

Błękit nieba stanowi najpospolitsze zjawisko, wciąż przez każdego obserwowane. Zazwyczaj nie zastanawiamy się nad jego przyczyną, chociaż jest ono piękne i osobliwe.

Błękitem nieba interesowano się już od najdawniejszych czasów, jednak wyjaśnienie pochodzenia tej barwy nastąpiło stosunkowo niedawno. Starożytni zupełnie nie znali przyczyny błękitu nieba. Leonardo da Vinci, wiedziony znakomitą intuicją, twierdził, że „błękit powietrza powstaje dzięki grubości oświetlonej atmosfery zawartej pomiędzy Ziemią a znajdującą się nad nią ciemnością. Powietrze jako takie jest bezbarwne; ma ono tym piękniejszy błękit, im głębsza jest ciemność poza nim. Z tej samej przyczyny widzi się odległe ciemne góry jako niebieskawe, bliższe zaś i jaśniejsze – w ich naturalnych barwach”.

Opinia Leonarda da Vinci nie rozwiązała jednak zagadnienia barwy nieba, gdyż nie wyjaśniła, dlaczego atmosfera ziemską świeci błękitnym światłem, skoro sama jest, według jego słów, bezbarwna i dlaczego nie świeci np. światłem żółtym. Aby uporać się z tym problemem, L. Euler założył, że powietrze składa się z cząsteczek. Uważał, że cząsteczki te mają własną barwę. Był on autorem książki „Listy do pewnej księżniczki niemieckiej dotyczące różnych zagadnień fizyki i filozofii” (tytuł dość ceremonialny!). List XXXII tomu pierwszego z datą 27 lipca 1760 roku ma tytuł: „O błękitcie nieba”.

„Udowodnię Waszej Wysokości – pisał Euler – że przyczyny błękitu nieba należy szukać w naszej atmosferze, przyjmując że nie jest ona bynajmniej przezroczysta. . . Powietrze składa się z ogromnej ilości małych drobinek, które są niezupełnie przezroczyste; lecz gdy zostaną oświetlone promieniami światła, zaczynają wykonywać ruchy drgające, pod wpływem których powstają nowe promienie charakterystyczne dla tych drobinek. . . barwa tych drobinek jest niebieskawa”.

Powietrze składa się z cząsteczek azotu, tlenu, argonu, dwutlenku węgla i znikomych ilości innych substancji. Wszystkie one są bezbarwne. A więc azot, tlen i podobne substancje w stanie gazowym nie pochłaniają światła widzialnego i same z siebie wcale nie są niebieskawe. Wbrew słowom Eulera, ich cząsteczki są zupełnie przezroczyste dla światła widzialnego – pochłaniają one jedynie promienie ultrafioletowe.

Euler nie miał więc racji, ale dwieście lat temu o cząsteczkach wiedzano bardzo mało. Jednak główna myśl Eulera o tym, że światło pobudza cząsteczki do swobodnych drgań świetlnych, jest słuszna i dzisiaj.

Zagadnienie było trudne i w dążeniu do jego rozwiązania zakładano też, że atmosfera zawdzięcza błękit swojemu składnikowi – ozonowi, który w stanie płynnym jest niebieski. Ale koncepcja taka była błędna, gdyż mimo wszystko powietrze jest bezbarwne, jak to już przypuszczał Leonardo da Vinci. Najlepszym tego dowodem jest to, że gwiazdy w nocy widzimy jako białe, niektóre nawet jako żółte. Gdyby powietrze lub znajdujący się w nim ozon były niebieskie, to gwiazdy przeświecając przez atmosferę ziemską miałyby kolor błękitny, a Betelgeuse, Antares oraz Mars świeciłyby nie żółto, lecz zielono, czego się jednak nie obserwuje.

Stopniowo zaczęła się szerzyć opinia, że atmosfera jest pewnego rodzaju ośrodkiem mętnym, a będąc nim rozprasza promienie niebieskie. Dowodzą tego doświadczenia. Weźmy pod uwagę dym z papierosa: dym ten wygląda, jak gdyby był błękitny, chociaż nie składa się z niebieskich cząsteczek. Podobnie kropla mleka, wpuszczona do szklanki czystej wody, daje zawiesinę opalizującą kolorem błękitnawym.

