

## LXVI OLIMPIADA FIZYCZNA — ZADANIA ZAWODÓW I STOPNIA

Rozwiązania zadań I stopnia należy przysyłać do **Okręgowych Komitetów Olimpiady Fizycznej** w terminach: część I — do 14 października b.r., część II — do 18 listopada b.r. O kwalifikacji do zawodów II stopnia będzie decydować suma punktów uzyskanych za rozwiązania zadań części I i II.

**Przed wysłaniem rozwiązań prosimy o zarejestrowanie się na stronie internetowej <http://www.kgof.edu.pl/rejestracja>.**

Szczegóły dotyczące regulaminu oraz organizacji Olimpiady można znaleźć na stronie internetowej <http://www.kgof.edu.pl>.

### **Krótką informacją na temat poprawnej redakcji rozwiązań zadań Olimpiady Fizycznej**

Zadania powinny być rozwiązane jasno, przejrzysto i czytelnie. Każde zadanie powinno być rozwiązane na oddzielnej kartce papieru. Poszczególne etapy rozumowania należy opisać, a wszelkie zależności fizyczne, które nie są wprost podane w podręcznikach szkolnych – udowodnić. Należy również objaśnić wszelkie oznaczenia występujące w rozwiązaniach zadań. Rysunki mogą być wykonane odrębnie – muszą być jednak przejrzyste i czytelne oraz dobrze opisane w tekście.

Rozumowanie przedstawione w rozwiązaniach nie może zawierać luk logicznych. Każdy krok rozumowania powinien być zwięźle opisany, a przyjęte założenia – klarownie uzasadnione. Rozwlekłość jest uznawana za ujemną cechę pracy.

Rozwiązanie zadania teoretycznego powinno być poprzedzone analizą problemu poruszanego w zadaniu, a zakończone dyskusją wyników. Rozwiązania zadań teoretycznych powinny odnosić się do ogólnej sytuacji opisanej w treści, dane liczbowe (o ile zostały podane) powinny być podstawione dopiero do ostatecznych wzorów.

W zadaniach doświadczalnych należy wyraźnie rozgraniczyć części teoretyczną i doświadczalną. Część teoretyczna zadania doświadczalnego powinna zawierać analizę problemu wraz z wyprowadzeniem niezbędnych wzorów (o ile nie ma ich wprost w podręcznikach szkolnych) oraz sugestie metody doświadczalnej. Część doświadczalna powinna zawierać m.in. opis układu doświadczalnego ilustrowany rysunkiem, opis wykonanych pomiarów, wyniki pomiarów, analizę czynników mogących wpływać na wyniki (jak np. rozpraszanie energii lub opory wewnętrzne mierników), opracowanie wyników wraz z dyskusją niepewności pomiarowych. Wykresy do zadania doświadczalnego powinny być starannie wykonane, najlepiej na papierze milimetrowym. Ocenie podlegają wyłącznie elementy rozwiązania opisane w pracy. W zadaniach doświadczalnych osobno oceniana jest część teoretyczna i część doświadczalna.

W rozwiązaniach można posługiwać się dowolnym układem jednostek, chyba że tekst zadania mówi wyraźnie inaczej.

# LXVI OLIMPIADA FIZYCZNA

## ZAWODY I STOPNIA

### CZEŚĆ DOŚWIADCZALNA

Za każde z zadań doświadczalnych można otrzymać maksymalnie 40 punktów.

#### Zadanie D1.

Jeśli magnes porusza się wewnątrz przewodzącej rury, to w materiale rury indukują się prądy wirowe. Powodują one powstanie siły działającej na magnes przeciwnie do kierunku ruchu. Wartość siły dana jest wzorem:

$$F = bv^\alpha,$$

gdzie  $v$  to prędkość magnesu względem rury, zaś  $b$  oraz  $\alpha$  są pewnymi stałymi.

Mając do dyspozycji:

- rurę miedzianą o długości co najmniej 1 m,
- magnes neodymowy o średnicy mniejszej od średnicy wewnętrznej rury,
- długi, cienki drut miedziany w izolacji (np. emaliowany) z odizolowanymi końcówkami,
- oscyloskop,
- przewody i zaciski umożliwiające zestawienie układu pomiarowego,
- kilka obciążników wykonanych z niemagnetycznego materiału,
- wagę kuchenną,
- papier milimetrowy,
- linijkę, taśmę klejącą, plastelinę, karton,

wyznacz współczynnik  $\alpha$  dla użytej rury miedzianej.

