



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

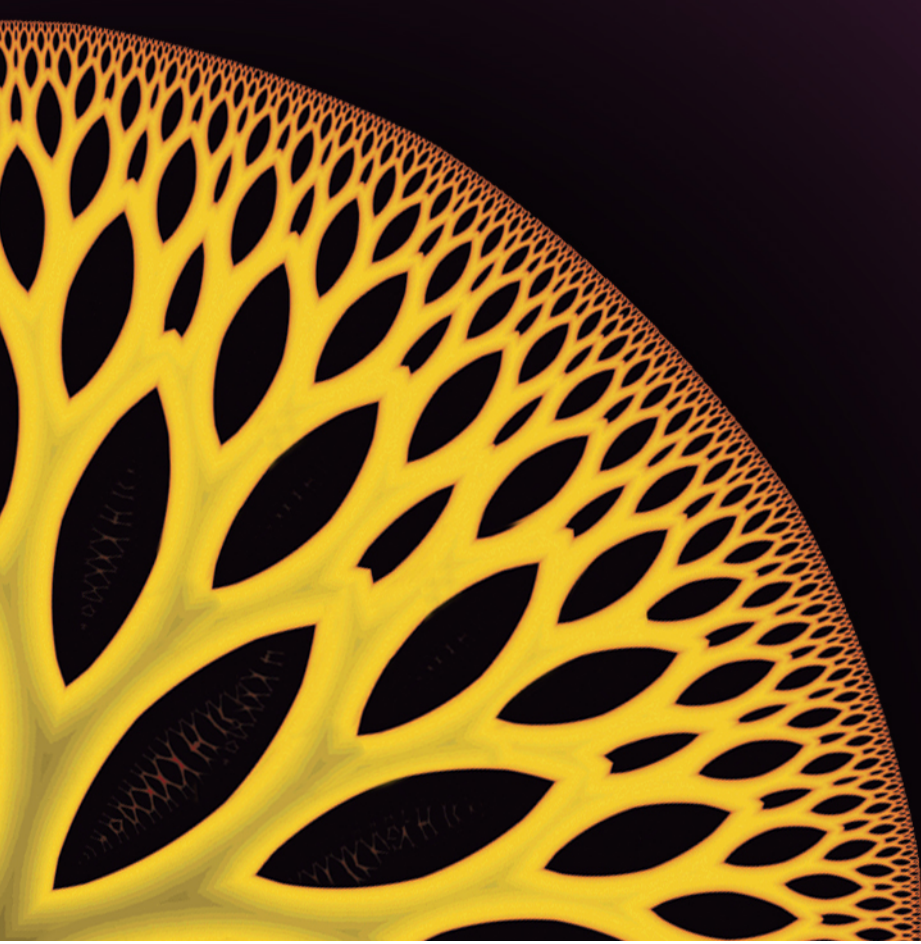
**ANDRZEJ  
BIADASZ**

**DOBROŚŁAWA  
KASPROWICZ**

**TOMASZ  
RUNKA**

# FIZYKA

## MIĘDZY ZABAWĄ A NAUKĄ



FASCYNACJE ZAKŁĘTE  
W NAUCE I BIZNESIE

CZŁOWIEK – NAJLEPSZA INWESTYCJA!



Andrzej Biadasz  
Dobrosława Kasproicz  
Tomasz Runka

# FIZYKA

## MIĘDZY ZABAWĄ A NAUKĄ

Poznań 2010

---

Recenzent  
dr hab. Jacek Goc

---

Opracowanie graficzne  
Marcin Modliński

---

Redakcja  
Marcin Modliński

© Copyright by NiB, Poznań 2010

Wydanie I

MATERIAŁ BEZPŁATNY — EGZEMPLARZ WSPÓLFINANSOWANY ZE ŚRODKÓW  
UNII EUROPEJSKIEJ W RAMACH EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU SPOŁECZNEGO



