

## Pomiar skręcenia płaszczyzny polaryzacji wywołanej przez roztwór sacharozy oraz wyznaczenie skręcalności właściwej

**I. Cel ćwiczenia:** zapoznanie ze zjawiskiem polaryzacji, pomiar kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji roztworu cukru w funkcji stężenia, wyznaczenie skręcalności właściwej dla roztworu cukru.

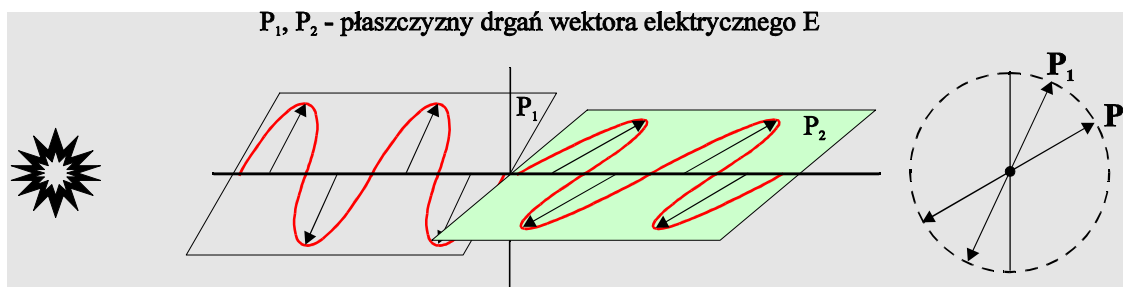
**II. Przyrządy:** polarymetr, waga laboratoryjna, zlewki, menzurka 100 cm<sup>3</sup>, cukier.

**III. Literatura:**

1. H. Hofmokr, A. Zawadzki *Laboratorium fizyczne*,
2. Polarymetr kołowy *Instrukcja fabryczna* Carl Zeiss Jena,
3. J. Garaj i inni *Fizyczne i fizykochemiczne metody analizy*, WN-T, Warszawa 1981,
4. T. Dryński *Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki* PWN, Warszawa 1976

### IV. Wstęp

Światło stanowią fale elektromagnetyczne, w których mamy do czynienia z rozchodzeniem się zmiennych pól elektrycznych i magnetycznych. Przyjęto określać drgania świetlne tylko wektorem  $\vec{E}$  i nazwano go wektorem świetlnym. W świetle wychodzącym z naturalnego źródła drgania wektora świetlnego odbywają się prostopadle do kierunku rozchodzenia się promieni, lecz we wszystkich możliwych płaszczyznach, w których ten kierunek leży i takie światło nazywamy *niespolaryzowanym*. Wynika to stąd, że wiązkę promieni tworzy wiele ciągów falowych wysłanych przez różne atomy emitujące promieniowanie. W każdym z tych ciągów falowych wektor świetlny drga w innej płaszczyźnie (rys 1).

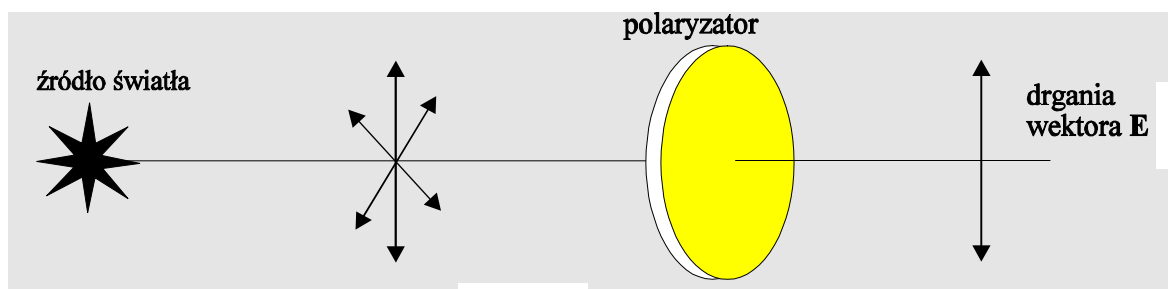


**Rys.1** Drgania wektora  $\vec{E}$  oraz płaszczyzny drgań ( $P_1, P_2$ ) dla światła niespolaryzowanego dla przykładowych dwóch ciągów falowych

Jeśli jakiś czynnik zewnętrzny (zwykle w wyniku oddziaływania światła i materii) „zmusi” chaotyczne drgania by odbywały się w jednej płaszczyźnie lub według innego obranego porządku, to mówimy o polaryzacji światła. Gdy drgania świetlne odbywają się w jednej płaszczyźnie polaryzacja nosi nazwę liniowej. Płaszczyznę prostopadłą do tej, w której odbywają się drgania nazywamy *płaszczyzną polaryzacji* (niekiedy płaszczyznę polaryzacji definiuje się jako płaszczyznę drgań).

