

Rys. 34.16. Przykład 34.3. a) Początkowo niespolaryzowane światło o natężeniu I_0 przechodzi przez układ złożony z trzech polaryzatorów. Na rysunku oznaczenia I_1, I_2, I_3 to natężenia światła po przejściu przez kolejne polaryzatory. Pokazano również polaryzację światła niespolaryzowanego wchodzącego do układu (b), oraz po przejściu przez kolejne polaryzatory (c-e)

Ostatecznie po przejściu przez układ trzech polaryzatorów światło jest spolaryzowane równoległe do osi x (rys. 34.16e). Jego natężenie znajdziemy, podstawiając do ostatniego równania najpierw I_2 , a następnie I_1 :

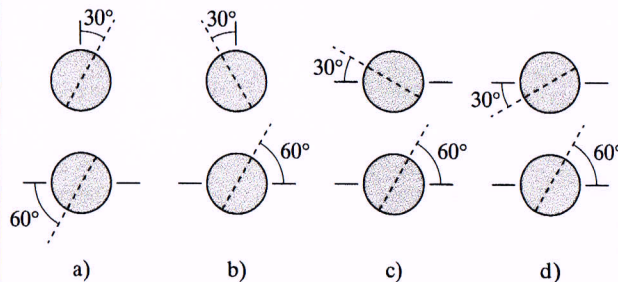
$$I_3 = I_2 \cos^2 30^\circ = (I_1 \cos^2 60^\circ) \cos^2 30^\circ = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 60^\circ \cos^2 30^\circ = 0,094 I_0.$$

Stąd

$$\frac{I_3}{I_0} = 0,094. \quad (\text{odpowiedź})$$

Jak widać, tylko 9,4% natężenia światła padającego na układ trzech polaryzatorów opuszcza ostatecznie ten układ. (A jakie byłoby natężenie światła wychodzącego z układu, gdybyśmy usunęli z niego drugi z polaryzatorów?)

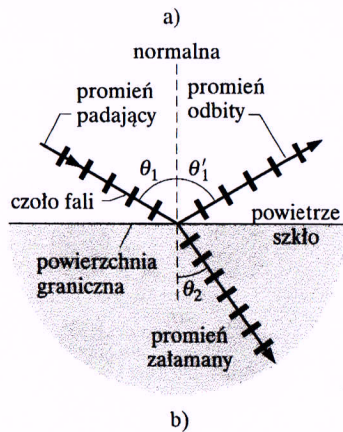
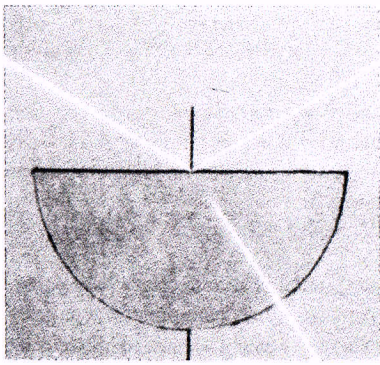
SPRAWDZIAN 4: Na rysunku pokazano cztery pary polaryzatorów (widziane od przodu). Każda para umieszczona jest na drodze światła niespolaryzowanego (tak jak układ trzech polaryzatorów z rys. 34.16a). Kierunek polaryzacji każdego polaryzatora (zaznaczony linią przerywaną) podany jest w odniesieniu albo do osi poziomej x , albo do osi pionowej y . Podaj kolejność par w porządku malejącego ułamka natężenia światła padającego, jaki jest przez nie przepuszczany.



34.7. Odbicie i załamanie

Chociaż światło wychodzące ze źródła rozchodzi się we wszystkich kierunkach, to możemy je często traktować tak, jak gdyby rozchodziło się ono po linii prostej; tak traktowaliśmy falę świetlną na rysunku 34.5a. Opisywanie właściwości fal świetlnych w ramach takiego przybliżenia to podstawa *optyki geometrycznej*. W rozdziale tym i w całym następnym rozdziale 35 będziemy się zajmowali optyką geometryczną światła widzialnego.

