

# Metodyczna analiza instrukcji wykonywania wybranych eksperymentów fizycznych w szkole średniej

Jan Górski

Uniwersytet Wrocławski, Instytut Fizyki Doświadczalnej, Pracownia Dydaktyki Fizyki

Pisząc didaskalia do instrukcji wykonywania eksperymentów fizycznych w szkole, które są publikowane w niniejszym tomie, uczyniłem to na prośbę redakcji, bowiem zajęcie to wydało mi się bardzo niewdzięcznym. Z drugiej strony, czytając instrukcje pisane przez kolejne pokolenia nauczycieli, których autorzy powielają te same grzechy pierwotności – uczenia się na własnych błędach, a nie od starszych Koleżanek i Kolegów po fachu, uznałem że w szaleństwie proponowanym przez redakcję jest jednak pewna metoda. „Komentowane” instrukcje są autorstwa nauczycieli fizyki, biorących udział w warsztatach metodycznych „Eksperyment na lekcjach fizyki w LO” moderowanych przez dr Sylwią Dudziak-Kamieniarz, Jana Górskiego i Ryszarda Nycha, które odbyły się podczas XIX Jesiennej Szkoły „Problemy Dydaktyki Fizyki” – Dydaktyka fizyki w Polsce: historia – teraźniejszość – perspektywy (Krośnice, 14-17 października 2010 r.) oraz studentów fizyki nauczycielskiej Uniwersytetu Wrocławskiego.

Wychodzę z założenia, że takie didaskalia powinien pisać każdy nauczyciel fizyki, dla którego eksperyment uczniowski bywa elementem strategii nauczania. Niestety nie znam opracowań metodycznych, które korzystają z tej formy uzupełniania istniejących już tekstów metodycznych.

Uważam, że pisanie na marginesach cudzych tekstów może być wartościową formą ekspresji nauczycielskiej, która osłabi skutki kreowania mitu wiecznego początku ekip kolejnych reformatorów oświaty w naszym Kraju.

Teksty produkują teksty. Liczę na to, że do moich komentarzy Ktoś dopisze kolejne teksty, i tak stać się powinno.

## I. Wyznaczanie przyspieszenia ziemskiego<sup>1</sup>

W instrukcji użyto słów sugerujących płeć ucznia (powinieneś, będziesz mógł). Należy formułować instrukcję przy użyciu słów neutralnych ze względu na płeć (np. będzie można).

### *Sposób przeprowadzenia doświadczenia*

W punkcie 3. Oczekuje się od ucznia ustalenia konkretnej długości wahadła (160 cm, 145 cm, itd.).

Jest to trudne i czasochłonne jeśli oczekujemy, że uczeń wykona to z dokładnością choćby 1 mm. Jest bardzo prawdopodobne, że po kilku próbach uczeń zniechęci się i wpisze do tabeli żadaną wielkość, mimo iż wahadło ma nieco inną długość.

Wydaje się więc, że punkt 3. należy rozbudować polecając skracać wahadło o **około 15 cm**, po czym wykonywać **staranny** pomiar długości nici **k**.

Dobrze byłoby zwrócić większą uwagę na wyznaczenie niepewności pomiarowych i do punktów 2. i 3. dodać polecenia:

- Określ i zapisz obok tabeli 1. niepewność pomiaru średnicy kulki  $\Delta d$ .
- Określ i zapisz pod tabelą 2. niepewność pomiaru długości nici  $\Delta k$  oraz niepewność pomiaru czasu  $\Delta t$ .

Stoper mierzy czas z dokładnością 0,01 s, ale niepewność pomiaru czasu  $\Delta t$  jest znacznie większa.

---

<sup>1</sup> Komentarz do instrukcji I. Gruszeckiej i M. Olufowobi-Turka, s. 201.

Czas reakcji badacza można przyjąć ok. 0,2 s. Z taką niepewnością rozpoczyna się i kończy pomiar, co należałoby uczniowi uświadomić.

Całkowita niepewność pomiaru czasu wynosi więc  $\Delta t = 0,40 \text{ s} + 0,01 \text{ s}$ .

Widać, że decydujący jest tu „czynnik ludzki”.

Można by tu zadać pytanie, czy jest sens uwzględniać niepewność pomiarową sto-  
pera.

Niepewności  $\Delta k$  oraz  $\Delta t$  powinny się znaleźć pod tabelą pomiarową 2. zamiast  $\Delta l$ , ponieważ  $l$  nie jest wielkością bezpośrednio mierzoną.

Postępując według instrukcji uczeń uzyskać może 3 różne wyniki pomiaru średnicy kulki. Instrukcja nie określa jaką średnicę przyjąć. Pod tabelą 1. należy zatem dopisać polecenie obliczenia średniej wartości średnicy kulki  $d_{\text{sr}}$ .

*Opracowanie wyników pomiarów*

Należy podać pod tabelą 2 formuły do obliczenia:

- długości wahadła  $l = k + r$ ,
- okres drgań  $T = \frac{t}{10}$  .

