



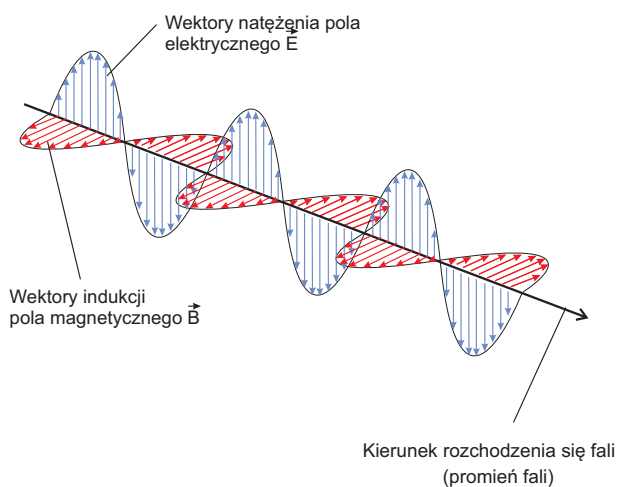
## Ćwiczenie 45

### Wyznaczanie stężenia roztworów cukru przy pomocy polarymetru

Krzysztof Rębilas

#### ŚWIATŁO

W ujęciu fizyki klasycznej opierającej się na teorii Maxwella światło widzialne to fala elektromagnetyczna o długości w zakresie ok. 400-700 nm. W fali elektromagnetycznej wektory natężenia pola elektrycznego  $\vec{E}$  i indukcji pola magnetycznego  $\vec{B}$  ustawione są prostopadle do kierunku biegu fali (Rys. 1). Ponadto wektory  $\vec{E}$  i  $\vec{B}$  usta-



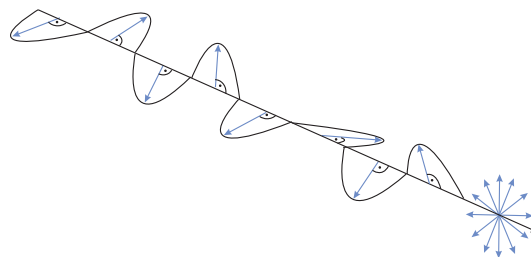
Rysunek 1. Fala elektromagnetyczna.

wione są prostopadle względem siebie, zatem informacja o kierunku wektora  $\vec{E}$  pozwala automatycznie ustalić kierunek wektora  $\vec{B}$ . Ze względu na dominujące działanie pola elektrycznego w oddziaływaniu światła z materią, często rozpatruje się jedynie wektor natężenia pola elektrycznego  $\vec{E}$ , który nosi też nazwę „wektora świetlnego”.

Ponieważ drgania wektora pola elektrycznego  $\vec{E}$  odbywają się w płaszczyźnie *prostopadłej* do kierunku rozchodzenia się fali, fala elektromagnetyczna jest falą **poprzeczną** i jako taka może być niespolaryzowana lub spolaryzowana.

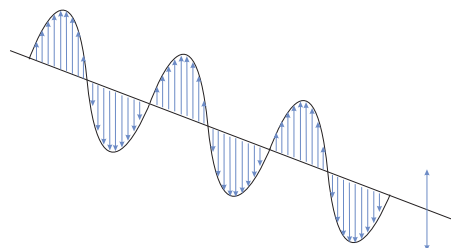
Fala elektromagnetyczna jest falą **niespolaryzowaną** jeśli wektory świetlne  $\vec{E}$  ustawione są w fali chaotycznie we wszystkich kierunkach (ale zawsze prostopadle do wektora prędkości fali) z jednakowym prawdopodobieństwem (Rys. 2).

Fala elektromagnetyczna jest falą **spolaryzowaną liniowo** jeśli wektory świetlne  $\vec{E}$  ustawione są w fa-



Rysunek 2. Fala elektromagnetyczna niespolaryzowana.

li równoległe względem siebie i tworzą wraz z kierunkiem rozchodzenia się fali tzw. **płaszczyznę polaryzacji** (Rys. 3).



Rysunek 3. Fala elektromagnetyczna spolaryzowana liniowo.

Najogólniejszym stanem polaryzacji jest tzw. polaryzacja eliptyczna, w której wektory  $\vec{E}$  i  $\vec{B}$  zakreślają w miejscu, przez które przechodzi fala, linie w kształcie elipsy. Szczególnym przypadkiem polaryzacji eliptycznej jest polaryzacja kołowa, przy której wektory  $\vec{E}$  i  $\vec{B}$  zakreślają linię w kształcie koła.

Zwykle światło składa się z wielu fal emitowanych przez pojedyncze atomy lub molekuly. Każdy atom wysyła falę o określonej polaryzacji. Przy dużej liczbie atomów źródła, kierunki wektora  $\vec{E}$  są jednakowo prawdopodobne i wypadkowa fala będąca sumą fal emitowanych przez poszczególne atomy jest falą *niespolaryzowaną*.

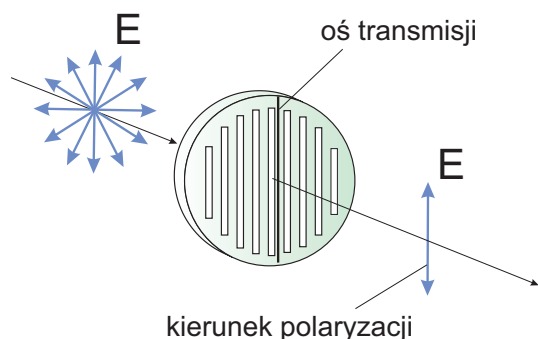
#### METODY POLARYZACJI ŚWIATŁA

Aby otrzymać falę spolaryzowaną liniowo, należy z wiązki światła niespolaryzowanego usunąć wszystkie fale

oprócz tych, których wektor pola elektrycznego  $\vec{E}$  drga w jednej płaszczyźnie.