Na czarno-białej fotografii (rys. 34.17a) pokazano falę świetlną, która w przybliżeniu rozchodzi się wzdłuż linii prostych. Wąska wiązka światła (wiązka *padająca*) rozchodząca się w powietrzu na prawo w dół, dociera pod pewnym kątem do *płaskiej* powierzchni płytki szklanej. Część tej wiązki ulega **odbiciu** od powierzchni płytki, tworząc wiązkę odbitą skierowaną w prawo do góry. Pozostała część światła z wiązki padającej przechodzi przez powierzchnię płytki i rozchodzi się w szkło, tworząc wiązkę skierowaną na prawo w dół. Fakt, że światło może w ten sposób wnikać do szkła i rozchodzić się w nim, sprowadza się do stwierdzenia, że szkło jest *przezroczyste*; oznacza to, że możemy przez nie patrzeć. (W tym rozdziale będziemy zajmować się wyłącznie materiałami, albo inaczej *środkami przezroczystymi*).



Rys. 34.17. a) Czarno-biała fotografia ilustrująca odbicie i załamanie wiązki światła padającej na płaską, poziomą powierzchnię szklaną. (Początkowa część promienia załamane we wnętrzu szkła nie jest zbyt wyraźnie widoczna na tej fotografii). Na dolnej zakrzywionej powierzchni szklanej promień jest prostopadły do powierzchni i załamanie na tej powierzchni nie wywołuje odchylenia promienia. b) Szkic sytuacji z fotografii (a) przy użyciu promieni świetlnych. Na rysunku zaznaczono kąty: padania (θ_1), odbicia (θ'_1) i załamania (θ_2)

Zjawisko przechodzenia światła przez powierzchnię rozgraniczającą dwa różne ośrodki (albo inaczej przez *granicę ośrodków*) nazywamy **załamanie** (refrakcją) światła i mówimy, że światło uległo **załamaniu**. W wyniku załamania na granicy ośrodków zmienia się kierunek rozchodzenia się wiązki światła, z wyjątkiem sytuacji, kiedy wiązka pada na granicę ośrodków prostopadle. Z tego powodu mówi się o wiązce światła, iż ulega ona „odchyleniu” w wyniku załamania. Zauważmy, że odchylenie, jak to zilustrowano na rysunku 34.17 zachodzi tylko na granicy ośrodków; w szkłe wiązka rozchodzi się prostoliniowo.

Na rysunku 34.17b wiązki światła z fotografii (a) zostały przedstawione odpowiednio przez: *promień padający*, *promień odbity* i *promień załamany* (a także przez czoła fali). Kierunek promienia wyznaczamy względem prostej prostopadłej do powierzchni granicznej ośrodków w punkcie odbicia i załamania, tzn. względem *normalnej* do powierzchni. Jak to zilustrowano na rysunku 34.17b, wszystkie kąty, tzn. **kąt padania** θ_1 , **kąt odbicia** θ'_1 oraz **kąt załamania** θ_2 są mierzony względem *normalnej*. Płaszczyznę, która zawiera promień padający i normalną nazywamy *płaszczyzną padania*. Na rysunku 34.17b jest to płaszczyzna kartki.

Wyniki doświadczeń świadczą o tym, że zjawiskami odbicia i załamania rządzą dwa prawa:

Prawo odbicia: Promień odbity leży w płaszczyźnie padania, a kąt odbicia jest równy kątowi padania. Zgodnie z oznaczeniami przyjętymi na rysunku 34.17 oznacza to, że

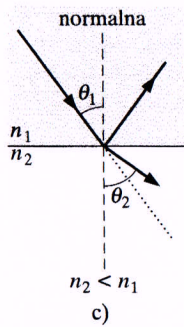
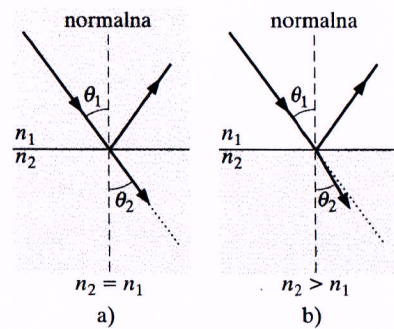
$$\theta'_1 = \theta_1 \quad (\text{odbicie}). \quad (34.43)$$

(Od tej pory będziemy na ogół opuszczać znak prim przy kącie odbicia).