Światło spolaryzowane liniowo uzyskuje się przepuszczając je przez filtry polaryzacyjne (polaroidy). Po przejściu przez taki filtr wektor świetlny  $\vec{E}$  drga w jednej określonej płaszczyźnie (rys. 2).

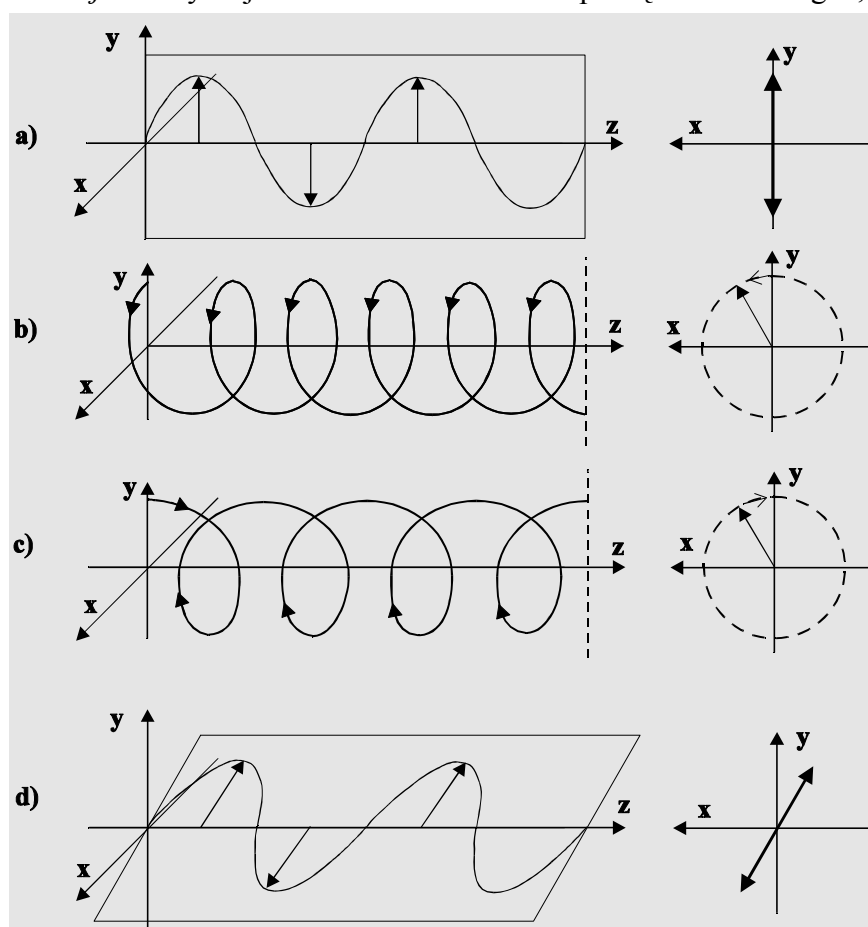
Niektóre ciała posiadają zdolność skręcania płaszczyzny polaryzacji przy przechodzeniu przez nie światła spolaryzowanego liniowo. Nazywamy je ciałami optycznie czynnymi. Należą do nich niektóre ciała stałe (np. kwarc), ciecze, gazy oraz roztwory niektórych substancji, między innymi roztwór cukru.



Rys.2 Wiązka światła po przejściu przez filtr polaryzacyjny.

Wyjaśnienie tego zjawiska jest następujące.

Ciało optyczne czynne dzieli wiązkę spolaryzowaną liniowo (rys. 3a) na składową spolaryzowaną kołowo prawoskrętnie i kołowo lewoskrętnie (rys. 3b i 3c). Zjawisko to nosi nazwę *dwójłomności kołowej*. Polaryzacja kołowa oznacza takie uporządkowanie drgań, przy którym wektor świetlny  $\vec{E}$



Rys.3 Wyjaśnienie skręcenia płaszczyzny polaryzacji przez dwójłomność kołową

obraca się wokół promienia świetlnego a jego koniec zakreśla linię śrubową. Te dwie składowe rozchodzą się z różnymi prędkościami, w wyniku czego wytwarza się między nimi różnica faz. Przy wyjściu z ciała te dwie składowe dodają się i wypadkowa jest nadal spolaryzowana liniowo, ale ma już inną płaszczyznę polaryzacji.

Wartość kąta  $\alpha$  skręcenia płaszczyzny polaryzacji w warstwie roztworu o grubości  $l$  jest proporcjonalna do stężenia roztworu  $c$  i do grubości tej warstwy  $l$ . Zależy też od rodzaju roztworu, długości fali  $\lambda$  i temperatury  $t$ .

$$\alpha = [\alpha]_t^\lambda \cdot l \cdot c \quad (1)$$

Jest to tzw. prawo Biota.

