

Uwaga na tęczę!

■ WALDEMAR BEREJ, STANISŁAW PIŁAT

1. Wstęp

Jedno z najbardziej efektownych zjawisk optycznych przyrody – zjawisko tęczy – było już szczegółowo omawiane w licznych publikacjach popularno-naukowych (na przykład [1–6], choć w żadnym razie podanej literatury nie można traktować jako kompletnej). Spieszymy zatem uprzedzić, że nie jest celem tego artykułu dokonanie jeszcze jednej próby przedstawienia teorii, czy też historii objaśniania tęczy. Zakładając pewną wiedzę czytelnika na ten temat, a także odsyłając do wyżej wymienionych opracowań w bibliografii, chcemy zwrócić uwagę na nieścisłości oraz błędy pojawiające się w wielu encyklopediach i słownikach fizycznych oraz niektórych podręcznikach szkolnych, gdzie podejmuje się próbę, z konieczności skrótowego objaśnienia powstawania tęczy. Nie jest jednak naszym zamiarem piętnowanie ani pouczanie nieuważnych autorów. Chcemy przede wszystkim ostrzec czytelników, aby nie przyjmowali bezkrytycznie i nie przekazywali uczniom błędnego lub nadmiernie uproszczonego opisu zjawiska tęczy. W tym miejscu nie sposób nie zacytować uwag profesora Władysława Błasiaka zawartych we wstępie do długiego wykazu pytań o tęczę [7]: „Fizyka zjawiska tęczy jest bardzo złożona. Większość fizyków, w tym także nauczycieli fizyki i astronomii sądzi, że bardzo dobrze rozumie mechanizm tego pięknego i tajemniczego zjawiska. Nasze doświadczenie wskazuje na to, że bardzo często jest to niestety sąd mijający się z prawdą.” Rozpowszechnienie pewnych prostych błędów, które omówimy w dalszej części artykułu, naszym zdaniem w pełni potwierdza cytowaną opinię.

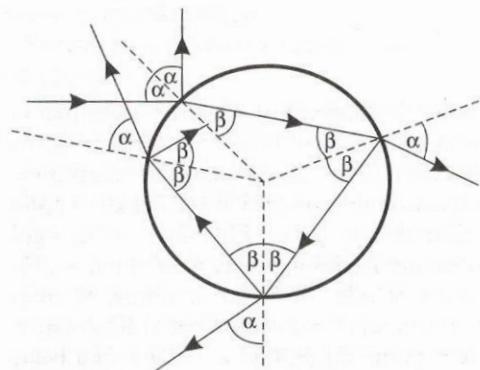
Przy okazji zamierzamy w miarę szczegółowo opisać jeden z najważniejszych epi-

zodów z długiej historii prób objaśniania tęczy. Chodzi o dokonania Kartezjusza przedstawione przez niego w rozprawie o tęczy opublikowanej w 1637 roku. Są one niedoceniane przez filozofów, a na ogół nieznanne fizykom. Kiedy w artykule w „Fizyce w Szkole” nr 5/2005 czytamy, że „mechanizm jej powstawania badał Kartezjusz, ale w pełni objaśnił go w XVII wieku Isaac Newton”, może to sugerować, że francuski myśliciel niewiele tu osiągnął. Rzeczywiście, Kartezjusz nie był w stanie wyjaśnić zjawiska rozszczepienia światła, ale za to stworzył pierwszą ilościową teorię tęczy i wytłumaczył, znany od XIII wieku fakt, że kąt między światłem padającym i promieniami tęczy głównej wynosi około 42° . Dlatego też warto poznać cały program badawczy Kartezjusza tzn. co i jak osiągnął w kwestii objaśniania tęczy. Poza tym, jeśli pozna się te osiągnięcia, to raczej trudno popełnić błąd, którym zajmujemy się w drugiej części artykułu.

