

## Ćwiczenie nr 9

# Pomiar współczynnika załamania refraktometrem Abbego

### Wstęp teoretyczny:

#### 1.1 Zjawisko odbicia i załamania światła

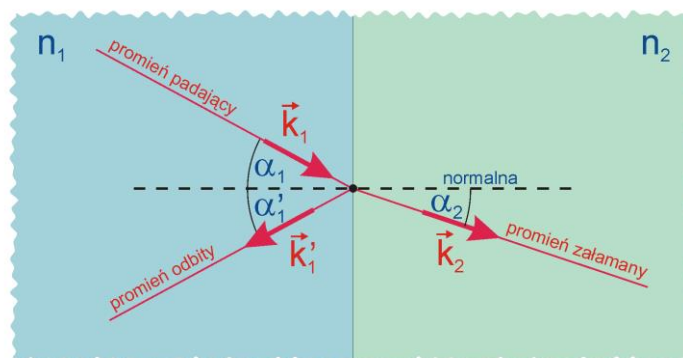
Monochromatyczna fala świetlna (fala elektromagnetyczna z zakresu długości od 340 nm do 780 nm) porusza się w ośrodku dielektrycznym z prędkością  $v$  mniejszą niż prędkość światła w próżni ( $c = 299792458$  m/s). Stosunek tych prędkości:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

wyznacza parametr ośrodka nazywany **współczynnikiem załamania  $n$** . Falę świetlną opisują też inne parametry, a mianowicie długość fali  $\lambda$ , częstość  $\omega$  oraz wektor falowy  $k$ , które powiązane są następującą relacją:

$$\omega = \frac{2\pi v}{\lambda} \quad |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad |\vec{k}| = \frac{\omega n}{c} \quad (2)$$

Gdy fala płaska rozchodząca się z prędkością  $v_1$  w ośrodku o współczynniku  $n_1$  (**fala padająca**) natrafi na granicę z innym ośrodkiem (o współczynniku załamania  $n_2$ ) ulegnie ona podziałowi na dwie fale płaskie, tzn., **falę odbitą** (poruszającą się z prędkością  $v_1$ ) i **falę załamaną** (poruszającą się z prędkości  $v_2$ ), co ilustruje rys. 1.



Rys. 1. Ilustracja zjawiska załamania i odbicia fali świetlnej na granicy dwóch dielektryków.

Na rys. 1 zaznaczono tzw. **normalną**, czyli prostą prostopadłą do granicy podziału dwóch ośrodków. Kąt pomiędzy wektorem falowym fali padającej a normalną nazywa się **kątem padania**  $\alpha_1$ , natomiast kąt pomiędzy wektorem falowym fali odbitej a normalną to **kąt odbicia**  $\alpha_1'$ . Kąt pomiędzy wektorem falowym fali załamanej a normalną to **kąt załamania**  $\alpha_2$ .

**Prawo odbicia** mówi, że kąt padania jest równy kątowi odbicia:

$$\alpha_1 = \alpha'_1 \quad (3)$$

a fala padająca, odbita i normalna leżą w jednej płaszczyźnie. Podczas odbicia zmienia się jedynie kierunek propagacji (dokładniej, zmienia się znak składowej normalnej wektora falowego), nie zmienia się wartość prędkości ani długość fali.

**Prawo załamania** mówi, że fala padająca, fala załamana i normalna leżą w jednej płaszczyźnie, a ponadto przy przejściu z jednego ośrodka do drugiego zachowuje się iloczyn kąta padania i współczynnika załamania:

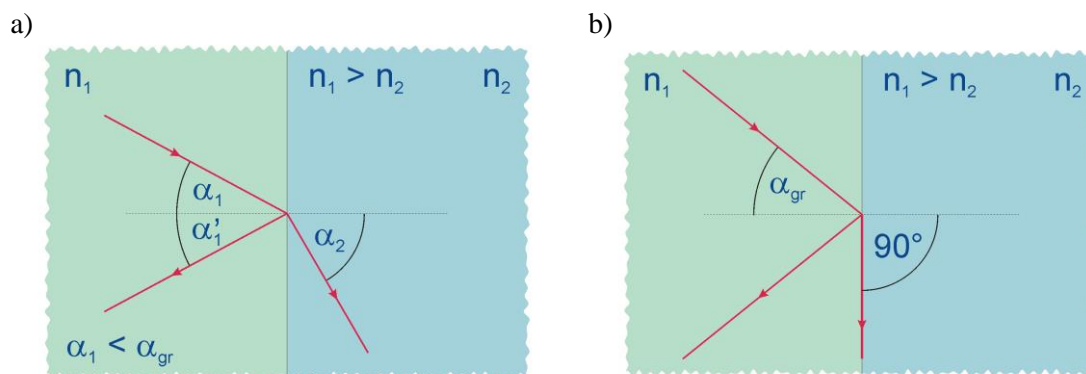
$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2. \quad (4)$$

Związek między kątem padania, kątem załamania a współczynnikami załamania ośrodków jest zależnością geometryczną, która wynika z równań Maxwella, a w szczególności z warunków ciągłości składowych stycznych natężenia pola elektrycznego i magnetycznego na granicy obu ośrodków

Odkrycie prawa odbicia i załamania przypisywane jest Willebrordowi Snellowi (1621r.) stąd też nazywane bywa **prawem Snella** lub **prawem Selliusa**.

