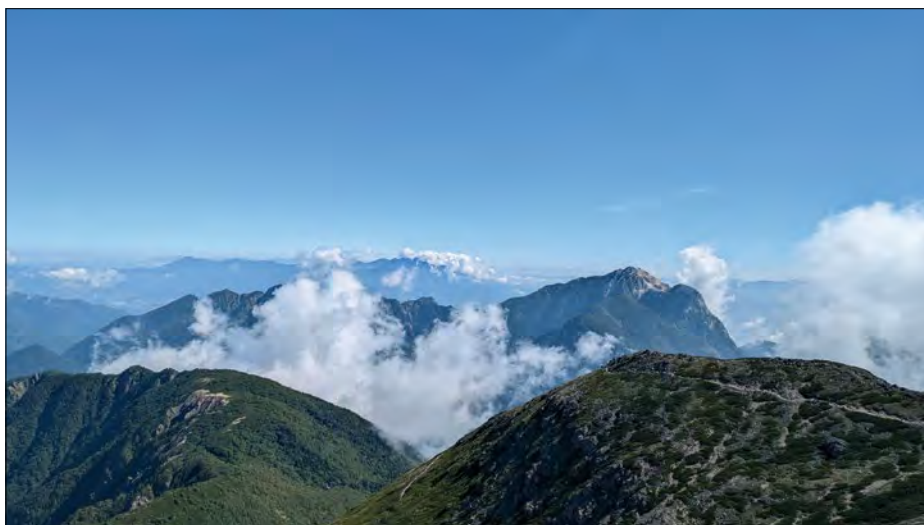


## **Dlaczego niebo jest niebieskie, a zachodzące słońce czerwone?**

Kiedy wyruszamy na wędrowkę poza miasto, możemy wreszcie dostrzec piękno nieba w pełnej okazałości – od jego czystego błękitu (il. 1) po spektakularne kolory zachodów słońca (il. 2). Ale czy zastanawialiście się kiedyś, dlaczego niebo jest niebieskie, a zachodzące słońce czerwone? Okazuje się, że w obu przypadkach przyczyna jest ta sama – rozpraszanie światła słonecznego w atmosferze ziemskiej.

To nie zostało zrozumiane od razu. Aby wyjaśnić błękit nieba, w przeszłości wysuwano różne hipotezy. Próbowano przedstawiać jego kolor jako rezultat mieszanina się w określonych proporcjach „światła i ciemności”. Zakładano, że cząsteczki powietrza są zabarwione na niebiesko. Sugerowano, że błękitny kolor nieba to luminescencja cząsteczek powietrza, wywołana promieniowaniem słonecznym. Obecnie wszystkie te wyjaśnienia uznawane są za niewłaściwe.

Pierwszy istotny krok ku wyjaśnieniu błękitu nieba poczynił John Tyndall, który w 1869 roku zaobserwował i opisał tzw. zjawisko opalescencji, nazywane często po prostu zjawiskiem Tyndalla. Jeżeli na zawieszinę niewielkich cząstek w płynie pada wiązka światła białego (np. światła słonecznego), to obserwując tę zawieszinę z boku, zauważamy, że ona opaluje, czyli wydaje się, jakby była niebieskawa. W warunkach

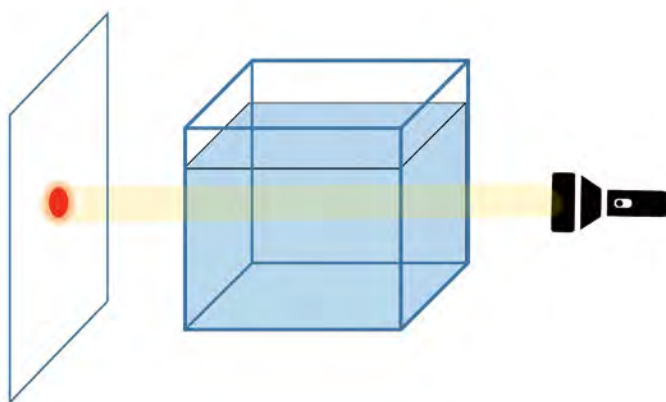


Il. 1. Błękit nieba (fot. Piotr Szymczak)