### Selektywna absorpcja

Pewne substancje anizotropowe złożone ze zorientowanych molekuł przepuszczają tylko te fale, których wektor pola elektrycznego  $\vec{E}$  ustawiony jest w określonym kierunku równoległym do tzw. **osi transmisji**, Rys. 4. Przykładami takich substancji są turmalin, szpat islandz-



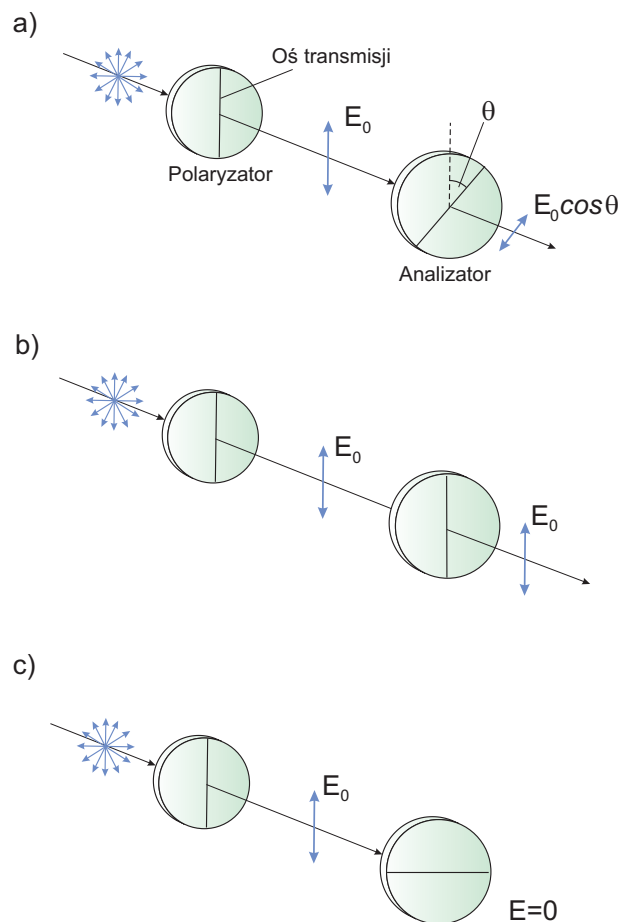
Rysunek 4. Filtr polaryzacyjny. Polaryzacja światła polega na przepuszczeniu jedynie tych drgań pola elektrycznego fali, które są zgodne z kierunkiem osi transmisji. Własność przepuszczania pola elektrycznego w określonym kierunku zaprezentowano *symbolicznie* w formie układu równoległych szczepek.

ki lub sztucznie wytwarzany materiał zwany polaroidem. Określona orientacja powiązanych ze sobą molekuł wiąże się z istnieniem wyróżnionego kierunku przewodnictwa elektrycznego w tych substancjach. W rezultacie molekuły absorbują fale świetlne, których wektor pola elektrycznego  $\vec{E}$  jest zgodny z kierunkiem przewodnictwa, a przepuszczają fale mające wektor elektryczny  $\vec{E}$  ustawiony prostopadłe do kierunku przewodnictwa elektrycznego (tj. zgodnie z osią transmisji).

Na Rys. 5a przedstawiono przejście światła niespolaryzowanego przez dwie płytki polaryzujące, tzw. **polaryzatory**, których osie transmisji tworzą kąt  $\theta$ . Pierwszy polaryzator przepuszcza światło o wektorze pola elektrycznego  $\vec{E}_0$  zgodnym z jego osią transmisji. Drugi polaryzator, zwany *analyzerem*, przepuszcza jedynie składową pola  $\vec{E}_0$  zgodną ze swoją osią transmisji, czyli wektory o długości  $E_0 \cos \theta$ . Natężenie światła jest proporcjonalne do kwadratu wektora pola elektrycznego, zatem natężenie światła po przejściu przez analyzer wynosi (prawo Malusa):

$$I = I_0 \cos^2 \theta, \quad (1)$$

gdzie  $I_0$  to natężenie światła padającego na analyzer. Maksimum przepuszczanego światła przez układ polaryzator-analizator następuje, gdy osie transmisji obu

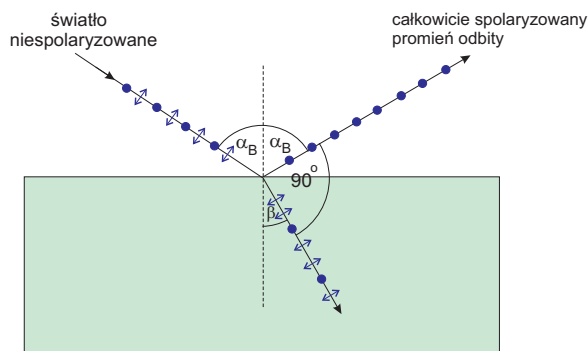


Rysunek 5. Działanie układu polaryzator-analizator, gdy: a) ich osie transmisji tworzą kąt  $\theta$ , b) osie transmisji są do siebie równoległe, c) osie transmisji są do siebie prostopadłe.

plytek są zgodne ( $\theta = 0^\circ$  lub  $180^\circ$ ) - Rys. 5b. Przy prostopadłym ustawieniu osi ( $\theta = 90^\circ$  lub  $270^\circ$ ) następuje całkowite wygaszenie światła - Rys. 5c.

### Odbicie światła

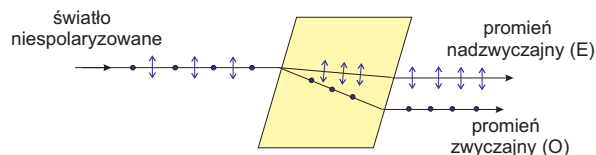
Światło ulega całkowitej lub częściowej polaryzacji podczas odbicia od powierzchni dielektryka. Wiązka światła padająca z próżni na powierzchnię jakiegoś ośrodka częściowo się odbija i częściowo wchodzi do ośrodka w formie wiązki załamanej (Rys. 6). Przy dowolnym kącie padania  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ , promień załamany i odbity są częściowo spolaryzowane. Promień załamany polaryzuje się w kierunku zgodnym z płaszczyzną padania, a promień odbity w kierunku prostopadłym do płaszczyzny padania. Jeśli promień odbity i załamany tworzą *kąt prosty*, wówczas promień odbity jest spolaryzowany całkowicie. Dzieje się to przy kącie padania wiązki zwanym *kątem Brewstera*  $\alpha_B$ . Z prawa załamania światła wynika, że  $\tan \alpha_B = n$ , gdzie  $n$  to współczynnik załamania ośrodka.



Rysunek 6. Polaryzacja światła przez odbicie od powierzchni dielektryka.

