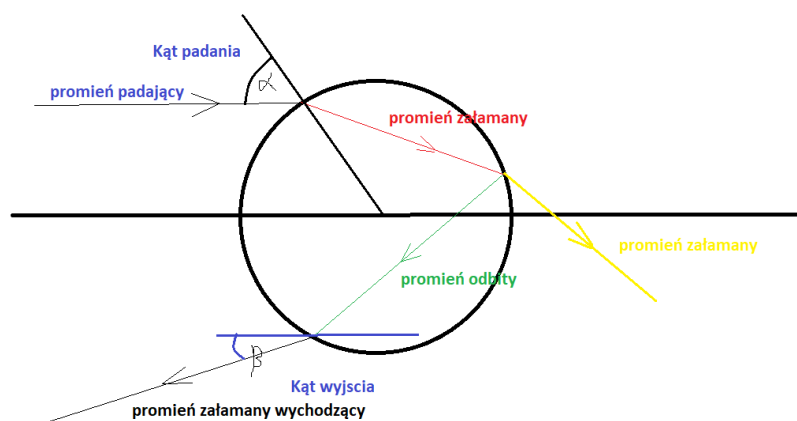


Zjawisko tęczy

Tęcza jest zjawiskiem optycznym należącym do grupy fotometeorów. Jest obserwowana na tle chmur opadowych, które znajdują się po przeciwnej stronie położenia Słońca lub Księżyca. Według Międzynarodowej Organizacji Meteorologicznej **tęczą** nazywamy układ koncentrycznych łuków o barwach od fioletowej do czerwonej, występujących na tle sklepienia niebieskiego, wywołanych przez światło Słońca lub Księżyca, padające na zespół spadających kropeł wody w atmosferze (krople deszczu, krople mżawki lub mgły), które występują zawsze po przeciwnej stronie Słońca [1]. Uważny obserwator spostrzeże, że oprócz łuku głównego, czasami można zaobserwować łuk wtórny, który charakteryzuje się większymi rozmiarami kątowymi, mniejszą jasnością oraz odwróconą kolejnością barw. Najpiękniejsze tęcze są obserwowane tuż po burzy, a więc na tle chmur Cumulonimbus. Tęcza po burzy charakteryzuje się bardzo dużą jaskrawością wąskich łuków z wyraźnie oddzielonymi barwami [2]. Pierwsze wyjaśnienie mechanizmu powstawania tęczy podał w 1637 roku Kartezjusz, według którego za powstanie tęczy odpowiadają prawa optyki geometrycznej a dokładniej odbicie i załamanie światła, które zachodzą w opadających kroplach opadowych. Teoria dyfrakcyjna tęczy została zaproponowana przez Airy'ego [2,3,4].

Fizyka tęczy

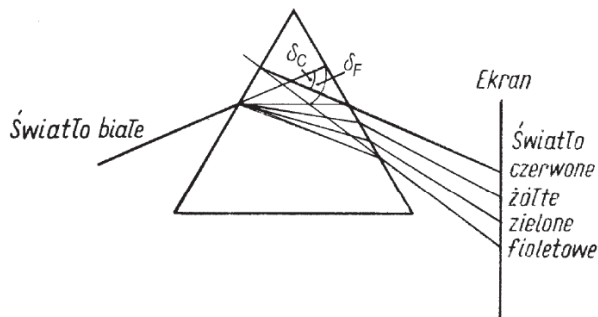
Światło słoneczne docierające do Ziemi rozchodzi się w atmosferze, w której znajdują się obszary z chmurami zbudowanych z kropelek chmurowych oraz opadających kropeł opadowych. Kiedy rozchodzące się w atmosferze promienie słoneczne natrafią na opadającą krople deszczu, po dotarciu do jej powierzchni, ulegają częściowemu odbiciu, zgodnie z prawem odbicia oraz częściowemu załamaniu, zgodnie z prawem załamania. Promień świetlny ulega załamaniu dlatego że przechodzi z ośrodka mniej gęstego optycznie (powietrze) do ośrodka gęstszego optycznie (woda). Kiedy promień światła wnika do kropli przez górną jej powierzchnię, to kontynuuje swój ruch po linii prostej (zakładając, że właściwości optyczne kropli są jednorodne) tak długo, aż dotrze do granicy kropli, ale od jej wewnętrznej strony, gdzie ulega częściowemu wewnętrznemu odbiciu i częściowemu załamaniu. Intensywność promienia odbitego będzie mniejsza. Intensywność promienia odbitego i załamane go zależą będzie od kąta padania. Im mniejszy jest kąt padania tym większa jest intensywność promienia załamane go i mniejsza intensywność promienia odbitego. Po odbiciu, kierunek promienia się zmieni, ale ponownie światło będzie poruszało się po linii prostej, tak długo, aż dotrze do wewnętrznej krawędzi kropli. Wówczas promień światła ulegnie częściowemu załamaniu i częściowemu odbiciu. Załamany promień opuszcza krople z przedniej dolnej części kropli. Taki proces przebiega na wszystkich kroplach deszczowych. W efekcie końcowym obserwator podziwia piękny łuk tęczy, których charakteryzuje się piękną paletą barw.



Rozchodzenie się promienia w kropli.

Zagadkę kolorów tęczy wyjaśnił Izaak Newton. Za kolorystykę tęczy odpowiedzialne jest zjawisko dyspersji. Światło białe jest mieszaniną światła o różnej długości fali. Eksperymentalnie można sprawdzić

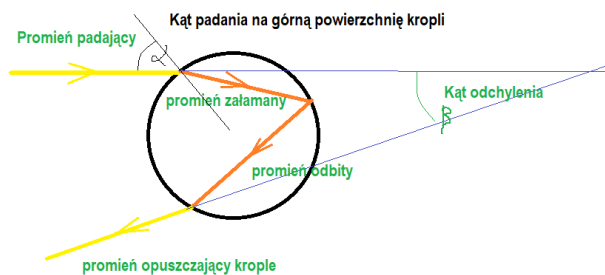
(oświetlając pryzmat wiązką światła białego otrzymuje się barwną smugę) a teoretycznie udowodnić, że współczynnik załamania światła jest zależny od długości fali. Im długość fali jest krótsza tym współczynnik załamania będzie większy. Zatem oświetlając krople światłem białym, podczas pierwszego i drugiego załamania promieni świetlnych nastąpi rozszczepienie. Światło fioletowe ulegnie załamaniu pod większym kątem w porównaniu ze światłem czerwonym.