### 1.2 Całkowite wewnętrzne odbicie

Gdy ośrodek, z którego pada fala świetlna ma współczynnik większy niż ośrodek, w którym propaguje fala załamana, kąt załamania jest większy niż kąt odbicia. Dzięki temu, jeżeli kąt padania będzie odpowiednio duży, kąt załamania zacznie zbliżać się do  $90^\circ$ . Gdy kąt padania osiągnie wartość graniczną ( $\alpha_{gr}$  - **kąt graniczny**) fala załamana będzie rozchodziła się pod kątem prostym do normalnej (rys. 2b).



Rys. 2. Ilustracja zjawiska załamania światła dla  $n_1 > n_2$  (a) i granicznego kąta padania (b).

Wzór opisujący prawo załamania przybiera dla granicznego kąta padania następującą postać:

$$n_1 \sin \alpha_{gr} = n_2 \sin 90^\circ \quad (5)$$

lub

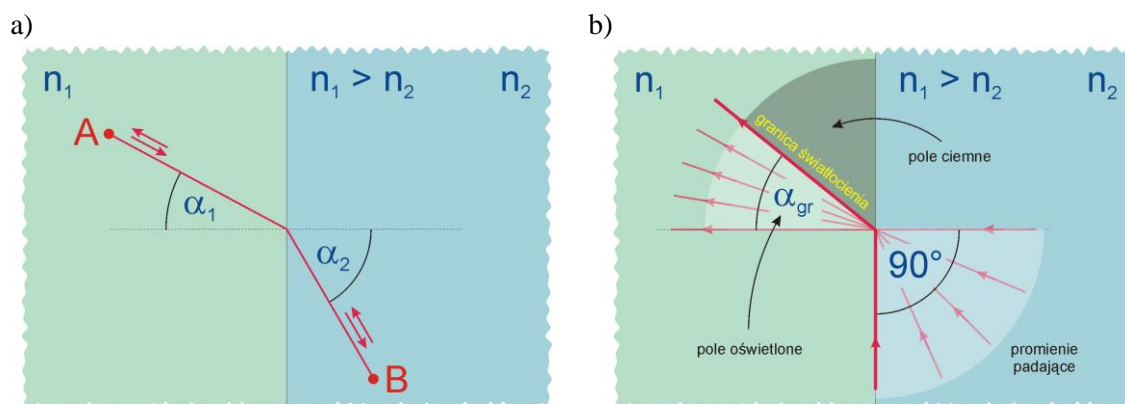
$$\sin \alpha_{gr} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (6)$$

Dla kątów padania mniejszych lub równych kątowi granicznemu obserwujemy zarówno falę załamaną jak i odbitą. Dla kątów większych niż kąt graniczny światło ulega tylko odbiciu i pozostaje „wewnątrz” pierwszego ośrodka, dlatego zjawisko to nosi nazwę **całkowitego wewnętrznego odbicia**.

### 1.3. Zasada działania refraktometru Abbego

#### a) pomiar współczynnika załamania metodą transmisyjną

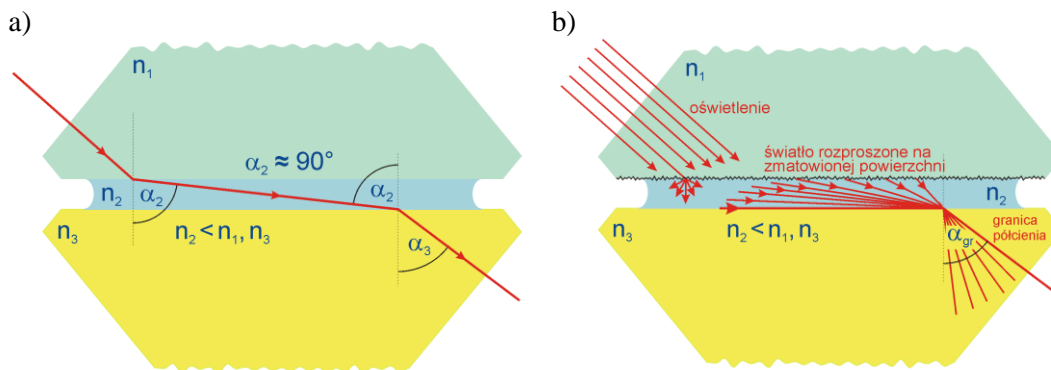
Załamanie światła jest zjawiskiem, które podlega zasadzie odwracalności – fala świetlna przebiega oba ośrodki po tej samej drodze także wtedy, gdy odwrócimy jej bieg (rys. 3a – droga z punktu A do B oraz z punktu B do A jest taka sama). Efekt ten wykorzystywany jest do pomiaru współczynnika załamania.



Rys. 3. Odwrócenie biegu światła przy przejściu przez granicę dwóch ośrodków (a). Powstawanie granicy światłocienia (b).

Rozpatrzmy sytuację, gdy bieg światła jest odwrócony względem tego, który przedstawiono na rys. 2. Światło padając pod wszystkimi możliwymi kątami od strony ośrodka drugiego  $n_2$  (o współczynniku załamania mniejszym niż  $n_1$ ), w ośrodku pierwszym będzie się rozchodzić pod kątem nie większym niż kąt graniczny. W efekcie, w pierwszym ośrodku utworzy się **granica światłocienia** (lub inaczej **linia graniczna**) rozdzielająca obszar oświetlony od obszaru ciemnego, której położenie wyznaczone jest przez graniczny kąt padania. Zilustrowano to na rys. 3b. Jeżeli zmierzy się kąt graniczny w pierwszym ośrodku oraz zna się jego współczynnik załamania  $n_1$ , to na podstawie wzoru (6) można wyznaczyć współczynnik załamania  $n_2$  drugiego ośrodka.