Współczynnik  $[\alpha]_t^\lambda$  nosi nazwę *skręcalności właściwej* dla danego roztworu, dla danej długości fali  $\lambda$  i dla określonej temperatury  $t$ .

*Skręcalność właściwa* wyraża liczbowo kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji o stężeniu jednostkowym ( $1 \text{ kg/m}^3$ ) i grubości warstwy jednostkowej ( $1 \text{ m}$ ). Ma więc wymiar:

$$[\alpha]_t^\lambda = \left[ \frac{\text{stopień} \cdot \text{m}^3}{\text{m} \cdot \text{kg}} \right] = \left[ \frac{\text{stopień} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}} \right]$$

Często w badaniach laboratoryjnych np. w pracowni studenckiej stężenie wyraża się w gramach na  $100 \text{ cm}^3$  roztworu ( $\text{g}/100\text{cm}^3$ ) zaś długość rurki pomiarowej w decymetrach ( $\text{dm}$ ) i wówczas wartość skręcalności właściwej wyraża się w jednostkach:

$$[\alpha]_t^\lambda = \left[ \frac{\text{stopień} \cdot \text{cm}^3}{\text{dm} \cdot \text{g}} \right]$$

Skreślenie płaszczyzny polaryzacji (a więc i płaszczyzny drgań wektora  $\vec{E}$ ) przez substancję optyczną czynną wyznacza się polarymetrem kołowym, najczęściej dla długości fali linii sodowej  $\lambda = 589,3 \text{ nm}$ . Skreślenie jest określone przez wartość kąta  $\alpha$  o jaki należy obrócić analizator polarymetru, aby pole widzenia uzyskało taki sam wygląd jak przed umieszczeniem substancji skręcającej.

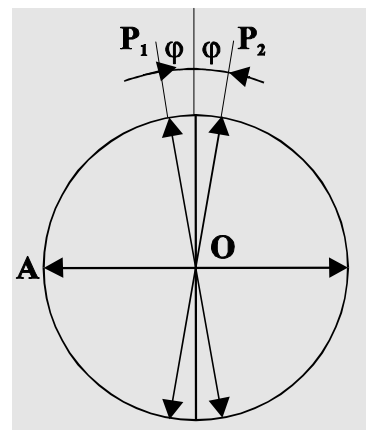
### V. Zasada działania polarymetru półcieniowego.

Zasada działania polarymetru półcieniowego polega na tym, że pole widzenia oświetlone przez polaryzator podzielone jest na połowy, przy czym jedna z nich oświetlona jest przez światło spolaryzowane liniowo, mające płaszczyznę drgań ( $OP_1$  na rys. 4) nachyloną pod niewielkim kątem względem płaszczyzny drgań światła oświetlającego drugą połowę ( $OP_2$  rys. 4). Pole widzenia obserwujemy przez analizator mający płaszczyznę drgań  $OA$  (terminem płaszczyzna drgań analizatora będziemy tutaj określać płaszczyznę, w której zachodzą drgania wektora świetlnego, gdy przez analizator przechodzi światło). W położeniu symetrycznym przedstawionym na rysunku 4, gdy płaszczyzna drgań analizatora jest prostopadła do dwusiecznej kąta między  $OP_1$  i  $OP_2$ , jednakowe oświetlenie jest bardzo słabe (rys. 5b) i wynosi (zgodnie z prawem Malusa):

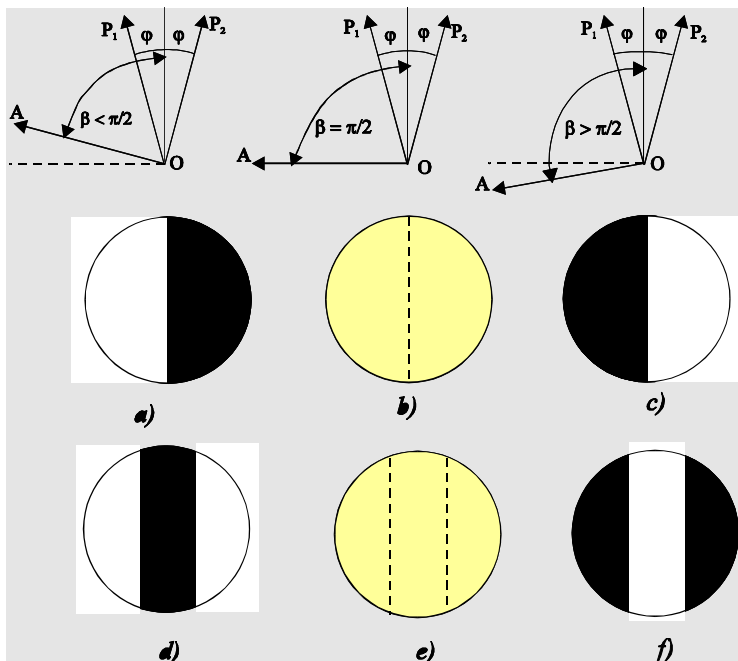
$$I = I_o \cdot \cos^2(90^\circ - \varphi) = I_o \cdot \cos^2(90^\circ + \varphi) = I_o \cdot \sin^2 \varphi \quad (2)$$