2. Kwestia „całkowitego wewnętrznego odbicia”

Zacznijmy od błędu, który występuje nader często i zapewne jest znany wielu czytelnikom. Dla przykładu przytoczymy fragment hasła „tęcza” z jednego ze słowników fizycznych [8], które w ostatnich latach publikowane są przez różne wydawnictwa. Czytamy tam, że „łuk główny powstaje w wyniku całkowitego wewnętrznego odbicia i dwukrotnego załamania światła w kropki wody”. O błędności stwierdzenia, jakoby tęcza była wynikiem całkowitego wewnętrznego odbicia można się bardzo łatwo przekonać po narysowaniu biegu promienia padającego na kulistą kroplę wody. Patrząc na rysunek zauważymy natychmiast, że jeśli promień padłby na wewnętrzną ściankę

kropki pod kątem większym od granicznego, to nigdy by z niej nie wyszedł, bo następne kąty padania są takie same.



Rys. 1. Tor promienia świetlnego padającego na kulistą kropkę

Argument wprost uzyskujemy, wypisując na podstawie prawa załamania zależność między kątami:

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n},$$

gdzie n oznacza współczynnik załamania wody. Kąt α mógłby osiągnąć wartość graniczną czyli g , od którego zaczyna się całkowite wewnętrzne odbicie, dla $\alpha = 1$. To zaś jest możliwe dla promienia padającego na kropkę pod kątem 90° , a więc zaledwie muskającego jej brzeg i nie wnikaącego do wnętrza!

Omawiany błąd nie ominął publikacji renomowanych wydawnictw. Pouczające jest zajrzenie do wielotomowych encyklopedii wydawnictwa PWN. O ile w 13-tomowej „Wielkiej encyklopedii powszechnej” jest słusznie mowa o wewnętrznym odbiciu promienia, to w „Encyklopedii powszechnej” w czterech tomach pojawia się już błędne „całkowite odbicie”. Hasło z błędem przeniesiono w zasadzie bez zmian do 6-tomowej „Nowej encyklopedii powszechnej”, ilustrując je efektywnym kolorowym zdjęciem, ale też dodając rysunek, który może powodować dodatkowy błąd (piszemy o tym w punkcie czwartym naszych rozważań). To samo jest w najnowszej 30-tomowej „Wielkiej Encyklopedii PWN”. Przy

obecnej łatwości składu komputerowego, można przypuszczać, że błędy przeniknęły bez przeszkód do różnych innych publikacji encyklopedycznych tego wydawnictwa. Błędne stwierdzenia nie uniknęła też wydana kilka lat temu obszerna encyklopedia szkolna WSiP [9], gdzie, co prawda, w haśle o zjawiskach optycznych w atmosferze czytamy o wewnętrznym odbiciu, ale na rysunkach przedstawiających zasadę powstawania tęczy głównej i wtórnej, widnieją wyraźnie napisy „całkowite wewnętrzne odbicie”. Szkoda, że błąd ten zakradł się do książki opracowanej na niewątpliwie wysokim poziomie.

Mamy nadzieję, że dociekliwy czytelnik zechce sprawdzić inne dostępne mu źródła. Oczywiście jest wiele książek, które poprawnie opisują bieg promienia w kropki wody. Jako pozytywny przykład warto tu wymienić np. książkę [10], której autor każdorazowo pisze o częściowym odbiciu i częściowym załamaniu światła. Inne przykłady, wolne od omawianego błędu, to hasła o tęczy w niektórych szkolnych słownikach fizycznych (np. [11]).

Nie ulega jednak wątpliwości, że błąd występuje dość powszechnie i to od dawna, zarówno w książkach rodzimych jak i tłumaczonych. Podczas wrywkowego sprawdzania zauważyliśmy go na przykład w bardzo szczegółowym podręczniku szkolnym Jana Wojnicza-Sianożęckiego [12], który miał kilka wydań w drugiej dekadzie XX wieku oraz w przekładzie znakomitej skądinąd książki Gamowa [13]. Po dotychczasowej wyliczance nie powinno dziwić, że błędne odwołanie się do całkowitego odbicia pojawiło się na jednej z plansz przedstawiających nagrodzone zdjęcia konkursowe uczniów, które pokazano w czasie obrad XXXVII Zjazdu Fizyków Polskich w Warszawie we wrześniu 2005 roku.