Rys. 4 przedstawia ideę pomiaru współczynnika załamania  $n_2$  cieczy w oparciu o obserwację położenia linii granicznej (granicy półcienia) w dolnym pryzmacie. Górny pryzmat w połączeniu z dolnym tworzą szczelinę, w której można rozprowadzić ciekłą warstewkę badanej cieczy. Powierzchnia górnego pryzmatu, która jest w kontakcie z cieczą pełni rolę ośrodka rozpraszającego i jest wykonana w taki sposób, aby promienie świetlne po rozproszeniu rozchodziły się w warstewce cieczy we wszystkich kierunkach (rys. 4b). Warunkiem wykonalności pomiaru jest oczywiście odpowiedni stosunek współczynników załamania dla poszczególnych ośrodków, tj. pryzmaty ( $n_1$ ,  $n_3$ ) muszą mieć współczynniki załamania większe niż badana ciecz ( $n_2$ ).

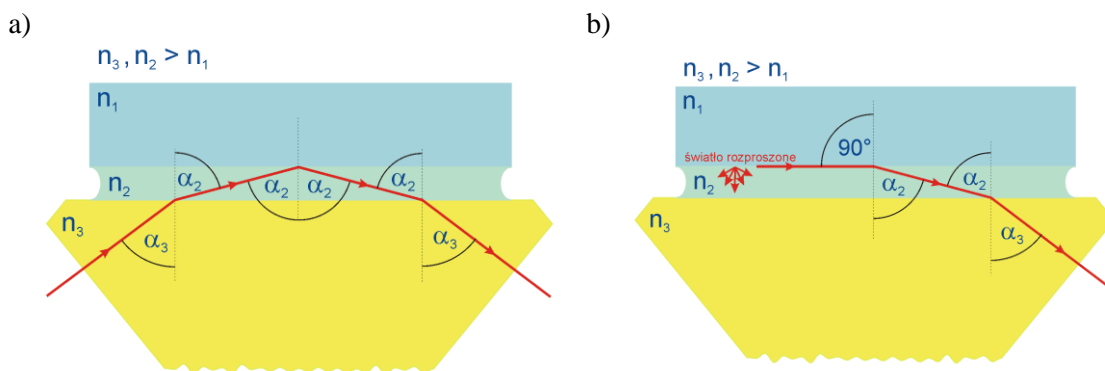


Rys. 4. Bieg fali świetlnej podczas pomiaru współczynnika załamania  $n_2$  cieczy umieszczonej pomiędzy dwoma pryzmatami (a). Rozproszenie światła na zmatowionej powierzchni kontaktowej górnego pryzmatu (b).

Jak wspomniano, ośrodek drugi ( $n_2$ ) umieszczony pomiędzy pryzmatami jest zazwyczaj warstwą cieczy, ponieważ w praktyce niezwykle trudno byłoby dopasować dwa (lub trzy) bloki szklane tak, aby pomiędzy nimi nie znalazło się powietrze. Jeżeli chcemy zmierzyć współczynnik załamania szkła, musimy wykorzystać inną technikę, czyli pomiar w świetle odbitym.

#### b) pomiar współczynnika załamania metodą odbiciową

Rys. 5 przedstawia sytuację, gdy górny pryzmat został zastąpiony blokiem szklanym, którego współczynnik załamania  $n_1$  chcemy zmierzyć, a ciecz pomiędzy badanym blokiem a dolnym pryzmatem dobrano tak, aby miała współczynnik załamania większy niż  $n_1$  (w naszych pomiarach będzie to monobromonaftalen o współczynniku załamania 1.6572). Współczynnik załamania dolnego pryzmatu  $n_3$  również musi być większy niż dla badanego bloku szklanego, nie jest natomiast istotne w jakim stosunku pozostają współczynniki załamania cieczy  $n_2$  i dolnego pryzmatu  $n_3$ .



Rys. 5. Bieg fali świetlnej podczas pomiaru współczynnika załamania pierwszego ośrodka metodą odbiciową (a). Bieg fali świetlnej przy oświetleniu od strony pierwszego ośrodka odpowiadającej katowi granicznemu.

Rys. 5 pozwala zrozumieć ideę pomiaru współczynnika załamania w świetle odbitym. Przedstawiono na nim sytuację, gdy fala świetlna porusza się w ośrodku o współczynniku załamania  $n_1$  pod kątem  $90^\circ$  do normalnej, dzięki czemu załamuje się w ośrodku o współczynniku  $n_2$  pod kątem  $\alpha_2$ , który jest kątem granicznym. Wartość tego kąta zależy od stosunku współczynników załamania  $n_1$  ośrodka pierwszego i  $n_2$  drugiego:

$$\sin \alpha_2 = \frac{n_1}{n_2}. \quad (7)$$

Następnie fala załamuje się w ośrodku o współczynniku załamania  $n_3$  pod kątem  $\alpha_3$ :

$$\frac{\sin \alpha_3}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_3}. \quad (8)$$