M. Faraday (1856) zauważył, że wąska wiązka promieni słonecznych przechodzących przez naczynie zawierające roztwór złota jest dobrze widoczna na ciemnym tle, chociaż roztwór wydawał się zupełnie przezroczysty pod mikroskopem. Przypuszczał, że światło rozprasza się na bardzo małych ziarenkach złota. J. Tyndall badał to zjawisko dokładniej i w 1869 roku dokonał systematycznych obserwacji światła rozpraszanego przez cząsteczki różnej wielkości. Przekonał się, że gdy cząsteczki zawiesiny w gazie są bardzo małe, w świetle rozproszonym przeważają fale krótkie, a światło rozproszone jest prawie całkowicie spolaryzowane (rys. 1). Najczęściej stosuje się stożek promieni zbieżnych. Mówimy wówczas o „stożku Tyndalla”; samo zjawisko rozpraszania nazwano zjawiskiem Tyndalla.

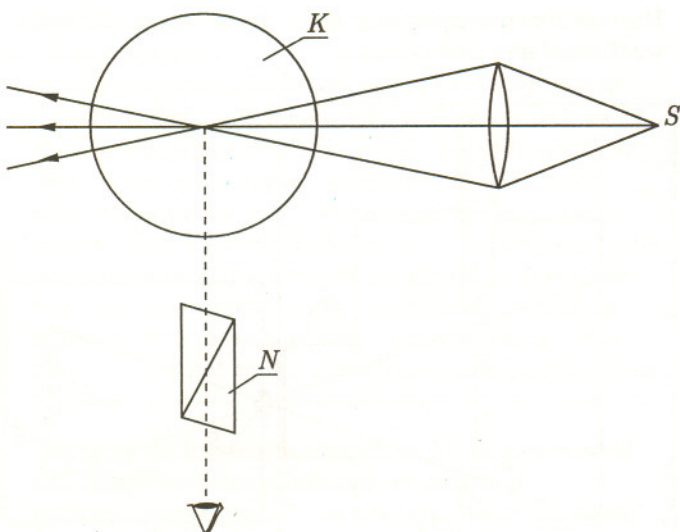
Światło spolaryzowane – światło, w którym drgania odbywają się tylko w jednej płaszczyźnie w przeciwieństwie do światła naturalnego, w którym zachodzą drgania we wszystkich kierunkach.

Michael Faraday (1791–1867) – fizyk i chemik angielski, jeden z najwybitniejszych fizyków XIX wieku. Skroplił szereg gazów, jak chlor, dwutlenek węgla, amoniak. Odkrył prawa elektrolizy oraz zjawisko indukcji elektromagnetycznej i ustalił jej ogólne prawa. Wprowadził pojęcie pola i linii pola elektrycznego i magnetycznego.

John Tyndall (1820–1893) – fizyk angielski. Był następcą Faradaya na uniwersytecie londyńskim. Znany eksperymentator z dziedziny optyki i nauki o cieple.

Zjawisko Tyndalla – rozproszenie światła w mętnych ośrodkach o niejednorodnościach nie większych od $(0,1 \div 0,2)\lambda$.

William Nicol (1768–1851) – fizyk szkocki, skonstruował przyrząd do polaryzacji światła, zwany nikolem.



Rys. 1. Zjawisko Tyndalla w cieczach. S oznacza źródło światła, N – nikol, K – kolbę z badaną cieczą.

Tyndall sądził, że rozpraszanie światła jest spowodowane przez drobne pyłki znajdujące się w gazach i cieczach. Aby się o tym przekonać, wykonał piękne doświadczenie. Przez szklaną rurę metrowej długości, zamkniętą na obu końcach płytkami szklanymi (rys. 2) przepuszczał wiązkę światła. Po opróżnieniu rury z powietrza napełnił ją mieszaniną powietrza, chlorowodoru i parą azotynu butylowego; wskutek zachodzących reakcji chemicznych po paru minutach tworzyła się w gazie zawiesina złożona z bardzo subtelnych cząsteczek. Cząsteczki te miały prawie jednakowe rozmiary. Rozpraszały one światło niebieskie; w miarę ich tworzenia się i stopniowego wzrostu obserwator, spoglądający na rurę z boku, dostrzegał początkowo słabe zabarwienie ciemnoniebieskie, którego natężenie zwiększało się stopniowo, przy czym barwa rozjaśniała się wraz ze wzrostem rozmiarów cząsteczek. Zgodnie z opisem Tyndalla „wytwarzamy w ten sposób błękit, który może współzawodniczyć z najczystszyim niebem włoskim, jeśli go nie przewyższa”.