Zapewne w wielu przypadkach błędne stwierdzenie jest zapożyczane z innych publikacji. W takiej sytuacji nieuniknione jest jego pojawienie się w podręcznikach szkolnych oraz na licznych stronach internetowych. Przejrzeliśmy niemal wszystkie gim-



nazwalne podręczniki fizyki. W dwóch trzecich z nich można znaleźć wzmianki o tęczy, na ogół ilustrowane zdjęciami zjawiska. W trzech przypadkach, kiedy podejmowana jest próba dokładniejszego przeanalizowania biegu promienia w kroplicy wody, autorzy odwołują się do całkowitego wewnętrznego odbicia. W jednym z tych podręczników czytamy np.: „Aby promienie trafiły do naszego oka, muszą padać na granicę woda-powietrze pod kątem większym od kąta granicznego”.

Ten ostatni cytat sugeruje, że źródłem błędnego przekonania, iż przy powstawaniu tęczy winno wystąpić całkowite odbicie, może być chęć prostego wyjaśnienia, dlaczego promienie rozpraszane są „do tyłu”. Wydaje nam się, że istotny wpływ na to może mieć sposób, w jaki objaśnia się zjawisko całkowitego odbicia światła w podręcznikach szkolnych. Mimo, że na początku optyki geometrycznej prawa odbicia i załamania bywają często wypowiadane niemal jednym tchem, to dalej autorzy, koncentrując uwagę na sytuacji granicznej, od której rozpoczyna się całkowite wewnętrzne odbicie, rysują zwykle promień padający oraz promień załamany ślizgający się po granicy ośrodków. Bez promienia odbitego! Ten, w podręcznikach wchodzi na arenę dopiero dla kątów padania większych od granicznego. Tymczasem podstawowa obserwacja przy użyciu tarczy Kolbego wyraźnie pokazuje, że wraz ze wzrostem kąta padania maleje natężenie promienia załamane, natomiast promień odbity, początkowo bardzo słabo widoczny, stopniowo „rośnie w siłę”, najpierw powoli, a potem coraz szybciej. W zasadzie cały czas go jednak widzimy. Rysunki często nie uwzględniają tego faktu, za to eksponują promień załamany, którego w sytuacji granicznej (i blisko niej) po prostu nie widać. Niezwykle wyraźny przykład takiego niefortunnego podejścia stanowi np. rysunek w „Atlasie fizyki” [14] (taki sam jest w cytowanej już encyklopedii [9]) ilustrujący całkowite wewnętrzne odbicie. Nic dziwnego, że podobne rysunki można znaleźć w bar-

dzo wielu szkolnych podręcznikach fizyki (ale nie w cenionym podręczniku [15]!).

Omawiając prawa odbicia i załamania światła warto wspomnieć, jak energia padającej wiązki dzieli się między wiązkę odbitą i załamaną dla różnych kątów padania, zarówno przy odbiciu zewnętrznym, jak i wewnętrznym. Przede wszystkim jednak warto to uczniom zademonstrować! Dalszą kwestią jest porównanie tego, co widzimy z wynikami teoretycznymi, które można uzyskać z tak zwanych wzorów Fresnela, wyprowadzonych na długo (w 1823 roku) przed pojawieniem się równań Maxwella i elektromagnetycznej teorii światła. Wykresy pokazujące, jak ułamek niesionej energii zależy od kąta padania dla odbicia wewnętrznego i zewnętrznego na granicy ośrodków można znaleźć np. w starszych wydaniach drugiego tomu podręcznika Resnicka i Hallidaya. Gdy niespolaryzowana fala świetlna pada z wody do powietrza, to początkowo, dla szerokiego zakresu wartości kąta padania, energetyczny współczynnik odbicia jest niewielki, a wzrasta silnie dopiero przy zbliżaniu się do kąta granicznego. W ciekawy sposób jest to zilustrowane w książce Hewitta [16]: wzajemne proporcje między natężeniem światła załamanego i odbitego są oddane poprzez długości strzałek leżących wzdłuż kierunków odpowiednich promieni.