### Podwójne załamanie

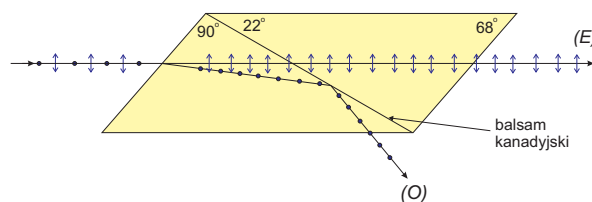
W ośrodkach jednorodnych światło porusza się we wszystkich kierunkach z jednakową prędkością. Istnieją jednak materiały krystaliczne, takie jak kalcyt lub kwarc, w których prędkość światła zależy od kierunku. Gdy promień światła niespolaryzowanego pada na taką substancję, następuje tzw. **zjawisko podwójnego załamania**: na granicy ośrodka następuje rozszczepienie promienia na dwa załamane pod różnym kątem promienie, promień zwyczajny  $O$  i promień nadzwyczajny  $E$ . Każdy z za-



Rysunek 7. Bieg promieni świetlnych przez kryształ dwójłomny.

łamanymi promieniami jest *liniowo spolaryzowany* (w kierunkach wzajemnie prostopadłych). Substancje, w których zachodzi zjawisko podwójnego załamania nazywamy **kryształami dwójłomnymi**.

W celu uzyskania światła spolaryzowanego liniowo wystarczy zastosować kryształ dwójłomny i wyeliminować jeden z promieni. Na tej zasadzie działa polaryzator liniowy zwany **pryzmatem Nicola** lub po prostu **nikolem** (Rys. 8). Składa się on z dwóch kawałków kryształu dwójłomnego (szpatu islandzkiego) połączonych ze sobą balsamem kanadyjskim. Kryształ dwójłomny powoduje rozszczepienie wiązki na dwa liniowo spolaryzowane promienie. Obecność balsamu kanadyjskiego o współczynniku załamania mniejszym niż współczynnik załamania szpatu islandzkiego sprawia, że promień zwyczajny  $O$  ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu, a przez układ przechodzi jedynie jeden liniowo spolaryzowany promień  $E$ .

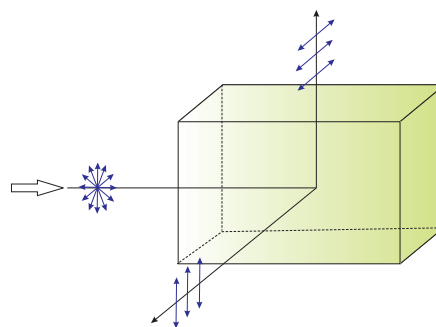


Rysunek 8. Bieg promieni w pryzmacie Nicola.

### Rozpraszanie światła

Światło ulega polaryzacji również przy rozproszeniu. Zjawisko rozproszenia światła polega na absorpcji i prawie natychmiastowej reemisji światła przez atomy lub cząsteczki ośrodka, przez które przechodzi światło. Rozproszenie światła na cząsteczkach powietrza sprawia, że docierające do nas światło słoneczne jest częściowo spolaryzowane. Z rozpraszaniem światła na cząsteczkach powietrza wiąże się również obserwowany kolor nieba, bowiem najłatwiej rozpraszane jest światło o małej długości fali czyli właśnie o barwie niebieskiej.

Polaryzację światła przez rozproszenie tłumaczy się tym, że światło indukuje w cząsteczkach drgania ładunków w kierunku prostopadłym do swego kierunku rozchodzenia się. Drgające ładunki reemitują światło (światło rozproszone) o wektorze pola elektrycznego  $\vec{E}$  zgodnym z kierunkiem ich drgań. Ponieważ fale świetlne są poprzeczne, wobec tego ośrodek może wysyłać fale tylko w kierunkach prostopadłych do kierunku własnych drgań. Tak więc wiązka rozproszona pod kątem *prostym* względem wiązki padającej będzie zawsze spolaryzowana w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiązki padającej (Rys. 9).

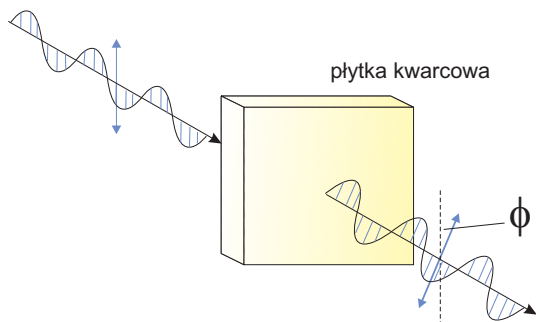


Rysunek 9. Polaryzacja światła przez rozproszenie.

### SKRĘCENIE PŁASZCZYZNY POLARYZACJI ŚWIATŁA

W 1811 roku Dominique Arago stwierdził, że płytki kwarcowa powoduje **skręcanie płaszczyzny polary-**

zacji światła przechodzącego przez tą płytkę. To znaczy, światło liniowo spolaryzowane w pewnej płaszczyźnie, po przejściu przez płytkę kwarcową, wciąż było spolaryzowane liniowo, ale w innej płaszczyźnie, obróconej (skróconej) o pewien kąt  $\phi$  względem płaszczyzny pierwotnej (Rys. 10).



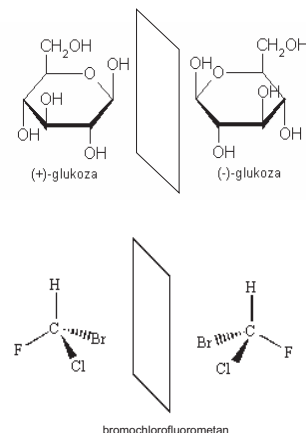
Rysunek 10. Płaszczyzna polaryzacji światła ulega skróceniu o kąt  $\phi$  po przejściu przez płytkę kwarcową.

W 1815 roku Jean Baptist Biot odkrył, że naturalnie występujące związki organiczne takie jak cukier, terpentyna, kwas winny są **aktywne (czynne) optycznie** tj. skrócają płaszczyznę polaryzacji światła. Płaszczyzna polaryzacji światła ulega skróceniu przy przejściu światła przez ośrodki optycznie czynne takie jak: glukoza, fruktoza, sacharoza, większość olejków eterycznych, białka, alkaloidy. Istnieją substancje, które są optycznie czynne w stanie krystalicznym, a roztwory tych substancji nie wykazują tej właściwości, oraz substancje, które w stanie ciekłym i gazowym, a także w roztworach są optycznie czynne.

