

Nazwisko .....

Data .....

Nr na liście .....

Imię .....

Wydział .....

Dzień tyg. ....

Godzina .....

## Ćwiczenie 73

### Wyznaczanie stężenia roztworu cukru za pomocą polarymetru

---

Stężenie roztworu I		$d_1$	[g/dm <sup>3</sup> ]	
Rodzaj cieczy	Położenie analizatora [w stopniach]			Kąt skręcenia [w stopniach]
	Noniusz A	Noniusz B	Wartość średnia	
Woda destyl.			$\alpha_0 =$	X
$\alpha_{0i}$				
Roztwór I			$\alpha'_1 =$	$\alpha_1 =$
$\alpha'_{1i}$				
Roztwór II			$\alpha'_2 =$	$\alpha_2 =$
$\alpha'_{2i}$				
Długość rurki,		$l$	[dm]	
Zdolność skręcająca		$a$	$\left[ \frac{\text{stopień} \cdot \text{dm}^2}{\text{g}} \right]$	
Stężenie roztworu II		$d_2$	[g/dm <sup>3</sup> ]	

## Ćwiczenie 73. Wyznaczanie stężenia roztworu cukru za pomocą polarymetru

### Polaryzacja światła

Zjawiska dyfrakcji i interferencji wskazują na falową naturę światła, zjawisko polaryzacji światła świadczy, że są to fale poprzeczne. Zgodnie z elektromagnetyczną teorią, naturalne (niespolaryzowane) światło składa się z wielu grup fal elektromagnetycznych o długości od  $10^{-9}$  do  $10^{-3}$  m, przy czym oko ludzkie reaguje na fale w przedziale  $(0,38 \div 0,77) \cdot 10^{-6}$  m.

Falą elektromagnetyczną nazywamy zaburzenie (drżania) pola elektromagnetycznego, rozchodzące się w przestrzeni ze skończoną prędkością  $c$  (w próżni  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s), a ponieważ w każdym punkcie pola wektor natężenia pola elektrycznego  $\vec{E}$  i wektor indukcji magnetycznej  $\vec{B}$  są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fal, mamy do czynienia z falą poprzeczną.

Zmianę w czasie wartości natężenia pola elektrycznego  $\vec{E}$  wzdłuż kierunku  $x$  rozchodzenia się fali, której długość wynosi  $\lambda$ , wyraża równanie

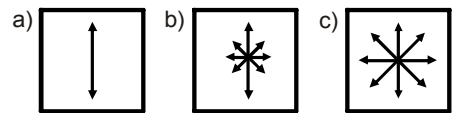
$$E = E_0 \sin \left[ 2\pi \left( \frac{ct - x}{\lambda} \right) + \delta \right],$$

przedstawione graficznie na rys. 1.

Podobne równanie można napisać dla wektora indukcji magnetycznej  $\vec{B}$ .

Jeżeli wektor elektryczny drga tylko w jednej płaszczyźnie, zwanej *plaszczyną drgań*, to światło jest *liniowo spolaryzowane*. Wektor magnetyczny  $\vec{B}$  drga wówczas w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny drgań wektora  $\vec{E}$ , zwanej *plaszczyną polaryzacji*. Ponieważ wiadomo, że to wektor elektryczny odpowiedzialny jest za wszystkie zjawiska optyczne i fotograficzne, dalej będziemy mówić tylko o drżaniach wektora elektrycznego.

Jeżeli światło spolaryzowane liniowo ma pewną składową wektora  $\vec{E}$  niespolaryzowaną, to mówimy, że jest ono częściowo spolaryzowane. Na rys. 2 pokazano drżania wektora elektrycznego, w płaszczyźnie  $(z, y)$  prostopadłej do kierunku rozchodzenia się światła: dla światła spolaryzowanego liniowo (a), częściowo spolaryzowanego (b) i niespolaryzowanego (c).