3. Kartezjańska teoria tęczy

Zadowoleni z możliwości łatwego wyjaśnienia kolorów tęczy przez odwołanie się do zjawiska rozszczepienia światła, zapominamy zwykle o potrzebie objaśnienia (przynajmniej dla siebie samych) tego, że tęczę widzimy zawsze pod tym samym kątem względem promieni słonecznych. Może się też zdarzyć, że dociekliwy uczeń zapyta nas w końcu, dlaczego na rysunku w podręczniku ilustrującym powstawanie tęczy zaznaczone są tylko promienie, które padają na kropkę wody blisko jej skraju.

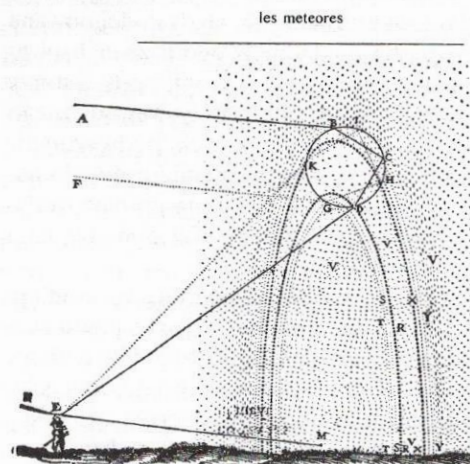
Z rozmów prowadzonych przez nas z innymi fizykami na temat tęczy wynika dość jednoznacznie, że tylko niektóre osoby są obeznane z pierwszą ilościową teorią tęczy

stworzoną przez Kartezjusza. Jeśli chcemy zrozumieć tęczę w ramach optyki geometrycznej, to koniecznie musimy się zapoznać z wynikami dociekań Kartezjusza, a najlepiej, gdy sami wykonamy zasadnicze doświadczenie i przeprowadzimy stosowne obliczenia.

Godne uwagi jest to, że licząca kilkanaście stron rozprawa o tęczy została opublikowana w roku 1637 w Lejdzie, w jednym tomie ze słynną „Rozprawą o metodzie”. To ostatnie dzieło stanowi wstęp metodologiczny do dużo większej, bo liczącej 360 stron całości zawierającej wyniki badań matematycznych i przyrodniczych Kartezjusza. Są to trzy traktaty: „Dioptryka”, „Zjawiska Atmosferyczne” i „Geometria”. Ósma z kolei rozprawa w drugim z nich jest poświęcona tęczy. W późniejszych wiekach rzadko wydawano dzieło Kartezjusza w całości, my sięgnęliśmy do jubileuszowego wydania francuskiego [17]. Istotne fragmenty rozprawy o tęczy, przetłumaczone na język angielski, można znaleźć w znanym zbiorze tekstów źródłowych z fizyki [18].

Według Kartezjusza tak wybitne, a jednocześnie mało zrozumiane zjawisko, jakim jest tęcza, stanowi doskonały przedmiot badań, w którym mógłby pokazać siłę swojej metody. Przyjmując, że widok łuku tęczy nie zależy od wielkości kropeł wody, co jak wiemy, do końca nie jest prawdą, zaczyna od przeprowadzenia doświadczenia z dużym modelem kropli w postaci kulistego, szklanego naczynia, wypełnionego wodą. Powtarza więc krok, który ponad trzydzieści lat wcześniej wykonał Teodoryk z Fryburga [19]. Obserwując losy światła słonecznego oświetlającego kulę, zauważa efekty barwne pojawiające się wzdłuż dwóch kierunków tworzących kąty około 42° oraz 52° z kierunkiem padania promieni słonecznych. Stwierdza ponadto, że za te efekty odpowiada tylko mała część promieni z całej wiązki padającej na model kropli. Wyniki badań eksperymentalnych Kartezjusza (zapewne z uwzględnieniem rezultatów dalszej analizy) podsumowuje reprodukowany poniżej wspinały rysunek,

który precyzyjnie pokazuje bieg promieni tworzących oba łuki tęczy.