W 1848 roku Louis Pasteur badając sól kwasu winowego stwierdził, że winian sodowo-amonowy występuje jako mieszanina dwóch rodzajów kryształów będących wzajemnymi lustrzanymi odbiciami. Rozdzieliwszy te dwa rodzaje kryształów, sporządził z nich dwa rodzaje roztworów. Okazało się, że jeden roztwór wykazywał aktywność optyczną prawoskrętną, a drugi lewoskrętną. Ponieważ rozpuszczona substancja nie posiada określonej struktury krystalicznej, Pasteur wynioskował stąd, że przyczyną aktywności optycznej winianu sodowo-amonowy są dwa rodzaje *cząsteczek* różniących się aktywnością optyczną.

Rzeczywiście, okazuje się, że związki o takim samym wzorze sumarycznym mogą różnić się właściwościami fizyko-chemicznymi. Związki takie nazywamy **izomerami**. Izomery różniące się rozmieszczeniem atomów w przestrzeni, nazywa się **stereoizomerami**. Stereoizomery będące swoim lustrzanym odbiciem nazywane są **enancjomerami**, pozostałe **diastereoizomerami**. Cząsteczki danego związku nazywamy **chiralnymi**, jeśli istnieją w formie dwóch nienakładalnych na siebie enancjomerów (tak jak ręka lewa i prawa albo sprężyna lewo- i prawoskrętna, będąc swymi zwierciadlanymi odbiciami, są nienakładalne na siebie). Przykłady związków chiral-

nych przedstawiono na Rys. 11.



Rysunek 11. Związki chiralne występują w postaci dwóch nienakładalnych na siebie odbić lustrzanych (enancjomerów).

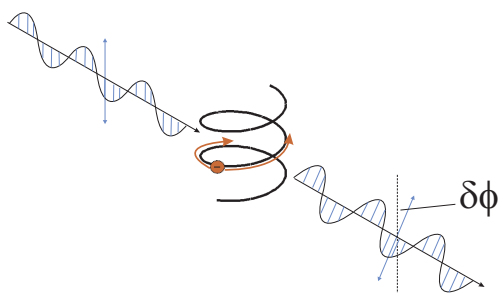
Generalnie, warunkiem koniecznym występowania czynności optycznej cząsteczek jest ich chiralność. Jeden z enancjomerów cząstek chiralnych wykazuje aktywność optyczną prawo- a drugi lewoskrętną. Jeśli roztwór zawiera enancjomery prawo- i lewoskrętne *w tej samej ilości* (jest to tzw. roztwór racemiczny), nie jest on czynny optycznie. Aktywność optyczną wykazują roztwory zawierające tylko jeden z enancjomerów cząstek chiralnych lub oba rodzaje, ale w różnych proporcjach. Aktywność optyczna substancji naturalnych (szczególnie aminokwasów) spowodowana jest tym, że występują one w przyrodzie w przeważającej części w formie cząsteczek lewoskrętnych.

Aktywność optyczna kwarcu związana jest nie tyle z budową cząsteczek, ale z jego strukturą krystaliczną (o czym świadczy fakt, że zmielony lub ciekły kwarc nie wykazuje aktywności optycznej). Kwarc występuje w dwóch formach krystalicznych wykazujących prawo- i lewoskrętną aktywność optyczną. Mówimy, że są to struktury **enancjomorficzne**.

Okazuje się, że dla niektórych substancji aktywnych optycznie (sacharydów) będących w formie roztworów kąt skrócenia płaszczyzny polaryzacji może *zmieniać się w czasie*. Zjawisko to nazywamy **mutarotacją**. Przyczyną mutarotacji jest zmiana względnej liczby enancjomerów prawo- i lewoskrętnych w roztworze (jeden rodzaj izomeru przekształca się w drugi). Proces ten trwa aż do ustalenia się równowagi chemicznej między izomerami. Na przykład w stanie równowagi roztwór wodny D-glukozy zawiera 35,5% formy  $\alpha$  i 64,5% formy  $\beta$ .

## WYJAŚNIENIE ZJAWISKA AKTYWNOŚCI OPTYCZNEJ

Nienakładalne na siebie enancjomery cząstek chiralnych można porównać do obiektów w kształcie śruby prawo- lub lewoskrętnej. Załóżmy, że roztwór składa się tylko z jednego rodzaju enancjomeru, np. prawoskrętnego. Jeśli światło spolaryzowane pada na cząstkę śrubową, wówczas pobudza do drgań znajdujące się w cząsteczce elektrony, które w takiej cząsteczce muszą poruszać się po drodze spiralnej - Rys. 12. Z powodu ruchu śrubo-



Rysunek 12. Model cząstki chiralnej. Elektron pobudzany do drgań przez falę spolaryzowaną liniowo drga wzdłuż linii śrubowej. Reemitowana przez drgający elektron fala ma wektory świetlne ułożone w płaszczyźnie obróconej o mały kąt  $\delta\phi$  względem płaszczyzny polaryzacji światła padającego.

wego elektronu reemitowana przez niego fala elektromagnetyczna ma wektory świetlne o kierunku niezgodnym z kierunkiem wektorów świetlnych padającej fali, a zatem będzie spolaryzowana w innej płaszczyźnie niż fala padająca. Można pokazać, że efekt ten zachodzi niezależnie od orientacji cząsteczki i zawsze obrót wektora świetlnego zachodzi w tę samą stronę. Przejściu fali spolaryzowanej przez cząsteczki spiralne o jednakowej skrętności towarzyszy zatem zmiana płaszczyzny polaryzacji fali (aktywność optyczna).

Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji  $\phi$  jest proporcjonalny do liczby cząsteczek, na które trafia fala podczas przechodzenia przez roztwór. Oznacza to, że  $\phi$  jest proporcjonalne do stężenia roztworu  $c$  (wyrażonego w  $g/cm^3$ ) oraz do długości drogi światła w roztworze  $l$  (prawo Biota):

$$\phi = [\alpha] c l. \quad (2)$$

Współczynnik proporcjonalności  $[\alpha]$  zwany jest skręceniem właściwym i zależy on od rodzaju substancji rozpuszczonej, temperatury, rozpuszczalnika i długości fali światła. Znajac współczynnik  $[\alpha]$  i mierząc kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji  $\phi$  można na podstawie wzoru (2) wyznaczyć nieznaną stężenie roztworu.