Prawo załamania: Promień załamany leży w płaszczyźnie padania, a kąt załamania θ_2 jest związany z kątem padania θ_1 zależnością

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 \quad (\text{załamanie}). \quad (34.44)$$

Tutaj n_1 i n_2 są bezwymiarowymi stałymi nazywanymi **współczynnikami załamania światła** charakteryzującymi ośrodki, na których granicy zachodzi załamanie światła. Równanie (34.44) opisujące załamanie, znane jako prawo Snella



Rys. 34.18. Załamanie światła przy przejściu z ośrodka o współczynniku załamania światła n_1 do ośrodka o współczynniku załamania światła n_2 . a) Wiązka światła nie ulega odchyleniu, gdy $n_2 = n_1$; światło rozchodzi się wówczas bez odchylenia od pierwotnego kierunku (wzdłuż linii kropkowanej), zgodnego z kierunkiem promienia padającego. Wiązka załamuje się b) w kierunku do normalnej wtedy, gdy $n_2 > n_1$ i c) w kierunku od normalnej wtedy, gdy $n_2 < n_1$

wyprowadzimy
załamanie światła
światła w ośro
W tabeli 3
rych typowych
równy 1; dla
kiej przybliżo
światła mniejs
Tabe
ośro
589
próż
powi
wod.
acetu
alko
rozt
kwa
rozt
Przekszta
Jeżeli n_2
następuje
tak jak to
Jeżeli n_2
po załam
kierunku
rysunku
Jeżeli n_2
po załam
kierunku
rysunku
Załamanie ni
kierunku tak
promień pad.
Rozszczepi
Współczynni
leży od długi

wyprowadzimy w rozdziale 36. Przekonamy się wówczas, że współczynnik załamania światła dla każdego ośrodka jest równy c/v , gdzie v jest prędkością światła w ośrodku, a c jest prędkością światła w próżni.

W tabeli 34.1 podano współczynniki załamania światła dla próżni i niektórych typowych ośrodków optycznych. Dla próżni współczynnik załamania jest równy 1; dla powietrza jest on bardzo bliski 1 (często będziemy używali takiej przybliżonej wartości). Żadna substancja nie ma współczynnika załamania światła mniejszego od 1.

Tabela 34.1. Współczynniki załamania światła n dla wybranych ośrodków optycznych (dla żółtej linii D sodu o długości fali $\lambda = 589 \text{ nm}$)

Ośrodek	n	Ośrodek	n
próżnia	1 (ściśle)	szkło typowe (kron)	1,52
powietrze (0°C, 1 atm)	1,00029	chlorek sodu	1,54
woda (temp. 20°C)	1,33	polistyren	1,55
aceton	1,36	dwusiarczek węgla	1,63
alkohol etylowy	1,36	ciężkie szkło (flint)	1,65
roztwór cukru (30%)	1,38	szafir	1,77
kwarc topiony	1,46	bardzo ciężkie szkło	1,89
roztwór cukru (80%)	1,49	diamant	2,24

Przekształcenie równania (34.44) do postaci

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \quad (34.45)$$

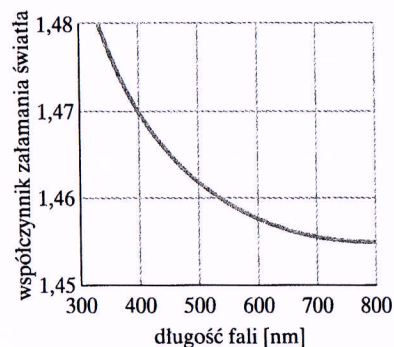
pozwala porównać kąt załamania θ_2 z kątem padania θ_1 . Jak widać, ich związek zależy od stosunku wartości n_1 i n_2 . Możliwe są trzy sytuacje:

1. Jeżeli n_2 jest równe n_1 , to θ_2 jest równe θ_1 . W takim przypadku załamanie nie następuje, promień nie zostaje odchyłony od swojego pierwotnego kierunku, tak jak to pokazano na rysunku 34.18a.
2. Jeżeli n_2 jest większe od n_1 , to θ_2 jest mniejsze od θ_1 . W takim przypadku po załamaniu promień jest odchyłany od swojego pierwotnego kierunku (od kierunku promienia padającego) w stronę do normalnej, tak jak pokazano na rysunku 34.18b.
3. Jeżeli n_2 jest mniejsze od n_1 , to θ_2 jest większe od θ_1 . W takim przypadku po załamaniu promień jest odchyłany od swojego pierwotnego kierunku (od kierunku promienia padającego) w stronę od normalnej, tak jak pokazano na rysunku 34.18c.