#### Uwagi:

1. Jeśli nie masz dostępu do oscyloskopu, możesz użyć komputera z kartą dźwiękową, gniazdem mikrofonowym i odpowiednim oprogramowaniem, tj. rejestratorem i graficznym analizatorem dźwięku, np. Audacity (<http://www.audacityteam.org/>).
2. Do wykonania doświadczenia możesz użyć typowej miedzianej rury hydraulicznej o średnicy np. 22 mm, dostępnej w sklepach budowlanych.
3. W rozwiązaniu podaj wymiary (długość, średnica zewnętrzna, grubość ścianki) użytej rury.

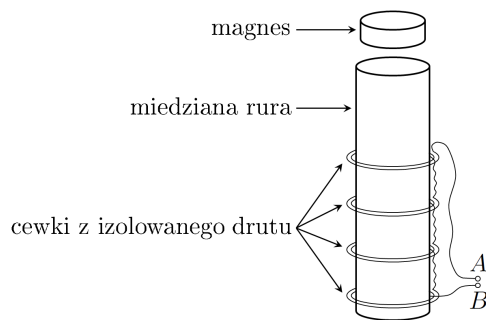
#### Rozwiązanie zadania D1.

##### Część teoretyczna

Magnes upuszczony wewnątrz ustawionej pionowo przewodzącej rury będzie się początkowo poruszał ruchem przyspieszonym, a po odpowiednio długim czasie – ruchem w przybliżeniu jednostajnym. Nastąpi to wtedy, gdy siła działająca na magnes przeciwnie do kierunku jego ruchu, będąca skutkiem obecności prądów wirowych w materiale rury, zrównoważy ciężar magnesu. Prędkość magnesu w takiej sytuacji można wyznaczyć, nawijając wokół rury, za pomocą izolowanego drutu, kilka cewek rozmieszczonych wzdłuż rury w znanych odległościach (np. dla uproszczenia jednakowych i równych  $d$ ) i łącząc je szeregowo, jak schematycznie przedstawiono na Rys. 1. Poruszający się magnes, mijając płaszczyzny kolejnych cewek, będzie powodował indukowanie w nich zmiennej siły elektromotorycznej, której zależność od czasu zarejestrować można za pomocą oscyloskopu podłączonego do zacisków  $A$  i  $B$ . Dzięki temu można wyznaczyć czas  $t_i$ , w jakim magnes mija płaszczyznę  $i$ -tej cewki, a dzięki znajomości odległości  $d$  pomiędzy cewkami można wyznaczyć prędkość  $v$  magnesu. Aby wyznaczyć współczynnik  $\alpha$  w równaniu podanym w treści zadania, należy wyznaczyć prędkość  $v$  dla różnych mas  $m$  spadającego magnesu (masę magnesu można zmieniać za pomocą niemagnetycznych obciążników) i dopasować odpowiednią krzywą do zależności  $F = mg$  od  $v$ . Wygodnie jest to zrobić, wykreślając zależność logarytmu  $m$  od logarytmu  $v$ , bowiem po zlogarytmowaniu stronami równania podanego w treści zadania otrzymujemy:

$$\log(F) = \log(mg) = \log(m) + \log(g) = \log(b) + \alpha \log(v), \quad (1)$$

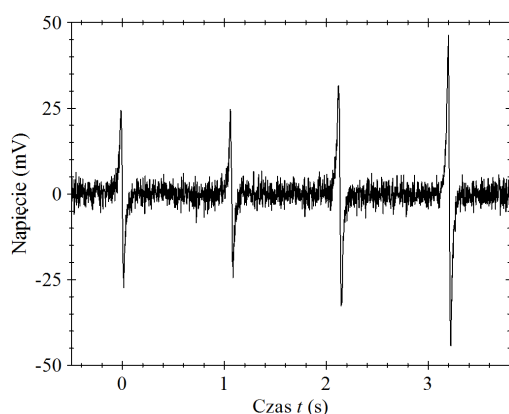
Zatem zależność  $\log(m)$  od  $\log(v)$  jest zależnością liniową, do której można dopasować prostą o współczynniku kierunkowym  $\alpha$ .