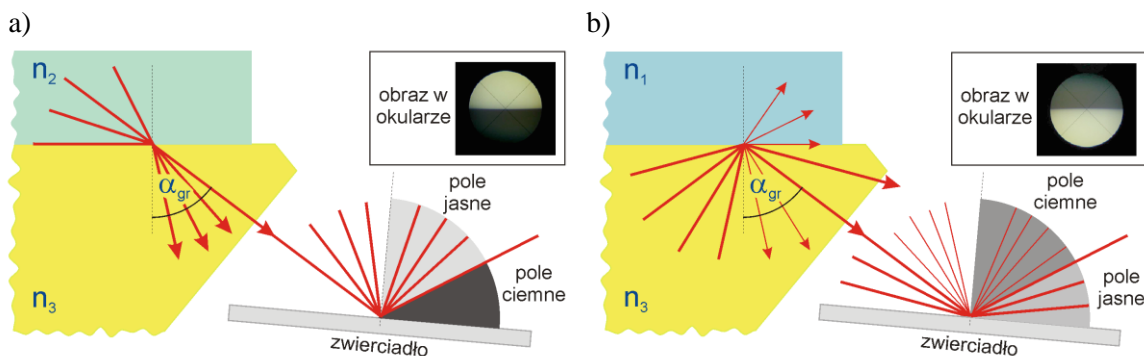
Jeżeli wyznaczymy z równania (7)  $\sin \alpha_2$  i postawimy do wzoru (8) otrzymamy zależność:

$$\sin \alpha_3 = \frac{n_1}{n_3}, \quad (9)$$

która mówi, że kąt graniczny dla układu trzech warstw o różnych współczynnikach załamania nie zależy od współczynnika załamania środkowej warstwy. Dzięki temu pomiar kąt granicznego  $\alpha_3$  umożliwia wyznaczenie współczynnika załamania bloku szklanego  $n_1$ .

Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na różnicę pomiędzy granicą światłocienia obserwowaną podczas pomiaru w świetle przechodzącym, a tą powstającą w świetle odbitym. Refraktometr Abbego skonstruowany jest tak, że pod dolnym pryzmatem znajduje się zwierciadło (lub pryzmat dachowy pełniący taką samą rolę jak zwierciadło) łamiący bieg wiązki, co ułatwia obserwację granicy światłocienia.

Na rys. 6a przedstawiono schematyczny sposób powstawania granicy światłocienia w metodzie transmisyjnej, w której światło pada od strony warstwy cieczy o współczynniku załamania  $n_2$ .



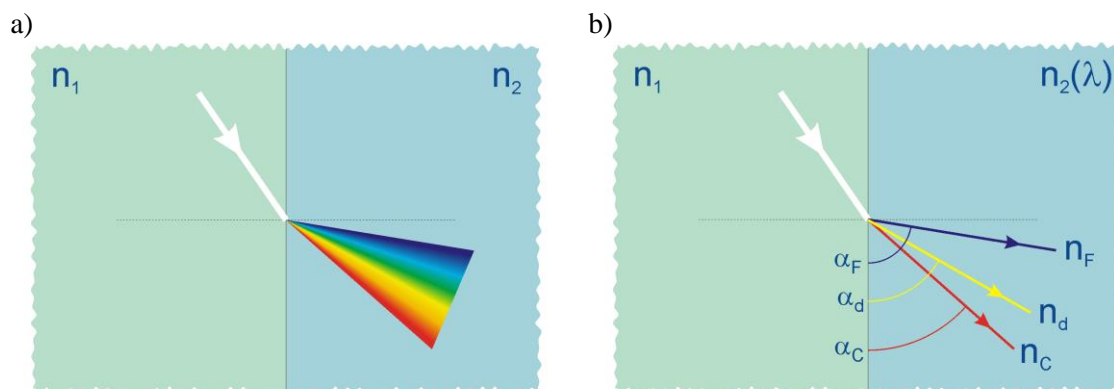
Rys. 6. Zasada powstawania granicy światłocienia w metodzie transmisyjnej (a) i odbiciowej (b).

Jak wyjaśniono w podpunkcie a), światło pada na dolny pryzmat pod wszystkimi możliwymi kątami, ale załamuje się w nim pod kątem nie przekraczającym kąta granicznego. Po opuszczeniu pryzmatu (na rysunku dla uproszczenia pominięto załamanie na granicy pryzmat-powietrze) fale świetlne odbijają się od zwierciadła, przy czym granicznemu kierunkowi propagacji odpowiada największy kąt padania na zwierciadło. W efekcie, po odbiciu od zwierciadła w okularze refraktometru obserwujemy zaciemnienie w dolnej części pola widzenia i rozjaśnienie w części górnej.

Powstawanie granicy światłocienia w metodzie odbiciowej jest nieco bardziej skomplikowane. Fale świetlne padają od strony dolnego pryzmatu pod różnymi kątami i odbijają się od granicy ośrodków o współczynnikach załamania  $n_1$  i  $n_3$  (dla uproszczenia pominięto tu ciecz znajdującą się pomiędzy blokiem szklanym i pryzmatem). Jeżeli kąt padania jest mniejszy niż kąt graniczny, to fala ta ulega podziałowi na falę załamaną propagującą w bloku szklanym i falę odbitą pozostającą w dolnym pryzmacie – zmniejszeniu ulega zatem natężenie światła odbitego. Dla fal padających pod kątem większym od granicznego mamy do czynienia z całkowitym wewnętrznym odbiciem. Współczynnik odbicia jest wtedy równy 100%. W konsekwencji fale odbite opuszczają dolny pryzmat pod wszystkimi możliwymi kątami, jednak natężenie fal odbitych pod kątem mniejszym niż kąt graniczny jest mniejsze niż natężenie fal odbitych w wyniku zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia. W efekcie także w tym przypadku obserwujemy granicę światłocienia, jednakże kontrast pomiędzy polem jasnym a polem ciemnym jest znacznie mniejszy niż podczas pomiaru w świetle przechodzącym. Dodatkowo, ze względu na odbicie od zwierciadła, obserwujemy w okularze refraktometru inny obraz niż dla światła przechodzącego. W tym przypadku jasny obszar znajduje się w dolnej części pola widzenia, a obszar ciemny w górnej.