Jeżeli natomiast obrócimy analizator o mały kąt, oświetlenie jednej połówki staje się jaśniejsze, drugiej ciemniejsze. Na przykład, gdy kąt między  $OA$  i  $OP_1$  maleje (obróć analizatora zgodny z kierunkiem ruchu wskazówek zegara), prawa połówka staje się ciemniejsza (rys. 5a), gdy kąt ten wzrasta (obróć przeciwny do kierunku ruchu wskazówek zegara), lewa połówka staje się ciemniejsza (rys. 5c). Całkowite zaciemnienie jednej z połówek pola widzenia osiąga się, gdy płaszczyzna drgań analizatora  $A$  tworzy z dwusieczną kąta  $P_1OP_2$  albo kąt  $\beta_1 = 90^\circ - \varphi$ , albo też kąt  $\beta_2 = 90^\circ + \varphi$ . Obrotowi analizatora o kąt  $2\varphi$  od położenia całkowitego zaciemnienia lewej połówki towarzyszy przejście do całkowitego zaciemnienia prawej połówki.

Operowaliśmy tu pojęciem płaszczyzny drgań (również w odniesieniu do polaryzatora i analizatora) zamiast płaszczyzny polaryzacji. Ponieważ są to płaszczyzny wzajemnie prostopadłe (patrz strona 1), w opisie matematycznym niczego to nie zmienia. Wszystkie relacje



Rys. 4 Płaszczyzny drgań światła spolaryzowanego liniowo i analizatora



Rys.5 Pole widzenia w polarymetrze półcieniowym dla różnych ustawień analizatora ( a,b,c - pole dwuczęściowe; d,e,f -pole trójczęściowe)

między płaszczyznami drgań przenoszą się na relacje między płaszczyznami polaryzacji.

Przyrządy używane w laboratoriach przemysłowych mają kąt półcienia  $2\varphi$  nie mniejszy od  $3^\circ$ . W polarymetrze użytym w tym ćwiczeniu kąt  $2\varphi$  wynosi  $2 \times 5^\circ$ .

Ponieważ oko doskonale rozróżnia kontrasty sąsiadujących ze sobą obszarów słabo oświetlonych, natomiast źle rozróżnia kontrasty obszarów silnie oświetlonych, właściwym położeniem analizatora jest pole widzenia słabo oświetlone (ale równo) i stąd pochodzi nazwa - przyrząd półcieniowy.

Z rys. 4 widać, że jednakowe oświetlenie obu połówek osiąga się również przy ustawieniu analizatora A tak, że płaszczyzna drgań jest równoległa do dwusiecznej kąta  $P_1OP_2$ . Wówczas oświetlenie obu połówek wynosi:

$$I = I_o \cdot \cos^2(180^\circ - \varphi) = I_o \cdot \cos^2 \varphi \quad (3)$$

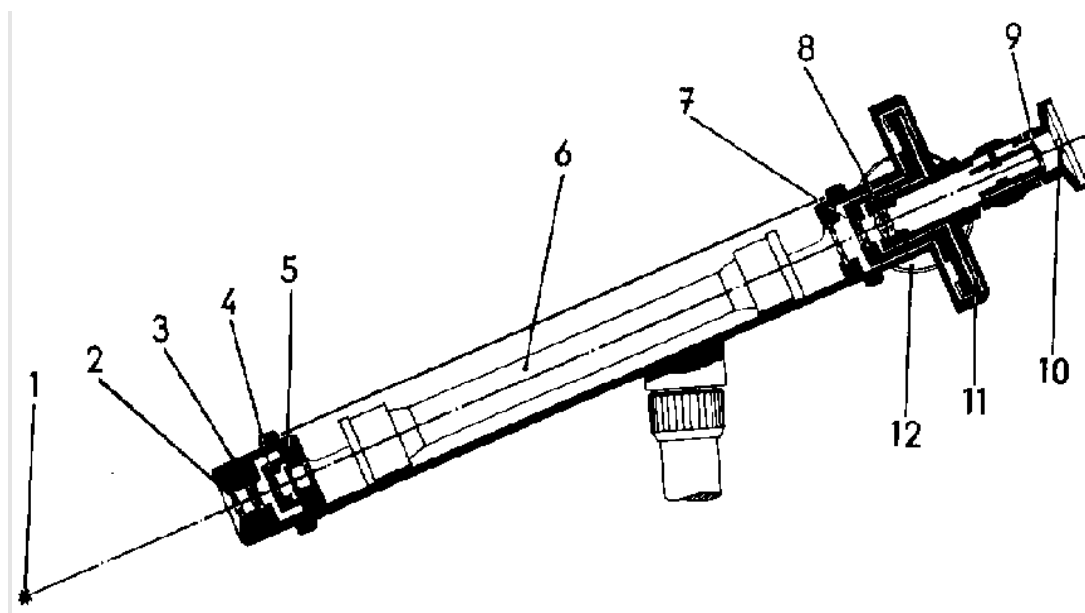
Ponieważ kąt  $\varphi$  jest mały (ok.  $5^\circ$ ), trójczęściowe pole widzenia jest jasno oświetlone i oko słabo rozróżnia równość oświetleń wszystkich trzech części - tego ustawienia nie stosujemy do pomiarów.