## POLARYMETR

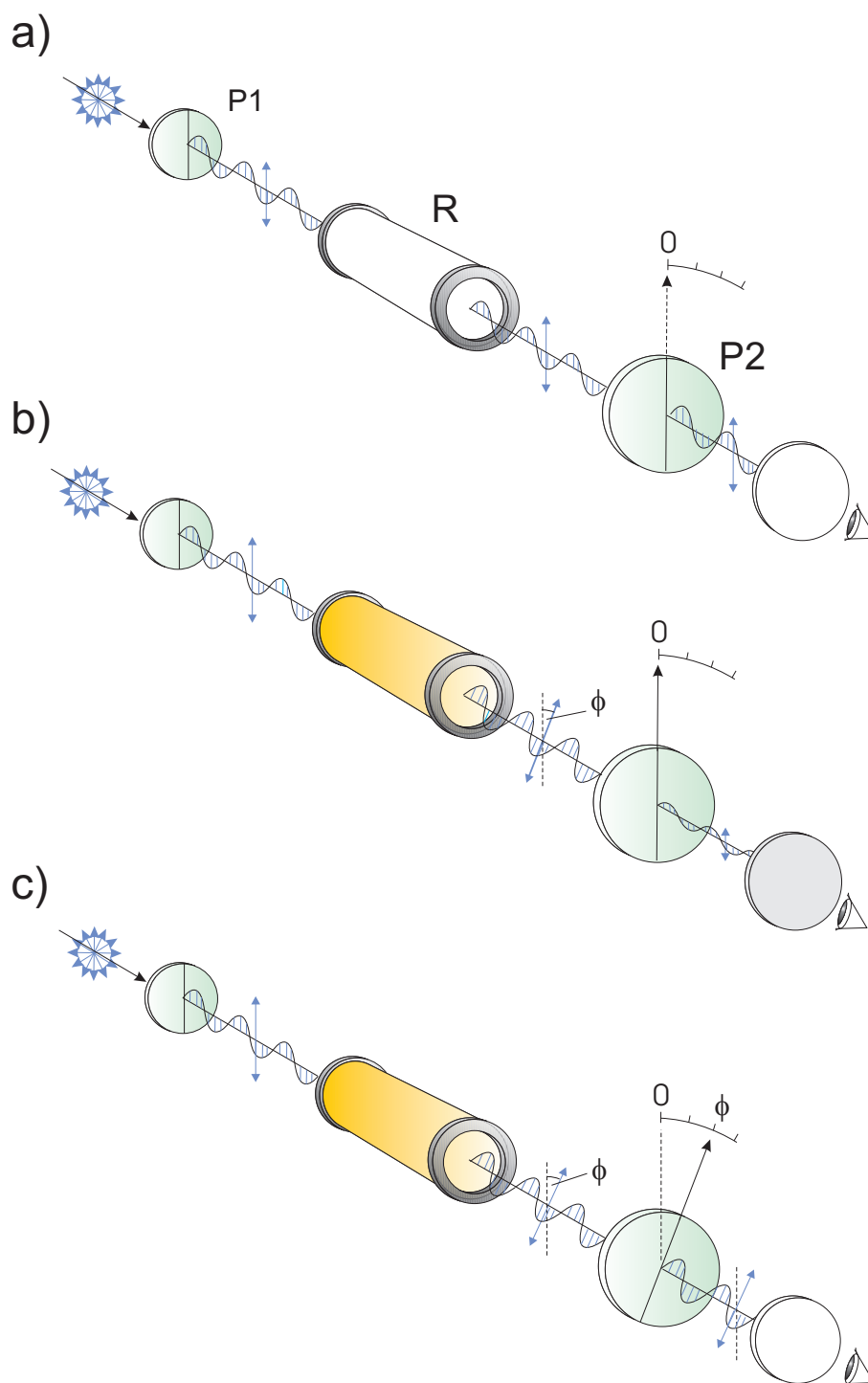
### Zasada działania

Do pomiaru kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji służy polarymetr. Ideę działania polarymetru przedstawiono na Rys. 13. Światło niespolaryzowane przechodzi przez polaryzator P1 ulegając polaryzacji. Spolaryzowana wiązka przechodzi przez rurkę R, w której umieszcza się badane roztwory. Jeśli rurka zawiera wodę lub inną substancję nieczynną optycznie (Rys. 13a), światło wychodzi z niej spolaryzowane w tej samej płaszczyźnie, w jakiej było spolaryzowane przed wejściem do rurki. Następnie trafia na drugi polaryzator P2 (analizator). Jeśli oś transmisji polaryzatora P2 jest zgodna z osią transmisji polaryzatora P1 (a więc i kierunkiem polaryzacji światła), otrzymujemy jasno oświetlone pole widzenia. Jeśli w rurce umieścimy substancję czynną optycznie (Rys. 13b), wówczas światło po wyjściu z rurki jest spolaryzowane liniowo w innej płaszczyźnie niż przed wejściem do rurki. Płaszczyzna polaryzacji światła zostaje obrócona o kąt  $\phi$ . Jeżeli oś transmisji analizatora P2 pozostawimy zgodną z osią polaryzatora P1, wtedy pole widzenia ulegnie przyćmieniu, bowiem analizator przepuści jedynie składową pola elektrycznego fali padającej równą  $E_0 \cos \phi$ . Aby odzyskać pierwotną maksymalną jasność pola widzenia, należy analizator obrócić o kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji  $\phi$ . Wtedy bowiem ponownie całe pole elektryczne zostaje przepuszczone przez analizator (Rys. 13c). Ze skali dołączonej do analizatora można odczytać kąt  $\phi$ .