W punkcie 1. byłoby dobrze podać jak te niepewności pomiarowe obliczyć:

$$\Delta l = \Delta k + \Delta r \qquad \Delta T = \frac{\Delta t}{10} .$$

Ponieważ  $\Delta r = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ , a  $\Delta k = 10^{-3} \text{ m}$ , znów pojawia się problem sensowności uwzględniania  $\Delta r$  przy obliczaniu niepewności pomiaru długości wahadła.

Znalezienie formuły do obliczenia niepewności pomiarowej  $\Delta(T^2)$  może przerażać możliwości ucznia, dlatego należy podać ten wzór lub go wyprowadzić.

Metoda Najmniej Korzystnego Przypadku (NKP):

Największa dopuszczalna wartość:  $T_{\text{max}} = T + \Delta T$

Najmniejsza dopuszczalna wartość:  $T_{\text{min}} = T - \Delta T$ .

Zatem:  $(T_{\text{max}})^2 = (T + \Delta T)^2 = T^2 + 2T \cdot \Delta T + (\Delta T)^2$

Ponieważ  $(\Delta T)^2$  jest bardzo małe, możemy ten składnik pominąć i otrzymujemy:

$$(T_{\text{max}})^2 = T^2 + 2 T \Delta T,$$

Analogicznie:  $(T_{\text{min}})^2 = T^2 - 2 T \cdot \Delta T$  .

Zatem:  $(T_{\text{max}})^2 - T^2 = \Delta(T_{\text{max}}^2) = 2 T \Delta T$

$$(T_{\text{min}})^2 - T^2 = \Delta(T_{\text{min}}^2) = 2 T \Delta T.$$

Widać więc, że niepewność pomiarowa rozkłada się symetrycznie po obu stro-  
nach  $T$  i równa jest:

$$\Delta(T^2) = 2 T \Delta T.$$

$\Delta(T^2)$  nie jest więc stałe, a rośnie wraz z  $T$ . Należy więc policzyć  $\Delta(T^2)$  dla każdej długości wahadła. Konieczne staje się więc dodanie w tabeli 2 wiersza  $\Delta(T^2)$ .

W punkcie 3. należałoby dokończyć rozumowanie:

$$g = 4\pi^2 a$$

gdzie:  $a$  jest wyznaczonym z wykresu współczynnikiem kierunkowym.

Zatem:

- $g_{\max} = 4\pi^2 a_{\max}$ , gdzie  $a_{\max}$  jest wyznaczonym z wykresu maksymalnym współczynnikiem kierunkowym,
- $g_{\min} = 4\pi^2 a_{\min}$ , gdzie  $a_{\min}$  jest wyznaczonym z wykresu minimalnym współczynnikiem kierunkowym.

$$\text{Więc } \Delta g = \frac{1}{2} (g_{\max} - g_{\min}) = \frac{1}{2} 4\pi^2 (a_{\max} - a_{\min}) = 2\pi^2 (a_{\max} - a_{\min})$$

$$\Delta g = 2\pi^2 (a_{\max} - a_{\min})$$

## II. Wyznaczanie ciepła właściwego bryły metalu<sup>2</sup>

### Część doświadczalna

Przy wszystkich poleceniach pomiaru należy pisać: „Zapisz wynik pomiaru”, ponieważ dla wielu uczniów nie jest to oczywiste.

W punkcie 3. lepiej byłoby posłużyć się językiem fizyki i napisać: „wyznacz masę...” podobnie jak uczyniono w punkcie 1.

W punktach 6. i 9. użyto określenia: „odczytaj temperaturę z termometru”. Należałoby raczej napisać: *Zmierz temperaturę początkową (ew. końcową) wody w kalorymtrze.*

Brakuje poleceń:

- Określ niepewności wszystkich swoich pomiarów.
- Korzystając z metody NKP, oblicz niepewność, z jaką wyznaczone zostało ciepło właściwe bryłki.

### Niepewność pomiarowa

Przyjęto niepewność pomiaru masy  $\Delta m = 0,1 \text{ g}$ . Ponieważ  $m_w = m_{k+w} - m_k$ , niepewność wyznaczenia masy wody  $\Delta m_w = 2 \Delta m = 0,2 \text{ g}$ .

Podobny błąd popełniono w przypadku temperatury. Przyjęto niepewność pomiaru temperatury  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ . Różnice temperatur  $\Delta T$  występujące w bilansie cieplnym to zawsze jakieś  $T_1 - T_2$ . Zatem niepewność pomiaru różnicy temperatur  $\Delta(\Delta T) = 2 \Delta t = 2^\circ\text{C}$ .

Niepewność wyznaczenia ciepła właściwego jest zatem większa od określonej w przykładowych obliczeniach.

<sup>2</sup> Komentarz do instrukcji J. Adamek i K. Mili, s. 203.