Rys. 1. Schemat układu doświadczalnego pozwalającego na wyznaczenie prędkości magnesu wewnątrz przewodzącej rury.

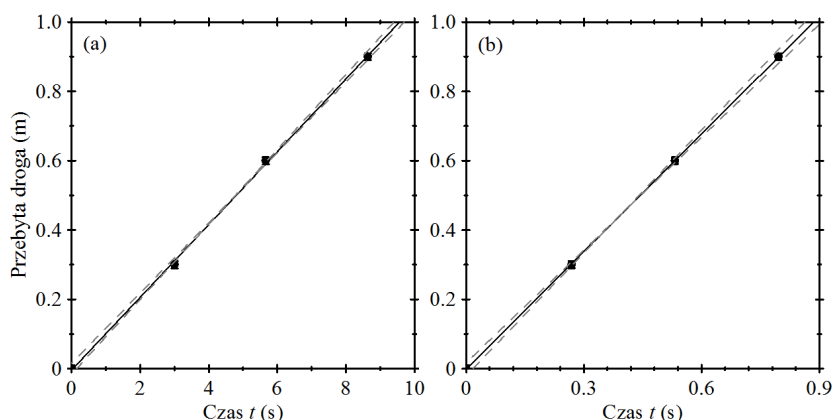
### Część doświadczalna

W celu wykonania doświadczenia zestawiono układ eksperymentalny według schematu przedstawionego na Rys. 1, nawijając wokół miedzianej rury 4 cewki o kilkunastu zwojach i rozmieszczając je w odległości  $d = 30$  cm od siebie. Końcówki drutu, z którego nawinięto cewki, podłączono do oscyloskopu. Przykładowy przebieg zarejestrowany za pomocą oscyloskopu przedstawia Rys. 2:



Rys. 2. Przykładowa zależność napięcia rejestrowanego przez oscyloskop od czasu podczas spadania magnesu wewnątrz przewodzącej rury.

Gdy magnes zbliża się do płaszczyzny którejś z cewek, napięcie indukowane w obwodzie rośnie, następnie, gdy magnes mija tę płaszczyznę, gwałtownie zmienia znak, po czym dąży do wartości bliskiej zeru. Za moment przejścia magnesu przez płaszczyznę cewki można uznać moment, w którym napięcie indukowane w obwodzie zrównuje się z zerem podczas gwałtownej zmiany znaku. Mając wyznaczone czasy  $t_i$  mijania przez magnes płaszczyzn  $i$ -tej cewki, można wykreślić zależność położenia magnesu od czasu:



Rys. 3. Przykładowa zależność położenia magnesu od czasu wraz z dopasowaną prostą (linia ciągła) dla najmniejszej (a) i największej (b) masy  $m$  magnesu wraz z obciążnikami. Linie przerywane odpowiadają prostym o możliwie najmniejszym i największym nachyleniu.

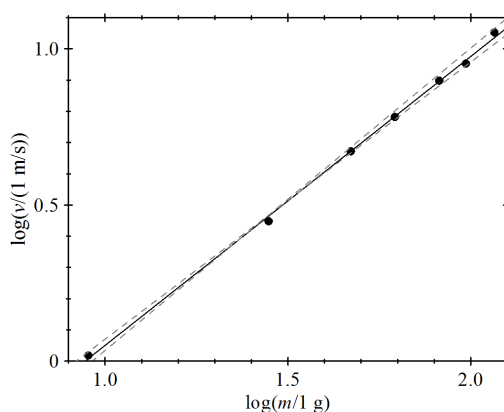
Jak widać, wykreślone punkty z bardzo dobrą dokładnością układają się na prostej, zarówno dla najmniejszej, jak i największej masy  $m$ . Oznacza to, że w czasie rejestrowania ruchu magnesu poruszał się on już ruchem jednostajnym. Współczynnik kierunkowy tej prostej jest równy prędkości magnesu i w przypadku (a) z Rys. 3 wynosi  $(0,102 \pm 0,004) \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , a w przypadku (b) wynosi  $(1,15 \pm 0,02) \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Analogiczną procedurę wyznaczania prędkości  $v$  magnesu przeprowadzono dla różnych wartości masy  $m$  magnesu z obciążnikami, wyznaczonej za pomocą wagi kuchennej. Dla każdej wartości masy  $m$  pomiar powtarzano czterokrotnie. Otrzymane wyniki przedstawia tabela:

$m$ (g)	$v_{\text{sr}}$ ( $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ )	$v_{\text{max}} - v_{\text{min}}$ ( $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ )
9	0,104	0,009
28	0,281	0,010
47	0,470	0,016
62	0,605	0,015
82	0,791	0,022
97	0,897	0,030
116	1,13	0,05

Tab. 1. Wyniki pomiaru prędkości  $v$  magnesu dla różnych wartości masy  $m$  magnesu wraz z obciążnikami: średnia wartość  $v_{\text{sr}}$  z czterech pomiarów oraz różnica pomiędzy wartością maksymalną ( $v_{\text{max}}$ ) i minimalną ( $v_{\text{min}}$ ), będąca oszacowaniem niepewności wartości  $v_{\text{sr}}$ .

Korzystając z tych danych, wykreślono następnie zależność  $\log(v)$  od  $\log(m)$ :



Rys. 4. Zależność logarytmu prędkości granicznej  $v$  magnesu (w metrach na sekundę) od logarytmu masy  $m$  magnesu wraz z obciążnikami (w gramach) wraz z dopasowaną prostą (linia ciągła). Linie przerywane odpowiadają prostym o możliwie najmniejszym i największym nachyleniu.

Współczynnik kierunkowy dopasowanej prostej, będący szukanym współczynnikiem, wynosi:

$$\alpha = 0,94 \pm 0,06.$$

Niepewność tego wyniku oszacowano na podstawie współczynników kierunkowych dopasowanych prostych o możliwie największym i najmniejszym nachyleniu (Rys. 4). Głównym źródłem tej niepewności są błędy przypadkowe, których skutkiem jest rozrzut otrzymywanych wartości prędkości  $v$  w kolejnych powtórzeniach pomiaru dla tej samej masy  $m$ . Błędy te mogą wynikać np. z przypadkowego ocierania się magnesu o ścianki rury podczas spadku.

### Punktacja zadania D1.

#### Część teoretyczna

Pomysł na wyznaczenie prędkości granicznej przez badanie zależności położenia od czasu – 2 pkt.

Pomysł na zastosowanie cewek do wykrywania momentu przelotu magnesu przez płaszczyznę cewki – 3 pkt.

Pomysł na połączenie więcej niż dwóch cewek lub wykonanie wielokrotnego pomiaru przy użyciu dwóch cewek umieszczonych w różnych położeniach – 3 pkt.

Wzór (1) lub równoważny – 2 pkt.

#### Część doświadczalna

Zestawienie i opis układu umożliwiającego poprawne wykonanie doświadczenia – 2 pkt.

Poprawna interpretacja sygnału rejestrowanego przez oscyloskop i wyznaczenie momentów mijania płaszczyzn cewek przez magnes – 1 pkt

Wykonanie pomiarów prędkości  $v$  dla co najmniej 4 różnych mas  $m$  i sprawdzenie czy zależność  $\log(v)$  od  $\log(m)$  jest liniowa – 2 pkt.

Co najmniej trzykrotne powtórzenie pomiaru prędkości  $v$  dla każdej masy  $m$  – 2 pkt.  
Wyznaczenie wartości współczynnika  $\alpha$  na podstawie dopasowania prostej – 1 pkt  
Wynik liczbowy wraz z oszacowaniem jego niepewności – 1 pkt  
Wskazanie głównych źródeł niepewności – 1 pkt

### Zadanie D2.

Zależność oporu typowego opornika od temperatury można z dobrym przybliżeniem opisać wzorem:

$$R = R_0 (1 + \alpha(T - T_0)),$$

gdzie  $R$  to opór opornika,  $T$  to jego temperatura,  $R_0$  to jego opór w temperaturze pokojowej,  $T_0$  to wartość temperatury pokojowej, a  $\alpha$  to pewna stała nazywana współczynnikiem temperaturowym opornika.