## VI. Układ pomiarowy.

Układ pomiarowy przedstawia rysunek 6. Składa się on z polarymetru, sodowej lampy spektralnej, rurki pomiarowej.

Właściwy polarymetr przystosowany jest do wygodnej obserwacji przez ukośne ustawienie na kolumnie umieszczonej na okrągłej podstawie. Pojemnik z lampą 1 podtrzymywany jest przez ramie przymocowane do podstawy kolumny. Przestrzeń, w której umieszcza się rurkę jest chroniona przed światłem z zewnątrz przez zamykaną osłonę. Dwie skale kątowe o zakresie  $0 - 180^\circ$  umożliwiają odczyt kąta co  $1^\circ$ .

*Całkowitą ilość stopni określa kreska zerowa noniusza. Noniusz z 20 podziałkami pozwala na pomiar kąta z dokładnością  $0,05^\circ$ .*



Rys.6 Układ pomiarowy i budowa optycznej części polarymetru.

Lampa sodowa 1 oświetla kondensator 2. Filtr barwny 3 absorbuje promieniowanie o innej długości fali niż  $589,3 \text{ nm}$  (żółta linia sodu). Filtr polaryzacyjny 4 polaryzuje światło padające tak, że wychodząc z płytki kwarcowej 5 (płytki Laurenta) znajdującej się w środku pola obserwacji tworzy kąt półcienia.  $2\varphi = 2 \times 5^\circ = 10^\circ$ . W ten sposób uzyskuje się trójczęściowe pole widzenia. Przy obrocie analizatora 7 dwa zewnętrzne pola na przemian ciemnieją i ulegają rozjaśnieniu, podczas gdy część środkowa wykazuje przeciwne zmiany jasności. Dla ochrony przed kurzem część

optyczna oddzielona jest od obszaru z substancją badaną szklanym okienkiem ochronnym. Roztwór badany znajduje się w rurce 6. Analizator 7 jest sztywno połączony z tarczą 11 (wewnątrz przyrządu), można go obracać przy pomocy pokrętki 12. Kąt obrotu odczytuje się przy pomocy lupy 10. Pole widzenia obserwuje się przez lunetkę, której obiektyw 8 i okular 9 dają w sumie ok. czterokrotne powiększenie.

Zaleca się przeprowadzenie odczytu przy wykorzystaniu dwóch noniuszy (prawego i lewego) i znalezienie średniej.

Jednakowe oświetlenie trójczęściowego pola widzenia (ustawienie pomiarowe) uzyskuje się przez obrót rowkowego pokrętki 12 analizatora. **Zwrócić uwagę by wybrać właściwe zaciemnienie pola widzenia (niezaciemnione jest mało czule).**

## VII. Pomiary.

1. Przygotować co najmniej 5 roztworów cukru np. o następujących stężeniach (w gramach na 100 cm<sup>3</sup> roztworu): 2, 4, 6, 8, 10 g/100cm<sup>3</sup>.

Roztwory o podanych stężeniach można przygotować przez odważenie odpowiednich mas cukru i ich rozpuszczenie w wodzie destylowanej, tak by otrzymać 100 cm<sup>3</sup> roztworu lub wg procedury podanej w uzupełnieniu (strona 7 instrukcji).

Najlepiej najpierw odważyć potrzebne masy cukru, następnie przygotować pierwszy roztwór i zmierzyć kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji przez niego wywoływany. To samo uczynić dla następnych roztworów.

2. Przed właściwymi pomiarami kąta skręcenia ustalić położenie zerowe skal (dla obu skal) tj. wartość kąta  $\alpha_0$  dla pustej rurki. Położenie początkowe zależy od ewentualnych niecentryczności podziałki kołowej oraz od indywidualnych cech obserwatora i nie zawsze pokrywa się z zerowym punktem skali.