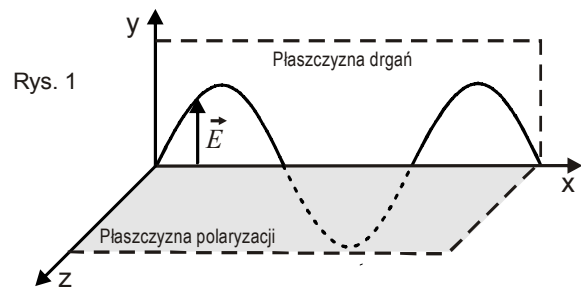
Rys. 2

Obserwujemy także *polaryzację kołową*, w której koniec wektora elektrycznego nie wykonuje drgań tam i z powrotem w płaszczyźnie, ale ma ustaloną wartość i zakreśla okrąg wokół kierunku rozchodzenia się. Najbardziej ogólnym przypadkiem polaryzacji jest *polaryzacja eliptyczna*, która określa wszystkie przypadki pośrednie pomiędzy polaryzacją kołową i liniową.

Światło naturalne jest niespolaryzowane, ponieważ stanowi superpozycję wielkiej liczby grup fal emitowanych przez pojedyncze atomy lub cząsteczki, których położenie jest zupełnie przypadkowe, zatem ułożenie płaszczyzn drgań poszczególnych grup fal jest również przypadkowe. Światło spolaryzowane można otrzymywać różnymi metodami. Wspomnijmy tutaj o polaryzacji światła przez odbicie, załamanie, selektywną absorpcję i podwójne załamanie.

### Polaryzacja przez odbicie i załamanie

Gdy wiązka światła pada np. na powierzchnię płyty szklanej, część wiązki wnika do wnętrza, a część zostaje odbita. Jeżeli światło padające jest światłem naturalnym, niespolaryzowanym, to okazuje się, że obie wiązki, odbita i załamana, stają się częściowo spolaryzowane. W roku 1812 Brewster stwierdził, że maksimum polaryzacji otrzymuje się wtedy, gdy wiązka odbita i załamana tworzą ze sobą kąt  $90^\circ$ .

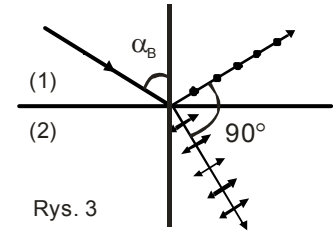


Z prawa odbicia i załamania światła można wyprowadzić, że zachodzi to, jeżeli kąt padania  $\alpha$  światła równy jest kątowi Brewstera  $\alpha_B$  spełniającemu warunek

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_{2,1};$$

$n_{2,1}$  — współczynnik załamania ośrodka 2 względem 1. Wartość kąta Brewstera wynosi około  $57^\circ$  przy odbiciu światła od powierzchni szkła ( $n \approx 1,5$ ) i  $53^\circ$  przy odbiciu światła od powierzchni wody ( $n \approx 1,33$ ).

Dla kąta  $\alpha = \alpha_B$  światło odbite jest całkowicie spolaryzowane (płaszczyzna drgań jest prostopadła do płaszczyzny padania), natomiast światło załamane jest częściowo spolaryzowane (płaszczyzna drgań jest równoległa do płaszczyzny padania, którą wyznaczają promień padający i odbity), rys. 3.



Rys. 3

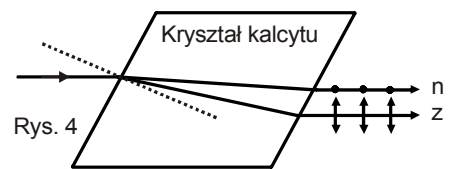
Polaryzację przez odbicie można wytłumaczyć następująco. Światło pobudza atomy materiału, na który pada i reemisja wywołana tymi drganiami jest właśnie światłem odbitym. Ale tylko drgania, które są prostopadłe do płaszczyzny padania mogą dawać swój wkład. Te, które leżą w płaszczyźnie padania, nie mają składowych poprzecznych do kierunku obserwacji i dlatego nie mogą być emitowane w tym kierunku.

Polaryzacja może zachodzić także przy odbiciu od powierzchni jezdni, powodując jej błyszczenie. Taki blask można wyeliminować używając okularów polaryzacyjnych, których płaszczyzna transmisji jest pionowa.