Mając do dyspozycji:

- cztery oporniki o jednakowym nominalnym oporze wynoszącym około  $1\text{ k}\Omega$  i mocy znamionowej z przedziału  $0,5\text{ W} - 1,0\text{ W}$ ,
- źródło prądu stałego o napięciu kilku woltów (zasilacz lub baterię),
- cyfrowy woltomierz o dokładności odczytu 3 cyfr znaczących,
- naczynie (np. garnek lub kubek) i wrzątek,
- termometr,
- szczelną torebkę foliową,
- przewody i zaciski umożliwiające zestawienie układu pomiarowego,

wyznacz jak najdokładniejszą metodą współczynnik temperaturowy jednego z użytych oporników.

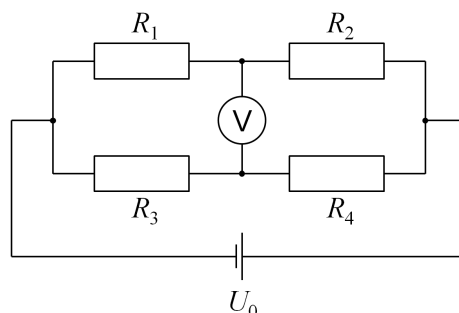
### Uwagi:

1. Jako woltomierza możesz użyć cyfrowego miernika uniwersalnego.
2. Jeżeli nie masz możliwości zdobycia oporników o podanych wartościach oporu, przed 31 października 2016 r. przyślij na adres KGOF zaadresowaną do siebie kopertę ze znaczkiem pocztowym.

### Rozwiązanie zadania D2.

#### Część teoretyczna

Ponieważ zmiana oporu typowego opornika na skutek zmiany temperatury jest bardzo mała, do wykonania doświadczenia potrzebna jest bardzo dokładna metoda pomiaru oporu. Metodą taką jest metoda mostkowa, którą można zrealizować w układzie schematycznie przedstawionym na Rys. 5:



Rys. 5. Schemat układu mostkowego pozwalającego na badanie zmian oporu jednego z oporników na skutek zmiany temperatury.

W takim układzie, jeżeli temperatura wszystkich oporników jest równa temperaturze pokojowej, a natężenie prądu płynącego przez woltomierz jest pomijalnie małe, to wartość napięcia  $U$  wskazywanego przez woltomierz wynika z drobnych fabrycznych różnic pomiędzy oporami  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  i  $R_4$ , i wynosi:

$$U = U_0 \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right), \quad (2)$$

gdzie  $U_0$  jest wartością napięcia użytego źródła prądu. Jeżeli natomiast temperatura jednego z oporników (np. tego o oporze  $R_1$ ) zmieni się o  $\Delta T$ , to jego opór zmieni się o:

$$\Delta R = R_0 \alpha \Delta T. \quad (3)$$

Wskutek tej zmiany wartość napięcia wskazywanego przez woltomierz zmieni się o:

$$\Delta U = U_0 \left( \frac{R_1 + \Delta R}{R_1 + \Delta R + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = U_0 \frac{\Delta R R_2}{(R_1 + R_2)^2 + \Delta R (R_1 + R_2)}. \quad (4)$$

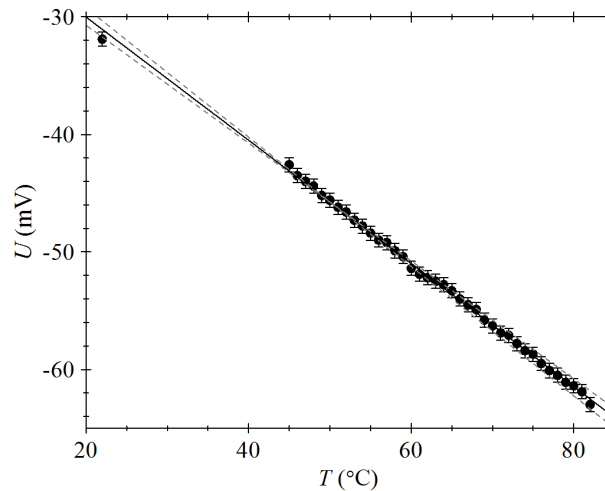
Ponieważ  $R_1 \approx R_2 \approx R_0$  oraz  $\Delta R \ll R_0$ , to powyższe wyrażenie można z dobrą dokładnością przybliżyć wyrażeniem:

$$\Delta U = U_0 \frac{\Delta R R_0}{(2R_0)^2} = U_0 \frac{\Delta T \alpha R_0^2}{(2R_0)^2} = \Delta T \frac{U_0 \alpha}{4}. \quad (5)$$