Wskazano ograniczoną dokładność przyrządów pomiarowych jako źródła niepewności wyznaczonego ciepła właściwego. Nie są to wszystkie przyczyny niepewności. Zastosowana metoda zakłada, że układ bryła metalu – kalorymetr z wodą jest izolowany.

Dokładność metody zależy w dużej mierze od umiejętności badacza (sprawne przełożenie bryły do kalorymetru, dobór mas) oraz od jakości kalorymetru.

Założono też, że temperatura początkowa bryłki  $T_{b1} = 100^\circ\text{C}$ . W rzeczywistości jest ona niższa. Jeśli ułoży się bilans  $Q_w + Q_k + Q = Q_b$ , gdzie  $Q$  to ciepło rozproszone, wzór określający ciepło właściwe bryłki metalu wygląda następująco:

$$c_{wb} = \frac{c_{ww} \cdot \Delta T_w \cdot m_w + c_{wk} \cdot \Delta T_k \cdot m_k + Q}{(T_{b1} - T_{b2}) \cdot m_b}$$

Widać, że zarówno założenie doskonałej izolacji układu, jak i założenie  $100^\circ\text{C}$  jako temperatury początkowej bryłki zaniżają wyznaczone ciepło właściwe.

### III. Demonstracja kształtu linii pól: magnetycznego i elektrycznego<sup>3</sup>

Aby prezentacja miała sens, uczeń musi rzeczywiście widzieć linie pól. Istotny jest więc nie tylko układ doświadczalny, ale też tło na którym te linie są obserwowane.

Jeżeli do uwidocznienia linii pola elektrycznego używamy kaszy (która jest jasna), należy pod naczynie z olejem podłożyć ciemne tło (np. czarną kartkę).

W przypadku cynamonu, kartka powinna być biała.

„Czynności wykonującego pokaz” powinny być zapisem procedury realizującej konkretne cele (wymienione w punkcie „Oczekiwane efekty kształcenia”).

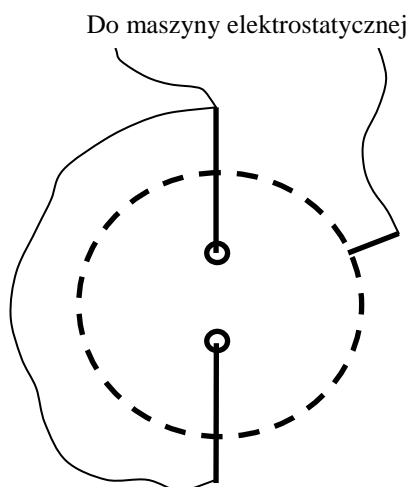
Ponieważ uczeń może nie wiedzieć, co to znaczy „umieścić odpowiednie elektrody”, należałoby poprowadzić go przez ciąg logiczny:

- pole elektryczne wokół ładunku punktowego – 1 elektroda „punktowa” połączona z którymś biegunem maszyny elektrostatycznej,
- pole elektryczne dwóch ładunków punktowych różnoimiennych – 2 elektrody „punktowe” podłączone do różnych biegunów maszyny elektrostatycznej,
- pole elektryczne dwóch ładunków punktowych jednoimiennych – 2 elektrody „punktowe” podłączone do tego samego bieguna maszyny elektrostatycznej,
- pole elektryczne wokół ostrza – 1 elektroda ze szpicem połączona z którymś biegunem maszyny elektrostatycznej,
- pole elektryczne w jednorodnie (kondensatorze płaskim) – 2 elektrody-pręty podłączone do różnych biegunów maszyny elektrostatycznej.

W przypadku pojedynczej elektrody oraz dwóch elektrod połączonych z jednym biegunem maszyny elektrostatycznej linie pola będą **bardzo słabo widoczne**.

Aby temu zaradzić należy użyć elektrody kołowej (dużego koła) połączonej z drugim biegunem maszyny elektrostatycznej.

<sup>3</sup> Komentarz do instrukcji G.P. Korbasia, s. 207.



Ze względu na swój kształt elektroda ta nie wyróżnia żadnego kierunku i ma niewielki wpływ na obserwowany układ linii pola elektrycznego.

*Siła powodująca polaryzację i ustawienie się drobin kaszy jest wprost proporcjonalna do natężenia pola elektrycznego. Pole elektryczne zaś między dwoma punktami o różnych potencjałach jest tym większe, im bliżej siebie są te punkty.*

*Jeśli użyjemy jednej elektrody, to tym drugim punktem jest „wolny” biegun maszyny elektrostatycznej. Jest on dość daleko.*

*Podłączając drugi biegun maszyny elektrostatycznej do elektrody kołowej zmniejszamy tę odległość, a więc zwiększamy siłę ustawiającą drobin kaszy.*

Istotne są też informacje dodatkowe:

- aby uniknąć szoku elektrycznego, przed każdą zmianą układu elektrod należy rozładować maszynę elektrostatyczną przez zetknięcie jej elektrod.
- Należy zachować ostrożność i wycierać elektrody aby uniknąć zabrudzeń olejem.