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



FASCYNACJE ZAKŁĘTE  
W NAUCE I BIZNESIE





# SPIS TREŚCI

1. Środek masy . . . . .	7
2. Ruch jednostajnie przyspieszony . . . . .	8
3. Bezwładność ciał . . . . .	9
4. Spadek swobodny ciał . . . . .	13
5. Wyznaczanie przyspieszenia ziemskiego . . . . .	14
6. Wyznaczanie gęstości ciał stałych . . . . .	16
7. Wyznaczanie gęstości cieczy . . . . .	17
8. Rozszerzalność cieplna ciał stałych . . . . .	18
9. Konwekcja . . . . .	20
10. Aerodynamika . . . . .	21
11. Pompa próżniowa . . . . .	23
12. Balonowa „kula magdeburska” . . . . .	26
13. Zgniatanie puszek — implozja . . . . .	27
14. Miraż w akwarium . . . . .	28
15. Widmo światła „białego” . . . . .	30
16. Spektroskop . . . . .	32
17. Ogniskowa naczynia z wodą oraz szklanej soczewki . . . . .	34
18. Kamera otworkowa . . . . .	36
19. Obraz powstający w „aparacie” . . . . .	38
20. Wyznaczanie współczynnika załamania światła wody . . . . .	40
21. Kąt graniczny dla wody . . . . .	42
22. Dyfrakcja światła na optycznej siatce dyfrakcyjnej oraz na płycie CD i DVD . . . . .	44
Literatura . . . . .	47



# ŚRODEK MASY

## Cel ćwiczenia

Wyznaczanie środka masy płaskich ciał.

## Materiały

- tektura,
- nożyczki,
- statyw,
- korek,
- nitka i ciężarek,
- szpilka lub gwóźdź.

## Wykonanie

1. Z tektury wycinamy figurę o dowolnym kształcie (najlepiej nieregularnym).
2. W przygotowanej figurze wykonujemy kilka otworów w różnych miejscach na jej brzegu.
3. Na statywie mocujemy korek, w który wbijamy gwóźdź.
4. Wybierając jeden z otworów zakładamy tekturową figurę na gwoździu.
5. Następnie na gwoździu mocujemy nitkę z ciężarkiem.
6. Na tekturze zaznaczamy prostą wyznaczoną przez naprężoną nitkę.
7. Powtarzamy tę czynność dla pozostałych otworów zrobionych w tekturze.

Zauważymy, że narysowane linie przetną się w jednym punkcie.

## Objaśnienie

Punkt przecięcia się linii prostych wyznaczonych w ćwiczeniu nazywamy środkiem masy ciała. Istnieje prosty sposób na sprawdzenie, czy wyznaczony dla figury punkt jest środkiem masy. Doświadczalnie wyznaczony na figurze punkt ustawiamy na pionowym ostrzu np. końcówce zaostrego ołówka. Figura powinna być w stanie równowagi.



Rysunek 1.1. Wyznaczanie środka masy figury płaskiej

## RUCH JEDNOSTAJNIE PRZYSPIESZONY

### Cel ćwiczenia

Badanie ruchu jednostajnie przyspieszonego.

### Materiały

- sznurek o długości przekraczającej 2,5 m,
- nakrętki metalowe — 6 sztuk,
- miara,
- stoper.

### Wykonanie

1. Nakrętki mocujemy do sznura w następujący sposób: pierwsza nakrętka na początku sznura, a kolejne nakrętki w odległościach 10, 40, 90, 160, 250 cm od pierwszej.
2. Sznur unosimy pionowo do całkowitego wyprostowania tak, aby pierwsza nakrętka znalazła się na poziomie podłogi.
3. Puszczamy sznur i mierzymy czas od chwili puszczenia sznura do uderzenia drugiej nakrętki o podłogę, następnie od chwili puszczenia sznura do uderzenia trzeciej nakrętki o podłogę i tak dalej, aż zmierzmy czas od chwili puszczenia sznura do uderzenia ostatniej nakrętki.

Zauważymy, że odstępy czasu pomiędzy kolejnymi uderzeniami nakrętek o podłogę są jednakowe.