Jeśli odczytu kąta dokonujemy na skali kątowej z rosnącymi wartościami kątów od 0° do 180° przy obrocie tarczy kątowej w prawo (ruch pokrętki rowkowego w lewo), to wartości kątów bierzemy ze znakiem + (plus).

Jeśli odczytu dokonalibyśmy na tarczy kątowej z malejącymi wartościami kątów od 180° do 0° przy obrocie tarczy w lewo (ruch pokrętki rowkowego w prawo), to wartość odczytaną kąta znajdujemy jako kąt:  $\alpha = \text{wartość odczytana kąta} - 180^\circ$ .

Odczytane wartości kątów skręcenia płaszczyzny polaryzacji dla roztworu sacharozy (badanej w tym ćwiczeniu) są  **dodatnie**. **Natomiast położenia zerowe skal mogą być dodatnie bądź ujemne.**

Zwrócić uwagę, czy wartość kąta odpowiadająca położeniu początkowemu jest dodatnia czy też ujemna. Sposób odczytu z wykorzystaniem noniuszy pokazują rysunki 7, 8a, 8b i 8c (patrz **Uzupełnienie**, strona 7 ÷ 8 instrukcji).

**Rurkę napełniamy w następujący sposób.**

Po odkręceniu nakrętki napełniamy rurkę wodą destylowaną (lub roztworem) aż do momentu powstania menisku. Następnie nakładamy denko szklane i nakręcamy ostrożnie nakrętkę. Napełniona rurka nie powinna zawierać powietrza. Po każdym użyciu rurkę należy umyć.

3. Przeprowadzić pomiar kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji dla wszystkich pięciu badanych roztworów i jednego o nieznanym stężeniu  $c_x$ . Zapisać wyniki pomiarów w tabelach 1 i 2.

Tabela 1

Położenie początkowe	
prawe	lewe
$\alpha_p^\circ$ [stopnie]	$\alpha_l^\circ$ [stopnie]

Tabela 2

$c$ [ g/100cm <sup>3</sup> ]	$\alpha_p$ [stop- nie]	$\alpha_l$ [stopnie]	$\alpha_1 = \alpha_p - \alpha_p^o$	$\alpha_2 = \alpha_l - \alpha_l^o$	$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$

gdzie

$c$  - stężenie w g/100 cm<sup>3</sup> roztworu

$\alpha_p^o$  - położenie początkowe prawe w stopniach (prawy odczyt)

$\alpha_l^o$  - położenie początkowe lewe w stopniach (lewy odczyt)

$\alpha_p$  - odczytany kąt skręcenia w stopniach (prawy odczyt)

$\alpha_l$  - odczytany kąt skręcenia w stopniach (lewy odczyt)

### VIII. Opracowanie wyników.

1. Sporządzić wykres zależności kąta  $\alpha$  skręcenia płaszczyzny polaryzacji od stężenia roztworu cukru  $c$  i wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów (*patrz np. I pracownia fizyczna J.L. Kacperski, K. Niedźwiedziuk*) znaleźć parametry prostej  $\alpha = a \cdot c + b$  opisującej otrzymaną zależność doświadczalną między kątem  $\alpha$  skręcenia płaszczyzny polaryzacji a stężeniem roztworu  $c$ .
2. Wyznaczyć skręcalność właściwą  $[\alpha]_t^\lambda$ . Współczynnik  $a$  nachylenia prostej jest równy ( zgodnie z zależnością (1) ):

$$a = [\alpha]_t^\lambda \cdot l. \quad (4)$$

Stąd 
$$[\alpha]_t^\lambda = \frac{a}{l}, \quad (5)$$

gdzie  $l$  - długość rurki pomiarowej. W tym ćwiczeniu  $l = 200$  mm.

3. Znaleźć nieznanne stężenie  $c_x$ .
4. Ocenić błędy wyznaczonych wielkości  $[\alpha]_t^\lambda$ , i  $c_x$ .

Błąd skręcalności właściwej zależy od błędu współczynnika nachylenia czyli  $\Delta a$  i błędu jakim obarczona jest długość rurki  $l$ . Przyjmujemy  $\Delta l = 1$  mm.

Należy też mieć na uwadze, że skręcalność właściwa świeżo przygotowanego roztworu cukru nie jest stała i dopiero po kilku godzinach przyjmuje wartość końcową (mutarotacja), która stanowi ok. połowy wartości początkowej.

