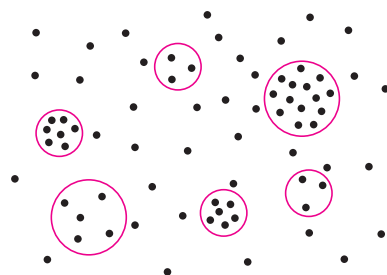


Niebieski las

Robert ŻAK

Andrzej HRYCZUK

Kiedy obserwujemy nasze otoczenie, zwykle nie zwracamy uwagi na zjawiska, do których przywykliśmy. Niebieski kolor odległych obiektów, błękitny kolor nieba czy czerwony kolor zachodzącego słońca są dla nas naturalne. Tak naturalne, że nie zastanawiamy się nawet nad ich złożonością. Fotografia na pierwszej stronie okładki przedstawia Wielki Kanion – widzimy, jak kolejne szczyty stają się coraz bardziej niebieskie. Między innymi ten właśnie efekt wykorzystujemy do oceny odległości do bardzo odległych obiektów. Na tym zdjęciu widzimy także podobieństwo między niebieskim kolorem wzgórz a niebieską barwą nieba. I to podobieństwo nie jest przypadkowe. Nie możemy mówić o niebieskiej barwie lasu, nie rozważając niebieskiego koloru nieba.



Rys. 1. Fluktuacja gęstości powietrza.

Dlaczego więc niebo wydaje się niebieskie? Jest to spowodowane rozpraszaniem światła, czyli odchyleniem biegu promieni świetlnych na wszystkie strony względem kierunku pierwotnego. Istnieje kilka powodów, dla których światło jest rozpraszane. Po pierwsze, kiedy w przezroczystym ośrodku znajdują się przezroczyste cząstki o innym współczynniku załamania światła. Po drugie, gdy w przezroczystym ośrodku znajdują się nieprzezroczyste molekuly odbijające i absorbujące światło i wreszcie, kiedy w powietrzu znajdują się kropelki wody.

W 1899 roku John Rayleigh pokazał, że natężenie rozproszonego światła jest odwrotnie proporcjonalne do czwartej potęgi długości fali. Może to posłużyć do wyjaśnienia niebieskiego koloru nieba. Łatwo obliczyć, że światło niebieskie – o długości fali około 450 nm – jest rozpraszane ponad czterokrotnie silniej niż światło czerwone (około 650 nm). Dlaczego jednak nie obserwujemy nieba fioletowego, skoro odpowiadają mu fale jeszcze krótsze? Są dwie przyczyny: natężenie światła fioletowego, docierającego do Ziemi, jest małe w porównaniu z natężeniem światła o dłuższych falach oraz nasze oko jest ponad stokrotnie mniej wrażliwe na światło fioletowe, niż na światło niebieskie.

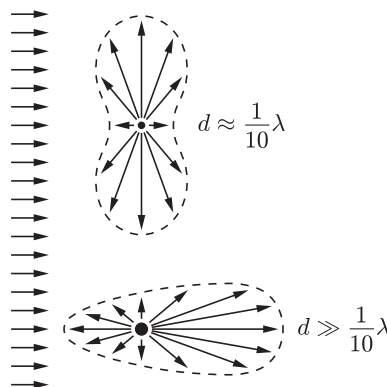
Rayleigh zaproponował także metodę obliczania natężenia rozproszonego światła. Rozważał molekuly jako dipole, które pod wpływem padającej na nie fali elektromagnetycznej są pobudzone do drgań i wypromieniowują energię we wszystkich kierunkach.

Kilka lat później Smoluchowski i niezależnie Einstein wyjaśnili niebieski kolor nieba za pomocą fluktuacji gęstości powietrza (rys. 1). Im mniejsza jest objętość fluktuacji, tym większe prawdopodobieństwo jej powstania i tym większe natężenie rozproszonego światła o długości fali odpowiadającej rozmiarom fluktuacji. Ich równania zostały później sprawdzone eksperymentalnie, posłużyły mianowicie do wyznaczenia stałej Avogadro z niezwykle dużą precyzją.