Załamanie nigdy *nie może* odchylić promienia załamanego od jego pierwotnego kierunku tak dalece, aby mógł się on znaleźć po tej samej stronie normalnej co promień padający.

Rozszczepienie światła

Współczynnik załamania światła n w każdym ośrodku, z wyjątkiem próżni, zależy od długości fali światła. Ta zależność n od długości fali oznacza, że pro-

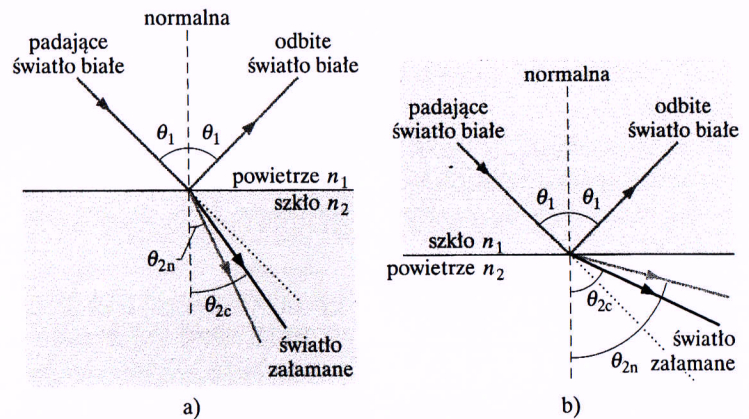


Rys. 34.19. Zależność współczynnika załamania światła od długości fali dla topionego kwarcu. Na wykresie pokazano, że światło o mniejszych długościach fali, dla którego współczynnik załamania światła jest większy, jest załamywane silniej przy wnikaniu lub wychodzeniu z kwarcu niż światło o większych długościach fali

mienie świetlne, którym odpowiadają różne długości fali, będą załamywane pod różnymi kątami na tej samej powierzchni granicznej dwóch ośrodków. Jeżeli zatem wiązka światła zawiera promienie o różnych długościach fali, to w wyniku załamania zostanie ona **rozszczepiona** (to zjawisko rozszczepienia nazywane jest *dyspersją chromatyczną*). W przypadku takiego załamania światła, jak zilustrowane na rysunkach 34.17 i 34.18, rozszczepienie nie występuje, ponieważ rozważane tam wiązki świetlne są *monochromatyczne (jednobarwne)*, tzn. tworzy je światło o jednej długości fali.

Na ogół współczynnik załamania światła dla danego ośrodka jest *większy* dla fal krótszych (np. odpowiadających światłu o barwie niebieskiej) niż dla fal dłuższych (np. dla światła czerwonego). Na rysunku 34.19 zilustrowano zależność współczynnika załamania światła od długości fali na przykładzie ośrodka optycznego, którym jest topiony kwarc. Taki przebieg tej zależności oznacza, że gdy wiązka światła składająca się z dwóch *składowych* — światła niebieskiego i światła czerwonego — jest załamywana na powierzchni rozgraniczającej powietrze od topionego kwarcu, wówczas składowa niebieska (promień świetlny odpowiadający fali światła niebieskiego) jest załamywana silniej niż składowa czerwona niezależnie od tego, czy światło przechodzi z powietrza do kwarcu, czy na odwrót.