Wartość skręcalności właściwej wynosi<sup>1</sup>:

$$[\alpha]_{20^\circ}^{589,3nm} = +66,6 \frac{\text{stopień} \cdot \text{cm}^3}{\text{dm} \cdot \text{g}} = +0,666 \frac{\text{stopień} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}}$$

Podane dwie wartości uwzględniają relacje między jednostkami:

$$\left[ \frac{\text{stopień} \cdot \text{cm}^3}{\text{dm} \cdot \text{g}} \right] = \left[ \frac{\text{stopień} \cdot 10^{-6} \text{m}^3}{10^{-1} \text{m} \cdot 10^{-3} \text{kg}} \right] = 10^{-2} \left[ \frac{\text{stopień} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}} \right]$$

<sup>1</sup> J. Garaj i inni, Fizyczne i fizykochemiczne metody analizy, WNT Warszawa 1981, s.385

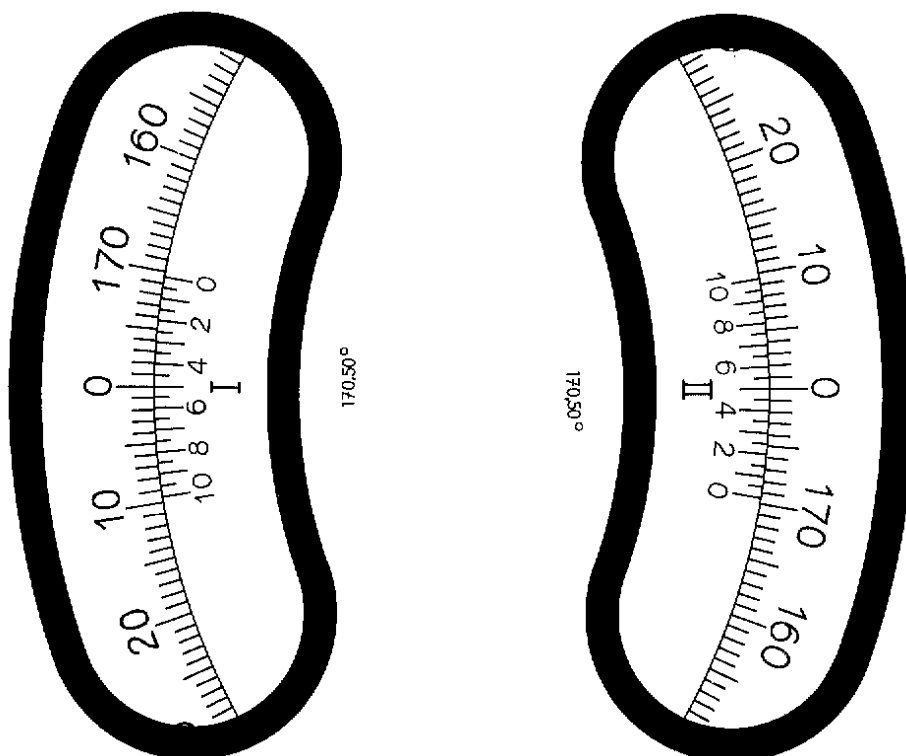
## Uzupełnienie

### A) Procedura przygotowania 5 roztworów (2, 4, 6, 8, 10 g/100cm<sup>3</sup>) przy dwóch ważeniach.

1. Ważymy dwie porcje cukru o masach  $m_1 = 10\text{g}$  i  $m_2 = 8\text{g}$ .
2. Rozpuszczamy odważoną pierwszą porcję  $m_1 = 10\text{g}$  cukru w ok.  $80\text{ cm}^3$  wody destylowanej wykorzystując zlewkę i menzurkę, a następnie wodą destylowaną uzupełniamy objętość roztworu do  $100\text{ cm}^3$ . Otrzymujemy roztwór 1 o stężeniu  $c = 10\text{g}/100\text{cm}^3$  roztworu. Odlewamy do zlewki  $40\text{ cm}^3$  roztworu (będzie to roztwór pomiarowy 1).
3. Pozostałą objętość menzurki (czyli  $60\text{ cm}^3$ ) dopełniamy do  $100\text{ cm}^3$  i mieszamy. Uzyskaliśmy w ten sposób roztwór o stężeniu  $c = 6\text{g}/100\text{cm}^3$  (czy wiesz dlaczego?). Około  $40 - 50\text{ cm}^3$  odlewamy do zlewki (roztwór pomiarowy 2), pozostałą część roztworu wylewamy z menzurki i płuczemy ją.
4. Rozpuszczamy drugą porcję  $m_2 = 8\text{g}$  cukru w ok.  $80\text{ cm}^3$  wody destylowanej. Następnie wodą destylowaną uzupełniamy objętość roztworu do  $100\text{ cm}^3$ . Po wymieszaniu odlewamy  $50\text{ cm}^3$  (połowę) do zlewki - jest to roztwór 3 o stężeniu  $c = 8\text{g}/100\text{cm}^3$ .
5. Pozostałą połowę w menzurce uzupełniamy do  $100\text{ cm}^3$  i mieszamy. Otrzymujemy roztwór o stężeniu  $c = 4\text{g}/100\text{cm}^3$ . Połowę objętości menzurki ( $50\text{ cm}^3$ ) przelewamy do zlewki - jest to roztwór 4.
6. Pozostałą objętość roztworu w menzurce ( $50\text{ cm}^3$ ) uzupełniamy wodą destylowaną do  $100\text{ cm}^3$  i mieszamy. Uzyskujemy roztwór 5 o stężeniu  $c = 2\text{g}/100\text{cm}^3$ .