Rozszczepienie światła. Źródło: Zbigniew Kamiński, Wincenty Kamiński, *Fizyka dla kandydatów na wyższe uczelnie techniczne*, PWN, 2018.

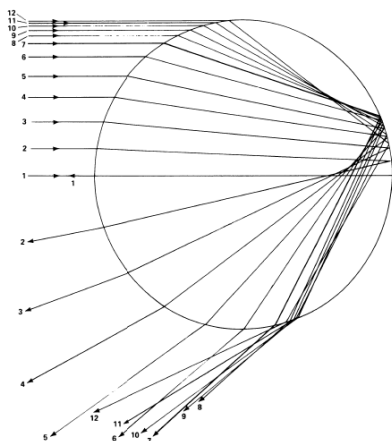
W rezultacie końcowym w łuku głównym tęczy od strony wewnętrznej występuje barwa fioletowa, zaś po zewnętrznej stronie łuku zaobserwujemy barwę czerwoną.

Obserwując tęcze, zauważymy, że rozmiary kątowe tęczy są za każdym razem takie same. W celu wyjaśnienia podążmy za Kartezjuszem, który podał teorię powstawania tęczy. Przeprowadźmy eksperyment polegający na oświetleniu kropli przez wiązkę równoległych promieni świetlnych. Przeanalizujemy promienie świetlne które będą padać w różnych punktach na powierzchnię kropli (różny kąt padania α) oraz kąt β odchylenia promieni opuszczających kroplę w stosunku do kierunku promienia padającego.



Rozchodzenie się promienia w kropli z jednym wewnętrznym odbiciem.

Obserwując zmiany kąta odchylenia β podczas zwiększania kąta padania α , zauważymy, że dla pewnego kąta padania α_0 kąt odchylenia osiągnie wartość maksymalną. Przy dalszym zwiększaniu kąta padania kąt odchylenia zacznie maleć.

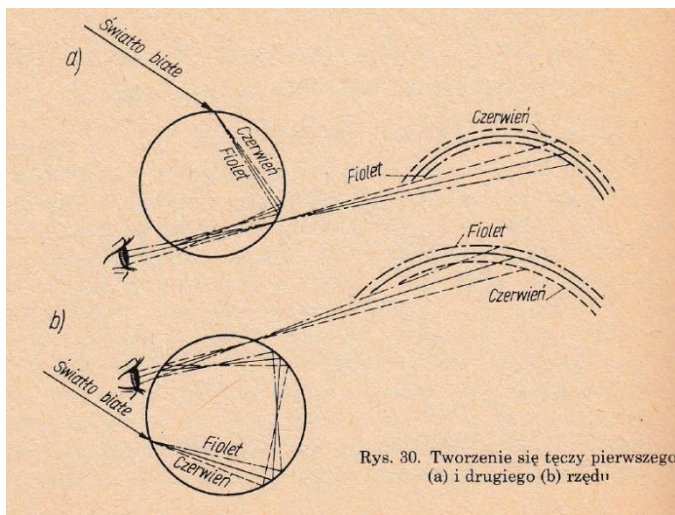


Drogi promieni świetlnych przechodzących przez kropkę wody. Źródło: Robert Greenler, *Rainbows, Halos and Glories*, Cambridge University Press, 1980.

Promień świetlny, dla którego osiągnąony jest maksymalny kąt odchylenia nazywany jest promieniem Kartezjusza [4]. Kiedy skupimy się na promieniach znajdujących się w pobliżu promienia Kartezjusza, to zauważymy, że niewielkie zmiany kąta padania, nie zmieniają zasadniczo wartości kąta odchylenia. Promienie słoneczne, które koncentrują się wokół promienia Kartezjusza opuszczają kroplę praktycznie pod takim samym kątem wyjścia. Dla promieni skupionych wokół promienia Kartezjusza następują kumulacja promieni opuszczających kroplę, zwiększając tym samym jasność. Z obserwacji poczynionych przez Kartezjusza wynikało, że dla kąta z przedziału 40° - 42° (w zależności od barwy) występuje największa koncentracja promieni i to one są odpowiedzialne za powstawanie tęczy [4], którą obserwujemy. Szerokość kątowa kolorowego łuku tęczy głównej wynosi około $1,72^{\circ}$ [9]. Jeżeli na ich drodze znajdzie się oko człowieka wówczas obserwuje on piękną tęczę. Jeśli obserwator znajdzie się w innym miejscu tęczy tej nie będzie mógł obserwować.

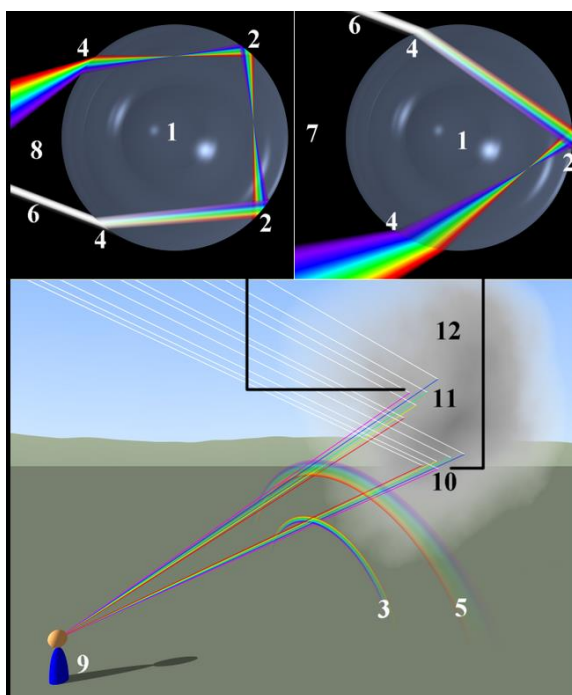
Kiedy pod rozwagę weźmie się cechy falowe światła to zauważyć można, że oprócz zjawiska załamania światła w kropelkach deszczu, światło ulega także ugięciu [7]. Kiedy przyjrzymy się fali padającej na kroplę deszczu, to zauważymy, że fala świetlna opuszczająca kroplę przestaje być falą płaską. Otrzymuje się zakrzywione czoła fali, które się przecinają. Ten obszar przecięcia odpowiada maksymalnemu kątowi odchylenia promienia. Przecięcia czoł określają kierunki występowania wiązek ugiętych. Zjawisko ugięcia bardzo komplikuje wygląd tęczy. Im rozmiary kropeł są mniejsze tym zjawisko dyfrakcji zaczyna być istotniejsze. Dlatego tęcza powstająca na małych kropelkach nie jest tak piękna jak tęcza powstająca na kropelkach opadowych chmur Cumulonimbus tuż po burzy.