#### 1.4 Zjawisko dyspersji

W poprzednich punktach poczynione zostało założenie, że rozpatrywana fala świetlna jest falą monochromatyczną. Pomiaru dokonujemy jednak dla światła białego, które w swoim spektrum zawiera wiele długości fal z zakresu 340nm – 780nm. Światło takie padając na granicę dwóch ośrodków ulega rozszczepieniu, jak pokazano to rys. 7a.

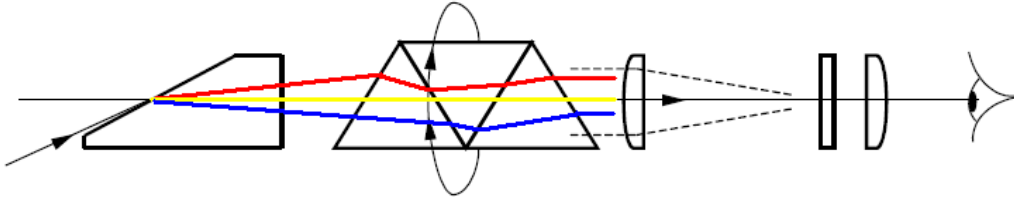


Rys. 7. Rozszczepienie światła białego podczas załamania spowodowane dyspersją chromatyczną współczynnika załamania (a). Ugięcie fal o różnych długościach fali (b).

Rozszczepienia polega na załamaniu fal o różnych długościach fali pod różnymi kątami. Dzieje się tak ponieważ współczynnik załamania materiałów dielektrycznych zmienia się w zależności od długości fali, co pokazano to schematycznie na rys. 7b. Ta własność nosi nazwę **dyspersji chromatycznej** lub **materiałowej**.



Wiązka światła białego po przejściu przez cały układ optyczny refraktometru ulega rozszczepieniu w każdym z jego elementów składowych (pryzmaty, badany materiał itp.). W rezultacie, w okularze refraktometru zamiast ostrej granicy światłocienia obserwujemy wielobarwną nieostrą linię. Aby zlikwidować to zjawisko stosuje się tzw. **podwójny pryzmat Amiciego**.



Rys. 8. Kompensacja odchylenia promieni o różnych barwach (różnych długościach fali) poprzez obrót podwójnego pryzmatu Amiciego.

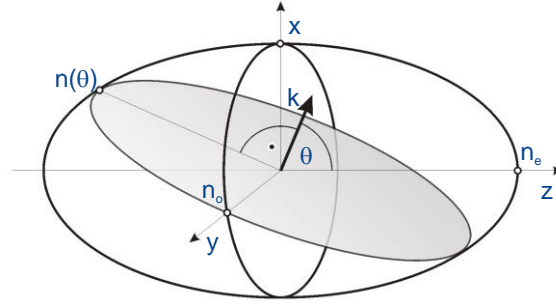
Pryzmat ten jest tak skonstruowany, że dla długość fali  $\lambda_D = 589.2\text{nm}$  (jest to długość fali żółtej linii sodu) prowadzi wiązkę świetlną bez zmiany jej kierunku, natomiast wiązki o innych długościach fali ulegają odchyleniu. Taki pryzmat umieszczony przed okularzem refraktometru może skompensować (poprzez odpowiedni obrót wokół osi) odchylenie promieni wprowadzone przez wcześniejsze elementy układu, tak że po przejściu przez niego tworzą one wiązkę równoległą i mogą być skupione przez okular w ostrą linię graniczną. Konsekwencją zastosowania pryzmatu Amiciego jest to, że wszystkie zmierzone współczynniki załamania ( $n_D$ ) wyznaczone są dla długości fali  $\lambda_D$ . Aby określić jak bardzo dla danego materiału zmienia się współczynnik załamania przy zmianie długości fali wyznacza się, w oparciu o odczyt z podziałki kątowej obrotu pryzmatu kompensującego (szczegóły w instrukcji obsługi refraktometru), tzw. **współczynnik dyspersji** czyli różnicę pomiędzy współczynnikami załamania  $n_F$  i  $n_C$  (F oznacza długość fali niebieskiej linii fosforu  $\lambda_F = 486.1\text{nm}$ , C to długość fali czerwonej linii wodoru  $\lambda_C = 656.3\text{nm}$ ). Dzięki temu można wyznaczyć liczbę Abbego dla mierzonej próbki z zależności:

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}. \quad (10)$$

### 1.5 Pomiar dwójłomności w kryształach jednoosiowych przy pomocy refraktometru Abbego

W kryształach jednoosiowych (w tym przypadku będzie to kryształ kwarcu) zależność współczynnika załamania od kierunku rozchodzenia się **fali własnych** można wyznaczyć na podstawie **elipsoidy współczynników załamania**, która w układzie kanonicznym przyjmuje następującą postać (rys. 9a):

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1. \quad (11)$$



Rys. 9. Elipsoida współczynników załamania kryształu jednoosiowego; oś optyczna kryształu pokrywa się z osią z układu odniesienia. Przekrój głowy elipsoidy prostopadły do kierunku propagacji  $k$  pozwala wyznaczyć współczynniki załamania fali zwyczajnej  $n_o$  i nadzwyczajnej  $n(\theta)$ .