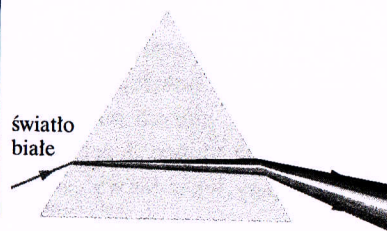
Na wiązkę *światła białego* składają się wszystkie (albo niemal wszystkie) barwy z zakresu widzialnego widma, z jednakowym w przybliżeniu natężeniem. Wiązkę taką widzimy jako białą bez wyróżnienia barw składowych. Na rysunku 34.20a wiązka światła białego pada od strony powietrza na powierzchnię graniczną powietrze-szkło. (Stronice tej książki są białe, zatem wiązka światła białego jest przedstawiana jako promień szary. Wiązki światła monochromatycznego są tu przedstawiane jako promień czerwony). W wiązce załamanej pokazane zostały tylko skrajne składowe wiązki światła białego — niebieska i czerwona. Składowa niebieska jest odchylana silniej, dlatego też jej kąt załamania θ_{2n} jest *mniejszy* niż kąt załamania składowej czerwonej θ_{2c} . (Przypominamy, że kąty załamania są mierzone względem normalnej do powierzchni granicznej). Na rysunku 34.20b wiązka światła białego pada od strony szkła na powierzchnię



Rys. 34.20. Rozszczepienie światła białego. Składowa niebieska jest załamywana silniej niż składowa czerwona. a) Przy przejściu z powietrza do szkła kąt załamania składowej niebieskiej jest mniejszy niż kąt załamania składowej czerwonej. b) Przy przejściu ze szkła do powietrza kąt załamania składowej niebieskiej jest większy niż składowej czerwonej



a)



b)

Rys. 34.21. a) Trójkątny pryzmat rozdzielający światło białe na barwy składowe. b) Rozszczepienie zachodzi na pierwszej powierzchni załamującej i jest zwiększane na drugiej powierzchni

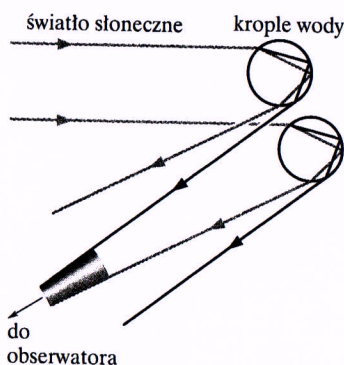
graniczną szkło–powietrze. I tym razem składowa niebieska jest odchylna silniej niż składowa czerwona, ale teraz kąt θ_{2n} jest większy od kąta θ_{2c} .

Rozdzielenie barw można zwiększyć, używając na przykład pryzmatu szklanego o trójkątnym przekroju poprzecznym, takiego jak na rysunku 34.21a. Rozszczepienie na pierwszej powierzchni załamującej (po lewej stronie na rys. 34.21a, b) zostaje następnie zwiększone przez rozszczepienie na drugiej powierzchni.

Chyba najbardziej zachwycającym przykładem rozszczepienia światła jest tęcza. Jeżeli na drodze promieni słonecznych pojawią się krople padającego deszczu, to część światła ulega załamaniu przy wnikaniu do kropli, a następnie odbija



a)



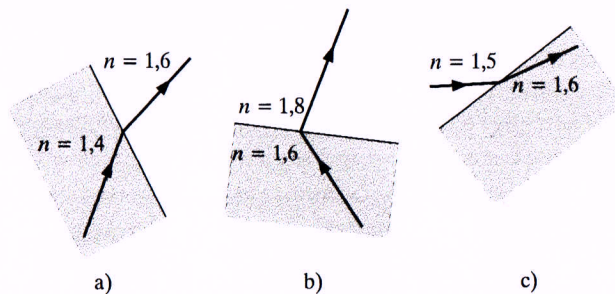
b)

Rys. 34.22. a) Tęcza ma zawsze kształt kolistej łuki utworzonego wokół kierunku, w którym patrzyłbyś wtedy, gdybyś spoglądał prosto od strony Słońca. W zwykłych warunkach ogląda się zazwyczaj tylko niezbyt długi fragment łuku, ale jeśli obserwację prowadzi się z wysokości, to można zaobserwować nawet pełen okrąg. b) Rozdzielanie barw w wyniku załamania światła przy wnikaniu i wychodzeniu z kropli deszczu prowadzi do powstania tęczy. Na rysunku zilustrowano sytuację, w której Słońce jest na horyzoncie (promienie słoneczne są wówczas poziome). Pokazane są kierunki promieni niebieskich i czerwonych z dwóch kropli. Na obserwowane promienie niebieskie i czerwone składa się załamanie światła w wielu innych kroplach (i to samo dotyczy innych barw pośrednich)

się od wewnętrznej powierzchni kropli i ulega kolejnemu załamaniu przy wyjściu z kropli (rys. 34.22). Tak jak w pryzmacie, pierwsze załamanie rozszczepia światło słoneczne na barwy składowe, a drugie załamanie zwiększa ich rozszczepienie.

