Esej o tęczy

Dorota ZIELIŃSKA

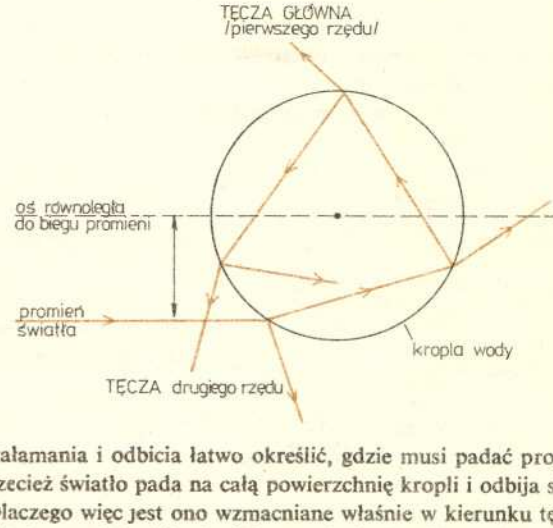
W czasie pisania artykułu autorka była uczennicą III klasy V Liceum Ogólnokształcącego w Krakowie.

> Tęcza jest tak wspaniałym zjawiskiem przyrody... że nie mógłbym wymyśleć piękniejszego do sprawdzania mych teorii.
>
> *Descartes*

Tęcza jest pomostem między poezją i nauką. Obie bowiem od wieków już starały się ją opisywać. Może się wydawać, że z naukowego punktu widzenia problem ten, jako dotyczący tylko optyki geometrycznej, dawno już został rozwiązany, a dziś zajmujemy się nim raczej z historycznego punktu widzenia. A jednak teoria tęczy silnie się rozwinęła dopiero w ostatnich latach. Opiera się ona nie tylko na prawach optyki geometrycznej, ale wykorzystuje wszelkie poznane dotąd cechy światła, jak interferencja, dyfrakcja, polaryzacja czy moment pędu promienia świetlnego.

Pojedynczy, jasny łuk widziany po deszczu to tęcza pierwszego rzędu. Oczywiście jej najbardziej rzucającą się w oczy cechą jest wspaniały wachlarz kolorów, rozpostartych wokół siebie zawsze w tej samej kolejności; pomiędzy fioletem po wewnętrznej stronie, a czerwienią, będącą zewnętrzną granicą, kolejno błękit przechodzi przez wszystkie odcienie zieleni w kolor żółty a następnie pomarańczowy. Trudniej jest już dostrzec inne cechy zjawiska tęczy. Wyżej bowiem znajduje się znacznie słabsza tęcza drugiego rzędu, o odwróconej kolejności barw. Poza tym, oko uważnego obserwatora dostrzega, iż obszar pomiędzy tęczami jest wyraźnie ciemniejszy niż poza nimi. Jest on zwany pasmem Alexandra, od imienia greckiego filozofa z II wieku n.e., który po raz pierwszy opisał to zjawisko. Jeszcze trudniejsze jest uchwycenie po wewnętrznej stronie tęczy pierwszego rzędu (a także po zewnętrznej stronie tęczy drugiego rzędu) leżących na przemian różowych i zielonych pasów.

Pierwszym, który podjął się wyjaśnienia powstawania tęczy, był prawdopodobnie Arystoteles. Zakładał on, że jest to specjalny rodzaj odbicia światła od całej chmury, tworzący stożkowo rozchodzące się promienie. Przewidział poprawnie, że tęcza nie jest ściśle zlokalizowanym obiektem materialnym, ale że jest to zbiór kierunków, wzdłuż których rozszczepione światło dochodzi do oczu obserwatora. Pierwszy, bardziej matematyczny opis pochodzi jednak dopiero z roku 1266. Roger Bacon jako pierwszy zauważył stałość kąta między kierunkami od obserwatora do tęczy i do Słońca (tzw. kąta tęczy), szacując go dosyć dokładnie na 138° dla tęczy pierwszego rzędu i 130° dla tęczy drugiego rzędu. W 1304 roku niemiecki mnich, Teodoryk z Freibergu, przeciwstawił teorii Arystotelesa hipotezę, w której każda pojedyncza kropla, a nie dopiero ich zbiór, tłumaczy powstanie tęczy. W trzy wieki później, niezależnie, także Descartes doszedł do wniosku, że wszystkie główne cechy tęczy można wytłumaczyć analizując przebieg promieni światła przez pojedynczą kroplę. I tak część promieni padających na powierzchnię kropli ulega odbiciu, a część załamaniu na granicy dwóch ośrodków. Promienie, które po jednokrotnym odbiciu wewnątrz wydostały się na zewnątrz, odpowiedzialne są za tęczę pierwszego rzędu, natomiast te, które dwukrotnie odbijają się od wewnętrznej powierzchni, tworzą tęczę drugiego rzędu. Podział wejściowego promienia na każdej granicy dwóch ośrodków na część odbitą i załamaną jest przyczyną różnicy (spadku) natężenia światła w tęczy drugiego rzędu i powoduje, że dalsze rzędy w ogóle są niewidzialne. Ze względu na sferyczną, a więc symetryczną budowę kropli, kąt odbicia i załamania dla każdej grupy równoległych promieni jest jedynie funkcją odległości punktu padania promienia od osi kropli.