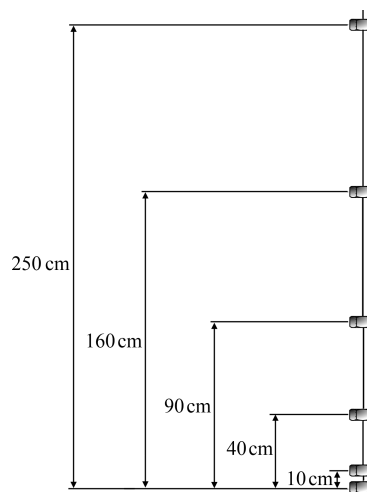
### Objaśnienie

Analizując relacje pomiędzy czasami spadania kolejnych nakrętek i drogą, jaka została przez nie przebyta, dochodzimy do wniosku, że gdy czas spadania kolejnych nakrętek zwiększa się odpowiednio 2, 3, 4, 5 razy, to droga przebyta przez nie zwiększa się odpowiednio 4, 9, 16, 25 razy. Stosunki czasów spadania i przebyte drogi są w następującej relacji:

$$1 : 2 : 3 : 4 : 5$$

$$1 : 4 : 9 : 16 : 25$$

Gdy drogi przebyte przez kolejne nakrętki przy spadku mają się do siebie jak kwadraty czasów spadania, mówimy wówczas o ruchu jednostajnie przyspieszonym.



Rysunek 2.1. Układ nakrętek rozmieszczonych na sznurku w odległościach 0, 10, 40, 90, 160 i 250 cm

## BEZWŁADNOŚĆ CIAŁ

### Cel ćwiczenia

Doświadczalne sprawdzenie działania siły bezwładności.

### Doświadczenie I

#### Materiały

- ciężki, gładki przedmiot np. drewniany klocek lub naczynie napełnione wodą,
- serweta o gładko zakończonych bokach.

#### Wykonanie

1. Wybrany uprzednio przedmiot stawiamy na serwecie położonej na stole.
2. Serwetę ciągniemy powoli, obserwując zachowanie przedmiotu na serwecie.
3. Ponownie ustawiamy przedmiot na serwecie i ciągniemy ją energicznym ruchem oburącz.

W pierwszym przypadku widzimy, że przedmiot przesuwa się wraz z serwetą. Natomiast w drugim przypadku zaobserwujemy, że przedmiot nie zmienia swojego położenia względem stołu.

#### Objaśnienie

Kiedy ciągniemy serwetę powoli, dzięki występującej między przedmiotem a serwetą sile tarcia statycznego, przedmiot nie przemieszcza się względem serwety — przesuwa

się razem z serwetą. Energiczne wyciągnięcie serwety — działanie ze znacznie większą siłą — wiąże się z jej dużym przyspieszeniem względem stołu i względem stojącego na niej przedmiotu. Należy pamiętać, że siła przyłożona do serwety nie działa bezpośrednio na przedmiot, ale za pośrednictwem siły tarcia. Jeśli przyłożona do serwety siła jest znacznie większa od siły tarcia występującego między przedmiotem i serwetą, przedmiot zaczyna przesuwać się względem ciągniętej serwety (a serweta względem przedmiotu). Ponieważ przedmiot ma stosunkowo dużą masę, tym samym cechuje go duża bezwładność, a zatem nie ulega on przemieszczeniu w czasie energicznego wyciągnięcia serwety. Masa jest miarą bezwładności ciała w ruchu postępowym, czyli „oporu” jaki ciało stawia sile, która zmienia stan jego ruchu. Na podstawie tego można wyciągnąć wniosek, że ciała o dużej masie charakteryzuje duża



Rysunek 3.1. Bezwładność zlewki napełnionej wodą

bezwładność, a ciała o małej masie wykazują małą bezwładność.

Newton sformułował trzy zasady dynamiki, z których jedna, nazywana jest zasadą bezwładności — I zasada dynamiki Newtona. Zgodnie z tą zasadą: każde ciało pozostaje w stanie spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, jeśli na ciało nie działają siły lub działające siły równoważą się.