### Polaryzacja przez podwójne załamanie

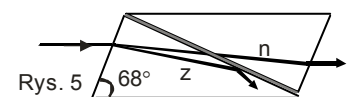
Narysujmy czarną kropkę na kartce papieru i połóżmy na nią kryształ kalcytu ( $\text{CaCO}_3$ ). Patrząc w dół przez kryształ, zamiast jednej zobaczymy dwie kropki. Przy obracaniu kryształu jeden z obrazów pozostaje nieruchomy, natomiast drugi obraca się wokół niego. Pierwszy obraz jest utworzony przez wychodzący z kryształu *promień zwyczajny*, a drugi przez tzw. *promień nadzwyczajny*. W ten sposób odkryto zjawisko *podwójnego załamania* (*dwójłomności*) kryształów kalcytu. Następnie stwierdzono, że oba promienie są spolaryzowane liniowo w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych. Wiele kryształów, takich jak turmalin, kwarc, mika, cukier czy lód wykazują również taki efekt. Kryształy te są *anizotropowe*. Ośrodki *izotropowe* mają tylko jeden współczynnik załamania, niezależny od kierunku. Większość gazów, cieczy i niekryształicznych ciał stałych, jak np. szkło (bez naprężeń), to ośrodki izotropowe.

W kryształach dwójłomnym światło ma różne prędkości zależnie od tego, jak zorientowana jest płaszczyzna jego drgań. Gdy światło niespolaryzowane przechodzi przez dwójłomny kryształ, to rozdziela się na dwie części — promień zwyczajny (z) i promień nadzwyczajny (n). Promienie te są spolaryzowane liniowo w różnych kierunkach i inaczej załamane, rys 4. Promień zwyczajny spełnia prawo załamania światła. Natomiast promień nadzwyczajny tego prawa nie spełnia. Ponieważ oba promienie wychodzące z kryształu kalcytu są liniowo spolaryzowane i do tego prostopadłe do siebie, kryształ taki mógłby być dobrym polaryzatorem, jeżeli można by było wyeliminować jedną z wiązek światła. Zrealizowano to w *pryzmacie Nicola*, rys. 5.



Rys. 4

Pryzmat Nicola (nikol) składa się z dwóch pryzmatów wyciętych z kalcytu. Oba pryzmaty są sklejone ze sobą cienką warstwą balsamu kanadyjskiego. Kąty ostre każdego z pryzmatów są równe  $68^\circ$  i  $22^\circ$ . Osie optyczne kryształu tworzą z podstawami pryzmatów kąt około  $48^\circ$  (i leżą w płaszczyźnie rysunku). Oś optyczna jest wyznaczona przez taki kierunek w kryształach dwójłomnym, wzdłuż którego obydwa promienie mają jednakowe prędkości — tylko wzdłuż tego kierunku kryształ jest izotropowy.



Rys. 5

Przy wejściu do pryzmatu wiązka światła niespolaryzowanego dzieli się na promień zwyczajny (z) i nadzwyczajny (n). Promień zwyczajny jest załamany silniej i pada na warstwę balsamu

kanadyjskiego pod kątem większym od kąta granicznego. Z tego powodu promień zwyczajny ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu i nie przechodzi przez warstwę balsamu. Z pryzmatu wychodzi tylko promień nadzwyczajny. Pryzmaty Nicola są dobrymi polaryzatorami, ale są dosyć drogie i wymagają stosowania nieomal równoległych wiązek światła.

### Polaryzacja przez selektywną absorpcję

Polaryzację przez selektywną absorpcję można obserwować w niektórych kryształach wykazujących *dichroizm*, czyli zależność współczynnika pochłaniania od kierunku polaryzacji fali, np. w turmalinie (jest to przezroczysty kryształ o bardzo skomplikowanym składzie chemicznym, używany również jako kamień ozdobny). Jeżeli światło niespolaryzowane pada na cienką płytkę wyciętą z turmalinu w taki sposób, że ściany są równoległe do osi optycznej kryształu, to zostaje ono rozdzielone na dwie składowe, liniowo spolaryzowane w ortogonalnych płaszczyznach. Jedna ze składowych jest silniej pochłaniana przez kryształ, natomiast druga przechodzi przez kryształ bez większych strat. Światło wychodzące z kryształu będzie, zatem, spolaryzowane liniowo.