### **Prezentacja linii pola magnetycznego – magnes trwały**

Podobnie jak poprzednio, należy zadbać o właściwe tło. Powinno być jednolite i jasne. Najprościej jest położyć na stole białą kartkę i na niej dopiero magnes.

„Czynności wykonującego pokaz” powinny być zapisem procedury realizującej konkretne cele:

- pole wokół magnesu sztabkowego – 1 magnes sztabkowy,
- pole między różnoimiennymi biegunami magnetycznymi – 2 magnesy sztabkowe zwrócone ku sobie przeciwnymi biegunami, leżące na jednej prostej,
- pole między jednoimiennymi biegunami magnetycznymi – 2 magnesy sztabkowe zwrócone ku sobie tymi samymi biegunami, leżące na jednej prostej,
- pole magnetyczne jednorodne – magnes podkowiasty,
- pokazanie „nierozdzielności” biegunów magnetycznych – najpierw pokazać linie pola magnesu sztabkowego przelamanego i złożonego w całość. Następnie rozsunąć połówki magnesu i pokazać ich linie pola magnetycznego.

- *Ewentualnie można pokazać linie pola dwóch magnesów ułożonych równolegle obok siebie z biegunami w tę samą, i w przeciwną stronę.*

Przy każdej manipulacji magnesami powstanie problem, co zrobić z opiłkami.

Uczeń powinien wiedzieć, że trzeba zsypać opiłki na osobną kartkę, aby z powrotem napełnić pudełko.

### ***Prezentacja linii pola magnetycznego – przewody z prądem***

Aby układ opiłków był dobrze widoczny potrzebne jest jasne tło – biała kartka na stole.

Umocowanie płytki na statywie tuż nad stołem zapewni wszystkim uczniom obserwację linii sił pola magnetycznego na właściwym tle.

Pokazanie linii pola magnetycznego wokół prostoliniowego przewodnika z prądem nie jest łatwe.

Nawet jeśli opiłki są drobne, a płytka gładka (małe tarcie) natężenie prądu rzędu kilku amperów nie wystarczy. *Bateria 3R20 nie jest więc dobrym źródłem prądu.*

Potrzebny jest przepływ prądu w przewodniku o natężeniu co najmniej 20 A. *Można użyć akumulatora lub dużego prostownika do ładowania akumulatorów, które pozwolą uzyskać prąd elektryczny o wystarczającym natężeniu.*

*Ze względów bezpieczeństwa doświadczenie to powinien wykonywać nauczyciel.*

*Jeżeli do dyspozycji jest tylko zasilacz o natężeniu kilku amperów, jedyną możliwością pokazania pola magnetycznego wokół przewodnika z prądem daje specjalny przyrząd. Jest to cewka ok. 100 zwojów w kształcie prostokąta „udająca” pojedynczy przewód prostoliniowy. Jeden z boków tego prostokąta powinien przebijać płytkę na którą sypie się opiłki.*

## **IV. Badanie charakterystyki prądowo-napięciowej opornika, żarówki i diody<sup>4</sup>**

Celem doświadczenia z punktu widzenia fizyka jest sprawdzenie stosowności prawa Ohma przy przepływie prądu elektrycznego przez opornik, żarówkę i diodę.

Wyznaczane charakterystyki są tylko narzędziem do wyciągnięcia wniosków.

Polecenie „wykonaj pomiary” powinno podawać procedurę postępowania mniej więcej tak jak poniżej:

*Zmieniając napięcie na oporniku należy mierzyć natężenie płynącego przez niego prądu.*

- *Amperomierz powinien być ustawiony na zakres 200 mA =,*
- *woltomierz powinien być ustawiony na zakres 20 V =,*
- *upewnij się, że pokrętko regulacji napięcia na zasilaczu skrócone jest na 0,*
- *podłącz swój obwód do zacisków zasilacza,*
- *włącz mierniki.*

**UWAGA:** *poproś prowadzącego, żeby sprawdził twój obwód.*

- *włącz zasilacz do sieci,*
- *włącz amperomierz i woltomierz,*

<sup>4</sup> Komentarz do instrukcji A. Haraburdy, s. 211.

- włącz zasilacz,
- ustaw pokrętko zasilacza tak, aby napięcie na oporniku wynosiło 1V i odczekaj chwilę, żeby wskazania mierników się ustabilizowały.  
Odczytaj z mierników napięcie  $U$  oraz natężenie  $I$  i zapisz w tabeli,
- powtarzaj pomiary zwiększając napięcie co 1V aż do 10 V,  
Zmniejsz napięcie zasilacza do 0 (pokrętko do końca w lewo),  
Wyłącz zasilacz i mierniki,  
Wyciągnij wtyczkę zasilacza z gniazdka,
- w instrukcji miernika znajdź sposób wyznaczenia niepewności pomiarowej napięcia  $\Delta U$  oraz niepewności pomiarowej natężenia  $\Delta I$ .
- Oblicz te niepewności dla każdego  $U$  oraz  $I$  i zapisz w tabeli.