W takim przypadku oś  $z$  układu odniesienia wyznacza kierunek propagacji, dla którego nie obserwuje się rozdzielenia fali na zwyczajną i nadzwyczajną (nie obserwuje się zjawiska dwójłomności). Oś  $z$  nazywana jest **osią optyczną** kryształu. W każdym innym kierunku w kryształach jednoosiowych mogą rozchodzić się dwie spolaryzowane liniowo i ortogonalnie fale, nazywane **falą zwyczajną** i **falą nadzwyczajną**. Współczynnik załamania fali zwyczajnej nie zależy od kierunku propagacji i zawsze jest równy  $n_o$ . Współczynnik załamania fali nadzwyczajnej zależy od kierunku propagacji i dany jest równaniem

$$\frac{1}{n^2(\theta)} = \frac{1}{n_o^2} \cos^2(\theta) + \frac{1}{n_e^2} \sin^2(\theta). \quad (12)$$

gdzie  $\theta$  oznacza kąt jaki tworzy kierunek propagacji (wektor falowy) fali nadzwyczajnej z osią optyczną (rys. 9b). Na granicy ośrodka izotropowego (szkła) i kryształu, składowa styczna wektora falowego musi być ciągła, co oznacza, że zarówno fala zwyczajna jak i nadzwyczajna spełniają prawo załamania. Dla fali zwyczajnej przyjmuje ono dobrze znaną postać:

$$n_1^o \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2^o, \quad (13)$$

gdzie  $n_1^o$  oznacza współczynnik załamania fali zwyczajnej w kryształ,  $n_2$  jest współczynnikiem załamania drugiego ośrodka (izotropowego pryzmatu),  $\alpha_1$  jest kątem padania fali w kryształ,  $\alpha_2^o$  jest kątem załamania fali zwyczajnej pryzmacie. Dla fali nadzwyczajnej prawo załamania przyjmuje nieco bardziej złożoną postać:

$$n_1(\theta) \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2^e, \quad (14)$$

gdzie  $n_1(\theta)$  jest zależnym od kierunku współczynnikiem załamania fali nadzwyczajnej w kryształ (wzór 14),  $\theta$  jest kątem jaki tworzy wektor falowy załamanej fali nadzwyczajnej z osią optyczną kryształu, natomiast  $\alpha_2^e$  to kąt załamania fali nadzwyczajnej w ośrodku drugim, czyli izotropowym pryzmacie.

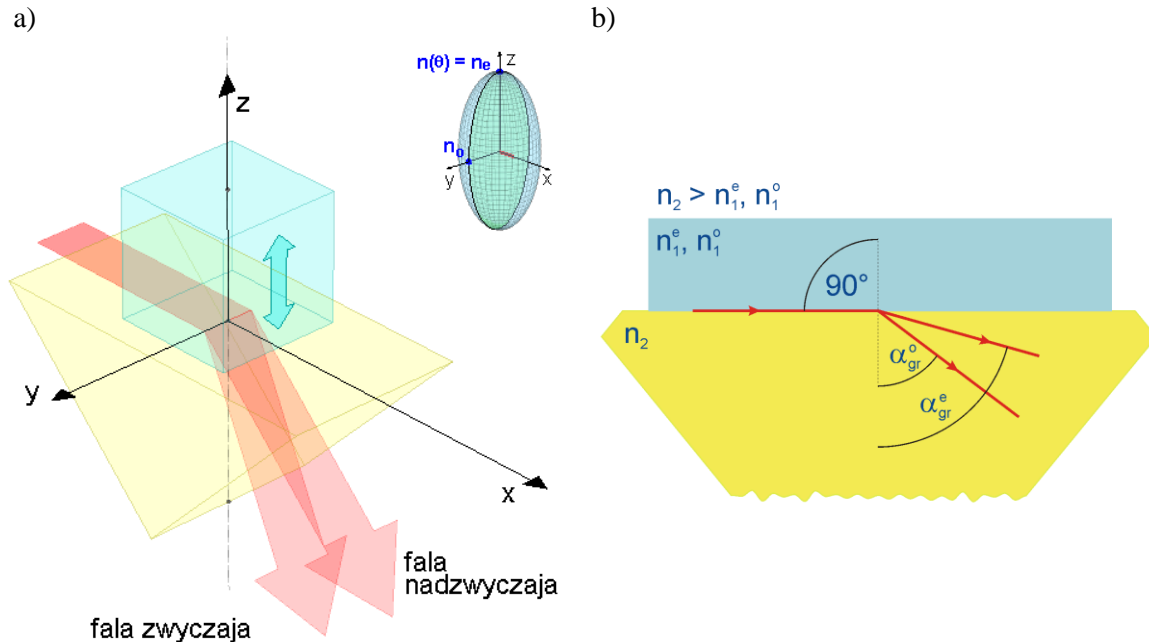


Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na to, że do pomiaru współczynników załamania kryształu stosujemy metodę odbiciową (przypadek ten został omówiony wcześniej w punkcie 1.2b), co komplikuje nieco tok rozumowania. W metodzie odbiciowej światło pada od strony dolnego pryzmatu wykonanego ze szkła izotropowego. Załóżmy teraz, że współczynnik załamania izotropowego pryzmatu jest większy od obu współczynników załamania kryształu,  $n_2 > n_1^o$  i  $n_2 > n_1^e$ . Powstawanie granicy półcienia jest w takiej sytuacji typowe dla metody odbiciowej. Zilustrowano to na rys. 10. Kąt graniczny łatwo wyznaczyć zakładając, że fala świetlna pada od strony kryształu dwójłomnego ślizgając się po granicy ośrodków. Taki promień załamie się w szkłe pod kątem granicznym, jednakże kąt ten będzie inny dla fali zwyczajnej  $\alpha_{gr}^o$  i nadzwyczajnej  $\alpha_{gr}^e$ :