Il. 2. Zachodzące słońce (fot. Piotr Szymczak)

domowych eksperyment Tyndalla możemy odtworzyć, stawiając prostokątne akwarium w ciemnym pomieszczeniu, napełniając je wodą z odrobiną mleka (lub proszku do prania) i kierując na jego ścianę wiązkę światła z latarki. Mleko jest zawiesiną – zawarte w nim cząsteczki tłuszczu, które nie rozpuszczają się w wodzie, będą sprzyjać rozpraszaniu światła. Jeśli spojrzymy na wiązkę światła w akwarium z boku, wyda się nam ona niebieskawa, a patrząc na nią od strony wylotu, zauważymy odcień czerwony (il. 3). Jest to możliwe do wyjaśnienia, jeśli założymy, że światło niebieskie



Il. 3. Doświadczenie Tyndalla. Promienie światła rozpraszają się na zawieszynie. Z boku wiązka wygląda na niebieską, ponieważ krótkie fale są silniej rozpraszane. Patrząc wzdłuż osi, wiązka wydaje się czerwona

rozprasza się silniej niż czerwone. Przechodząc przez rozpraszającą substancję, biały strumień światła traci głównie składową niebieską, a w pozostałym strumieniu zaczyna dominować składowa czerwona. Skojarzenie z błękitem nieba i czerwienią słońca jest tu silne, nic więc dziwnego, że Tyndall wysunął przypuszczenie, że niebieski kolor nieba jest związany z rozpraszaniem światła słonecznego na ciałach obcych, takich jak kurz, kropelki mgły itp., znajdujących się w atmosferze. W rezultacie, patrząc na niebo w dzień, widzimy światło rozproszone w atmosferze, którego widmo jest przesunięte ku wyższym częstotliwościom – stąd błękitny kolor. Z kolei patrząc na słońce, widzimy światło, które przeszło przez atmosferę bez rozproszenia, a jego widmo przesunęło się w stronę niższych częstotliwości. Im bliżej słońce jest horyzontu, tym dłuższą drogę musi pokonać światło w atmosferze, a jego widmo przesuwa się coraz bardziej ku czerwieni. Dlatego zachodzące lub wschodzące słońce widzimy w odcieniach czerwieni. Wyjaśnienie Tyndalla, łączące rozpraszanie światła z obecnością ciał obcych w atmosferze, nie mogło się jednak obronić ze względu na prostą obserwację – w wysokich górach powietrze jest bardzo czyste, a niebo – wciąż błękitne. Mimo to w literaturze w dalszym ciągu spotyka się twierdzenie, że Tyndall rozwikłał zagadkę błękitu nieba.

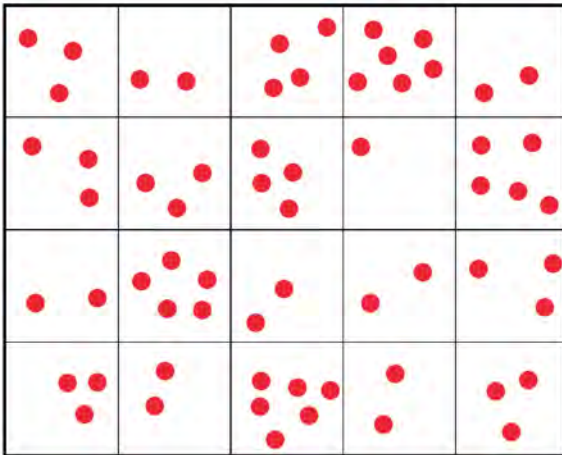
Następny krok uczynił w 1871 roku lord Rayleigh. Wyjaśnił on istotę zjawiska Tyndalla na podstawie praw fizyki, a dokładniej praw elektrodynamiki. Światło jest falą elektromagnetyczną. Kiedy taka fala napotyka obiekt o rozmiarach dużo mniejszych od jej długości  $\lambda$ , ulega na nim rozpraszaniu. Intensywność rozpraszania silnie zależy od długości fali – jest proporcjonalna do odwrotności czwartej potęgi  $\lambda$ , tzn. do  $1/\lambda^4$ . Białe światło słoneczne jest mieszaniną fal o różnych długościach, a różnym długościom odpowiadają różne kolory. I tak fale o długości rzędu 400 nanometrów to światło niebieskie, zaś fale o długości rzędu 700 nanometrów to światło czerwone. Zatem światło niebieskie rozprasza się około 10 razy silniej niż światło czerwone. To tłumaczy zjawisko Tyndalla, a także tłumaczyłoby błękit nieba, gdybyśmy wiedzieli, na czym rozprasza się światło w atmosferze ziemskiej.