### Polarymetr półcieniowy

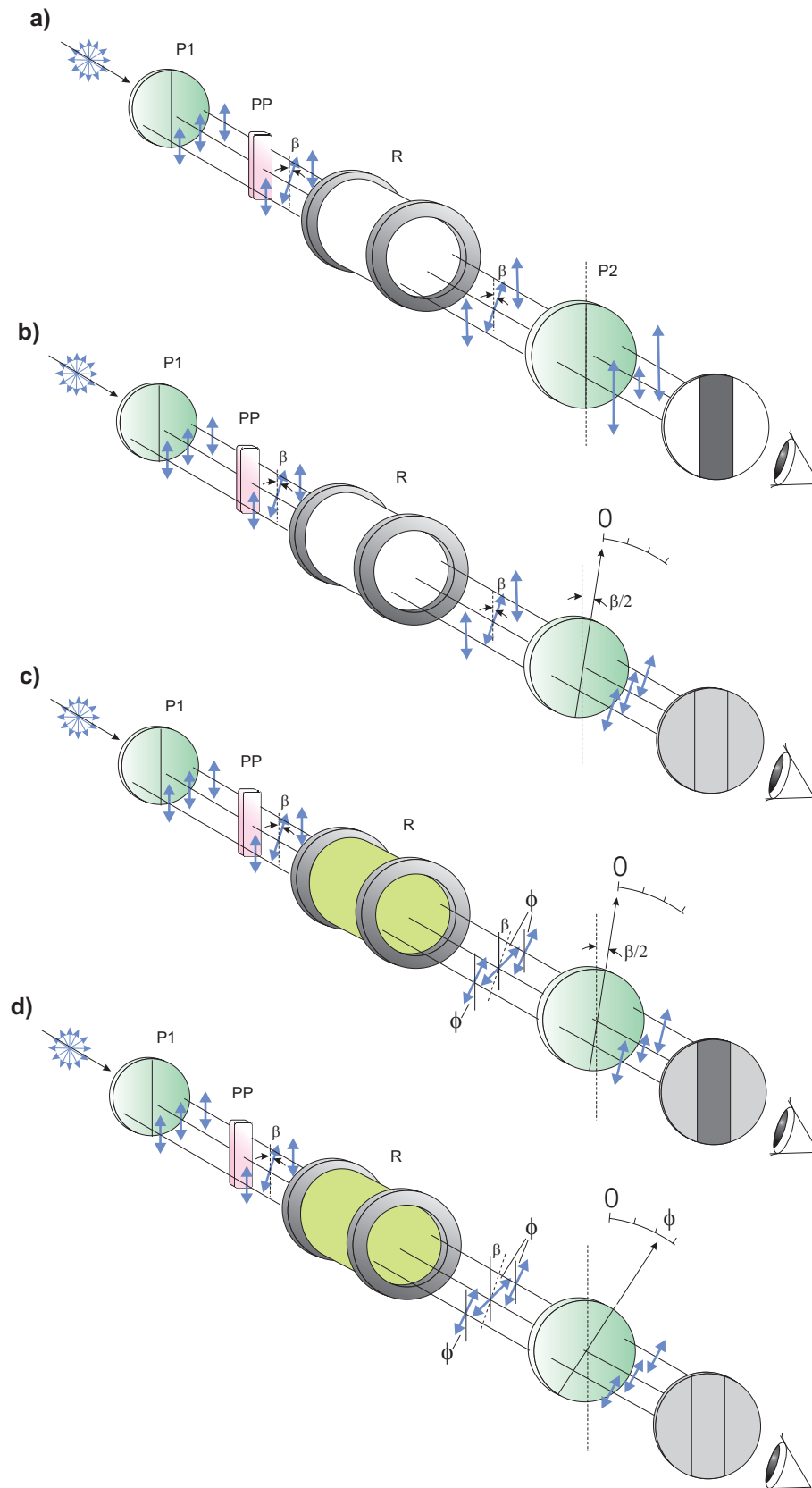
W opisanej powyżej metodzie pomiar kąta skręcenia polaryzacji światła wymaga ustawienia analizatora w takiej pozycji, by uzyskiwać maksymalne oświetlenie pola widzenia. Ponieważ ocena maksimum jasności jest mało dokładna, w praktyce używa się polarymetrów z dodatkowym elementem - wykonaną z kwarcu tzw. płytką półcieniową albo płytką Laurenta, która przesłania środkową część pola widzenia. Na Rys. 14 oznaczona jest ona symbolem PP. Obecność aktywnej optycznie płytki kwarcowej powoduje, że pole widzenia zostaje podzielone na trzy obszary i przy obrocie analizatora zmienia się ich względne oświetlenie (Rys. 15).

Przy wykonywaniu pomiarów kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji  $\phi$  należy ustawiać analizator w takim położeniu, aby wszystkie części pola widzenia były jednako oświetlone, jak na Rys. 15 C. Znajdowanie pozycji analizatora poprzez ocenę jednakowego stopnia oświetlenia obszarów w polu widzenia jest znacznie bardziej precyzyjne niż w metodzie opartej na ustalaniu maksimum jasności pola widzenia.

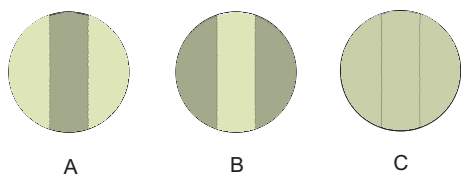


Rysunek 13. Zasada działania polarymetru (opis w tekście).





Rysunek 14. Zasada działania polarymetru półcieniowego (opis w tekście).



Rysunek 15. Pole widzenia w polarymetrze półcieniowym.

Zasada działania polarymetru półcieniowego jest następująca. Załóżmy, że w rurce R jest woda lub inna substancja nieczynna optycznie oraz osie transmisji polaryzatora P1 i analizatora P2 są zgodne. Ponieważ w półcieniowej płytce kwarcowej PP zachodzi skręcenie płaszczyzny polaryzacji o pewien mały kąt  $\beta$ , światło w środkowej części pola widzenia będzie miało płaszczyznę polaryzacji niezgodną kierunkiem osi transmisji analizatora. W rezultacie światło to tylko częściowo będzie przepuszczone przez analizator (prawo Malusa) i środkowa część pola widzenia będzie przyciemniona (Rys. 14a). Aby ustawić "zerową" pozycję analizatora należy go zorientować w takiej pozycji, by wszystkie części pola widzenia były jednakowo oświetlone. Łatwo dostrzec, że aby to osiągnąć oś transmisji analizatora powinna pokrywać się z dwusieczną kąta  $\beta$ . Wtedy bowiem przepuszczona zostanie przez analizator składowa pola elektrycznego o tej samej wartości  $E_0 \cos(\beta/2)$  zarówno dla światła biegnącego środkiem jak i tego oświetlającego zewnętrzne części pola widzenia. Na skali kątowej polarymetru powinniśmy mieć wtedy wartość 0 (Rys. 14b).