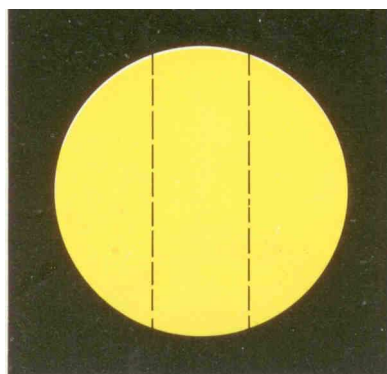
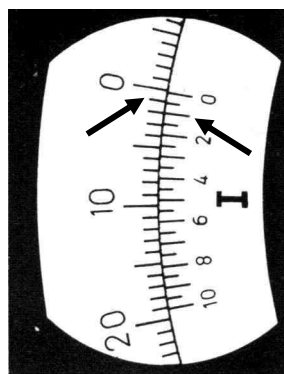
### B) Odczyt kątów na skali polarymetru.

Przykładowe ustawienie skali polarymetru pokazuje rysunek 7.



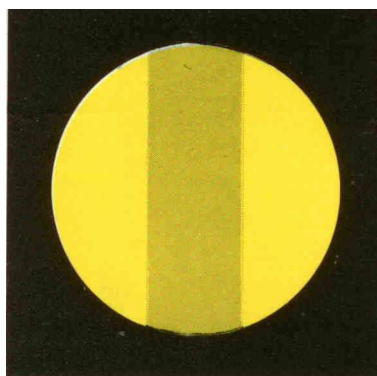
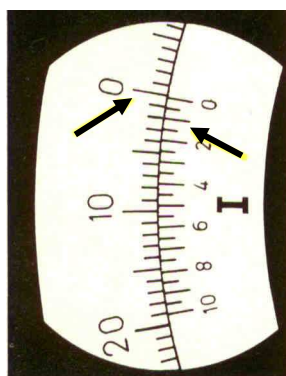
Rys.7 Obraz skal polarymetru  $0 - 180^\circ$  z noniusem I i II widziany przez lupki.

Kreska zerowa noniusza zawiera się między kreskami odpowiadającymi  $170^\circ$  i  $171^\circ$ , kreska skali kątownej pokrywa się z 5 długą kreską skali noniusza. Stąd wynik odczytu  $170,50^\circ$ .

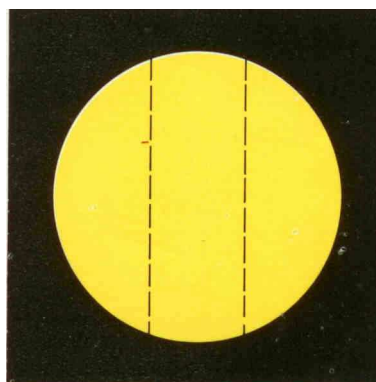
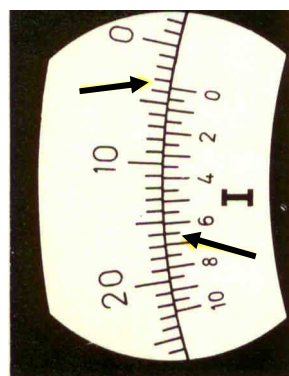


**Rys. 8a** Początkowe ustawienie noniusza przy pustej rurce pomiarowej po doprowadzeniu trójczęściowego pola widzenia do jednakowej jasności.

Kreska zerowa noniusza zawiera się między kreskami 0 i 1 skali kątowej, kreska skali odpowiadająca  $0,1^\circ$  pokrywa się z kreską skali kątowej (jest tylko jedna taka kreska). Stąd odczyt  $+0,10^\circ$  (znak plus, bo odczytano na skali  $0 - 180^\circ$  a nie na skali  $180^\circ - 0$ ).



**Rys. 8b** Obraz pola widzenia po wprowadzeniu do polarymetru napełnionej rurki z badaną cieczą i ustawieniu okularu na ostrość.



**Rys. 8c** Końcowe ustawienie noniusza dla rurki wypełnionej badaną cieczą i po doprowadzeniu trójczęściowego pola widzenia do jednakowej jasności.

Kreska zerowa noniusza zawiera się między 3 i 4 kreską skali kątowej, kreska skali noniusza odpowiadająca  $0,65^\circ$  pokrywa się z kreską skali kątowej. Stąd odczyt  $+3,65^\circ$  (znak plus, bo odczytano ze skali  $0 - 180^\circ$ ).