Zatem, wykreślając zależność napięcia wskazywanego przez woltomierz od temperatury opornika i dopasowując do tej zależności prostą, możemy wyznaczyć wartość współczynnika  $\frac{U_0 \alpha}{4}$ . Temperaturę opornika możemy natomiast zmieniać, umieszczając go w szczelnej torebce foliowej i zanurzając razem z termometrem w naczyniu z gorącą początkowo wodą.

### Część doświadczalna

W celu wykonania doświadczenia wykonano obwód elektryczny według schematu przedstawionego na Rys. 5, przy użyciu baterii o napięciu znamionowym 9 V, cyfrowego miernika uniwersalnego i czterech oporników o oporze znamionowym  $960 \Omega$  i mocy znamionowej 0,5 W. Siła elektromotoryczna baterii, wyznaczona za pomocą miernika uniwersalnego, była równa  $U_0 = (9,35 \pm 0,01) \text{ V}$ . Gdy wszystkie oporniki miały temperaturę pokojową, napięcie wskazywane przez woltomierz wynosiło  $(-31,9 \pm 0,1) \text{ mV}$ . Następnie jeden z oporników umieszczono w szczelnej torebce foliowej i zanurzono razem z termometrem w naczyniu z wrzątkiem. Zadbano przy tym, aby końcówka termometru znajdowała się możliwie blisko opornika, a opornik nie znajdował się blisko ścianek naczynia (aby uniknąć znaczących niejednorodności temperatury wody wokół opornika). Następnie, w miarę stygnięcia wody w naczyniu, notowano wartość temperatury  $T$  wskazywaną przez termometr i odpowiadającą jej wartość napięcia  $U$  wskazywaną przez woltomierz. Otrzymane wyniki przedstawiono na poniższym wykresie:



Rys. 6. Zależność napięcia wskazywanego przez woltomierz od temperatury jednego z oporników, wraz z dopasowaną prostą (linia ciągła). Linie przerywane odpowiadają prostym o możliwie najmniejszym i największym nachyleniu.

Z wykresu odczytano współczynnik kierunkowy dopasowanej prostej  $\frac{U_0 \alpha}{4} = (-0,524 \pm 0,015) \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}$ , a stąd:

$$\alpha = (-2,24 \pm 0,06) \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Głównym źródłem niepewności otrzymanej wartości współczynnika  $\alpha$  są niepewności odczytu napięcia  $U$ , wpływające na niepewność dopasowania prostej do zależności  $U$  od  $T$ .

### Uwaga:

Według danych producenta opornika użytego w rozwiązaniu zadania wartość bezwzględna jego współczynnika temperaturowego nie powinna przekraczać  $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

## Punktacja zadania D2.

### Część teoretyczna

Pomysł na dokładny pomiar zmian oporu opornika – 5 pkt.

Wzór (2) lub równoważny – 2 pkt.

Wzór (5) lub równoważny – 3 pkt.

### Część doświadczalna

Zestawienie i opis układu umożliwiającego poprawne wykonanie doświadczenia – 2 pkt.

Wykonanie pomiarów napięcia  $U$  dla co najmniej 7 różnych temperatur opornika – 4 pkt.

Wyznaczenie wartości współczynnika  $\alpha$  na podstawie dopasowania prostej – 2 pkt.

Wynik liczbowy wraz z oszacowaniem jego niepewności – 1 pkt

Wskazanie głównych źródeł niepewności – 1 pkt

## Uwaga dla KOOF:

Rozwiązanie mniej dokładną metodą pomiaru niż metoda mostkowa należy punktować maksymalnie na 50% łącznej liczby możliwych do uzyskania punktów.