Rys. 2. Powstawanie tęczy według Kartezjusza

Zachęcamy gorąco do wykonania tego pięknego doświadczenia w wersji opisanej w znanej książce Minnaerta [21], a przypomnianej w „Fotonie” [22]. Snop światła, np. z rzutnika do przeźroczy, kierujemy na kolbę wypełnioną wodą poprzez kołowy otwór w dużej przesłonie, która stanowi jednocześnie ekran do obserwacji tęczywych efektów. Jeśli kolba jest blisko otworu, to na ekranie widzimy barwny łuk (z przewagą czerwieni) oddzielający obszar jasny od ciemnego. Jeśli kolbę odsuniemy trochę dalej, to wewnątrz pojawi się drugi łuk z odwróconą kolejnością barw. Co ciekawe, rzadko wspomina się o tej możliwości, oczywiście w świetle rysunku biegu istotnych promieni, naszkicowanego w rozprawie Kartezjusza.

Po opisie wyników doświadczenia Kartezjusz wyraźnie stwierdza, że zasadniczy problem nadal nie jest rozwiązany: dlaczego z wielu promieni, które wnikają do kropli i odbijają się w jej wnętrzu, tylko niektóre dają efekty barwne? Po pewnych uwagach dotyczących porównania z pryzmatem, uczony przechodzi do decydującego kroku. Chwyta pióro i pracowicie wylicza bieg promieni padających w różnych punktach na kroplę i ulegających jednemu bądź



dwóm wewnętrznym odbiciom. W porównaniu z Teodorykiem, który jako pierwszy z grubsza poprawnie opisał bieg promieni w kropli, Kartezjusz dysponuje ścisłym prawem załamania. Podał je w drugiej rozprawie „Dioptryki”, uzasadniając wywodem teoretycznym. W istocie był pierwszym, który je opublikował (stąd w podręcznikach francuskich prawo załamania nazywane jest prawem Kartezjusza). W drugiej połowie XVII wieku wysunięto wobec Kartezjusza zarzut plagiatu [22], choć wszystko wskazuje na to, że doszedł on do tego ważnego wyniku niezależnie od Willebrorda Snella.

Kartezjusz przyjmuje promień kropli za równy 10 000 jednostek i śledzi na papierze losy kolejnych promieni świetlnych, zmieniając parametr zderzenia, jak obecnie powiedzielibyśmy (czyli odległości prostej będącej kierunkiem padania promienia, od środka kropli), co tysiąc jednostek. Jego uwagę zwraca od razu szczególnie zachowanie się kątów odchylenia promieni padających na skrajną część kropli. Przeprowadza drugą turę rachunków dla parametru zderzenia w przedziale od 8 000 do 9 800, tym razem zmieniając go o sto jednostek w każdym kroku. W ten sposób odkrywa, że po jednym odbiciu wewnątrz nieproporcjonalnie wiele promieni wychodzi w wąskim zakresie kątów od 41° do 42° , a żaden nie tworzy większego kąta z kierunkiem padania (co pozwala wyjaśnić ciemny obszar na zewnątrz barwnego łuku w naszym doświadczeniu, a tym samym fakt, że powyżej głównego łuku tęczy niebo jest ciemniejsze) oraz analogiczne zachowanie po dwóch odbiciach wewnętrznych: bardzo wiele promieni trafia w przedział kątów od 51° do 52° , natomiast żaden nie osiąga mniejszej wartości kąta. Oznacza to, że występuje koncentracja promieni wzdłuż określonych kierunków – obecnie w takiej sytuacji używamy terminu kaustyka. Maksimum natężenia światła rozproszonego przypada na okolice tych kątów, gdyż tam kąt rozproszenia w niewielkim stopniu zależy od parametru zderzenia. Wynika stąd także, że dla

kątów leżących pomiędzy tymi wartościami istnieje ciemniejszy pas, czyli tak zwana wstęga Aleksandra, znana jeszcze badaczom starożytnym.