Obserwując tęczę główną, każdy zauważył, że czasami towarzyszy jej łuk tęczy wtórnej, który charakteryzuje się mniejszą jasnością, odwróconym układem barw i większą szerokością samego łuku. Mechanizm fizyczny powstawania łuku wtórnego tęczy jest analogiczny. Rozchodzące się promienie słoneczne napotykając krople deszczu mogą wnikać do jej wnętrza przez górną powierzchnię lub przez dolną. Aby łuk wtórny mógł być obserwowany światło musi wnikać do kropli od dołu. Promienie docierając do powierzchni kropli od dołu, podobnie jak w poprzednim wypadku, częściowo ulegają odbiciu i częściowo się załamują. Promień słoneczny po załamaniu porusza się wewnątrz kropli, doznając tym razem nie jednego a dwa wewnętrzne odbicia. Promień docierając po raz trzeci do granicy kropli, od strony wewnętrznej, ulega częściowemu załamaniu i częściowemu odbiciu i wychodzi na zewnątrz z przedniej górnej części kropli.



Rys. 30. Tworzenie się tęczy pierwszego (a) i drugiego (b) rzędu

Źródło: W. Bułat, *Zjawiska optyczne w przyrodzie*, WSiP, 1978.



Źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/T%C4%99cza#/media/Plik:Rainbow_formation.png

Ze względu na przeciwny kierunek biegu promienia w kropli, w której występują dwa wewnętrzne odbicia, rozkład barw we wtórnym łuku tęczy jest odwrotny. Podczas pierwszego załamania światło ulega rozszczepieniu i otrzymuje się kolorową rozbieżną wiązkę. Podczas pierwszego i drugiego odbicia następuje kolejne rozszczepienie barw, barwna wiązka poszerza się. W rezultacie końcowym oko zarejestruje łuki tęczy wtórnej, które są szersze (mają większe rozmiary kątowe). Szerokość kątowa łuku tęczy wtórnej wynosi około $3,11^\circ$ [9]. Jak wspomniano wyżej w wypadku tęczy głównej dla kąta odchylenia 40° - 42° występowała największa koncentracja promieni. W wypadku łuku tęczy wtórnej koncentracja promieni wychodzących następuje dla kąta z przedziału 50° - 54° (w zależności od barwy). Podczas każdego załamania i odbicia wewnątrz kropli intensywność promieni zmniejsza się [9]. Zatem sumaryczna intensywność tęczy wtórnej jest mniejsza w porównaniu z jaskrawością tęczy głównej. Podczas powstawania łuku wtórnego tęczy efekty dyfrakcyjne również odgrywają rolę. Zjawiskiem ugięcia tłumaczy się występowanie ciemniejszego obszaru pomiędzy łukiem tęczy wtórnej oraz pierwotnej, nazywany pasem Aleksandra.



Łuk główny tęczy. Źródło: <https://cloudatlas.wmo.int/en/search-image-gallery.html>

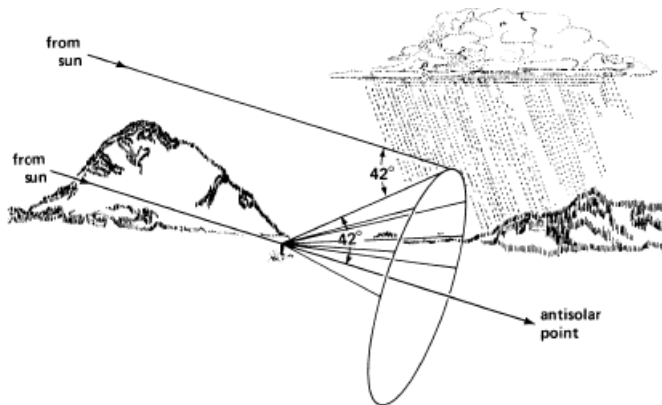


Łuk główny i wtórny tęczy. Źródło: <https://cloudatlas.wmo.int/en/search-image-gallery.html>

Gdzie znajduje się tęczę oraz jaki jest jej kształt

Chcąc odnaleźć tęczę obserwator powinien stanąć tyłem do Słońca i skierować wzrok w kierunku przeciwsłonecznym, który jest środkiem tęczy, a który wyznacza nam linia łącząca głowę z cieniem naszej głowy rzuconej na powierzchnię ziemi. Kiedy Słońce jest nad horyzontem punkt ten znajduje się pod horyzontem. Innym sposobem wyznaczenia środka tęczy jest linia dosłoneczna, czyli linia łącząca Słońce z okiem obserwatora. Kiedy obserwator poprowadzi promienie łączące oko obserwatora z punktami łuku tęczy, to okaże się, że linie te położone będą na powierzchni bocznej stożka o kącie rozwarcia $40^\circ - 42^\circ$ (w zależności od barwy), a sam wierzchołek tego stożka znajduje się w oku obserwatora. Pełen łuk tęczy głównej lub wtórej tworzy pełen okrąg. Obserwator

naziemny, znajdujący się na nizinach, może jedynie zaobserwować półokrąg. Będąc w górach można zaobserwować łuk o większych rozmiarach, a w sprzyjających warunkach nawet pełen okrąg.



Według konstrukcji Kartezjusza łuk powinien być okręgiem o promieniu kątowny 40-42 stopni utworzonym wokół punktu przeciwsłonecznego. Źródło: Robert Greenler, *Rainbows, Halos and Glories*, Cambridge University Press, 1980.