Napięcie $U$ [V]										
Natężenie $I$ [A]										
Niepewność $\Delta U$ [V]										
Niepewność $\Delta I$ [A]										

- Wykonaj wykres charakterystyki prądowo napięciowej żarówki.

Niepewności pomiarowe mierników określone są formułami:

Amperomierz:  $\Delta I = I \cdot 1.5\% + 1$  ostatnia cyfra

Woltomierz:  $\Delta U = U \cdot 0,5\% + 1$  ostatnia cyfra

Przykład:

$I = 83,3 \text{ mA}$ ,

więc  $\Delta I = 83,3 \text{ mA} \cdot 0,015 + 0,1 \text{ mA} = 1,25 \text{ mA} + 0,1 \text{ mA} \approx 1,4 \text{ mA}$

Sposób liczenia niepewności pomiarowych wskazuje, że zamiast „oszacować niepewności pomiarowe poszczególnych przyrządów” należy obliczyć je dla każdego pomiaru z osobna i umieścić w tabeli.

Ponieważ nie wykonuje się obliczeń żadnej wielkości (oprócz niepewności), nie można wskazać wielkości dających decydujący wkład niepewności. Pomiar miernikami jest bezpośredni.

Pewne znaczenie (trudne do oszacowania) może mieć jakość przewodów oraz styków.

Wartość opornika powinna być dużo mniejsza niż opór wewnętrzny woltomierza.

Oznacza to, że opornik o wartościach od kilku omów do dziesiątek kiloomów może być badany tą metodą.

Na schemacie obwodu pomiarowego elementem badanym jest opornik.

Przechodząc do następnych etapów doświadczenia (żarówka, dioda) należy zaznaczyć, żeby uczeń w miejsce opornika włączył żarówkę lub diodę.

Dodatkowo w przypadku diody należy się upewnić, czy włączona jest ona u obwód w kierunku przewodzenia.

Zarówno dla żarówki, jak i diody należy podać zakres zmian napięcia oraz ich skok w zależności od parametrów żarówki i diody.

*Dla mierzonych wartości napięcia  $\Delta U$  zmienia się od 0,02 V do 0,04 V.*

*Tymczasem na wykresy naniesiono niepewności  $\Delta U$  jednakowe w całym zakresie i zdecydowanie większe od obliczonych.*

Każdy z etapów doświadczenia powinien kończyć się wnioskiem o stosowalności prawa Ohma przy przepływie prądu elektrycznego przez opornik, żarówkę i diodę.

## V. Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej wybranych elementów<sup>5</sup>

Ponieważ uczeń pracuje z prądem elektrycznym, dobrze byłoby dodać dwa polecenia „ostrożnościowe” – choćby dla kształtowania dobrych nawyków:

- Zanim włączysz zasilacz, poproś nauczyciela o sprawdzenie układu pomiarowego.
- Po wykonaniu pomiarów zmniejsz napięcie zasilacza do zera i wyłącz go. Wyłącz także mierniki.

W punkcie 4. brakuje polecenia obliczenia niepewności pomiarowych  $u(I)$  oraz  $u(U)$ , albo przynajmniej ich maksymalnych wartości.

## VI. Sprawdzanie prawa załamania światła<sup>6</sup>

Sprawdzenie prawa załamania światła, a tym bardziej wyznaczenie współczynnika załamania przy użyciu akwarium z wodą wymaga dużej staranności.

Trudny jest bezpośredni pomiar kąta padania i załamania, a metody pośrednie wprowadzają dodatkowe niepewności pomiarowe.

Aby uczeń mógł zbudować układ pomiarowy minimalizując te niepewności pomiarowe, należy mu podać szczegółową procedurę badawczą. Powinna ona zwrócić jego uwagę na problemy istotne dla jakości pomiarów.

Przy wyznaczaniu biegu promienia świetlnego na ścianie akwarium może zaistnieć kilka czynników zwiększających niepewność pomiarową, na które nie zwrócono uwagi „spisie kolejnych czynności”:

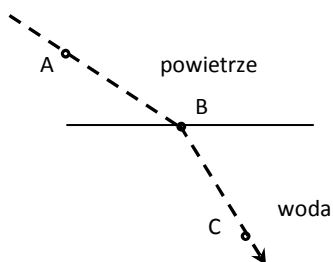
1. **Laser powinien być umieszczony nieruchomo.** W przeciwnym przypadku jest mało prawdopodobne naniesienie na ścianie akwarium minimum 3 punktów A, B i C umożliwiających pomiar kątów przy tym samym położeniu lasera.

Oszacowanie niepewności pomiarowej jest wówczas niemożliwe.

<sup>5</sup> Komentarz do instrukcji A. Koźmicka i N. Kędroń, s. 215.