Tęcza, którą oglądasz, jest utworzona przez światło załamane w bardzo wielu kroplach; barwa czerwona pochodzi z kropli, których położenie katowe na niebie jest wyższe, barwa niebieska — z kropli o nieco niższym położeniu katowym, a wszystkie barwy pośrednie między tymi dwiema skrajnymi barwami — z kropli o pośrednich położeniach katowych. Światło o różnych barwach dociera do Ciebie z kropli, których położenie katowe jest bliskie 42° po stronie dokładnie przeciwnej niż Słońce. Jeżeli opad jest intensywny i jasno oświetlony, to obserwujesz kolistą łuk z barwą czerwoną na górze i niebieską u dołu. Twoja tęcza jest zawsze osobista, ponieważ inny obserwator odbiera światło z innych kropli.

SPRAWDZIAN 5: Która (może żadna) z ilustracji zjawiska załamania pokazana na danych niżej rysunkach jest przypadkiem fizycznie możliwym?



Przykład 34.4

a) Na rysunku 34.23a wiązka światła monochromatycznego ulega odbiciu i załamaniu w punkcie A na powierzchni granicznej między ośrodkiem 1 o współczynniku załamania światła $n_1 = 1,33$ i ośrodkiem 2 o współczynniku $n_2 = 1,77$. Promień padający tworzy z powierzchnią graniczną kąt 50° . Jaki jest kąt odbicia w punkcie A? Jaki jest w tym punkcie kąt załamania?

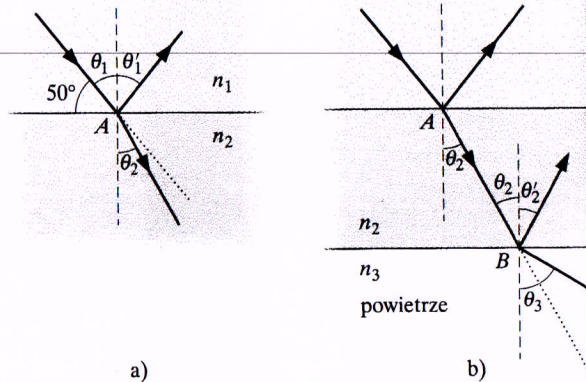
ROZWIĄZANIE:

Podstawowym spostrzeżeniem jest fakt, że przy każdym odbiciu kąt odbicia jest równy kątowi padania. Ponadto, kąty dla obu promieni (padającego i odbitego) są mierzone względem normalnej do powierzchni w punkcie odbicia. Na rysunku 34.23a normalna do powierzchni została narysowana linią przerywaną. Zauważ zatem, że kąt padania nie jest równy 50° , lecz wynosi $90^\circ - 50^\circ = 40^\circ$. Wobec tego kąt odbicia jest równy

$$\theta'_1 = \theta_1 = 40^\circ. \quad (\text{odpowiedź})$$

Światło, przechodząc w punkcie A z ośrodka 1 do ośrodka 2, ulega załamaniu. Przy rozważaniu załamania podstawową obserwacją jest fakt że kąt padania i kąt załamania można powiązać ze współczynnikami załamania światła obu ośrodków równaniem

$$(34.44) \quad n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1. \quad (34.46)$$



Rys. 34.23. Przykład 34.4. a) Światło odbija się i załamuje w punkcie A na powierzchni granicznej między dwoma ośrodkami 1 i 2. b) Światło, które przechodzi przez ośrodek 2, odbija się i załamuje w punkcie B na powierzchni granicznej między ośrodkami 2 i 3 (powietrze)

Tak jak poprzednio i w tym przypadku kąty między promieniami świetlnymi i normalną do powierzchni granicznej mierzymy w punkcie załamania. Kątem załamania na rysunku 34.23a jest kąt