$$n_1^o \sin(90^\circ) = n_2 \sin \alpha_{gr}^o. \quad (15 a)$$

$$n_1(\theta) \sin(90^\circ) = n_2 \sin \alpha_{gr}^e. \quad (15 b)$$

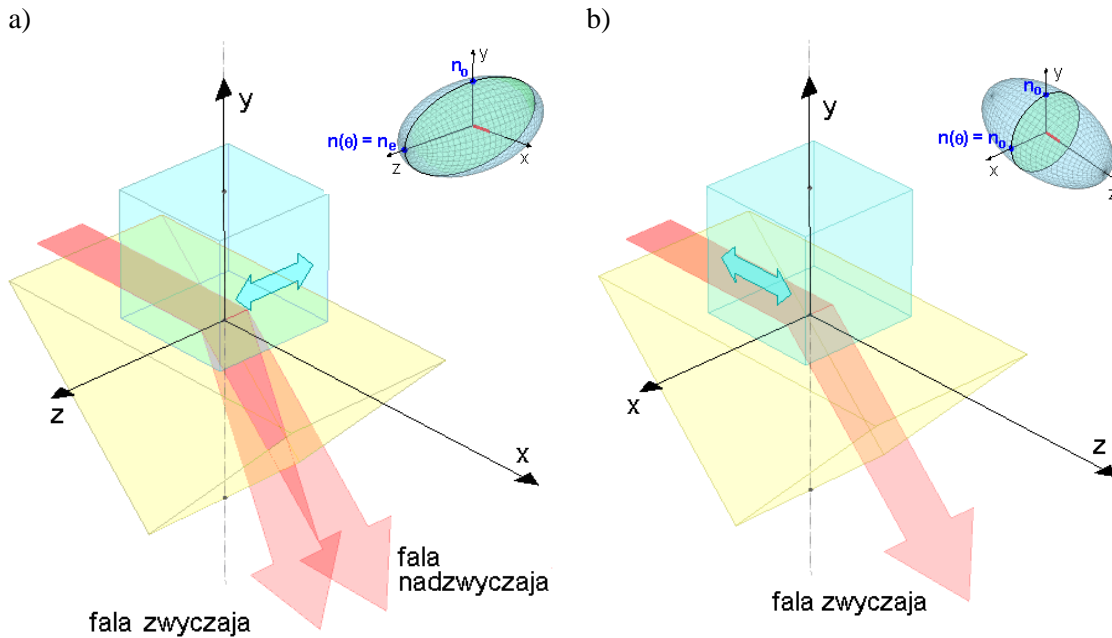
gdzie  $n(\theta)$  dane jest równaniem (12). Fale padające (od strony izotropowego pryzmatu) pod kątem większym niż kąt graniczny fali nadzwyczajnej ulegną całkowitemu wewnętrznemu odbiciu. Podobnie promienie padające pod kątem większym niż kąt graniczny fali nadzwyczajnej. Dla kątów padania mniejszych niż kąty graniczne fale padające ulegną podziałowi na fale odbite i załamane, co w efekcie spowoduje utworzenie podwójnej granicy światłocienia.



Rys. 10. Elipsoida współczynników załamania kryształu jednoosiowego; oś optyczna kryształu jest prostopadła do powierzchni pryzmatu (a). Rozdzielenie kąta granicznego spowodowane różnymi współczynnikami załamania fali zwyczajnej i nadzwyczajnej (b).

Celem tej części ćwiczenia jest wyznaczenie współczynników załamania  $n_o$  i  $n_e$  w prostopadłościenniej kostce kryształu kwarcu, w której oś optyczna jest równoległa do jednej z krawędzi. Jeśli kostka

ustawiona jest w taki sposób na pryzmacie refraktometru Abbego, że jest oś optyczna jest prostopadła do powierzchni pryzmatu (rys. 10), to w takim przypadku fale ślizgające się po powierzchni kryształu (dla granicznego kąta załamania) poruszają się w kierunku prostopadłym do osi optycznej. Współczynniki załamania dla fal propagujących w kierunku prostopadłym do osi optycznej równe są odpowiednio  $n_o$  dla fali zwyczajnej i  $n_e$  dla fali nadzwyczajnej. W konsekwencji zaobserwujemy rozdwojenie kąta granicznego w refraktometrze Abbego, co umożliwia bezpośredni pomiar  $n_o$  i  $n_e$ . Zauważmy, że obrót kostki na powierzchni pryzmatu wokół osi  $z$  nie wpływa wtedy na wynik pomiaru.



Rys. 11. Elipsoida współczynników załamania kryształu jednoosiowego; oś optyczna kryształu pokrywa się z osią  $z$  układu odniesienia (a). Zależność współczynnika załamania fali nadzwyczajnej od kierunku propagacji (b).

W przypadku, gdy oś optyczna kostki jest równoległa do powierzchni pryzmatu, jej kątowa orientacja ma istotne znaczenie. Jeśli oś optyczna jest prostopadła do płaszczyzny padania (rys. 11a), to mierzone współczynniki załamania odpowiadają  $n_o$  i  $n_e$ . Jeśli natomiast oś optyczna kostki jest równoległa do płaszczyzny padania (rys. 11b), to fala załamana poruszają się w kryształach w kierunku osi optycznej. Nie obserwujemy wtedy rozdwojenia kąta granicznego, a mierzony współczynnik załamania równy jest  $n_o$ . Zauważmy, że zmieniając kąt  $\theta$  jaki tworzy oś optyczna z płaszczyzną padania, można bezpośrednio wyznaczyć zależność współczynnika załamania fali nadzwyczajnej od kierunku propagacji  $n(\theta)$ .