Tęcza zaobserwowana na szczycie góry Wendelstein, (wysokość szczytu 1838 m. n. p. m.). Źródło: <https://cloudatlas.wmo.int/en/search-image-gallery.html>

Warunki widzialności tęczy

Tęczę można obserwować, kiedy Słońce znajduje się na wysokości mniejszej niż 42° dla tęczy głównej i 54° dla tęczy wtórnej. W chwili wschodu Słońca punkt przeciwsłoneczny, czyli środek tęczy, znajduje się dokładnie na horyzoncie, a obserwator widzi barwny półokrąg tęczy. Wraz ze zwiększaniem się wysokości Słońca nad horyzontem, obserwator będzie podziwiał jedynie fragment łuku tęczy. Kiedy Słońce wzniesie się powyżej 42° łuk tęczy pierwotnej przestaje być widoczny, wówczas można obserwować jedynie fragment łuku tęczy wtórnej. Przy wysokości Słońca powyżej 54° obserwator nie ma możliwości obserwacji tęczy. Dlatego też w rejonach tropikalnych i umiarkowanych szerokości geograficznych w godzinach okołopołudniowych nie ma warunków do obserwacji tęczy [2]. Po kulminacji górnej Słońca, kiedy nasza dzienna gwiazda zaczyna się obniżać w kierunku horyzontu, obserwator najpierw będzie mógł obserwować łuk tęczy wtórej (najpierw pojawi się łuk fioletowy, a na końcu łuk czerwony) i następnie łuk tęczy głównej (obserwator najpierw zaobserwuje łuk czerwony a jako ostatni łuk fioletowy).

Natężenie światła docierającego do oka

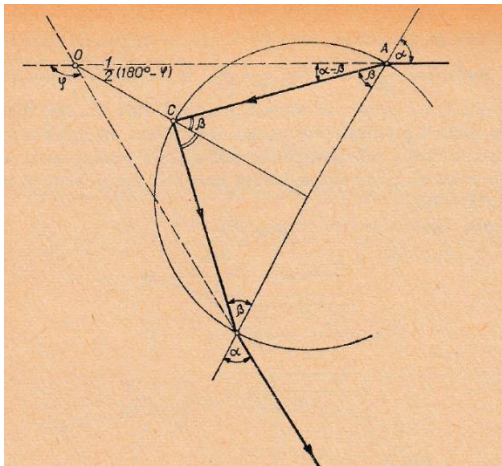
W celu przedyskutowania natężenia światła tęczy przeanalizujemy rozchodzenie się promienia świetlnego w kulistej kropelce deszczu. Niech promień światła pada na kropelkę pod kątem α . Z geometrii wynika, że promień światła, który opuszcza kropelkę będzie odchylony od pierwotnego kierunku o kąt:

$$\text{Kąt odchylenia promienia} = \pi - \varphi,$$

gdzie:

$$\varphi = \pi + 2\alpha - 4 \arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{n}\right),$$

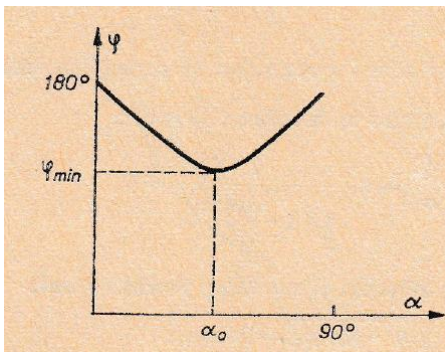
gdzie: n – względny współczynnik załamania wody względem powietrza.



Źródło: A. Szymacha, Olimpiady fizyczne XXV i XXVI, WSiP, 1980.

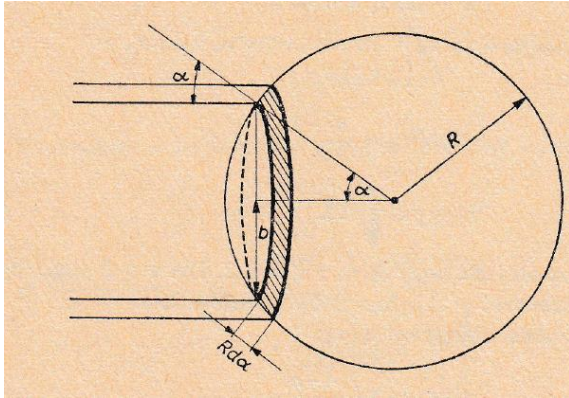
Tęczę tworzą promienie, które wychodzą pod kątem największym, czyli takie dla których kąt φ osiąga minimum:

$$\varphi_{min} = \pi + 2 \arcsin \sqrt{\frac{4 - n^2}{3}} - 4 \arcsin \sqrt{\frac{4 - n^2}{3n^2}}$$



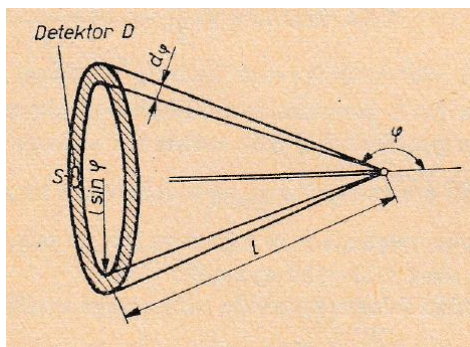
Zależność kąta φ w funkcji padania α promieni słonecznych na kulistą kropelkę. Źródło: A. Szymacha, Olimpiady fizyczne XXV i XXVI, WSiP, 1980.

Promienie padające pod kątem α na powierzchnię kropli o promieniu R tworzą na jej powierzchni okrąg o promieniu b [5].



Źródło: A. Szymacha, Olimpiady fizyczne XXV i XXVI, WSiP, 1980.

Promienie te ulegają odchyleniu o kąt φ i będą rozchodziły się po powierzchni bocznej stożka, którego kąt rozwarcia wynosi α , czyli dokładnie tyle co kąt padania promienia na powierzchnię kropli. Z punktu widzenia mechanizmu tęczy interesuje nas zbiór promieni znajdujących się w pobliżu promienia Kartezjusza, które padając na kroplę tworzą na jej powierzchni pierścień, dlatego promienie te opuszczając kroplę po jednym wewnętrznym odbiciu, będą poruszały się w obszarze wewnętrznym zawartym między dwoma stożkami, których kąt rozwarcia będzie się znajdował w przedziale zawartym między α a $\alpha+d\alpha$ lub $\varphi(\alpha)$ a $\varphi(\alpha+d\alpha)$ [5].