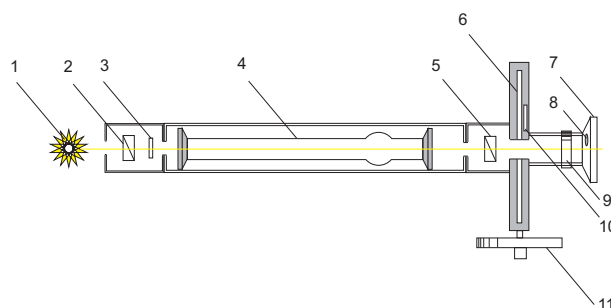
Jeśli w rurce R umieścimy ciecz optycznie czynną, to płaszczyzna polaryzacji światła po wyjściu z rurki ulegnie skręceniu o taki sam kąt  $\phi$  w całym polu widzenia. W rezultacie wektory pola elektrycznego fali nie będą już tworzyły z osią transmisji analizatora tych samych kątów w całym polu widzenia (jak to było w sytuacji przedstawionej na Rys. 14b). Raczej będziemy mieć różne oświetlenie poszczególnych części pola widzenia (Rys. 14c). Przywrócenie równego oświetlenia dokonuje się przez obrót analizatora P2 dokładnie o kąt  $\phi$  równy skręceniu płaszczyzny polaryzacji przez badaną ciecz (Rys. 14d). Wtedy bowiem wektor elektryczny znów będzie tworzyć z osią analizatora kąt  $\beta/2$  w całym polu widzenia, podobnie jak w sytuacji z Rys. 14b. Analizator zaopatrzony jest w podziałkę kątową z *noniuszem*, co pozwala na odczyt kąta  $\phi$  z dokładnością do ułamkowych części stopnia.

Polarymetr Laurenta używany w pracowni przedstawiono na Rys. 16. Schemat polarymetru pokazuje Rys. 17. Najważniejsze elementy składowe polarymetru to:

- 1 - źródło światła,
- 2 - polaryzator (nikol),
- 3 - półcieniowa płytka kwarcowa (tzw. płytka Laurenta),
- 4 - rurka pomiarowa z roztworem,
- 5 - analizator (nikol),
- 6 - tarcza z podziałką,
- 7 - obiektyw lunetki obserwacyjnej,
- 8 - lupka,



Rysunek 16. Polarymetr Laurenta.

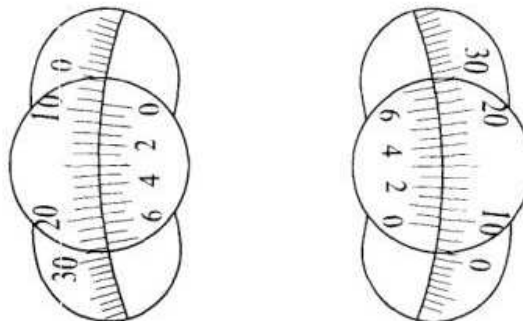


Rysunek 17. Schemat polarymetru Laurenta.

- 9 - pokrętło regulacji ostrości,
- 10 - okienko na skalę,
- 11 - śruba regulująca położenie analizatora.

Światło biegnie ze źródła światła (1) poprzez polaryzator (2), płytkę kwarcową (3), rurkę (4), analizator (5) do oka obserwatora.

Obraz skal widzianych z lewej i prawej strony przez lupki umieszczone w kołnierzu okularu pokazano na Rys. 18. Noniusz zaopatrzony jest w 20 działek, czyli pozwala na odczyt z dokładnością do  $0.05^\circ$ , czyli  $3'$ . Odczytu dokonuje się w taki sam sposób jak w przypadku suwmiarki z noniuszem. Przykładowo, z Rys. 18 znajdujemy, iż mierzony kąt wynosi  $9.30^\circ$ .



Rysunek 18. Obraz lewej i prawej skali widzianych w lupkach polarymetru.



### Cel i zasada pomiarów

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie stężenia roztworów cukru na podstawie kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji. Pomiar realizujemy wykorzystując prawo Biota (2). Mierząc kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji  $\phi$ , można na podstawie związku (2) wyznaczyć nieznaną stężenie roztworu, przy założeniu że znamy współczynnik  $[\alpha]$ . Współczynnik  $[\alpha]$  można wyznaczyć niezależnie, także na podstawie prawa Biota, mierząc kąt  $\phi$  dla cieczy o znanym stężeniu.

### Wykonanie pomiarów

1. Włączyć zasilanie lampy sodowej i odczekać około 10 min. dla uzyskania jasnego żółtego światła. Pokrętle przy obiektywie wyregulować ostrość pola widzenia.

2. Wyznaczyć "zero" polarymetru, tzn. za pomocą pokrętła (11) ustawić analizator w takiej pozycji, aby wszystkie części pola widzenia były jednakowo oświetlone (Rys. 15 C).

**Uwaga:** Właściwe ustawienie analizatora ma miejsce wówczas, gdy niewielka zmiana pozycji analizatora powoduje pojawienie się cienia w środku pola widzenia (Rys. 15 A) lub w częściach zewnętrznych (Rys. 15 B). W przypadku pomiaru dla powietrza wskazanie na kątomierzu powinno wynosić ok.  $0^\circ$ .

Odczytać kąt na skali z noniusem i zapisać wynik pomiaru. Powtórzyć pomiar 10 razy i wyniki zapisać jako  $\phi_0$ .

3. Napęlić rurkę pomiarową wodą destylowaną i wstawić ją do polarymetru.

**Uwaga:** Starać się, by w rurce nie pozostały pęcherzyki powietrza. Ewentualny pęcherzyk powietrza powinien znaleźć się w wybrzuszeniu rurki pomiarowej, gdy ta umieszczona jest w polarymetrze. Nakrętkę rurki pomiarowej zakręcamy ostrożnie, pilnując aby nie zgubić szkiełka nakrywkowego oraz aby między szkiełkiem a nakrętką znajdowała się gumowa podkładka.