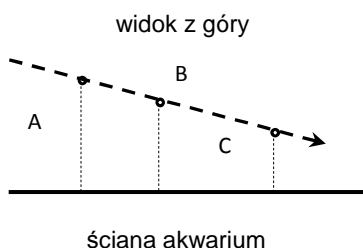
<sup>6</sup> Komentarz do instrukcji W. Idziak, B. Czechowskiej, A. Gilarskiej i K. Kosiek, s. 233.





2. Płaszczyzna biegnącego promienia **musi być równoległa** do ściany akwarium przez którą patrzymy.

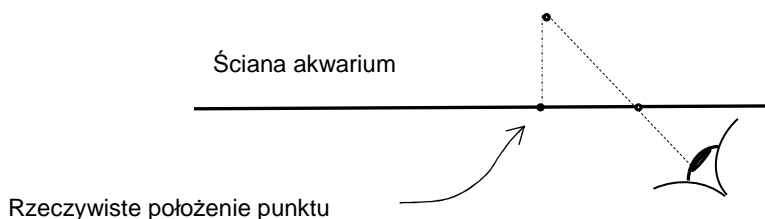
Obserwujemy bowiem (i mierzymy) rzut biegu promienia na ścianę akwarium. Tylko wówczas kąty i długości odcinków zaznaczone na niej będą równe rzeczywistym.



3. Należy zwrócić uwagę, że przy zaznaczaniu biegu wiązki laserowej popełniamy „**błąd paralaksy**”, ponieważ jest ona odległa od ścianki naczynia.

Błąd paralaksy można zmniejszyć jeśli promień będzie biegł blisko ścianki akwarium (i równoległe do niej). Nie może jednak biec przy samej ścianie, gdyż powierzchnia wody przy ścianie zazwyczaj tworzy menisk. Granica ośrodków powietrze/woda w tym miejscu jest zakrzywiona co uniemożliwia pomiar kątów padania i załamania.

Wydaje się, że odległość wiązki laserowej od ścianki akwarium 5-10 mm powinna być odpowiednia.



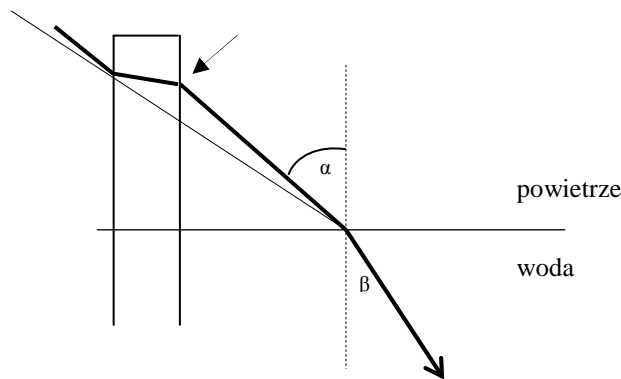
Optymalnie byłoby, gdyby eksperymentator umieścił swoje oko na wprost punktu załamania światła (na wysokości powierzchni wody). Wówczas paralaksa przy zaznaczaniu promienia padającego i załamane go nie ma wpływu na kąty padania i załamania.

Dobrym rozwiązaniem jest umieszczenie lustra na przeciwległej ścianie akwarium.

Musi być ono równoległe do ścianki na której zaznaczamy bieg wiązki lasera.

Można wówczas zaznaczyć na ścianie akwarium bieg wiązki ustawiając oko tak, by wiązka w wodzie i jej odbicie w lustrze pokrywały się.

4. Wyznaczenie biegu promienia padającego nie jest łatwe. Punkt załamania jest widoczny, ale promień padający – nie. Potrzebny jest przynajmniej jeszcze jeden punkt przez który przechodzi promień padający. Należy podać jakiś sposób jego „uwidocznienia”. Mogłoby to być np. zadymienie akwarium (aczkolwiek kłopotliwe).



Problem można rozwiązać umieszczając laser tak, by świecił ukośnie na powierzchnię wody przez końcową ścianę akwarium (albo przez taflę szklaną, którą nakryjemy akwarium).

Rozproszenie światła na powierzchni szkła powoduje, że widoczne stają się miejsce wejścia i wyjścia wiązki światła ze szkła.

Należy wziąć pod uwagę punkt, gdzie światło wychodzi ze szkła do powietrza nad wodą (oznaczony strzałką).

W przeciwnym wypadku (co widać na rysunku) wprowadzimy błąd wynikający z przesunięcia promienia przechodzącego przez płytkę płasko-równoległościenną.

## VII. Obrazy soczewkowe. Wyznaczanie ogniskowej soczewki<sup>7</sup>

Ponieważ w trakcie realizacji podstawy programowej fizyki w LO nie mówi się o metodzie Bessela, należałoby uzasadnić jej zastosowanie i pokazać skąd wynika zastosowany wzór.

Najprostsza metoda polega obliczeniu ogniskowej ze wzoru soczewkowego. Wymaga ona bezpośredniego pomiaru odległości przedmiotu od soczewki  $x$ , oraz soczewki od obrazu  $y$  po uzyskaniu ostrego obrazu przedmiotu na ekranie.