Zainteresowany czytelnik może znaleźć tabele zawierające wyniki obliczeń Kartezjusza w wydanej kilka miesięcy temu unikalnej historii fizyki, napisanej przez profesora Andrzeja Kajetana Wróblewskiego [23]. Jeśli ktoś zechciałby powtórzyć te imponujące rachunki (co przy obecnych możliwościach obliczeniowych nie będzie zbyt trudne), to podajemy od razu, że Kartezjusz używał wartości 250/187 dla współczynnika załamania wody względem powietrza. Ta wartość, jak się zdaje, była wynikiem jego własnych eksperymentów.

Kartezjusz w swoich obliczeniach w istocie tabelował wartości pewnych funkcji i wykrył na drodze numerycznej, że posiadają one ekstrema. Po rozwinięciu rachunku różniczkowego można było wyprowadzić analityczne wzory na położenie i wartości tych ekstremów bez konieczności przeprowadzania żmudnych rachunków. W przypadku jednego odbicia wewnętrznego zachodzi wzór:

$$\sin \alpha_{ekstr} = \sqrt{\frac{4-n^2}{3}}$$

Ten wzór oraz jego ogólniejsza wersja, słuszna dla większej liczby odbić wewnątrz kropli, zostały wyprowadzone przez Newtona (podał je w swoim dziele „Optics”) oraz niezależnie przez współczesnych mu: Edmunda Halleya, Jana Bernoulliego oraz Jakuba Hermanna [24]. Przypomnijmy, że analiza biegu promienia w kropli wody, prowadząca do wyznaczenia ekstremalnej wartości kąta odchylenia, była już kilka razy tematem zadań w trakcie zawodów Olimpiady Fizycznej [25]-[27].

Newton przeanalizował całe zagadnienie dokładniej niż Kartezjusz i wyliczył szerokości kątowe obu tęczowych łuków, uwzględniając oczywiście niejednakowe załamanie promieni o różnych barwach (dla promieni najmniej „łamliwych” przyjął wartość współczynnika załamania równą

$108/81 = 4/3$, zaś dla najsilniej załamywanych wartość $109/81$) oraz rozmiar tarczy słonecznej. Kolejne barwy widma osiągają największą koncentrację wzdłuż różnych kierunków, co powoduje, że przekrywanie się barw jest wtedy minimalne i umożliwia przetrwanie efektów rozszczepienia światła. Zwróćmy uwagę na to, że własności ekstremalnego odchylenia nie mają promienie wychodzące z kropli po dwukrotnym załamaniu bez odbić – dla nich nie obserwuje się efektu tęczowego.

Przedstawiliśmy szczegółowo jeden bardzo ważny epizod z historii badań tęczy. Opis dociekań innych badaczy, próbujących objaśnić zjawisko tęczy na przestrzeni wielu wieków czytelnik znajdzie w cytowanej powyżej książce Boyera [24]. Warto też zajrzeć do ostatnio wydanej francuskiej próby przedstawienia tego samego tematu [28].

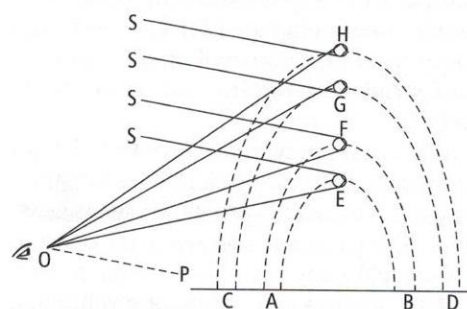
4. Kwestia „pojedynczej kropli”

Na rysunku zaczerpniętym z rozprawy Kartezjusza o tęczy nałożone są wyraźnie dwa plany: bliski, pokazujący bieg promieni w kulistej kropli wody oraz daleki, pokazujący promienie docierające do oka obserwatora od niektórych kropli deszczu. Umowność takiego nałożenia, dyktowana próbą zmieszczenia na jednej ilustracji dwóch różnych aspektów, jest w tym przypadku oczywista.