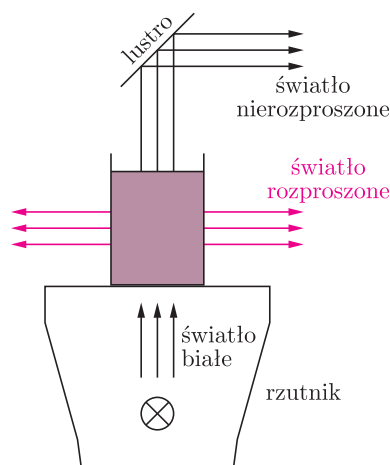
Zwróćmy jeszcze uwagę, że prawo Rayleigha jest słuszne jedynie dla obiektów mniejszych niż jedna dziesiąta długości fali światła padającego, a dla większych obiektów, jak kuliste kropelki wody, rozpraszanie opisuje teoria Mie. Natężenie rozproszonego światła według teorii Mie jest większe niż według prawa Rayleigha. Co więcej, światło jest silniej rozpraszane do przodu niż na boki. Rozkład kątowy natężenia światła od cząstek o różnych średnicach schematycznie ilustrują indykatrysy na rysunku 2.

Porównując teorię Rayleigha i teorię Mie, zauważamy, iż natężenie światła rozproszonego na kropelkach wody słabiej zależy od długości fali (jest odwrotnie proporcjonalne do długości fali). Wyjaśnia to zarówno biały kolor chmur, jak i szary kolor lasu w mglistej atmosferze.

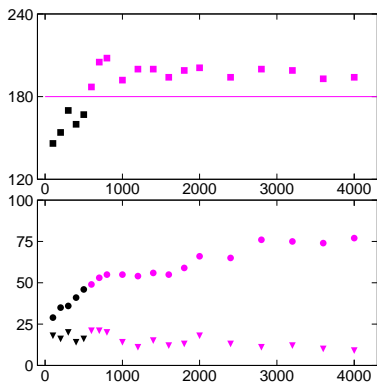
Te dwa rodzaje rozpraszania możemy zademonstrować w szklance wody. Roztwór tiosiarczanu sodu (około 1 łyżeczki) w wodzie destylowanej (500 ml) umieszczamy na projektorze (rys. 3). Kiedy dodamy nieco rozcieńczonego kwasu siarkowego, z roztworu zaczynają się wytrącać cząsteczki siarki i światło niebieskie zostaje rozproszone na boki, podczas gdy światło czerwone przechodzi przez roztwór niemal nierozproszone. Podobny proces zachodzi podczas zachodu słońca. Umieszczając filtry barwne wokół szklanki, możemy sprawdzić, że rzeczywiście rozpraszane są wszystkie długości fali, natomiast światło niebieskie najsilniej.



Rys. 2. Rozpraszanie Rayleigha (górną) i Mie (dół). Długość strzałek odpowiada natężeniu światła rozproszonego w danym kierunku.



Rys. 3. Układ doświadczalny służący do demonstracji rozpraszania światła.



Rys. 4. Wyniki analizy zdjęć z tylnej okładki, w zależności od odległości lasu w metrach. Użyto kodowania koloru HSV (*Hue* – barwa; *Saturation* – nasycenie; *Value* – jasność). W kodowaniu tym pierwsza liczba (górny wykres) zmienia się w zakresie 0–360 i odpowiada mierze w stopniach kąta określającego położenie dominującego koloru na kole barw. Poszczególnym barwom podstawowym odpowiadają zakresy: czerwonej (–60, 60), zielonej (60, 180), niebieskiej (180, 300). Następną liczbą (trójkąty na dolnym wykresie) określa nasycenie koloru. Czystej barwie odpowiada wartość 100, a 0 odpowiada kolorowi szaremu. Trzecia liczba (kółka na dolnym wykresie), również z zakresu 0–100, określa jasność. Niebieskimi znaczkami przedstawiono sytuację, w której dominuje kolor niebieski.

Ale proces wytrącania trwa dalej. Powstają duże ugrupowania siarki, większe niż jedna dziesiąta długości fali światła i obserwujemy zarówno wzrost natężenia światła rozpraszanego, jak i zmianę jego koloru na bielszy.

Po tym dość długim, lecz niezbędnym wstępie możemy przejść do zaproponowanej przez nas metody pomiaru odległości, dla których zielony las zaczyna być widziany jako niebieski. Wykonaliśmy serię zdjęć wzdłuż drogi, co umożliwiło nam pomiar odległości. Zdjęcia wykonano w godzinach południowych w kierunku zachodnim, niebo było pokryte chmurami, temperatura wynosiła około 20 stopni Celsjusza, wilgotność około 50% oraz było bezwietrznie. Następnie wyznaczyliśmy średnią barwę dla zaznaczonych obszarów na zdjęciach przetworzonych do postaci elektronicznej. Niektóre z tych zdjęć znajdują się na tylnej okładce.