Rys. 2. Rura, której używał Tyndall w swoich doświadczeniach nad rozpraszaniem światła przez zawiesiny w powietrzu.

Doświadczenie Tyndalla było bodźcem dla J.W. Strutt, znanego później pod imieniem lorda J. Rayleigha (n.b. tytuł lorda otrzymał on za osiągnięcia naukowe). On pierwszy opracował teorię błękitu nieba. Praca jego, ogłoszona w czasopiśmie

Philosophical Magazine w 1871 roku pod tytułem „O świetle z nieba, jego polaryzacji i barwie” była epokowa w tej dziedzinie, gdyż Rayleigh po raz pierwszy wyjaśnił, dlaczego światło rozpraszane przez ośrodek mętny w ogóle, a przez atmosferę ziemską w szczególności – jest błękitne.

John Rayleigh (1842–1919) – fizyk angielski. W 1904 roku otrzymał Nagrodę Nobla z fizyki za wyznaczenie gęstości kilku najważniejszych gazów i odkrycie argonu. Zajmował się badaniami nad promieniowaniem cieplnym, akustyką i optyką.

Rayleigh opisał rozpraszanie światła w przypadku, gdy pada ono na ośrodek składający się z niewielkich cząsteczek kulistych. Cząsteczki te powinny mieć rozmiary drobin dwuatomowych i znajdować się tak daleko jedna od drugiej, by można było przyjąć, że nie oddziałują wzajemnie. Z założeń takich wynika, że natężenie I promieniowania rozproszonego jest proporcjonalne do natężenia I_0 światła padającego, do kwadratu objętości V cząsteczek, z którymi światło oddziałuje, i do stężenia tych cząsteczek (przez co rozumiemy liczbę cząsteczek rozpraszających, przypadających na jednostkę objętości).

Natężenie promieniowania rozproszonego jest jednocześnie, według teorii Rayleigha, odwrotnie proporcjonalne – co tu jest nadzwyczaj charakterystyczne (!) – do czwartej potęgi długości λ fali padającej.

Prawo Rayleigha – odnoszące się do cząsteczek mniejszych niż 0,1 długości fali światła – można zatem zapisać w postaci

$$I \sim I_0 \cdot \frac{d \cdot V^2}{\lambda^4}.$$

Przebieg zjawiska rozproszenia zależy więc od długości fali promieniowania, które pada na ośrodek rozpraszający. Jeśli zatem promieniowanie padające jest złożone, tzn. gdy składa się ono z fal o różnych długościach, możemy oczekiwać, że pewna część tego promieniowania ulegnie rozproszeniu w większym stopniu, inna natomiast straci w wyniku rozproszenia mniejszą część niesionej energii. A więc: jeżeli na cząsteczki ośrodka mętnego pada światło białe, którego promienie poszczególnych długości fal mają jednakowe natężenie, to najsilniej będą rozproszone promienie o najkrótszej fali, w tym więc przypadku niebieskie. Długość fali światła niebieskiego jest dwa razy mniejsza niż światła czerwonego. W części niebieskiej widma natężenie światła rozproszonego będzie $2^4 = 16$ razy większe niż w części czerwonej. Barwa błękitna musi więc dominować w świetle rozproszonym przez atmosferę ziemską.

Naturalnie zachodziło pytanie, co za cząsteczki stanowią ośrodek mętny. Początkowo przypuszczano, że cząsteczkami tymi są zanieczyszczenia powietrza w postaci drobnego pyłu. Ale tam, gdzie powietrze jest najczystsze i zawiera najmniej pary wodnej, a więc nad pustyniami, błękit nieba jest najpiękniejszy!