Źródło: A. Szymacha, Olimpiady fizyczne XXV i XXVI, WSiP, 1980.

Jeżeli przez I_0 oznaczymy natężeniem światła padającego to całkowita energia wiązki światła skupionego w pierścieniu wyniesie:

$$dI = 2\pi I_0 R^2 \sin \alpha \cos \alpha d\alpha$$

Promienie poruszają się wewnątrz stożków docierają do oka ludzkiego, w którym znajdują się wierzchołki tych stożków. Z anatomii wiadomo, że oko ludzkie nie stanowi punktu materialnego i posiada powierzchnię S . Ponadto niech kropla znajduje się w odległości h od oka. Do oka, o powierzchni S , dotrze tylko ułamek energii dI :

$$\text{ilość energii wpadającej do oka} = \frac{S}{2\pi h^2 \sin \varphi |\varphi|} dI$$

Ilość światła, która dociera do oka wynosi:

$$\text{ilość światła} = I_0 \frac{S R^2 \sin \alpha \cos \alpha}{h^2 \sin \varphi \left| \frac{d\varphi}{d\alpha} \right|}$$

Z prostej analizy wynika, że ilość energii wpadającej do oka osiąga maksimum, kiedy promienie maksymalnie się odchylają [5]:

$$(\text{Ilość światła})_{\text{maksimum}} = I_0 \frac{S}{h^2} \frac{R^2 \sin \alpha \cos \alpha}{\sin \varphi \left| \frac{d\varphi}{d\alpha} \right|_{\alpha=\alpha_0}}$$

Maksimum kąta odchylenia promienia otrzymuje się z warunku $\left| \frac{d\varphi}{d\alpha} \right|_{\alpha=\alpha_0} = 0$, co oznacza, że wartość natężenia światła docierającego do oka jest nieskończona. Dzięki efektom dyfrakcji wartość natężenie światła okazuje się skończona. Obserwator ma wrażenie, że światło ugięte na kroplach, dochodzi do jego oczu, z jednego kierunku określonego minimalną wartością kąta φ_{\min} [5] o czym pisano już wcześniej.

Dla łuku tęczy wtórnej wartość kąta φ wynosi:

$$\text{Kąt odchylenia promienia} = 2\pi + 2\alpha - 6 \arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{n}\right)$$

Maksymalna wartość kąta odchylenia jest osiągana dla kąta padanie α , którego wartość wynosi:

$$\cos \alpha = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{8}}$$

Analiza natężenia światła docierającego do ludzkiego oka jest analogiczna.

Tęcze wyższego rzędu

Według Kartezjusza możliwe są także trzy i większa liczba wewnętrznych odbić, skutkiem których będą tęcze wyższego rzędu. Tęcze trzeciego rzędu, która powstała w wyniku trzech wewnętrznych odbić, i rzędu czwartego, która powstała w wyniku czterech wewnętrznych odbić powinny być zlokalizowane z tyłu obserwatora zwróconego twarzą w kierunku tęczy głównej. W tym wypadku łuki tych tęcz zlokalizowane są dookoła Słońca [8]. Ponieważ natężenie światła pochodzące od tęczy wyższych rzędów jest coraz mniejsza, obserwator ma utrudnione zadanie w ich odnalezieniu. Kiedy pomiędzy obserwatorem a Słońcem znajdzie się chmura z opadającymi kroplami opadowymi to promienienie słoneczne ulegają załamaniu, ale nie następuje wewnętrzne odbicie. Obserwator widzi silnie podświetlone krople. Kiedy porównamy natężenie światła pochodzące od kropeł, w których nie nastąpiło wewnętrzne odbicie w porównaniu z natężeniem światła pochodzącego od tęczy trzeciego i czwartego rzędu to okazuje się, że jest ono znacznie większe co powoduje, że obserwator nie będzie ich widział. Tęcza piątego rzędu wymaga, aby w kropli nastąpiło aż pięć wewnętrznych odbić. Łuk tęczy piątego rzędu powinien znajdować się między łukiem tęczy głównej i pierwotnej. Ponieważ, podczas każdego wewnętrznego odbicia następuje także częściowe załamanie. Natężenie promienia odbitego po każdorazowym odbiciu zmniejsza się. Skutkuje to tym, że jasność tęczy piątego rzędu jest na tyle mała, że nie można jej zaobserwować [8].

Rozmiary tęczy

Na pytanie jak długi jest łuk tęczy, trudno będzie udzielić odpowiedzi. Chcą określić rozmiary tęczy podaje się jej rozmiary kątowe. Dla tęczy głównej promień kątowy wewnętrznego łuku, o barwie fioletowej, wynosi $40^\circ 59'$, zaś dla łuku o barwie czerwonej wynosi $42^\circ 42'$. Dla tęczy wtórnej dla łuku wewnętrznego, o barwie czerwonej, rozmiary kątowe wynoszą $50^\circ 22'$, zaś dla łuku zewnętrznego fioletowego rozmiary kątowe wynoszą $53^\circ 29'$. Długość łuku tęczy jest wprost proporcjonalna do wysokości na jakiej znajduje się obserwator. Im wyżej znajdować się będzie obserwator, tym większy łuk będzie mógł obserwować. Jeżeli nie zmienimy wysokości punktu obserwacyjnego, to wraz ze wzrostem wysokości Słońca nad horyzontem, długość łuku będzie się zmniejszała. Zatem długość łuku jest odwrotnie proporcjonalna do wysokości Słońca nad horyzontem. Długość łuku będzie zwiększała wraz z oddalaniem się chmury opadowej od obserwatora, zatem rozmiar łuku jest wprost proporcjonalny do odległości chmury od obserwatora.

Czy dwój różni obserwatorzy obserwują tą samą tęczę?

Każdy obserwator widzi swoją własną tęczę, która powstaje na zbiorze kropelek znajdujących się na powierzchni bocznej stożka, którego wierzchołek znajduje się właśnie w oku obserwatora. Jest to zjawisko niepowtarzalne, zarezerwowane indywidualnie dla obserwatora [4].

Jasność tęczy

Kiedy obserwujemy tęczę, to zauważyć można, że jasność łuku nie jest jednakowa. Tęcza powstaje w wyniku oświetlenia opadających kropelek deszczu lub mżawki. Małe krople przyjmują kształt kulisty. Kiedy krople są większe wówczas przyjmuje one kształt „buleczki” [6].



