p. 7.
- A. Manzoni, *I promessi sposi*, a cura di A. Marchese, Mondadori, Milano 1985.
- I. Newton, *An Hypothesis explaining the Properties of Light*, in T. Birch, *The History of the Royal Society*, Londra 1757, vol. 3, pp. 247-305. è il resoconto dei primi celebri esperimenti sui colori che si osservano premendo l'una contro l'altra due lamine di vetro non perfettamente piane. I colori prodotti dall'interferenza variano con la differenza di cammino ottico secondo una sequenza caratteristica, nota come serie di Newton (gli stessi colori appaiono nelle bolle di sapone). Newton descrisse gli anelli colorati prodotti nel corso di queste esperienze (anelli di Newton) anche nell'*Ottica (Libro II, Parte I)*, dividendoli nei seguenti ordini:
1. nero, blu, bianco, giallo, rosso
 2. violetto, blu, verde, giallo, rosso
 3. porpora, blu, verde, giallo, rosso
 4. verde, rosso sporco
 5. blu verdognolo, rosso
 6. blu verdognolo, rosso pallido
 7. blu verdognolo, bianco rossiccio

- A. Pais, *Sottile è il Signore... La scienza e la vita di Albert Einstein*, Gli Archi, Bollati Boringhieri, Torino 1991, dove viene discusso il dibattito Einstein-Smoluchowski sull'opalescenza critica e l'azzurro del cielo.
- P. Pesic, *Sky in a Bottle*, The MIT Press, Cambridge (MA) 2005.
- L. Rayleigh, *On the light from the sky, its polarization and colour*, Phil. Mag. Ser. 4, 41, pp. 107-120 e pp. 274-279, 1871; *On the scattering of light by small particles*, Phil. Mag. Ser. 4, 41, pp. 447-454, 1871; *On the Transmission of Light Through an Atmosphere Containing Small Particles in Suspension, and on the Origin of the Blue of the Sky*, Phil. Mag. Ser. 5, 47, 375-84, 1899. John William Strutt (Lord Rayleigh), terzo barone di Rayleigh lavorò a intermittenza sul problema della luce del cielo diurno per circa mezzo secolo. Egli non fu il solo Rayleigh a dare importanti contributi all'ottica dell'atmosfera; suo figlio maggiore Robert John Strutt (1875-1947), quarto barone di Rayleigh, si dedicò allo studio del cielo notturno scoprendo l'ozono atmosferico.
- J.C. Shairp, P.G. Tait, A. Adams-Reilly, *Life and letters of James David Forbes*, Macmillan, London 1873. Forbes aveva una personalità poliedrica: fisico, geologo, naturalista, storico, viaggiatore, alpinista. Primo britannico a scalare la Jüingfrau, compì ricerche pionieristiche sull'origine dei ghiacciai, che lo coinvolsero anche in una disputa con Tyndall. Come fisico compì importanti studi sulla polarizzazione termica. Il nome di Forbes viene associato all'invenzione di un sismografo.
- J.A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill, New York 1941; M. Kerker, *The scattering of light and other electromagnetic radiation*, Academic Press, New York 1969, due testi a livello decisamente più avanzato. Non è facile trovare una trattazione organica della teoria della diffusione nei corpi condensati. Con un certo sforzo, la si può estrarre dai seguenti volumi della collana di *Fisica Teorica* di Landau-Lifschitz: *Theorie du champ*, *Physique Statistique*, *Hydrodynamique*, *électrodynamique des milieux continus* (MIR, Mosca 1969).
- G. Strohmaier, *Alhazen, l'età dell'oro della scienza islamica*, in "Le Scienze", n. 443, luglio 2005, pp. 98-107. L'articolo di Strohmaier s'incentra soprattutto sulla figura e l'opera di Alhazen. Nel campo dell'ottica Alhazen compì esperimenti sistematici, che descrisse con grande accuratezza: studiò la propagazione della luce e dei colori, la riflessione, la rifrazione, le proprietà degli specchi sferici e parabolici e delle lenti sferiche e cilindriche; ebbe le nozioni di messa a fuoco, ingrandimento e inversione delle immagini; riconobbe l'aberrazione sferica e descrisse una camera oscura. Alhazen è molto famoso anche per aver risolto il cosiddetto problema di Alhazen: determinare il punto di uno specchio (convesso, sferico, conico o cilindrico) in cui il raggio proveniente da un punto assegnato può riflettersi in un altro punto assegnato; la soluzione di questo problema comporta la risoluzione di un'equazione di quarto grado. Le opere di Alhazen, nella traduzione del monaco polacco Witelo (più noto col nome latinizzato di Vitellione), raggiunsero l'Europa nel XIII secolo e furono conosciute, fra gli altri, da Keplero, che per primo avrebbe descritto correttamente il processo di formazione delle immagini sulla retina. Al-Kindī fu uno studioso enciclopedico con vasti interessi scientifici: dalla farmacopea alla meteorologia, dalle maree al problema del peso specifico. Nel campo dell'ottica è ricordato come autore di un trattato che ebbe grande influenza nell'Occidente medievale.
- J. Tyndall, *On the blue color of the sky, the polarization of sky light, and on the polarization by cloudy matter in general*, Proc. Roy. Soc. (London), 17, p. 223, 1869.