## Doświadczenie II

### Materiały

- masywny statyw,
- drewniany klocek z haczykami,
- nici.

### Wykonanie

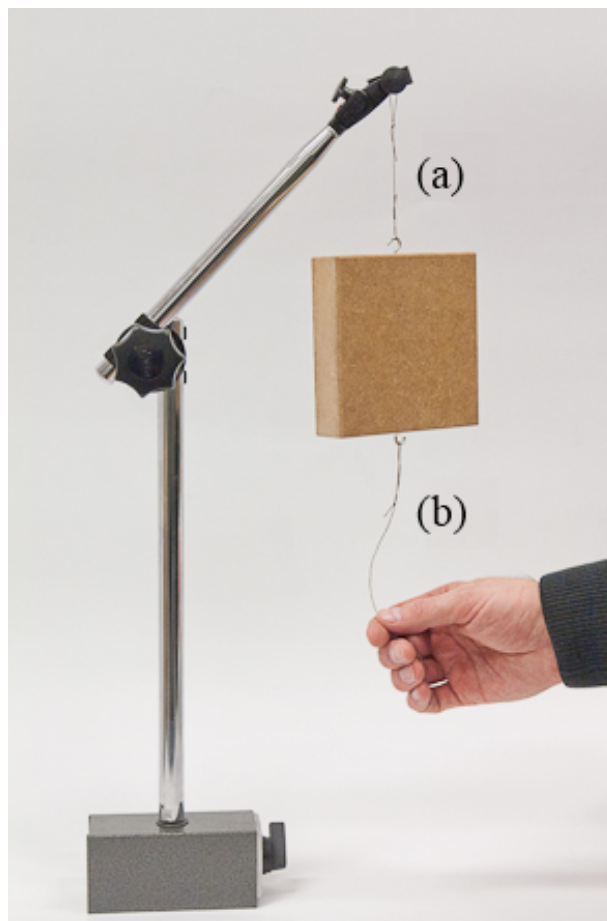
1. Przygotowujemy kilka nitek równej długości (długość dostosowujemy do wysokości statywu).
2. Za pomocą nitki (a) zawieszamy klocek na statywie.
3. Do dolnego haczyka klocka przyczepiamy nitkę (b).

Przy pomocy tak przygotowanego układu wykonamy pierwszą część ćwiczenia, a następnie po ponownym przygotowaniu takiego samego układu wykonamy drugą część ćwiczenia:

1. W pierwszej części ćwiczenia, ciągniemy powoli za nitkę (b), obserwując w pewnej chwili zerwanie nitki (a) i upadek klocka na stół.
2. W drugiej części ćwiczenia ciągniemy za nitkę (b) bardzo energicznym ruchem, obserwując zerwanie nitki (b), natomiast nitka (a) pozostaje nienaruszona.

### Objaśnienie

W pierwszej części ćwiczenia, przy powolnym działaniu siły zewnętrznej  $F$  na nitkę (b), wypadkowa tej siły i siły ciężkości klocka działa na nitkę (a) powodując jej zerwanie. Dzieje się tak, ponieważ wypadkowa siły zewnętrznej i siły ciężkości staje się w pewnym momencie większa od granicznej siły sprężystości nitki, powodując jej zerwanie. W drugim przypadku, przy energicznym szarpnięciu za nitkę (b), dzięki bezwładności klocka, działająca na nitkę (b) siła nie przenosi się na nitkę (a) i zerwaniu ulega tylko nitka (b). W tym przypadku siła zewnętrzna działająca na nitkę (b) w czasie szarpnięcia jest większa od granicznej siły sprężystości tej nitki, a zatem powoduje jej zerwanie.



Rysunek 3.2. Bezwładność klocka zawieszono-  
nego na statywie

## Doświadczenie III

### Materiały

- kilka krążków o grubości kilku milimetrów wykonanych np. z pleksi (mogą być także monety, żetony lub pudełka z zapawkami),
- linijka.