Plate 12. Oscillating water drops of $a_0 = 3.5$ mm, freely suspended in the vertical air stream of a wind tunnel; observation is taken from below the drop's equator.

Zdeformowana kropla. H. R. Pruppacher, J. D. Klett, *Microphysics of Clouds and Precipitation*, Springer, 1996.

Stopień deformacji kropli będzie zależał od jej rozmiarów. Przekrój poprzeczny, w płaszczyźnie horyzontalnej, zdeformowanej kropli deszczu, stanowi koło. Przekrój zdeformowanej kropli w płaszczyźnie wertykalnej znacząco odbiega od okręgu. Kiedy promienie świetlne oświetlają krople deszczu znajdujące się tuż nad horyzontem, wówczas wkład do sumarycznej jasności łuku tęczy pochodzi od wszystkich kropelek. W wypadku górnego obszaru, ze względu na odstępstwo w przekroju od koła, nie każda kropla daje wkład do jasności. Kolory w górnej części są bardziej matowe i mniej wyraziste [8]. Skutkuje to tym, że górny obszar łuku tęczy charakteryzuje się mniejszą jasnością a dolny obszar większą [4].

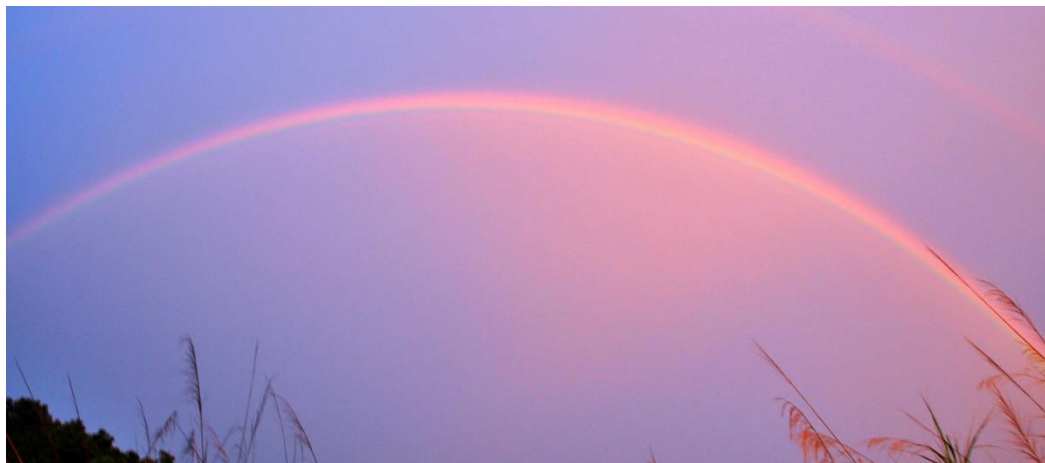
Biała tęcza

Jak wspomniano wyżej piękną jaskrawą tęczę obserwujemy, kiedy powstaje ona tuż po burzy na kroplach opadowych chmur Cumulonimbus lub Cumulus congestus. Kiedy zajrzemy do wnętrza chmur spostrzeżemy, że chmura zbudowana jest z kropelek, których rozmiary są duże. Kiedy rozmiary kropelek będą się zmniejszać wówczas, łuk staję tęczy będzie stawał się coraz bardziej rozmyty, barwy nie będą już tak wyraziste. Za poszerzenie łuku tęczy odpowiedzialne jest zjawisko dyfrakcji. Kiedy promienie światła padają na małe kropelki ulegają zjawisku dyfrakcji w wyniku, którego następuje poszerzenie łuku danej barwy. W następstwie nakładania się poszczególnych łuków barwnych na siebie dochodzi do powstania jednego szerokiego łuku, który w rezultacie końcowym będzie koloru białego.

Czerwona tęcza

Warunki konieczne do powstania tęczy koloru czerwonego jest nisko położone Słońce nad horyzontem oraz rozmiary kropelek opadowych muszą być małe. Kiedy Słońce znajduje się nisko nad horyzontem, światło musi

pokonać dłuższą drogą w porównaniu, kiedy znajduje się wysoko nad horyzontem. Światło o krótkiej długości fali rozprasza się bardziej od światła o długości dłużej. Skutkuje to tym, że zanim światło dotrze do kropelek to z jego widma zostanie „wycięta” część widma niebieskiego, w wyniku rozpraszania. Do kropeł zatem dociera światło, w którym dominuje kolor czerwony. Zatem obserwator kierując oczy w kierunku tęczy zaobserwuje szeroki łuk koloru czerwonego.



Czerwona tęcza. Źródło: <https://cloudatlas.wmo.int/en/search-image-gallery.html>

Ultrafioletowe oraz podczerwone tęcze

Tęcza, które na co dzień podziwiamy powstają przy udziale światła widzialnego. Widmo fal elektromagnetycznych w zakresie podczerwieni oraz ultrafioletu również mogą tworzyć łuki tęczy, które nie będą widoczne dla naszego oka. Tęcze takie można sfotografować wykorzystując odpowiednią aparaturę [4,8].



Tęcza w podczerwieni występująca w przyrodzie. Źródło: Robert Greenler, *Rainbows, Halos and Glories*, Cambridge University Press, 1980.

Tęcza a grzmot

Wygenerowana podczas przepływu ładunku elektrycznego w kanale błyskawicy fala akustyczna może oddziaływać na krople. Skutkiem oddziaływania mogą być oscylacje kropli co może wpływać na rozmazanie kolorów. Jeżeli w wyniku oddziaływania nastąpi zniekształcenie kropli to wówczas nastąpi zanik tęczy. W chmurze Cumulonimbus występują prądy wstępujące oraz zstępujące powietrza. Masy powietrza poruszają się z dużą prędkością. Krople chmury Cumulonimbus na ogół charakteryzują się większymi rozmiarami. Oddziaływanie powietrza z dużymi kroplami również może doprowadzić do ich deformacji lub nawet rozpadu i spowodować zanik rozmazanie kolorów lub zanik tęczy.