## **Przebieg pomiarów i ich opracowanie:**

### *Cel ćwiczenia*

Ćwiczenie składa się z dwóch części. W pierwszej części bada się zależność współczynnika załamania roztworu wodnego gliceryny od jego stężenia. W drugiej części mierzy się współczynnik załamania ciał stałych – izotropowych płytek szklanych i dwójłomnego kryształu kwarcu.

### *Przebieg pomiarów i opracowanie wyników*

**Przed przystąpieniem do ćwiczeń należy zapoznać się z instrukcją obsługi refraktometru!!!**

#### *Część pierwsza*

1. Oczyszczyć przy pomocy denaturatu i ręcznika papierowego dolny i górny pryzmat refraktometru.
2. Nanieść 2-3 krople badanej cieczy, zamknąć górny pryzmat i zabezpieczyć przy pomocy odpowiedniego pokrętki (z lewej strony korpusu).
3. Przygotować refraktometr do pomiaru (szczegóły w instrukcji obsługi):
  - ustawić oświetlenie pryzmatu górnego oraz skali
  - ustawić ostry obraz linii granicznej poprzez obrót pokrętki dyspersji.
4. Wykonać pomiar współczynnika załamania  $n_D$ :
  - ustawić pokrętką pomiarową linię graniczną na środku krzyża pomiarowego
  - odczytać ze skali wartość współczynnika załamania
  - odczytać wskazanie pokrętki dyspersji (w Instrukcji do refraktometru pokazano jak wyznaczyć liczbę Abbego)
  - obrócić pokrętkę pomiarową o dowolny kąt i ponownie dokonać pomiaru
  - wyznaczyć średnią wartość współczynnika załamania na podstawie pięciu pomiarów,
  - w przypadku dużego rozrzutu wyników oszacować niepewność na podstawie średniej niepewności kwadratowej dla wartości średniej, dla małego rozrzutu wyników oszacować niepewność na podstawie dokładności przyrządu
  - w przypadku dużych wahań temperatury skorygować wyniki (instrukcja robocza).
5. Dla roztworu wodnego gliceryny:
  - powtórzyć kroki 1-4 dla znanych stężeń 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%
  - powtórzyć kroki 1-4 dla próbki o nieznanym stężeniu
  - nanieść na wykres zależności współczynnika załamania od stężenia wyniki pomiarów dla próbek o znanych stężeniach
  - przy pomocy regresji liniowej wyznaczyć współczynniki prostej opisującej liniową zależność współczynnika załamania od stężenia roztworu, nanieść na wykres słupki niepewności (zakładamy że niepewność wyznaczenia stężenia dla znanych próbek wynosi zero), wyznaczyć niepewności dla współczynników regresji
  - wyznaczyć stężenie nieznannej próbki.

#### *Część druga – pomiar współczynników załamania szkła i kryształu kwarcu*

1. Oczyszczyć przy pomocy denaturatu i ręcznika papierowego dolny pryzmat refraktometru oraz powierzchnie badanej próbki.

2. Nanieść 2-3 krople cieczy kontaktowej, górny pryzmat pozostaje odchylony podczas pomiaru, umieścić badaną próbkę (blok szklany lub kryształ) na dolnym pryzmacie.
3. Przygotować refraktometr do pomiaru (szczegóły w instrukcji obsługi):
  - ustawić oświetlenie pryzmatu **dolnego** oraz skali
  - ustawić ostry obraz linii granicznej poprzez obrót pokrętki dyspersji.
4. Wykonać pomiar współczynnika załamania  $n_D$ :
  - ustawić pokrętką pomiarową linię graniczną na środku krzyża pomiarowego
  - odczytać ze skali wartość współczynnika załamania
  - odczytać wskazanie pokrętki dyspersji (w Instrukcji do refraktometru pokazano jak wyznaczyć liczbę Abbego)
  - obrócić pokrętkę pomiarową o dowolny kąt i ponownie dokonać pomiaru
  - wyznaczyć średnią wartość współczynnika/współczynników załamania na podstawie pięciu pomiarów
  - w przypadku dużego rozrzutu wyników oszacować niepewność na podstawie średniej niepewności kwadratowej dla wartości średniej, dla małego rozrzutu wyników oszacować niepewność na podstawie dokładności przyrządu
  - w przypadku dużych wahań temperatury skorygować wyniki (instrukcja robocza)
  - Wyznaczyć liczbę Abbego (wzór 10).
5. Dla próbek izotropowych:
  - powtórzyć kroki 1-5
  - zamieścić wyniki w tabeli i porównać z danymi tablicowymi.
6. Dla próbki dwójłomnej:
  - na podstawie obserwacji rozdzielenia kąta granicznego wyznaczyć kierunek osi optycznej w badanej kostce kryształu kwarcu
  - wykonując kroki 1-5 zmierzyć zwyczajny i nadzwyczajny współczynnik załamania kryształu
  - określić znak kryształu
  - wyznaczyć zależność nadzwyczajnego współczynnika załamania od kierunku propagacji
  - wyniki zamieścić w tabelach i porównać z danymi tablicowymi.

#### Literatura

- [1] R. Poprawski, W. Salejda, Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki, Część 3, Wrocław 2000.  
[2] T. Rewaj, Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki w Politechnice, Warszawa 1978.  
[3] F. Ratajczyk, Dwójłomność i polaryzacja optyczna, Wrocław 2000.