### Wykonanie

1. Ustawiamy stos z krążków kładąc je jeden na drugim.
2. Energeticznym uderzeniem płasko ustawionej linijki wybijamy po kolei krążki zaczynając od najniższego.

Zauważamy, że wybicie najniższego krążka praktycznie nie powoduje przemieszczenia się pozostałych krążków. Można również spróbować wybić dowolny krążek ze stosu.

### Objaśnienie

W czasie energeticznego uderzenia linijką w krążek, działamy na niego siłą, która jest znacznie większa od siły tarcia występującej między wybijanym krążkiem i stosem pozostałych krążków. Uderzony krążek doznaje przyspieszenia, przemieszczając się względem pozostałych krążków. Pozostałe krążki dzięki swojej bezwładności nie przemieszczają się wzajemnie i względem stołu. Zauważymy, że jeśli uderzymy w krążek nie dość energeticznie, czyli siła działająca na



Rysunek 3.3. Bezwładność stosu krążków

uderzany krążek będzie porównywalna z siłą tarcia statycznego, wtedy wszystkie krążki przemieszczą się względem stołu, a stos się rozsypie.

## Doświadczenie IV

### Materiały

- stalowa kulka,
- rurka o średnicy nieco mniejszej od kulki,
- sprężysta stalowa blaszka,
- drewniana podstawa,
- nożyczki,
- tektura.

### Wykonanie

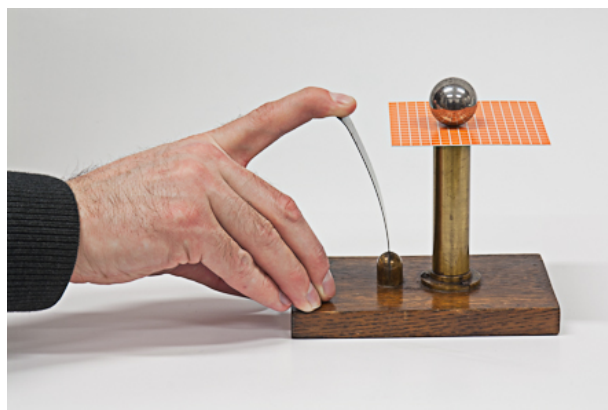
1. Przygotowujemy układ przedstawiony na rysunku.
2. Z tektury wycinamy kwadrat o odpowiednim rozmiarze i kładziemy go na rurce.
3. Metalową kulkę stawiamy na tekturce bezpośrednio nad otworem rurki.
4. Odchylamy blaszkę i puszczamy ją, aby wybiła tekturkę spod kulki.

Zaobserwujemy, że kulka po wybiciu tekturki osiadła na rurce.

### Objaśnienie

Ciało o kulistym kształcie pozostaje w stanie równowagi statycznej czyli nieruchome, wtedy i tylko wtedy, gdy działające na to ciało siły i momenty sił równoważą się. Zasada ta jest słuszna dla wszystkich brył sztywnych. Dla ciała kulistego o jednorodnym rozkładzie masy, znajdującego się na poziomej powierzchni mówimy o stanie równowagi obojętnej. Stan równowagi obojętnej dla kuli jest osiągnięty, gdy siła ciężkości jest zrównoważona przez siłę reakcji podłoża. Jeśli metalową kulkę umieścimy na tekturce bezpośrednio nad rurką tak, aby znalazła się w stanie równowagi obojętnej i następnie wybijemy tekturkę spod rurki, zaobserwujemy,

że kulka „osiada” na rurce. Siła działająca na tekturkę podczas jej wybijania jest znacznie większa od siły tarcia tocznego. W czasie wybijania tekturki nie zmienia się stan równowagi kulki (nie doznaje przemieszczenia poziomego) dzięki swojej bezwładności i osiada na rurce. Należy pamiętać, że w przypadku ciał takich, jak kula czy walec, które mogą poruszać się ruchem obrotowym lub toczyć się (ruch postępowo-obrotowy) miarą bezwładności ciał jest moment bezwładności, a nie masa.