## Zadanie D3.

Mając do dyspozycji:

- przezroczystą, gładką, biurową taśmę klejącą,
- wskaźnik laserowy,
- biały, sztywny karton,
- plastelinę, linijkę, taśmę mierniczą, nożyczki,
- zaciemnione pomieszczenie,

wyznacz współczynnik załamania światła dla folii, z której wykonana jest użyta taśma klejąca. Na kartkę z rozwiązaniem naklej kawałek tej taśmy.

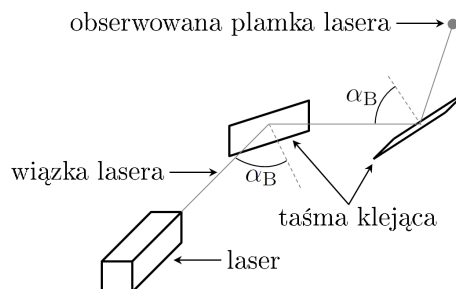
## Uwagi:

1. Światło laserowe może być niebezpieczne dla wzroku. Nigdy nie kieruj wiązki lasera w stronę ludzi ani zwierząt.
2. Typowy wskaźnik laserowy emituje światło niespolaryzowane.

## Rozwiązanie zadania D3.

### Część teoretyczna

Szukany współczynnik załamania światła można znaleźć wyznaczając kąt Brewstera  $\alpha_B$  dla użytej taśmy klejącej. Kąt ten można znaleźć odbijając dwukrotnie wiązkę lasera od powierzchni taśmy klejącej tak, aby drugie z odbić było całkowicie wygaszone. Dokonać tego można w układzie schematycznie pokazanym na Rys. 7:

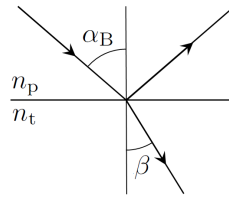


Rys. 7. Schemat układu pozwalającego na wyznaczenie współczynnika załamania światła poprzez dwukrotne odbicie wiązki lasera pod kątem Brewstera.

W sytuacji przedstawionej na powyższym rysunku wiązka lasera po pierwszym odbiciu od taśmy klejącej pod kątem Brewstera jest całkowicie spolaryzowana liniowo. Jeżeli drugie odbicie nastąpi w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny wyznaczonej przez promień padający i odbity w pierwszym odbiciu, a dodatkowo odbicie to nastąpi również pod kątem Brewstera, to promień odbity zostanie całkowicie wygaszony. W takiej sytuacji z prawa Snelliusa mamy:

$$n_p \sin \alpha_B = n_t \sin \beta, \quad (6)$$

gdzie  $n_p$  to współczynnik załamania dla powietrza,  $n_t$  to współczynnik załamania dla taśmy klejącej, a  $\beta$  to kąt załamania światła w rozważanej sytuacji, jak zaznaczono na Rys. 8:



Rys. 8. Schemat przejścia wiązki lasera przez granicę ośrodków (powietrza i taśmy klejącej).

Jednocześnie, ponieważ  $\alpha_B$  jest kątem Brewstera, to:

$$\alpha_B + \beta = 90^\circ. \quad (7)$$

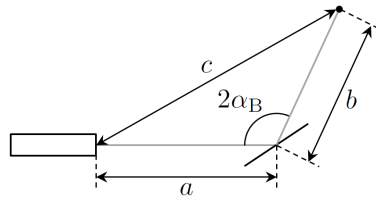
Stąd, przyjmując  $n_p = 1$ , otrzymujemy:

$$\sin\alpha_B = n_t \sin\beta = n_t \cos\alpha_B, \quad (8)$$

a zatem:

$$\operatorname{tg}\alpha_B = n_t. \quad (9)$$

Znajdując więc takie dwie płaszczyzny i kąty odbicia wiązki lasera od taśmy klejącej, przy których wiązka odbita ulega wygaszeniu, możemy bezpośrednio obliczyć wartość  $n_t$ . Kąt padania  $\alpha_B$  można natomiast wyznaczyć, mierząc za pomocą linijki i taśmy mierniczej odległości pomiędzy wskaźnikiem laserowym i plamkami lasera na kolejnych kawałkach kartonu, jak pokazano na Rys. 9:



Rys. 9. Schemat wyznaczenia kąta padania wiązki lasera na powierzchnię taśmy klejącej).