W niektórych publikacjach można zaobserwować tendencję do przedstawiania na rysunkach procesu powstawania tęczy tak, jakby to był wynik rozproszenia wiązki promieni słonecznych w pojedynczej kropli. Według takiego schematu, z dużej kropli skrajne promienie widma wychodzą jako wiązka lekko rozbieżna i trafiają do oka, które widzi łuk z odpowiednią kolejnością barw na przedłużeniu tych promieni. Ten typ ilustracji występuje w książce Bułata [10], całej serii encyklopedii PWN oraz w jednym z gimnazjalnych podręczników fizyki. Cytat z tego podręcznika świadczy dobitnie o tym, że można tu łatwo zapomnieć o umowności łączenia różnych aspektów: „W miejscu przedłużeń promie-

ni opuszczających kroplę powstaje obraz w postaci tęczy” (sic!).

Własności łuków tęczowych (także ich kształt) wynikają z tego, co dzieje się ze światłem w pojedynczej kropli, ale tęczę tworzy światło dobiegające do oczu obserwatora z wielu kropli. Warto zilustrować to odrębnym rysunkiem, na przykład podobnym do poniższego, który zapożyczaliśmy z „Optyki” Newtona.



Rys. 3. Powstawanie tęczy według optyki Newtona

5. Krótkie podsumowanie

Jest zrozumiałe, że nie jest łatwym zadaniem przedstawić prosto i zwięźle objaśnienie zjawiska, które może być poprawnie wytłumaczone dopiero po uwzględnieniu pewnych, dość subtelnych okoliczności. Być może wystarczyłoby tylko wspomnieć o podstawowych elementach, które składają się na efekt tęczy (łuk główny, łuk wtórny, ciemnia Aleksandra), bez ulegania pokusie wyjaśnienia jej powstawania i wdawania się w szczegóły. Jakkolwiek byśmy decyzję podjęli, z pewnością niedopuszczalne jest jednak pojawianie się merytorycznych błędów i nadmiernych uproszczeń w przedstawianiu tęczy.

W podręcznikowym omawianiu zjawiska tęczy pomija się sprawę tzw. łuków nadliczbowych, które choć słabo widoczne (najlepiej w okolicach wierzchołka tęczy), to przecież odegrały decydującą rolę w rozwoju teorii tego zjawiska. Naprawdę zadowalająca teoria tęczy (rozwijana od początku XIX wieku) korzysta tylko w pewnym stopniu z optyki geometrycznej, opierając się przede wszystkim na falowych własnościach światła. Mimo że na ten temat napi-

sano już wiele, pozostaje mnóstwo ciekawych aspektów (także doświadczalnych) do których przedstawienia zamierzamy powrócić w innym artykule.

Autorzy dziękują Mirosławowi Trociukowi za zgodę na wykorzystanie wykonanych przez niego zdjęć.