Rysunek 3.4. Bezwładność kulki



## SPADEK SWOBODNY CIAŁ

### Cel ćwiczenia

Doświadczalne sprawdzenie spadku swobodnego ciała o różnej masie.

### Materiały

- rura Newtona,
- jednogroszowa moneta,
- kawałek papieru o zbliżonej wielkości,
- układ do uzyskiwania próżni.

### Wykonanie

1. Do rury Newtona wkładamy przygotowane wcześniej ciała: jednogroszową monetę i kawałek papieru.
2. Ustawiamy rurę w pozycji pionowej i energicznie obracamy ją o  $180^\circ$ .
3. Powtarzamy tę czynność kilkakrotnie obserwując zachowanie się umieszczonych w niej ciał.
4. Następnie podłączamy do zaworu rury wąż pompy próżniowej i odpompowujemy z niej powietrze.
5. Ustawiamy rurę w pozycji pionowej, energicznie obracamy ją o  $180^\circ$  i obserwujemy zachowanie się spadających przedmiotów.

Zauważymy, że w rurze z powietrzem w środku, przedmiot o większej masie (moneta jednogroszowa) spada szybciej niż kawałek papieru. W przypadku, gdy z rury Newtona odpompujemy powietrze, oba ciała spadają z jednakowym przyspieszeniem.

### Objaśnienie

W przypadku ruchu ciał w powietrzu istotną rolę odgrywa siła oporu aerodynamicznego i to właśnie ona powoduje, że wypadkowa siła działająca na ciało o mniejszej masie jest mniejsza i ciało to spada z mniejszym przyspieszeniem. W przypadku ruchu ciał w rurze po odpompowaniu, cząsteczek powietrza jest znacznie mniej (zależnie od rodzaju, budowy i jakości stosowanej pompy) i siła oporów powietrza staje się zaniedbywalna. W tej sytuacji oba ciała spadają z jednakowym przyspieszeniem — przyspieszeniem grawitacyjnym.



Rysunek 4.1. Rura Newtona

# WYZNACZANIE PRZYSPIESZENIA ZIEMSKIEGO

## Cel ćwiczenia

Wyznaczenie wartości przyspieszenia ziemskiego.

## Materiały

- nić,
- ciężarek,
- stoper,
- miara metrowa.

## Wykonanie

1. Ciężarek zawieszamy na nici (zamiast ciężarka możemy użyć dowolnej masy).
2. Nić mocujemy na statywie.
3. Mierzmy długość nici.
4. Wychylamy masę z położenia równowagi o mały kąt (poniżej  $10^\circ$ ).
5. Mierzmy czas 10 okresów drgań.
6. Obliczamy średnią arytmetyczną, tzn. dzielimy otrzymany wynik czasu 10 okresów przez 10 — uzyskamy wtedy czas jednego okresu  $T$  (mierząc bezpośrednio jeden okres zamiast dziesięciu uzyskamy mniej dokładny wynik pomiaru).
7. Obliczamy wartość przyspieszenia ziemskiego  $g$  podstawiając dane do wzoru (5.6),
8. Zmieniamy długość nici na np. 1 m i 1,5 m i powtarzamy pomiary okresu  $T$  oraz obliczenia przyspieszenia ziemskiego  $g$ .
9. Dla wybranej długości nici możemy zmie-

nić zawieszoną masę na inną np. na kamień, odważnik o innej masie i sprawdzić jak to wpłynie na wynik.