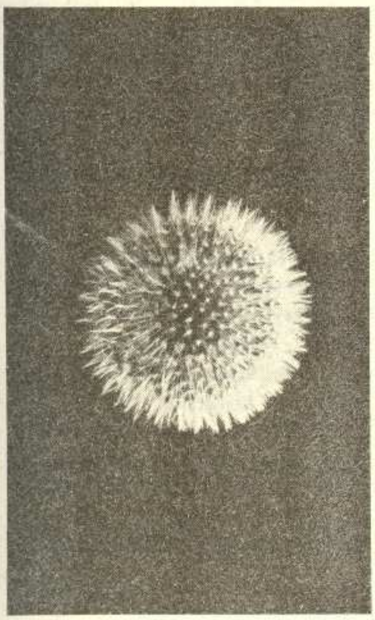
Na podstawie praw załamania i odbicia łatwo określić, gdzie musi padać promień, by wchodził w skład tęczy. Ale przecież światło pada na całą powierzchnię kropli i odbija się także w wielu innych kierunkach. Dlaczego więc jest ono wzmacniane właśnie w kierunku tęczy? Spróbujmy przeanalizować tor światła w zależności od miejsca padania. Jeżeli promień dosięgnie powierzchni kropli w jej środku, zachowa kierunek, a tylko zmieni zwrot biegu. W miarę oddalania się od osi kąt odbicia maleje, osiągając w odległości 7/8 promienia minimum równe 138° (dla promieni tworzących tęczę pierwszego rzędu), po czym znowu rośnie. Natomiast promienie wywołujące powstanie tęczy drugiego rzędu zwiększają swój kąt odbicia osiągając maksimum równe 130°.

Dokładne rachunki dla położenia tych ekstremów można znaleźć w Delcie 10/1975.

Ponieważ kropla oświetlana jest jednorodnie, niezależnie od miejsca powierzchni, więc wzmocnienie natężenia światła powstaje tam, gdzie kąt odbicia zmienia się najwolniej. W miejscu o najsilniejszym zagęszczeniu promieni, a więc dla kątów ekstremalnych (130° i 138°) powstają wzmocnione tęcze. Ponieważ zaś żadne promienie rozważanego typu nie są odbijane pod kątami pomiędzy 130° i 138°, więc powstaje tu zaciemnienie. Jak widać, wielkość kropli nie ma wpływu na kąty określające położenie poszczególnych obszarów.