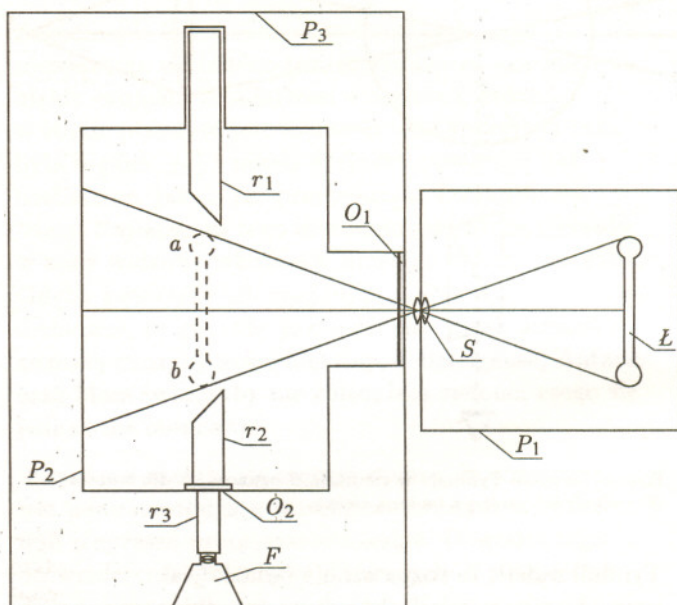
Niebo jest błękitne i w górach, na najwyższych szczytach, zimą, gdy wszystko naokoło jest pokryte śniegiem i atmosfera nie zawiera ani śladu pyłów, w które tak obfituje powietrze wielkowiejskie.

Jeszcze w XX wieku tak wybitny eksperymentator, jak R. Wood, bronił tezy, iż gazy czyste nie rozpraszają światła. Sprawa pozornie wydawała się łatwa do rozstrzygnięcia, w istocie jednak należała do najsubtelniejszych w fizyce doświadczalnej. Z jednej bowiem strony było niezmiernie trudno tak zbudować aparaturę, aby móc ręczyć, że badana substancja nigdzie nie mogła się zanieczyścić najdrobniejszym nawet pyłkiem; z drugiej strony niedostrzeżenie światła rozproszonego (rys. 1) niekoniecznie świadczyło o jego nieistnieniu. Ciało badane zawsze musi się znajdować w jakimś zbiorniku. Światło ulega odbiciu od ścianek naczyń. Jeżeli stożek światła rozpraszane jest bardzo słaby, zginie on w blasku rzuconym przez ścianki naczyń tak, jak na ulicach wielkiego miasta w świetle latarni i reklam ginie dla obserwatora większa część gwiazd naszego nieba.

Trudność realizacji doświadczeń polegała zatem na wyeliminowaniu światła rozpraszane przez ścianki naczyń. W 1915 roku fizyk francuski J. Cabannes wykazał rozpraszanie światła przez gazy czyste. Umieścił on badany gaz w jedenastolitrowym zbiorniku żelaznym, zaopatrzonym w jedno okienko do wpuszczania światła i w drugie okienko do obserwacji rozpraszania. Ścianki naczyń zostały pokryte czarnym aksamitem, który znacznie skuteczniej pochłania światło niż sadza. A jednak doświadczenia wykazały, że nawet najczarniejszy aksamit, naświetlony potężnym snopem promieni, ma blask 1000 razy silniejszy od przewidywanego świecenia gazu; trzeba było więc światło rozpraszane przez ścianki zupełnie wyeliminować, by móc obserwować zjawisko zasadnicze. Cały wysiłek fizyka był w tę właśnie stronę skierowany.

Na rysunku 3 przedstawiony jest schemat przekroju przyrządu Cabannesa. W pudełku metalowym P_1 , zaopatrzonym w soczewki S , znajdowała się lampa łukowa L . Badany gaz zawarty był w zbiorniku P_2 mającym okienka O_1 i O_2 . Pudełko metalowe P_3 ochraniało zbiornik od światła zewnętrznego. Soczewka S wytwarzała obraz ab lampy łukowej wewnątrz zbiornika; od tego miejsca (najsilniejszego skupienia światła pierwotnego) najintensywniej wybiegały promienie wtórne, rozproszone. Cabannes obserwował światło fotograficznie, za pomocą aparatu F , lub też okularowo, zastępując aparat fotograficzny okiem. Rury r_1 , r_2 i r_3 miały najważniejsze znaczenie dla wyniku doświadczeń. Rura r_1 , otwarta od strony a (skośnie ścięta) służyła do wytworzenia czarnego tła, na którym ukazywało się światło rozpraszane. Była ona pokryta wewnątrz (jak i wszystkie inne części) czarnym aksamitem. W głębi tej rury dzięki wielokrotnym odbiciom, ginęło zupełnie światło odrzucane przez ścianki zbiornika P_2 .