Wyregulować ostrość pokrętle przy obiektywie. Sprawdzić, czy zmieniła się wartość  $\phi_0$ . Jeżeli tak, wymyć dokładnie rurkę i powtórzyć punkt 3.

4. Napęlić rurkę pomiarową roztworem cukru o stężeniu  $c = (10 \text{ g cukru}) / 100 \text{ cm}^3$  i umieścić ją w polarymetrze, stosując się przy tych czynnościach do uwagi z punktu 3.

5. Wyregulować ostrość pokrętle przy obiektywie. Za pomocą pokrętła analizatora uzyskać jednakową szarość wszystkich części pola widzenia. Odczytać ze skali kąt skręcenia dla danego roztworu. Oznaczyć tę wartość jako  $\phi_1$ . Pomiar powtórzyć 10 razy za każdym razem zmieniając nieco położenie analizatora i ponownie przywracając stan jednakowego oświetlenia wszystkich obszarów w polu widzenia.

6. Podobnie wykonać pomiary kąta skręcenia (także 10 razy) dla roztworu o stężeniu  $c_A$  (roztwór A) i stężeniu  $c_B$  (roztwór B). Wyniki oznaczyć odpowiednio jako  $\phi_A$  i  $\phi_B$ .

### Opracowanie wyników

1. Wyliczyć wartości średnie  $\phi_{0sr}$ ,  $\phi_{1sr}$ ,  $\phi_{Asr}$ ,  $\phi_{Bsr}$ .

2. Obliczyć skręcenie właściwe cukru, korzystając ze wzoru:

$$[\alpha] = \frac{\phi_1 - \phi_0}{c \cdot l}, \quad (3)$$

gdzie:

$c$  - stężenie roztworu =  $10 \text{ g} / 100 \text{ cm}^3$ ,  
 $l$  - długość rurki pomiarowej =  $20 \text{ cm}$  (rurka długa),  $10 \text{ cm}$  (rurka krótka).

Za  $\phi_0$  i  $\phi_1$  wstawić wartości uzyskane w p. 1 dla  $\phi_{0sr}$  i  $\phi_{1sr}$ . Wynik należy podać, stosując jednostkę  $\text{cm}^2 / \text{g}$ .

3. Obliczyć stężenie roztworu A korzystając z zależności:

$$c_A = \frac{\phi_A - \phi_0}{[\alpha] \cdot l}, \quad (4)$$

wstawiając za  $\phi_A$  otrzymaną w p. 1 wartość  $\phi_{Asr}$ .

4. Podobnie jak dla roztworu A, obliczyć stężenie roztworu B.

5. Ułamek masowy  $p$  to stosunek masy substancji zawartej w roztworze (u nas jest to cukier) do masy całego roztworu. Dla roztworów A i B obliczyć ułamki masowe według wzoru:

$$p = \frac{c}{d},$$

gdzie  $c$  - stężenie roztworu,  $d$  - gęstość roztworu, którą należy odczytać z załączonej Tabeli I.

### Wyznaczanie niepewności pomiarowych

1. Ze względu na 10-cio krotne powtarzanie pomiarów, obliczyć niepewności standardowe  $u(\phi_0)$ ,  $u(\phi_1)$ ,  $u(\phi_A)$ ,

$u(\phi_B)$  wyznaczenia średnich  $\phi_{0_{\text{sr}}}$ ,  $\phi_{1_{\text{sr}}}$ ,  $\phi_{A_{\text{sr}}}$ ,  $\phi_{B_{\text{sr}}}$  zgodnie z wzorem (3) w materiałach [12].

2. Stosując wzór (9) z materiałów [12], obliczyć niepewność standardową pomiaru  $[\alpha]$ , czyli:

$$u([\alpha]) = \sqrt{\left(\frac{\partial[\alpha]}{\partial\phi_0}\right)^2 u^2(\phi_0) + \left(\frac{\partial[\alpha]}{\partial\phi_1}\right)^2 u^2(\phi_1)}. \quad (5)$$

3. Wstawiając wyrażenie (3) do (4), otrzymujemy:

$$c_A = \frac{\phi_A - \phi_0}{\phi_1 - \phi_0} c. \quad (6)$$

Zastosować wzór (9) z materiałów [12] do wyrażenia (6) i obliczyć niepewność standardową pomiaru  $c_A$ , czyli:

$$u(c_A) = \sqrt{\left(\frac{\partial c_A}{\partial\phi_0}\right)^2 u^2(\phi_0) + \left(\frac{\partial c_A}{\partial\phi_1}\right)^2 u^2(\phi_1) + \left(\frac{\partial c_A}{\partial\phi_A}\right)^2 u^2(\phi_A)}.$$

4. Analogicznie postąpić przy obliczaniu niepewności standardowej pomiaru  $c_B$ .

Tabela I. Zależność gęstości roztworu cukru od jego stężenia.

c [g/100 cm <sup>3</sup> ]	d [g/cm <sup>3</sup> ]
1	1,0021
5	1,0177
10	1,0367
15	1,0558
20	1,0748
25	1,0942
30	1,1136

- 
- [1] Sz. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, część IV, s. 359-465.
- [2] E. Szyszko, Instrumentalne metody analityczne, PZWL 1982, s. 66-91.
- [3] W. A. Shurcliff i S. S. Ballard, Światło spolaryzowane, PWN 1968.
- [4] Z. Kamiński, Fizyka dla kandydatów na wyższe uczelnie techniczne, WNT 1965, s. 328-332.
- [5] K. Pigoń i Z. Ruzewicz, Chemia fizyczna, cz. 2.
- [6] D. Hollyday, R. Resnick, Fizyka T. 2, s. 561-579.
- [7] R. Feynman, Feynmana wykłady z fizyki, T. 1, część 2, s. 106-120.
- [8] M. Massalska, J. Masalski, Fizyka kl. IV, s. 110-121.
- [9] S. Przystański, Fizyka z elementami biofizyki i agrofizyki, PWN, 1997, s. 183-193.
- [10] R. T. Morrison, R. N. Boyd, Chemia organiczna, PWN, T1, s. 154-179.
- [11] Cz. Bobrowski, Fizyka (krótki kurs dla inżynierów), WNT, 1981, s. 291-297.
- [12] K. Rębilas, Wprowadzenie do metod opracowania wyników pomiarowych.