Wyniki przedstawiamy na rysunku 4. Na pierwszych pięciuset metrach dominuje kolor zielony ustępując następnie niebieskiemu.

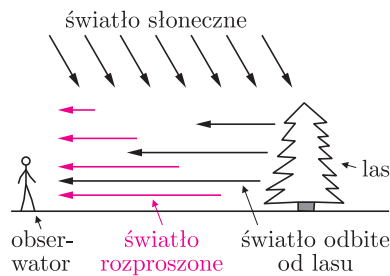
Spróbujmy wyjaśnić, dlaczego tak się dzieje. Kiedy światło pada na las, jest selektywnie odbijane w kierunku obserwatora. Dlatego z bliska las wydaje się zielony. Gdy odległość między lasem a obserwatorem rośnie, natężenie zielonego światła odbitego od lasu maleje (jest rozpraszane na boki). Ponadto część światła słonecznego zostaje rozproszona w kierunku obserwatora (rys. 5). Udowodniliśmy już, że jest to w przeważającym stopniu światło niebieskie. Z tych dwóch przyczyn kolor odległego lasu wydaje się niebieski. Natomiast wrażenie mglistości spowodowane jest spadkiem natężenia światła odbitego od lasu, a co za tym idzie spadkiem ilości obserwowanych detali.

Zastanówmy się jeszcze, jak warunki pogodowe wpływają na kolor lasu. Po pierwsze, kiedy atmosfera jest wolna od pyłów i kropelek wody, odległe plany wydają się silnie niebieskie. Ponieważ takie warunki niezwykle rzadko panują w Polsce, powróćmy do zdjęcia Wielkiego Kanionu. Wykonaliśmy analizę także tej fotografii. Widać wyraźnie (rys. 6), jak czerwona składowa bliskiego planu ustępuje składowej niebieskiej w miarę powiększania się odległości. Kolor niebieski jest tu bardzo wyraźny, a odległości sięgają pięćdziesięciu i więcej kilometrów. Interesujące jest, że otrzymujemy ten sam rezultat, mimo że skały nie są zielone, lecz brązowe.

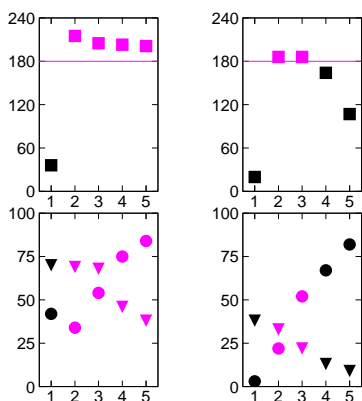
Natomiast pokazane na tylnej okładce zdjęcie Tatr zostało wykonane wtedy, kiedy w powietrzu znajdowało się wiele kropelek wody, większych niż jedna dziesiąta długości fali światła. Rozpraszanie staje się w takich warunkach nieselektywne i odległe wzgórza jawią nam się w odcieniach szarości. Analiza komputerowa tego zdjęcia potwierdza nasze spostrzeżenia (rys. 7). Wraz z odległością wzrasta jasność, natomiast spada nasycenie koloru – wzajemny stosunek barw pozostaje mniej więcej stały, co właśnie odpowiada odcieniom szarości rejestrowanym przez nasze oko.

Jest jeszcze wiele czynników, które mogą wpływać na kolor odległego lasu. Jednak jego niebieski kolor jest spowodowany rozpraszaniem światła w atmosferze i wpływają nań takie czynniki jak: odległości, kierunek obserwacji i oświetlenia, pogoda, czystość powietrza (w zanieczyszczonej atmosferze nie można pominąć absorpcji) i wrażliwość oka.

Zjawiska związane z kolorem lasu dają niewyczerpane możliwości prowadzenia badań. Pokazaliśmy jedynie jedno z wielu możliwych podejść.



Rys. 5. Mechanizm powstawania niebieskiej barwy lasu.



Rys. 6 Analiza zdjęcia Wielkiego Kanionu z przedniej okładki (rys. 6) oraz zdjęcia Tatr z tylnej okładki (rys. 7), w funkcji numerów pól zaznaczonych na zdjęciach. Legenda podana jest w opisie rysunku 4.



Autorzy artykułu, wraz z Janem Guttem (kapitanem), Jackiem Wołkowiczem i Anną Zlatkes, tworzyli zespół XIV LO im. Stanisława Staszica w Warszawie, który pod opieką mgr. Stanisława Lipińskiego wygrał ubiegłoroczny

Finał Międzynarodowego Turnieju Młodych Fizyków,
Odessa 2002.