Odległości  $x$  oraz  $y$  powinny być mierzone od środka soczewki. Ponieważ ustalenie położenia środka soczewki jest trudne, metoda ta jest mało dokładna.

W metodzie Bessela nie mierzy się  $x$  ani  $y$ . Potrzebny jest pomiar dwóch wielkości:

- Odległość przedmiotu od ekranu  $L$  (odległość dwóch równoległych płaszczyzn łatwo jest zmierzyć),
- Wzajemna odległość dwóch położen soczewki  $D$  dla których na ekranie uzyskuje się obraz ostry (przy nieziennej odległości przedmiot – ekran).

Ponieważ nie jest istotne położenie, tylko różnica położen (przesunięcie) soczewki, nie trzeba szukać środka soczewki.

Wystarczy zawsze mierzyć położenie tych samych punktów związanych z soczewką.

Pomiar położenia uchwyty lub statywu z soczewką jest łatwy.

Ogniskową soczewki liczy się ze wzoru:

$$\star \quad f = \frac{L^2 - D^2}{4L}$$

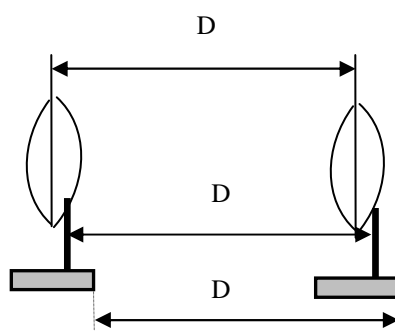
przy czym metodę tę stosuje się tylko wtedy, gdy  $L > 4f$ .

Skąd bierze się wzór  $\star$  ?

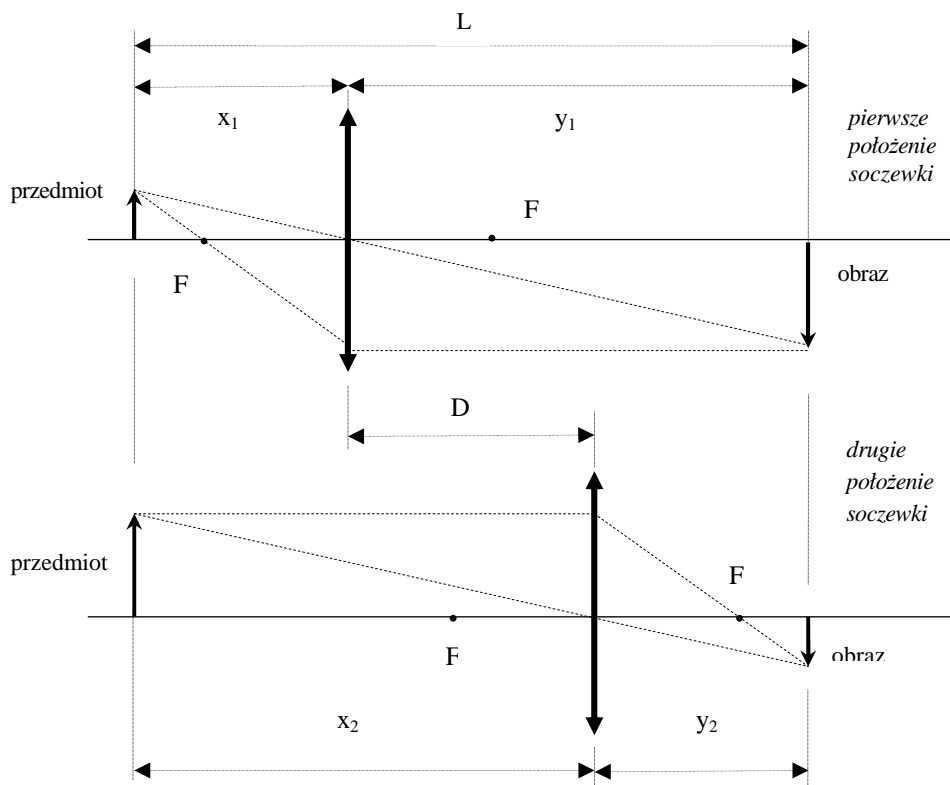
Jak widać z rysunku poniżej:

$$\begin{cases} x_1 + y_1 = L \\ y_1 - x_2 = D \end{cases} \quad \text{oraz} \quad \begin{cases} x_2 + y_2 = L \\ x_2 - x_1 = D \end{cases}$$

Oba położenia soczewki „zamieniają się rolami”, więc:  $x_1 = y_2$  oraz  $y_1 = x_2$ .



<sup>7</sup> Komentarz do instrukcji P. Skowrońskiego, s. 237.



Zatem po odjęciu/dodaniu stronami:

$$y_1 = \frac{L + D}{2} \quad y_2 = \frac{L - D}{2} = x_1$$

Po wstawieniu  $x_1$  oraz  $y_1$  do wzoru soczewkowego uzyskujemy:

$$\star \quad f = \frac{L^2 - D^2}{4L}$$

Ze wzoru tego wynika, że:  $D^2 = L^2 - 4Lf$ .