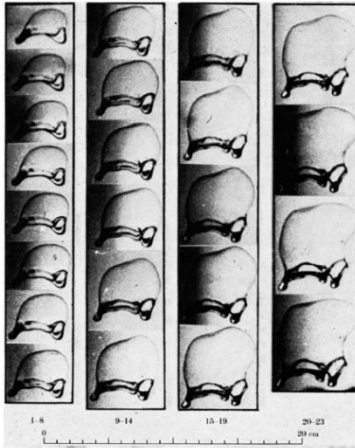


Fig. 8.16 A large falling water drop becomes unstable and forms an expanding bag supported on a toroidal ring of liquid. The bag eventually bursts, producing large numbers of small droplets, and the toroid breaks up into several large drops. The photographs are taken at intervals of 1 ms. From Mason (1971). Reproduced by permission of Oxford University Press.

Źródło: P. K. Wang. *Physics and Dynamics of Clouds and Precipitation*, Cambridge University Press, 2013.

Łuki nadliczbowe

Obserwując tęcze można zauważyć, że wewnątrz tęczy głównej pojawiają się dodatkowe łuki znajdujące się w jej wnętrzu. Jak pamiętamy padające, promienie słoneczne, znajdujące się w pobliżu promienia Kartezjusza wychodzą z kropli pod praktycznie tym samym kątem wyjścia. Im bardziej promienie padające będą oddalone od promienia Kartezjusza, tym pod mniejszym kątem wyjścia będą opuszczać krople. Wychodzące z kropli promienie światła, przebyły różne drogi optyczne, będą interferować. W zależności od różnicy ich dróg optycznych może nastąpić interferencja konstruktywna lub destruktywna. W efekcie obserwator będzie mógł obserwować wewnątrz łuku głównego dodatkowe łuki interferencyjne. Odległość między łukami interferencyjnymi uzależniona jest od rozmiarów kropli. Wraz ze zmniejszaniem się rozmiarów kropli maleje odstęp między łukami nadliczbowymi. Kiedy światło słoneczne pada na krople opadowe, które charakteryzują się różnymi rozmiarami wówczas powstające łuki interferencyjne nakładają się i zacierają się [4].



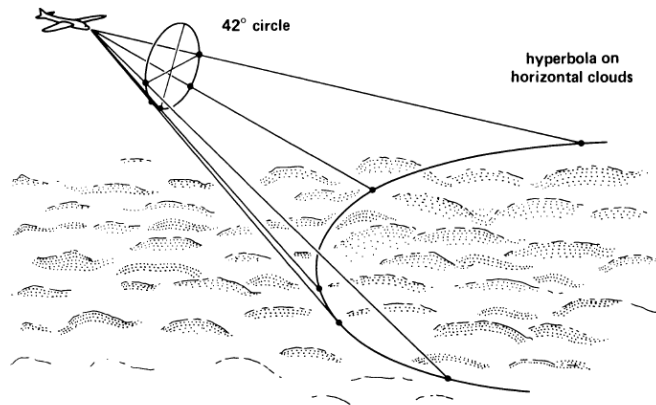
Łuki interferencyjne. Źródło: <https://cloudatlas.wmo.int/en/search-image-gallery.html>

Jaśniejszy obszar wewnątrz łuku głównego

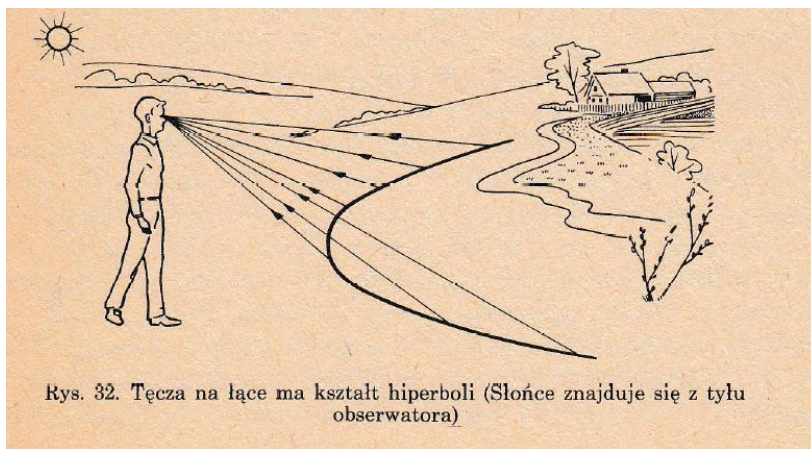
Łuk główny tęczy powstaje w wyniku sumowania się promieni słonecznych, które opuszczają krople pod maksymalnym kątem wyjścia. Dla pozostałym promieni słonecznych, oddalonych od promienia Kartezjusza, promienie słoneczne, wychodzą z kropli pod mniejszym kątem wyjścia. Oczywiście ich jasność nie sumuje się, ponieważ promienie opuszczające krople nie koncentrują się w wąskiej wiązce. Niemniej jednak ich obecność jest zaznaczona wewnątrz łuku głównego co obserwator widzi w postaci nieco jaśniejszego obszaru wewnątrz tęczy.

Tęcza na rosie oraz na poziomej warstwie chmur

Mechanizm powstawania tęczy na rosie jest taki sam jak w wypadku klasycznej tęczy. Różnica jest tylko taka, że zjawisko załamania i dyspersji nie zachodzi na kropkach opadowych a na kropkach rosy. Jest jednak jeden szczegół, który różnicuje oba rodzaje tęczy, a mianowicie jest to kształt. Tęcza na rosie przyjmuje kształt hiperboli. Podobne zjawisko obserwujemy podczas lotu samolotu, z tą małą różnicą, że tym razem zaobserwujemy białą tęczę. Spowodowane jest to tym, że na wierzchołkach chmur ciekłych, występują kropelki wody o bardzo małych rozmiarach. A jak już wspomniano wyżej w wypadku kropek małych rolę zaczyna odgrywać zjawisko dyfrakcji, skutkujące wystąpieniem białej tęczy. Kształt łuku białej tęczy zależy od wysokości Słońca. Kiedy Słońce znajduje się poniżej 42° , obserwator z samolotu zauważy łuk tęczy białej o kształcie hiperboli. Powyżej tej wysokości będzie mógł obserwować białą tęczę w kształcie elipsy. Kiedy Słońce znalazłoby się w zenicie wówczas obserwator z samolotu mógłby obserwować tęczę białą w kształcie okręgu. Jak wiemy, łuki tęczy powstają na opadających kropkach znajdujących się na powierzchni bocznej stożka z wierzchołkiem w „oku” obserwatora. Kiedy obserwujemy tęczę na powierzchni poziomej to jej kształt jest efektem przecięcia stożka z płaszczyzną, a jak pamiętamy z geometrii analitycznej, zbiór punktów otrzymanych w wyniku przecięcia stożka i płaszczyzny tworzy krzywą stożkową, czyli koło, elipsę, parabolę lub hiperbolę [2,4].