W połowie XIX wieku odkryto, że również kryształy jodosiarczanu chininy, nazwane herapatytem, wykazują dichroizm i przy odpowiedniej ich grubości światło spolaryzowane w jednym kierunku jest przez nie całkowicie absorbowane. Malutkie, mające kształt igiełek, kryształki herapatytu odpowiednio ustabilizowane i uporządkowane w matrycach acetylocelulozowych i poliwinylowych stanowią materiał znany dziś pod nazwą *polaroidu*. Polaroid jest efektywnym i ekonomicznym materiałem polaryzacyjnym, najlepiej nadającym się do pracy ze światłem zielonym i żółtym.

### Wyznaczanie kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji

Jak już wiemy, światło niespolaryzowane, po przejściu przez pryzmat Nicola bądź przez polaroid, ulega polaryzacji liniowej. Ciało polaryzujące światło nazywamy *polaryzatorem*, natomiast polaryzator wykorzystywany w celu sprawdzenia stanu polaryzacji światła nazywamy *analizatorem*. Gdy polaryzator i analizator są skrzyżowane, światło nie jest przez nie przepuszczane. Ale jeżeli kawałek kwarcu lub roztwór cukru wprowadzony zostanie pomiędzy polaryzator i analizator, wówczas stwierdzamy, że substancja ta skręca płaszczyznę polaryzacji światła. Przez obrót analizatora znaleźć można nową pozycję wygaszania, różną od poprzedniej. Efekt ten, znany jako *skręcenie płaszczyzny polaryzacji*, jest przejawem *aktywności optycznej* ośrodka. W zależności od kierunku skręcenia płaszczyzny polaryzacji, patrząc w kierunku źródła, skręcenie może być dodatnie — zgodne z ruchem wskazówek zegara, lub ujemne — w kierunku przeciwnym.

Przyrządy do pomiaru skręcenia płaszczyzny polaryzacji nazywają się *polarymetrami*, bądź *sacharymetrami*, gdy używane są do badania roztworów cukru. Schemat budowy polarymetru przedstawiono na rys. 6.

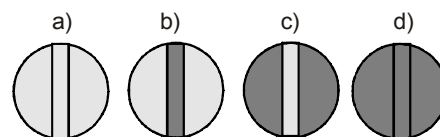


Rys.6 Schemat budowy polarymetru

Światło monochromatyczne ze źródła Z, przepuszczone przez polaryzator P, którego położenie jest ustalone, zostaje całkowicie spolaryzowane w płaszczyźnie wyznaczonej przez oś polaryzatora. Po przejściu przez substancję optycznie czynną zawartą w rurze R, płaszczyzna polaryzacji światła zostaje skręcona o kąt  $\alpha$ . Następnie poprzez analizator połączony z podziałką kątową światło dociera do obserwatora O. Pomiar kąta  $\alpha$  sprowadza się do dwukrotnego ustawienia analizatora na „ciemność”, raz bez substancji skręcającej (do rury wlewamy wodę destylowaną), drugi raz z substancją optycznie czynną (roztworem cukru). Różnica obu pozycji analizatora, odczytanych na podziałce kątovej, stanowi kąt skręcenia.

W celu umożliwienia dokładnego ustawienia analizatora stosuje się polarymetry półcieniowe, w których pomiędzy polaryzatorem i warstwą substancji umieszcza się płytkę krystaliczną, zasłaniającą środkowy pasek pola widzenia (względnie jego połowę).

Analizator ustawiamy do odczytu tak, aby pasek środkowy i pozostała część pola widzenia były



Rys. 7. Obrazy w polarymetrze półcieniowym

jednakowo ciemne, tak jak na rys. 7d.

Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła, jest proporcjonalny do długości drogi przebytej przez światło w substancji. W przypadku roztworu, kąt skręcenia  $\alpha$  dla danej barwy światła i długości drogi  $l$  jest proporcjonalny do stężenia  $d$  substancji aktywnej w roztworze:

$$\alpha = a \cdot d \cdot l. \quad (1)$$

Droga  $l$  równa jest długości rurki R. Współczynnik proporcjonalności  $a$  nazywany jest *skręceniem właściwym* lub *zdolnością skręcającą*; jest ono równe liczbowo kątowi skręcenia przypadającemu na jednostkę stężenia [ $\text{g}/\text{dm}^3$ ] i na jednostkę grubości warstwy roztworu [dm].