## Objaśnienie

Wahadło matematyczne to układ wyidealizowany — to ciało o masie punktowej zawieszone na nierozciągliwej i nieważkiej nici. W praktyce wahadło matematyczne możemy przybliżyć ciężką masą zawieszoną na jak najmniej rozciągliwej nici. Gdy taki układ zostanie wychylony z położenia równowagi i zacznie się wahać w płaszczyźnie pionowej, będzie to ruch drgający, za który odpowiada siła ciężkości. Czas potrzebny na wykonanie pełnego cyklu ruchu wahadła nazywa się okresem drgań  $T$ . Na rysunku 5.1 wahadło wychylono o pewien kąt. Składową styczną, która odpowiada za ruch można zapisać w postaci:

$$F = -mg \sin \phi. \quad (5.1)$$

Z tego wzoru wynika, że siła nie jest proporcjonalna do przemieszczenia kąтового tylko do  $\sin \phi$ . Ale dla małych wychyleń  $\sin \phi \approx \phi$ , co przedstawiono w poniższej tabeli:

$\phi$ [°]	$\phi$ [rad]	$\sin \phi$
1	0,017453	0,017452
5	0,087266	0,087157
10	0,174533	0,173565
30	0,523599	0,500000

Przy założeniu maksymalnego wychylenia wahadła nie przekraczającego kilku stopni, oraz przedstawieniu kąta jako stosunku łuku zataczanego przez masę wahadła do jego długości ( $\phi = \frac{x}{l}$ ), wzór (5.1) przyjmie postać:

$$F = -mg \frac{x}{l}. \quad (5.2)$$

Dla małych wychyleń wahadła można uznać, że tor masy wahadła jest niemal prostoliniowy. We wzorze (5.2) siła jest proporcjonalna do wychylenia  $x$  i jest skierowana stale ku środkowi drgań. Ruch taki można uważać za ruch harmoniczny prosty, w którym siła ma postać:

$$F = -m\omega^2 x, \quad (5.3)$$

gdzie:

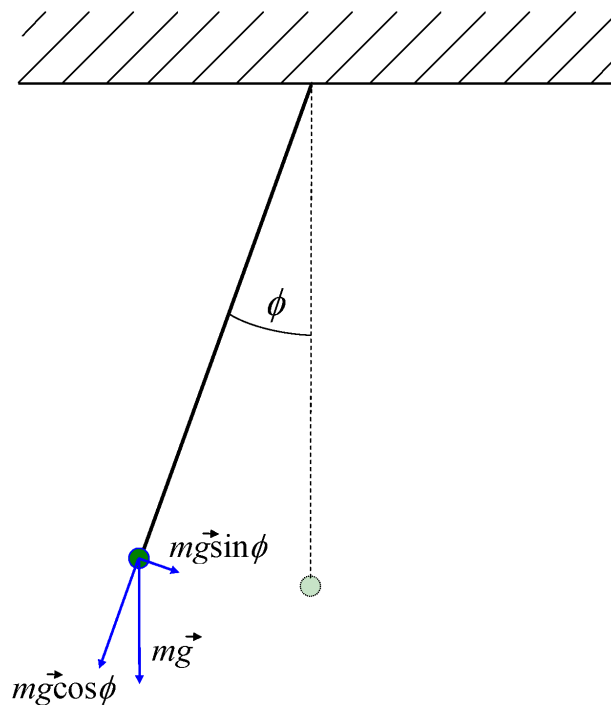
$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (5.4)$$

to częstotliwość kołowa (w ruchu obrotowym  $\omega$  oznacza prędkość kątową). Porównując wzory (5.2) i (5.3) można wyznaczyć okres wahadła matematycznego:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (5.5)$$

lub przyspieszenie grawitacyjne:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}. \quad (5.6)$$



Rysunek 5.1. Wahadło matematyczne

# WYZNACZANIE GĘSTOŚCI CIAŁ STAŁYCH

## Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z metodami wyznaczania gęstości ciał stałych o dowolnym kształcie.

## Materiały

- waga,
- naczynie, np. butelka o szerokiej szyjce,
- woda ( $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ),
- badane ciało stałe.

## Wykonanie

1. Naczynie wypełnione wodą ważymy wyznaczając masę  $m_1$ .
2. Badane ciało stałe ważymy wyznaczając masę  $m_2$ .
3. Do naczynia z wodą wrzucamy badane ciało stałe.
4. Naczynie wypełnione wodą i badanym ciałem stałym ważymy wyznaczając masę  $m_3$ .
5. W celu wyznaczenia gęstości badanego ciała stałego wyznaczone wartości podstawiamy do wzoru (6.3).