Aby rozwiązać ten problem, Rayleigh sięgnął do teorii atomistycznej. Warto podkreślić, że pod koniec XIX wieku istnienie atomów wciąż budziło wiele wątpliwości i nie było powszechnie akceptowane. Brak bezpośrednich dowodów sprawiał, że fizycy niechętnie wyjaśniali zjawiska w oparciu o tę teorię. Dobitym przykładem jest tu słynna praca z 1900 roku, w której Max Planck wprowadził kwanty energii. Aby dokończyć wyprowadzenie wzoru na widmo promieniowania ciała doskonale czarnego, Planck musiał posłużyć się prawami fizyki statystycznej, które odnosiły się do materii traktowanej jako zbiór atomów. Sam określił to jako „akt desperacji”. Do ostatecznej akceptacji teorii atomistycznej przyczyniły się dopiero prace Mariana Smoluchowskiego i Alberta Einsteina, którzy w latach 1905–1906 wyjaśnili istotę ruchów Browna – chaotycznych ruchów drobnych cząstek zawieszonych w cieczy, wywołanych przez uderzenia molekuł.

Na razie jednak cofnijmy się do końca XIX wieku. W 1899 roku Rayleigh wysunął hipotezę, że światło słoneczne rozprasza się na molekułach powietrza i na tej podstawie wyprowadził wzór na intensywność światła rozproszonego, sumując

intensywności rozpraszania przez poszczególne molekuly. Wydawało się zatem, że sprawa błękitu nieba została ostatecznie wyjaśniona. Tak też jest to przedstawiane w wielu współczesnych podręcznikach i tekstach naukowych. A jednak rozumowanie Rayleigha kryje w sobie lukę, na co m.in. zwrócił uwagę Albert Einstein. Zauważył on, że przy równomiernym rozmieszczeniu cząsteczek w przestrzeni średni efekt rozpraszania znika z powodu interferencji fal rozproszonych przez różne cząsteczki.

Na czym zatem ostatecznie rozprasza się światło w atmosferze? W rozwikłaniu tej zagadki kluczową rolę odegrały prace naszego rodaka Mariana Smoluchowskiego, poświęcone zjawisku opalescencji krytycznej. Jednorodna substancja przy dochodzeniu do stanu krytycznego, kiedy fazy ciekła i gazowa stają się identyczne, zachowuje się jak zawiesina w zjawisku Tyndalla, silnie rozpraszając światło niebieskie. Analizując ten problem, Smoluchowski pokazał, że rozpraszanie zachodzi na fluktuacjach gęstości, czyli na przypadkowo pojawiających się mikroskopijnych zagęszczeniach i rozrzedzeniach ośrodka. Ten sam mechanizm powinien działać w przypadku rozpraszania światła w atmosferze. Przyjrzyjmy się temu bliżej. Wyobraźmy sobie, że dzielimy przestrzeń powietrzną na jednakowe komórki (il. 4). Komórki te muszą być na tyle małe, by ich wymiary były znacznie mniejsze od długości fali światła, ale większe od średnicy molekuly. Wyobraźmy sobie, że wybieramy dowolny moment i „fotografujemy” rozmieszczenie cząsteczek powietrza. Widzimy, że niektóre komórki są niemal puste, podczas gdy inne okazują się dość gęsto wypełnione molekułami. To efekt chaotycznego ruchu cząsteczek powietrza, w wyniku którego gęstość powietrza zmienia się losowo między komórkami. W innych chwilach czasu rozmieszczenie cząsteczek może się różnić, gdyż będą one się przemieszczały między komórkami; zawsze jednak gęstość powietrza będzie przypadkowo zmieniała się od jednego punktu przestrzeni do drugiego. Te lokalne zgęstki powietrza stanowią centra rozpraszania, które powodują niebieski kolor nieba i czerwony kolor zachodzącego słońca. Na to nakładają się czynniki zależne od stanu atmosfery: temperatura różnych warstw powietrza oraz charakter i siła wiatru. Dlatego w pogodę bezwietrzną zachód słońca jest złocisty, a w wietrzną – krwistoczerwony.