Zdolność skręcającą  $a$  możemy wyznaczyć przez pomiar kąta skręcenia  $\alpha_1$  roztworu o znanym stężeniu  $d_1$ , w rurce o długości  $l$ :

$$a = \frac{\alpha_1}{l \cdot d} \quad (2)$$

Znajomość zdolności skręcającej pozwala wyznaczyć nieznanne stężenie  $d_2$  roztworu tego samego rodzaju, jeśli zmierzmy kąt skręcenia  $\alpha_2$ :

$$d_2 = \frac{\alpha_2}{a \cdot l}. \quad (3)$$

### Wykonanie ćwiczenia

1. Zapalamy lampę z żółtym filtrem ( $\lambda = 589,3 \text{ nm}$ ) i ustawiamy lunetkę na ostrość.
2. Rurę R wypełniamy wodą destylowaną i ponownie regulujemy ostrość widzenia.
3. Obracamy analizator A do położenia, w którym środkowy pas i pozostała część pola widzenia są jednakowo ciemne. Odczytujemy wskazania  $\alpha_{0i}$  na podziałkach obu noniuszy. Pomiar powtarzamy trzykrotnie. Obliczamy wartość średnią  $\alpha_0 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \alpha_{0i}$ .
4. Rurę R przepłukujemy, napełniamy roztworem I o znanym stężeniu i przeprowadzamy pomiar wartości  $\alpha'_{1i}$ , jak w punkcie 3. Obliczamy wartość średnią  $\alpha'_1 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \alpha'_{1i}$ .
5. Różnica odczytów dla roztworu I i dla wody destylowanej daje kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji:  $\alpha_1 = \alpha'_1 - \alpha_0$ . Znając długość rurki  $l$  i stężenie  $d_1$  roztworu I, znajdujemy zdolność skręcającą, wzór (2)
6. Rurę R wypełniamy roztworem II o nieznanym stężeniu  $d_2$ . Znajdujemy kąt skręcenia  $\alpha_2$  płaszczyzny polaryzacji dla roztworu II:  $\alpha_2 = \alpha'_2 - \alpha_0$ , gdzie  $\alpha'_2 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \alpha'_{2i}$ .
7. Obliczamy nieznanne stężenie  $d_2$  roztworu II, wzór (3).

**Rachunek błędów**

Błąd bezwzględny  $\Delta d_2$  obliczamy metodą różniczki zupełnej, którą stosujemy do wzoru (3):

$$\Delta d_2 = d_2 \left( \frac{\Delta \alpha_2}{\alpha_2} + \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta l}{l} \right) \quad (4)$$

Występującą we wzorze (4) wartość błędu bezwzględnego  $\Delta a$  zdolności skręcającej również obliczamy metodą różniczki zupełnej (pomijamy błąd  $\Delta d_1$ ):

$$\Delta a = a \left( \frac{\Delta \alpha_1}{\alpha_1} + \frac{\Delta l}{l} \right). \quad (5)$$

Po podstawieniu (5) do (4) dostajemy

$$\Delta d_2 = d_2 \left( \frac{\Delta \alpha_1}{\alpha_1} + \frac{\Delta \alpha_2}{\alpha_2} + \frac{2\Delta l}{l} \right). \quad (6)$$

Jeśli długość  $l$  rurki jest na niej wypisana, możemy przyjąć  $\Delta l \approx 0$ . Pozostałe błędy bezwzględne we wzorze (6) obliczamy:  $\Delta \alpha_1 = \Delta \alpha_0 + \Delta \alpha'_1$ ,  $\Delta \alpha_2 = \Delta \alpha_0 + \Delta \alpha'_2$ .

Za  $\Delta \alpha_0$  podstawiamy maksymalną wartość różnicy pomiędzy wartością średnią  $\alpha_0$ , a każdym z odczytów  $\alpha_{0i}$  na noniuszach A i B:  $\Delta \alpha_0 = \max |\alpha_0 - \alpha_{0i}|$ .

Podobnie:  $\Delta \alpha'_1 = \max |\alpha'_1 - \alpha'_{1i}|$ ,  $\Delta \alpha'_2 = \max |\alpha'_2 - \alpha'_{2i}|$ .

Obliczamy także błąd względny procentowy:  $B_p = \frac{\Delta d_2}{d_2} \cdot 100\%$ .