Rury r_2 i r_3 przepuszczały tylko promienie biegnące wzdłuż osi ab .



Rys. 3. Schemat przyrządu Cabannesa.

Po zastosowaniu tych środków ostrożności Cabannes rzeczywiście zaobserwował światło rozpraszane przez różne ośrodki gazowe. Rozpraszanie rosło wraz z gęstością gazu, w powietrzu było 5 razy, a w butanie 110 razy silniejsze niż w wodrze.

Gazy były wyjątkowo starannie filtrowane przez warstwy waty grubości kilkudziesięciu centymetrów. Jednak fizycy sceptycznie usposobieni sądzili, że istnieją pyłki ultramikroskopowe, których wata nie zatrzymała i to właśnie owe ziarenka zawiesiny rozpraszają światło, a nie cząsteczki gazu. Przeciwno takiemu pogładowi przemówiła następująca obserwacja Cabannesa. 28 lutego 1915 roku nappełnił przyrząd świeżym gazem i dokonał pomiaru natężenia światła rozproszonego. Z racji wypadków wojennych został jednak zmuszony do zaniechania swoich eksperymentów. Po wojnie, 19 marca 1919 roku, powtórzył pomiar. Przyrząd przez okres czterech lat nie był poruszany! Pomiar rozpraszania dał w obydwu przypadkach identyczne liczby. Gdyby gaz zawierał pyłki, przynajmniej część z nich musiałaby osiąść w ciągu tak długiego czasu i wielkość rozpraszania uległaby zmianie. Cabannes obserwował po raz pierwszy w dziejach nauki błękit powietrza wytworzony w pudełku metalowym, a jego badania potwierdziły teorię Rayleigha. Hipoteza pyłu, jako czynnika wytwarzającego błękit, wydała się zupełnie zbędna. Wystarczy założyć, że to cząsteczki powietrza rozpraszają światło słoneczne, aby zrozumieć barwy nieba. Każda cząsteczka oddzielnie rozprasza niewielką ilość światła, ale warstwa grubości kilku kilometrów uzyskuje stosunkowo dużą jasność z wyraźną nadwyżką fioletu i błękitu (zgodnie z prawem

Rayleigha jest $I \sim \lambda^{-4}$). Rozpraszają też światło i cząsteczki pyłów, sadze, kropelki wody. W tym jednak przypadku zachodzi już zwykłe rozproszenie światła białego, gdyż rozmiary tych cząsteczek są większe od długości fali świetlnej. Tym tłumaczy się fakt, że zanieczyszczone powietrze wielkich miast silnie rozprasza światło, wskutek czego przyjmuje ono w mieście odcień białawy. To samo dotyczy nieba nad oceanem, gdzie obfitość pary wodnej powoduje rozpraszanie światła białego nadając niebu odcień białawy. W wysokich górach i na pustyniach, gdzie pary wodnej jest mało, niebo przyjmuje głęboki kolor błękitny.

Teorię lorda Rayleigha uzupełnili M. Smoluchowski i A. Einstein. Udowodnili oni, że centrami rozpraszającymi światło są nie tylko same cząsteczki ośrodka, którym może być powietrze, ale również przypadkowe „nagromadzenia” cząsteczek, zdarzające się ustawicznie w małych objętościach powietrza (rzędu λ^3), na skutek ich bezładnego ruchu cieplnego. Owe fluktuacje gęstości wytwarzają dodatkową i grubszą „ziarnistość” ośrodka, silniej rozpraszającą światło aniżeli poszczególne cząsteczki. W gazach fluktuacje przejawiają się jako lokalne rozrzedzenia i zagęszczenia zachodzące w czasie. W cieczech występuje podobne zjawisko, z tą tylko różnicą, że fluktuacje w dwu sąsiednich częściach objętości cieczy nie są niezależne, ponieważ cząsteczki w cieczy są związane siłami spójności i jedna cząsteczka pociąga za sobą drugą. Smoluchowski obliczył natężenie światła rozproszonego przez gaz, a Einstein – przez ciecz. Jak wykazały ich obliczenia, rozmiary tych części ośrodka, które mają mniejsze lub większe fluktuacje w normalnych warunkach, są znacznie mniejsze niż długość fali światła widzialnego. Dlatego teoria Smoluchowskiego i Einsteina prowadzi

do tych samych wniosków w stosunku do zależności natężenia światła rozproszonego od λ , jak również do charakteru polaryzacji światła rozproszonego, co teoria Rayleigha.