Il. 4. Schemat fluktuacji gęstości: przestrzeń podzielona na drobne komórki, w których w danej chwili obserwuje się przypadkowe lokalne zagęszczenia i rozrzedzenia ośrodka

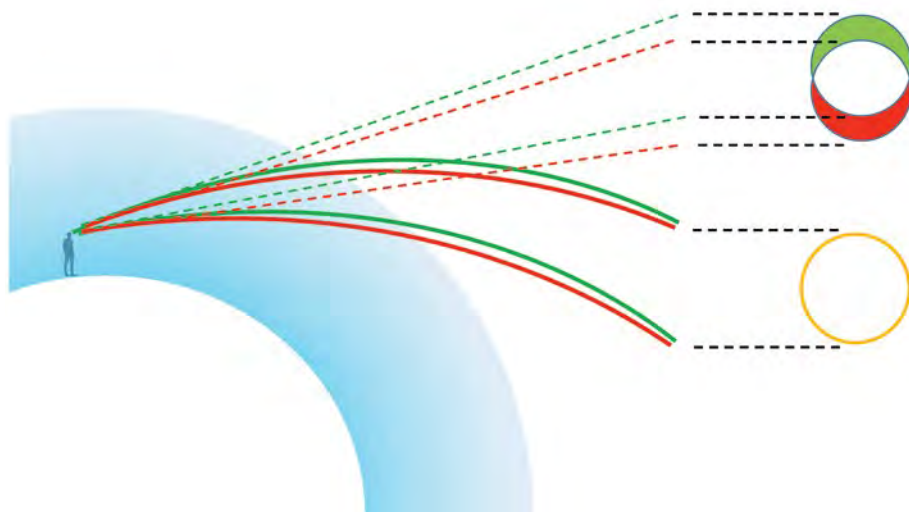
W swojej pracy Smoluchowski zamieszcza przypis, nawiązujący do wyniku Rayleigha, wskazując, że Rayleigh całkowicie pomija omawiany powyżej mechanizm, który dla koloru nieba jest kluczowy. Dopiero fluktuacje gęstości powietrza sprawiają, że niebo jest niebieskie. W wysiłek prawidłowego uwzględnienia tych fluktuacji w opisie rozpraszania światła angażuje się obok Smoluchowskiego także Albert Einstein, a obaj publikują na ten temat kilka prac. Ostatecznym wynikiem tych rozważań było wyprowadzenie w 1911 roku wzoru na intensywność rozpraszania światła, który uwzględniał fluktuacje gęstości powietrza. Formuła ta, znana jako wzór Einsteina-Smoluchowskiego, została później potwierdzona eksperymentalnie.

Jak już wspomnieliśmy, zaakceptowanie hipotezy o istnieniu atomów odbyło się nie bez trudności. Można więc zapytać, czy istnieje jakieś zjawisko wokół nas, które potwierdza tę hipotezę? „Każdy z nas obserwował je niezliczoną ilość razy, gdy podziwiał błękit nieba lub żar wschodzącego słońca” – pisał nasz genialny rodak Marian Smoluchowski. Nie da się wytłumaczyć błękitu nieba bez uwzględnienia fluktuacji gęstości powietrza, ani samych fluktuacji - bez założenia istnienia atomów.

Na koniec chcielibyśmy wspomnieć jeszcze o jednym, zaskakującym zjawisku, które można dostrzec o zachodzie słońca. Jest to słynny zielony promień – krótki błysk jasnego, zielonego światła, który pojawia się na kilka sekund, gdy niemal cała tarcza słoneczna skryje się za horyzontem. Wygląda niesamowicie, ale żeby go zobaczyć, trzeba mieć trochę szczęścia i idealne warunki pogodowe – można go zaobserwować w wieczory, gdy słońce aż do samego zachodu świeci jasno i prawie nie zmienia swojego koloru, pozostając żółte lub ewentualnie żółtopomarańczowe. Próbować warto, bo – jak pisze Juliusz Verne w książce *Zielony promień* – jest to „światło tak cudownego odcienia, takiej zieloności, jakiej nigdy jeszcze nie wytworzyła paleta malarza, na jaką nie zdobyła się natura, malując tyle miriad roślin, ani powierzchnia wód oceanu”.