WALDEMAR BEREJ, STANISŁAW PIŁAT

II Liceum Ogólnokształcące we Włodawie

LITERATURA

- [1] Z. Płochocki: *Podstawy teorii tęczy*, „Delta” 10/1975.
- [2] H.M. Nussenzveig: *Teoria tęczy*, „Problemy” 3/1983 (jest to tłumaczenie fragmentów artykułu z miesięcznika „Scientific American”, April 1977, który powinien być przeczytany przez każdego, kogo interesuje objaśnianie tęczy).
- [3] J. Szudy: *O teoriach tęczy*, „Fizyka w Szkole” 2/1992.
- [4] G. Derfel: *Tęcza*, „Delta” 6/1993.
- [5] W. Maciejewski: *Gloria i inne efekty rozszczepienia światła słonecznego w atmosferze ziemskiej*, „Postępy Fizyki” 3/1993.
- [6] R. Greenler: *Tęcze, glorie i halo, czyli niezwykle zjawiska w atmosferze*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1998.
- [7] W. Błasiak: *Pytania dla dociekliwych. 25 pytań o tęczy*, „Fizyka w Szkole” 5/1995.
- [8] J. Daintith, J.O.E. Clark: *Słownik szkolny. Fizyka*, Wyd. Eremis, Warszawa 2002.
- [9] *Encyklopedia szkolna. Fizyka z astronomią*, Wyd. Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2002.
- [10] W. Bulat: *Zjawiska optyczne w przyrodzie*, Wyd. Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1987.
- [11] M. Sawicki: *Szkolny słownik od A do Z. Fizyka*, Kram, Warszawa 2002.
- [12] J. Wojnicz-Sianożęcki: *Fizyka w zakresie szkoły średniej. Część II*, Wyd. M. Arcta, Warszawa 1919.
- [13] G. Gamow: *Biografia fizyki*, Wiedza Powszechna, Warszawa 1967.
- [14] H. Breuer: *Atlas fizyki*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000.
- [15] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker: *Podstawy fizyki, cz. 4*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003.
- [16] P.G. Hewitt: *Fizyka wokół nas*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
- [17] Descartes: *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison, et chercher la vérité dans les sciences. Plus la Dioptrique, les Météores et la Géométrie qui sont des essais de cette méthode. Edition du 350^e anniversaire*, Fayard, Paris 1987.
- [18] W.F. Magie: *A Source Book in Physics*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts 1965.
- [19] R. Harré: *Wielkie eksperymenty naukowe*, Wiedza Powszechna, Warszawa 1991 (Rozdział 8).
- [20] M. Minnaert: *Światło i barwa w przyrodzie*, PWN, Warszawa 1961.
- [21] B. Warczak, A. Gawlik: *Kącik eksperymentatora. Barwy światła*, „Foton”, Nr 58, 1998.
- [22] R.S. Ingarden: *Fizyka i fizycy. Studia i szkice z historii i filozofii fizyki*, Wydawnictwo UMK, Toruń 1994 (Rozdział IV).
- [23] A.K. Wróblewski: *Historia fizyki od czasów najdawniejszych do współczesności*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
- [24] C.B. Boyer: *The Rainbow. From Myth to Mathematics*, Princeton University Press, Princeton 1987.
- [25] A. Szymacha: *Olimpiady Fizyczne XXV i XXVI*, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1980 (str. 77).
- [26] W. Gorzkowski, A. Kotlicki: *Olimpiada Fizyczna XXVII–XVIII*, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1983 (str. 58).
- [27] W. Gorzkowski: *XXXIV Olimpiada Fizyczna. Zawody I stopnia*, „Fizyka w Szkole” 3/1985.
- [28] B. Maitte: *Histoire de l'arc-en-ciel*, Éditions du Seuil, Paris 2005.

Uwaga na Tęczę – sprostowanie

W numerze 2/2007 „Fizyki w Szkole” opublikowany został artykuł Waldemara Bereja i Stanisława Piłata pt. „Uwaga na tęczę”.

Autorzy wspomnianego artykułu nie są jednak nauczycielami II Liceum Ogólnokształcącego we Włodawie. Waldemar Berek jest pracownikiem Instytutu Fizyki UMCS w Lublinie, a Stanisław Piłat jest nauczycielem XXIII Liceum Ogólnokształcącego w Lublinie.

Za pomyłkę autorów przepraszamy.

Poza tym, na specjalne życzenie autorów drukujemy, pominięte w trakcie opracowania redakcyjnego, zdjęcia pokazujące tzw. doświadczenie Kartezjusza oraz informację, że światło tworzące tęczkowe łuki (niezbyt dobrze widoczne w czarno-białym wydruku) jest prawie całkowicie spolaryzowane.