Fluktuacje – przypadkowe odchylenia wartości wielkości fizycznych od ich wartości średnich.

Marian Smoluchowski (1872–1917) – fizyk polski, jeden z największych fizyków początku XX wieku. Stworzył teorię opalescencji, ruchów Browna, roztworów i koagulacji zawiesin. Przyczynił się do powiązania teorii kinetycznej z termodynamiką. Badał granice stosowalności II zasady termodynamiki, pogłębiając przy tym zrozumienie istoty zjawiska fluktuacji.

Prace Smoluchowskiego i Einsteina pozwoliły więc na wyjaśnienie błękitnej barwy nieba jako następstwa rozpraszania światła przez lokalne zaburzenia gęstości (fluktuacje) powietrza.

Fluktuacje powietrza rozpraszają dużo światła fioletowego (na które oko jest mało czułe), dużo światła niebieskiego i błękitnego (na które oko jest bardziej czułe) oraz nieco zielonego i żółtego. Złożenie tych barw daje barwę niebiesko-błękitną.

Na zakończenie warto przypomnieć, że w rozprawie z 1911 roku pt. „Ewolucja teorii atomistycznej” Smoluchowski pisał, że błękit nieba stanowi dowód istnienia atomów dla każdego, kto umie wyciągnąć wnioski z tego pięknego i codziennego zjawiska.

Literatura

M. Minnaert, „Światło i barwa w przyrodzie”, PWN, Warszawa 1961.

M. Smoluchowski, „Wybór pism filozoficznych”, PWN, Warszawa 1956.

J. Cabannes, „La diffusion moléculaire de la lumière”, Paris 1929.

V.F. Weisskopf, „Jak światło oddziałuje na materię”, w „Światło”, PWN, Warszawa 1973.



Rozwiązanie zadania M 773. Niech p_n oznacza to samo, co w rozwiązaniu zadania 772; oznaczmy przez A zdarzenie, że gracz I wygrał pierwszą grę, a przez B – że wygrał całą rozgrywkę. Zgodnie ze wzorem Bayesa

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} = \frac{(1 - p_{11}) \cdot \frac{1}{2}}{\frac{1}{3}} = \frac{11}{30} \cdot \frac{3}{2} = \frac{11}{20}$$

Na marginesie artykułu „Dlaczego niebo jest błękitne?” warto przytoczyć notatkę lorda Rayleigha „Harmonic echoes” zamieszczoną w *Nature* w 1873 roku. Lord Rayleigh omawia w niej przypadek opisany w książce Brewera „On Sound and its Phenomena”. Autor książki opisuje miejsca, w których echo powtarza czysty ton w innej tonacji niż ta, w jakiej został nadany. Słynne miejsce o tej właściwości miało się znajdować nad jeziorem Killarney w Irlandii. Rayleigh delikatnie zakwestionował opis Brewera („trudno uwierzyć, że ten opis jest ścisły”), jednak nie odrzucił go jako czystego wymysłu. Sam zaobserwował echo, które odbite od plantacji jodeł, znajdującej się po przeciwnej stronie doliny, podnosiło kobiecy głos o oktawę, nie wpływając na głos męski. Jak pisał Rayleigh „nie miałem pojęcia, że takie zjawisko było kiedykolwiek obserwowane, ani że jest możliwe, ale wkrótce uświadomiłem sobie, że wyjaśnienie jest podobne do wyjaśnienia błękitnego koloru nieba, jakie zaproponowałem rok czy dwa lata wcześniej. W chwili obserwacji miałem w teczce pracę poświęconą zaburzeniom fal dźwiękowych przez obiekty małe w porównaniu z długością fali. W takim przypadku siła odbicia czy też raczej zmiany kierunku fali, charakteryzujące przeszkodę, silnie zależą od czwartej potęgi długości fali. W przypadku dźwięku złożonego, jakim jest ludzki głos, jego składowe w różnym stopniu zostają zaburzone przez przeszkodę. Grupa małych przeszkód może odbić dźwięk wyższy o oktawę od podstawowego tonu relatywnie szesnaście razy silniej niż ton podstawowy.”

Tak więc rajlejowskie rozpraszanie odpowiedzialne za błękitny kolor nieba nie jest zjawiskiem wyłącznie optycznym, ale także akustycznym.

K.R.