Do tej pory nie zajmowaliśmy się najbardziej typową dla tęczy cechą, a mianowicie grą kolorów. Już w 1666 roku Newton zauważył, że światło białe jest mieszaniną wiązek różnobarwnych o różnych współczynnikach załamania. Różne współczynniki załamania dają różne ekstremalne kąty tęczy. I tak np. dla światła czerwonego wynosi on 137°58′, a dla fioletu 139°43′. Na podstawie tego oraz ze znanej szerokości kątowej tarczy słonecznej Newton ocenił szerokość tęczy na 2°15′, co było zgodne z jego obserwacjami. Tak więc Newton na podstawie optyki geometrycznej umiał uzasadnić występowanie i grę kolorów tęczy pierwszego i drugiego rzędu, ciemniejszy obszar między nimi, a nawet określić ich położenie. Nie był jednak w stanie wytłumaczyć pochodzenia barwnych prążków leżących po wewnętrznej części tęczy pierwszego rzędu. Po wewnętrznej stronie tęczy pierwszego rzędu oraz po zewnętrznej stronie drugiego — zawsze znajdziemy dwa promienie, które padały na kroplę z obu stron promieni tworzących tęczę i odbiły się w tym samym kierunku. Kąt tęczy jest bowiem kątem ekstremalnym. Stąd też, dla każdego kąta nieco większego od wartości kąta tęczy (w przypadku tęczy pierwszego rzędu) odbite światło zawiera równoległe promienie, które przeszły różne drogi o różnych długościach. W czasach Newtona natężenia spowodowane łączeniem się kilku grup promieni mogły być tylko po prostu dodane. Dlatego też przewidywał on ciągły jednostajny spadek natężenia w funkcji kąta bez żadnych prążków. Dopiero po odkryciu Younga dotyczącym możliwości interferencji fal świetlnych sam autor wpadł na pomysł, że takie dwa promienie przechodzące przez kroplę zachowują się analogicznie, jak promienie przechodzące przez dwa otwory w jego słynnym doświadczeniu. To „podtęczowe” zjawisko wyjaśnił więc następująco. Dla kątów bliskich kątom tęczy różnica dróg między sąsiednimi promieniami jest nieznaczna, więc interferują ulegając wzmocnieniu. Gdy różnica osiąga połowę długości fali, promienie wzajemnie się wygaszają. Dla dalszego wzrostu różnicy dróg światło konsekwentnie zostaje dalej na przemian wzmacniane i osłabiane, czego efektem są powstające prążki. Ponieważ kąt obserwacji, przy którym następuje wzmacnianie i osłabianie zależy od różnicy dróg przejścia odpowiednich promieni przez kroplę, więc całe zjawisko zależy tym razem od wielkości kropli. W większych kroplach następuje szybsza zmiana różnicy, gwałtowniejszy jej wzrost powodujący zbliżanie się prążków. Wyjaśnia to fakt, że bliżej wierzchołka łatwiej je dostrzec. Bo po prostu krople deszczu spadając rosną.

Dokładne wyjaśnienie wszelkich niezauważalnych gołym okiem subtelności tęczy wymaga posłużenia się pełną teorią fal elektromagnetycznych stworzoną przez Maxwella. Odpowiednie rachunki wcale nie są proste. Łatwo natomiast zrozumieć pewną ciekawą własność światła tworzącego tęczę. Okazuje się, że światło to jest praktycznie całkowicie spolaryzowane w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny, w której zachodzi odbicie promieni. Kąt wewnętrznego odbicia dla promieni tworzących tęczę pierwszego rzędu jest bowiem przez niezwykły przypadek równy kątowi Brewstera, przy którym światło całkowicie polaryzuje się przez odbicie. Zjawisko polaryzacji światła tęczowego może zaobserwować każdy, kto ma okulary polaryzacyjne lub inne urządzenie polaryzujące światło.



Zadania

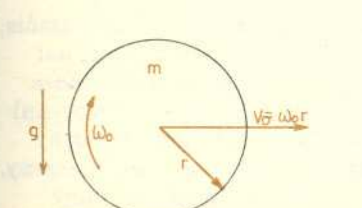
Redaguje mgr Andrzej MĄKOWSKI

M 172. Udowodnić, że jeżeli powierzchnia $\mathcal{S}$ ma następującą własność: *jeżeli punkty A, B, C należą do* $\mathcal{S}$, *to okrąg przechodzący przez A, B, C jest zawarty w* $\mathcal{S}$, to $\mathcal{S}$ jest płaszczyzną lub sferą.
Rozwiązanie na str. 5

M 173. Ile jest trójek liczb naturalnych nie większych od $3n$, których suma jest podzielna przez 3?
Rozwiązanie na str. 12

M 174. Wykazać, że jeżeli $f(x)$ jest wielomianem stopnia n o współczynnikach rzeczywistych oraz a i b są takimi liczbami rzeczywistymi, że wielomiany $f(x)-a$ i $f(x)-b$ mają po n różnych pierwiastków rzeczywistych, to dla każdej liczby c leżącej między a i b wielomian $f(x)-c$ ma n różnych pierwiastków rzeczywistych.
Rozwiązanie na str. 5

Redaguje dr Waldemar GORZKOWSKI



F58. Na poziomą powierzchnię stołu położono jednorodną kulkę o masie m i promieniu r wirującą z prędkością ω_0 wokół osi poziomej przechodzącej przez środek kulki. Jednocześnie środkowi kulki nadano prędkość liniową $v_0 = \omega_0 r$ w kierunku prostopadłym do osi obrotu. Współczynnik tarcia posuwistego kulki o stół wynosi f, a potoczystego k. Jaki warunek powinny spełniać k, f i r, aby ruch kulki aż do chwili zatrzymania odbywał się bez poślizgu?
Rozwiązanie na str. 2