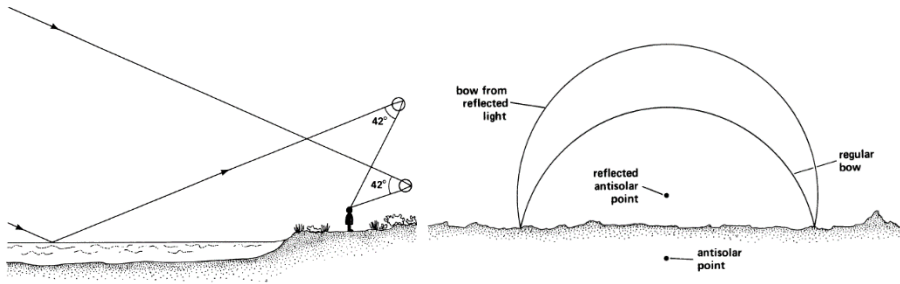
Tęcza na powierzchni górnej chmur. Źródło: Robert Greenler, *Rainbows, Halos and Glories*, Cambridge University Press, 1980.



Źródło: W. Bułat, *Zjawiska optyczne w przyrodzie*, WSiP, 1978.

Tęcze światła odbitego

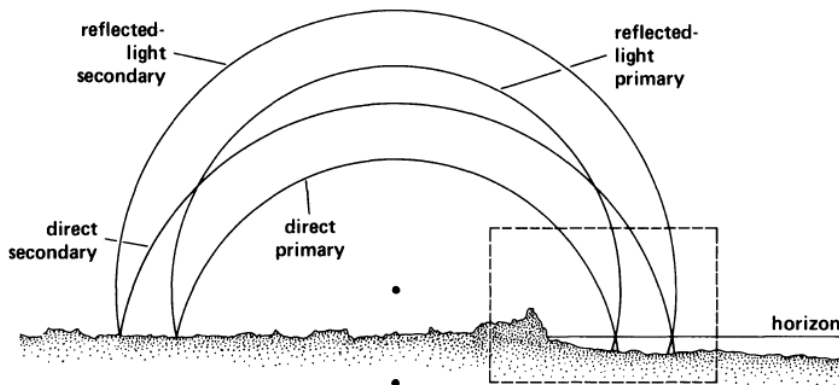
Niech obserwator znajduje się na wybrzeżu, a za plecami obserwatora znajduje się morze lub ocean nad którym, na pewnej wysokości znajduje się Słońce. Promienie słoneczne rozchodzą się we wszystkich kierunkach. Niektóre promienie przechodząc przez atmosferę oświetlać będą opadające krople opadowe na tle chmury. Inne promienie słoneczne rozchodząc się w atmosferze natrafiają na powierzchnię morza lub oceanu i jeżeli powierzchnia morza będzie spokojna, odbija się od niej. Promienie odbite będą przemieszczały się w atmosferze, aż w końcu na swej drodze mogą natrafić na zbiór kropeł deszczu. Należy tutaj podkreślić, że jest to zupełnie inny zbiór kropelek. W tym wypadku powstaną dwa łuki tęczy. Jeden punkt przeciwsłoneczny zalegać będzie pod horyzontem, zaś odbity punkt przeciwsłoneczny znajdować się będzie nad horyzontem. Obserwator będzie miał możliwość obserwacji dwóch łuków tęczy. Jedna stanowić będzie łukiem tradycyjnym a drugi będzie łukiem tęczy powstałej w wyniku odbicia promieni od powierzchni wody. Oba łuki będą miały dwa punkty wspólne znajdujące się na horyzoncie [4].



Powstawanie tęczy głównej oraz tęczy światła odbitego. Źródło: Robert Greenler, *Rainbows, Halos and Glories*, Cambridge University Press, 1980.



Tęcza światła odbitego. Źródło: <https://cloudatlas.wmo.int/en/search-image-gallery.html>



Tęcza główna i wtórna oraz główny i wtórny łuk tęczy światła odbitego. Źródło: Robert Greenler, *Rainbows, Halos and Glories*, Cambridge University Press, 1980.

Tęcza księżycowa

Promienie słoneczne odbite z powierzchni Księżyca również mogą oświetlać krople opadowe. Mechanizm fizyczny powstawania tęczy księżycowej jest taki sam. Jediną różnicą jest jej jaskrawość. Natężenie światła odbitego z powierzchni księżycowej jest znacząco mniejsze w porównaniu z natężeniem światła słonecznego. Skutkuje to tym, że jaskrawość tęczy jest mała. Rozróżnienie kolorów tęczy na tle czarnego nieba jest utrudnione. Obserwujący tęcze księżycowe twierdzą, że jest to tęcza biała, co jednak nie ma uzasadnienia fizycznego. Białość tęczy księżycowej można tłumaczyć efektami fizjologicznymi.

Literatura

1. Międzynarodowy Atlas Chmur – Atlas skrócony, IMGW, 1987.
2. W. Bułat, *Zjawiska optyczne w przyrodzie*, WSiP, 1978.
3. A. A. Kokhanovsky, *Cloud Optics*, Springer, 2006.
4. R. Greenler, *Rainbows, Halos and Glories*, Cambridge University Press, 1980.
5. A. Szymacha, *Olimpiady fizyczne XXV i XXVI*, WSiP, 1980
6. H. R. Pruppacher, J. D. Klett, *Microphysics of Clouds and Precipitation*, Springer, 1996.
7. Sz. Szczeniowski, *Fizyka doświadczalna, część IV, Optyka*, PWN, 1963.
8. J. Walker, *Latający cyrk fizyki*, PWN, 2018.
9. J. D. Walker, *Multiple Rainbows from single drops of water and other liquids*, Am. J. Phys. Vol. 44, No. 5, May 1976.