Aby zrozumieć to rzadkie zjawisko optyczne, należy uwzględnić, że oprócz rozpraszania światło ulega również załamaniu (refrakcji) w atmosferze i – podobnie jak w pryzmacie – białe światło słoneczne, składające się z różnych długości fal, rozszczepia się. Zazwyczaj współczynnik załamania rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości. Oznacza to, że promienie niebieskie czy zielone doświadczają w swojej drodze przez atmosferę silniejszego ugięcia w porównaniu z promieniami czerwonymi (il. 5).

Gdybyśmy przez chwilę założyli, że refrakcja jest jedynym zjawiskiem, które zachodzi w atmosferze, zapominając o rozpraszaniu, powinniśmy się spodziewać, że górna i dolna krawędź tarczy słonecznej w pobliżu linii horyzontu będą zabarwione kolorami tęczy – dolna bardziej czerwona, a górna – niebieskozielona. Tłumaczy to ilustracja nr 5 – ciągłe linie na tym rysunku pokazują trajektorie promieni słonecznych w atmosferze, biegnących od krawędzi tarczy słonecznej do obserwatora. Z uwagi na refrakcję promienie słoneczne w atmosferze uginają się, co sprawia, że obserwator widzi tarczę słoneczną w obrębie kąta wyznaczonego na rysunku przez linie. Co ciekawe, sprawia to, że widzimy słońce sporo uniesione nad horyzontem w stosunku do jego rzeczywistego położenia. Kiedy na nadmorskim brzegu podziwiamy zachód słońca i widzimy, jak dolna krawędź tarczy słonecznej dotyka linii horyzontu, w rzeczywistości cała tarcza słoneczna jest już za horyzontem. Refrakcja światła w atmosferze



Il. 5. Refrakcja w atmosferze powoduje różne ugięcia promieni: czerwone załamują się słabiej, a zielone i niebieskie – silniej. Rozpraszanie usuwa jednak niebieskie składowe, dzięki czemu tuż przed zachodem, gdy widoczna jest jedynie górna krawędź słońca, może pojawić się jaskrawozielona obwódka zwana zielonym promieniem

sprawia, że promienie o krótszych długościach fali – zielone i niebieskie – uginają się silniej niż czerwone, więc odpowiadająca im część tarczy sięga nieco wyżej nad horyzont niż część czerwona. Dlatego obserwator powinien widzieć zachodzące słońce tak, jak pokazano w prawym górnym rogu rysunku. Górna krawędź tarczy słonecznej byłaby niebieskozielona, dolna – czerwona, a w centralnej części dysku obserwowane byłoby mieszanie się wszystkich kolorów, co dawałoby kolor biały.

W rzeczywistości jednak nie można pominąć rozpraszania światła w atmosferze. Jak już wiemy, rozpraszanie powoduje, że promienie o wyższej częstotliwości są bardziej efektywnie usuwane z wiązki światła, pochodzącego od słońca. Najbardziej intensywnie rozpraszany jest kolor niebieski, co sprawia, że znika on z górnej obwódki słońca, ustępując miejsca zielonemu. Czerwony z kolei rozpraszany jest najslabiej, stąd dominuje na całym dysku słonecznym i sprawia, że trudno jest dostrzec zieloną obwódkę. Jeśli jednak prawie cały dysk słoneczny zajdzie za horyzont, pozostanie jedynie jego górna krawędź, a warunki będą sprzyjające – wieczór będzie bezchmurny i bezwietrzny, a powietrze czyste (co minimalizuje rozpraszanie światła) – wówczas możemy zobaczyć jaskrawozieloną krawędź słońca wraz z rozłaskami jasnych zielonych promieni.

### Bibliografia

- Greenler R., *Tęcze, glorie i halo, czyli niezwykle zjawiska optyczne w atmosferze*, Warszawa 1998.  
 Tarasow L. W., *Fizyka w przyrodzie*, Moskwa 1988.