Ponieważ musi być spełniony warunek, że  $D > 0$ , zatem metoda ma zastosowanie wówczas, gdy  $L > 4f$ .

**VIII. Wyznaczanie ogniskowej soczewki za pomocą ławy optycznej<sup>8</sup>**

Omawiając przebieg doświadczenia nie poruszono problemu niepewności pomiaru  $x$  oraz  $y$ .

Ława optyczna ma skalę z najmniejszą działką 1 cm. Z taką dokładnością można odczytać  $x$ .

Ale to nie rozdzielczość skali ogranicza dokładność pomiaru odległości ekranu od soczewki  $y$ , tylko subiektywne odczucie ostrości obrazu. W pewnych warunkach wrażenie, że obraz jest ostry można mieć przy położeniach ekranu różniących się o kilka centymetrów. Zatem niepewność pomiarowa  $\Delta y$  będzie większa niż 1 cm.

Na domiar złego wszystkie te rozważania są poprawne jeśli  $x$  oraz  $y$  mierzone są od płaszczyzny soczewki. Sposób zamocowania soczewki (na który badacz często nie ma wpływu) może zwiększać niepewności pomiarowe  $\Delta x$  i  $\Delta y$ .

Określenie niepewności pomiarowych w tym doświadczeniu jest „nieostre”.

Może jednak stanowić świetny temat do rozważenia z uczniami.

Metoda **B.** graficznego wyznaczania ogniskowej.

Na wykresie 2 można zauważyć, że są tylko 2 punkty pomiarowe dla  $x < 20$  cm.

Nie można narysować krzywej w oparciu o 2 punkty, a więc także asymptoty  $x = f$ .

Wzór  $\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}$  jest jednak „symetryczny”:

Jeśli  $y = f$ , wówczas  $\frac{1}{x} = 0$ , więc  $x \rightarrow \infty$ .

Więc  $y = f$  też jest asymptotą.

Ponieważ jest wiele punktów pomiarowych dla  $y < 20$  cm, można wykreślić krzywą. Zatem możliwe jest wyznaczenie asymptoty  $y = f$ .

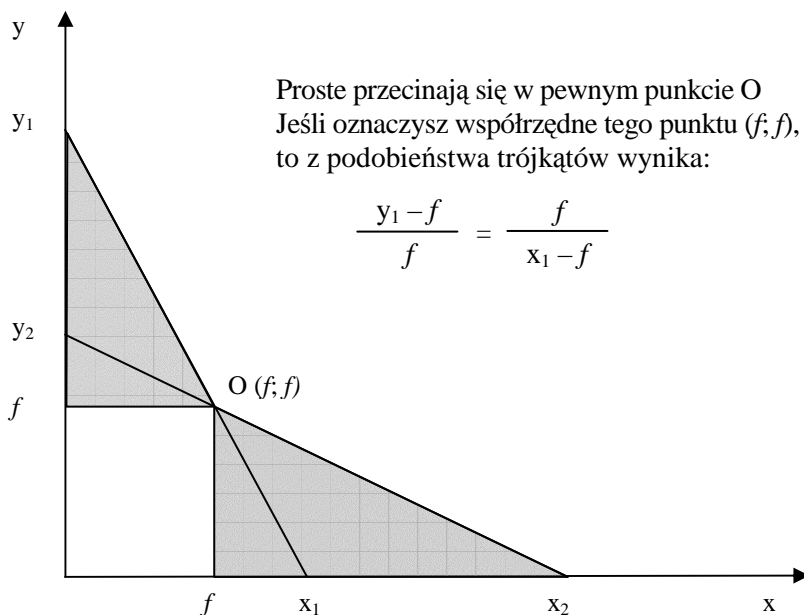
Lepiej byłoby napisać, że istnieją 2 asymptoty:  $x = f$  oraz  $y = f$ .

Uczeń mógłby wybrać asymptotę, przy której jest więcej punktów pomiarowych.

Metoda **A.** Skąd się bierze?

Jeśli na osiach układu współrzędnych zaznaczysz 2 pary odpowiadających sobie wartości  $x_1$ ,  $y_1$  oraz  $x_2$ ,  $y_2$  i połączysz je prostą, uzyskasz następujący obraz:

<sup>8</sup> Komentarz do instrukcji D. Drewniak i P. Siedleckiej, s. 241.



Stąd:  $f^2 = y_1 x_1 - y_1 f - x_1 f + f^2$  ,

$$0 = y_1 x_1 - y_1 f - x_1 f$$

Po podzieleniu stronami przez  $y_1 x_1 f$  otrzymasz:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x_1} + \frac{1}{y_1}$$

Zatem współrzędne punktu przecięcia położenia  $x_1, y_1$  spełniają równanie soczewki.

Dotyczy to wszystkich prostych (par  $x_i, y_i$ ). Wszystkie te proste przecinają się w jednym punkcie o współrzędnych  $(f; f)$ .