W takiej sytuacji, korzystając z wyrażenia na pole powierzchni trójkąta o bokach  $a$ ,  $b$  i  $c$ , możemy zapisać tożsamość:

$$\frac{ab \sin 2\alpha_B}{2} = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}, \quad (10)$$

gdzie  $p = \frac{1}{2}(a + b + c)$ , a stąd:

$$\alpha_B = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}}{ab} \quad (11)$$

### Część doświadczalna

W celu wykonania doświadczenia zestawiono układ doświadczalny według schematu przedstawionego na Rys. 7. Dwa kawałki taśmy klejącej przyklejono do dwóch kawałków sztywnego, płaskiego kartonu. Wskaźnik laserowy przymocowano poziomo do stołu za pomocą plasteliny. Jeden z kawałków kartonu z taśmą klejącą przymocowano pionowo do stołu, tak aby wiązka lasera padała na taśmę pod pewnym kątem. Następnie na drodze wiązki odbitej od tej taśmy umieszczono drugi kawałek kartonu z taśmą klejącą w taki sposób, aby wiązka od niej odbita leżała w płaszczyźnie pionowej. W wiązce tej umieszczono kolejny kawałek kartonu służący za ekran, na którym obserwowano natężenie plamki lasera. Następnie zmieniano kąt pomiędzy drugim z kawałków kartonu a płaszczyzną stołu (a w konsekwencji kąt padania wiązki lasera) w taki sposób, aby otrzymać najmniejsze możliwe natężenie plamki lasera na ekranie. Po osiągnięciu takiego stanu zmieniano kąt padania wiązki na pierwszy z kartonów również w taki sposób, aby natężenie plamki lasera na ekranie było możliwe najmniejsze. Po całkowitym wygaszeniu tej plamki wyznaczono oba kąty padania w sposób przedstawiony na Rys. 9. Taki pomiar powtórzono trzykrotnie, a otrzymane wartości  $\alpha_B$  przedstawiono w poniższej tabeli:

nr pomiaru	wartości $\alpha_B$
1	$(53,6 \pm 0,5)^\circ$ , $(52,6 \pm 0,5)^\circ$
2	$(52,7 \pm 0,5)^\circ$ , $(51,4 \pm 0,5)^\circ$
3	$(53,2 \pm 0,5)^\circ$ , $(54,2 \pm 0,5)^\circ$

Tab. 2. Wyniki pomiaru kąta  $\alpha_B$ .

Średnia wartość powyższych wyników to  $(53,0 \pm 0,5)^\circ$ , a stąd:

$$n_t = 1,33 \pm 0,03.$$

Głównym źródłem niepewności otrzymanego wyniku jest niepewność wyznaczenia takiego położenia kawałków kartonu z taśmą klejącą, przy którym natężenie plamki lasera na ekranie (oceniane nieuzbrojonym okiem) jest najmniejsze.

**Uwaga:**

Alternatywną metodą rozwiązania mogłaby być metoda wykorzystująca nieprostokątne przejście wiązki lasera przez grubą, płasko-równoległą warstwę taśmy klejącej. Jednak wtedy wyznaczony współczynnik załamania byłby średnim współczynnikiem folii, z której wykonana jest taśma, i warstwy kleju o nieznanym parametrach. Dlatego metoda taka nie jest poprawna.

**Punktacja zadania D3.**

Część teoretyczna

Pomysł na wykorzystanie odbicia pod kątem Brewstera – 3 pkt.

Pomysł na dwukrotne odbicie pod kątem Brewstera prowadzące do całkowitego wygaszenia wiązki lasera – 5 pkt.

Wzór (9) lub równoważny – 1 pkt

Wzór (11) lub równoważny – 1 pkt

Część doświadczalna

Zestawienie i opis układu umożliwiającego poprawne wykonanie doświadczenia – 3 pkt.

Wyznaczenie obu kątów padania – 3 pkt.

Co najmniej trzykrotne powtórzenie pomiaru – 2 pkt.

Wynik liczbowy wraz z oszacowaniem jego niepewności – 1 pkt

Wskazanie głównych źródeł niepewności – 1 pkt