## Objaśnienie

Gęstość ciała określa się jako stosunek jego masy do objętości:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]. \quad (6.1)$$

Pomiar masy może być wykonany za pomocą wagi analitycznej, jednak objętość ciała o dowolnym kształcie jest trudniejsza do wyznaczenia. W przeprowadzonym doświadczeniu odejmując masę  $m_2$  od masy  $m_3$  otrzymuje się masę naczynia z wodą je wypełniającą, pomniejszoną o masę wody o objętości równej objętości badanego ciała stałego. Posługując się zależnością  $m_1 - (m_3 - m_2)$  oblicza się masę wody o objętości  $V$  równej objętości badanego ciała stałego. Mając daną gęstość wody i obliczoną wcześniej masę wypartej wody wyznaczamy jej objętość ze wzoru:

$$V = \frac{m_1 - (m_3 - m_2)}{\rho}, \quad (6.2)$$

która jest równa objętości badanego ciała stałego. Podstawiając uzyskaną objętość i masę badanego ciała stałego  $m_2$  do wzoru na gęstość oblicza się gęstość danego ciała stałego ze wzoru:

$$\rho_c = \frac{m_2}{m_1 - (m_3 - m_2)} \rho_w. \quad (6.3)$$

# WYZNACZANIE GĘSTOŚCI CIECZY

## Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z metodami wyznaczania gęstości cieczy.

## Materiały

- waga,
- naczynie, np. butelka o szerokiej szyjce,
- woda ( $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ),
- badana ciecz np. olej spożywczy.

## Wykonanie

1. Puste naczynie ważymy wyznaczając masę  $m_1$ .
2. Naczynie napełnione wodą ważymy wyznaczając masę  $m_2$ .
3. Badaną ciecz wlewamy do pustego naczynia i ważymy wyznaczając masę  $m_3$ .
4. Gęstość badanej cieczy wyliczamy ze wzoru (7.3)

## Objaśnienie

W tym doświadczeniu gęstość badanej cieczy wyznaczono metodą porównawczą, stosując jako ciecz wzorcową wodę destylowaną. Gęstość wody destylowanej w temperaturze  $4^\circ\text{C}$  i pod ciśnieniem atmosferycznym (1013 hPa) wynosi  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

W ćwiczeniu pomiary wykonywane są w temperaturze wyższej niż  $4^\circ\text{C}$  jednak przyjęcie wartości gęstości wody w tej temperaturze nie wpłynie zauważalnie na wynik pomiaru. Znając gęstość cieczy wzorcowej można wyznaczyć objętość naczynia, która jest równa:

$$V = \frac{m_2 - m_1}{\rho_w}. \quad (7.1)$$

W pomiarach używano tego samego naczynia, czyli obydwie cieczki zajmowały taką samą objętość, która dla badanej cieczy będzie opisana wzorem:

$$V = \frac{m_3 - m_1}{\rho_c}. \quad (7.2)$$

Porównując wzory na objętość (7.1) i (7.2) uzyskuje się wzór na gęstość badanej cieczy:

$$\rho_c = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \rho_w. \quad (7.3)$$

# ROZSZERZALNOŚĆ CIEPLNA CIAŁ STAŁYCH

## Cel ćwiczenia


Doświadczalne sprawdzenie rozszerzalności cieplnej ciał stałych.

## Materiały

- klucz oczkowy z dobraną do niego pod względem średnicy kulką, np. z łożyska (średnicę kulki dobieramy tak, aby w temperaturze pokojowej swobodnie przechodziła przez oczko klucza); do kulki mocujemy haczyk, a kulkę wieszamy na łańcuszku,
- świeczka lub palnik gazowy.

## Wykonanie

1. Stalową kulkę przekładamy przez oczko klucza, aby sprawdzić czy przez nie przechodzi.
2. Kulkę umieszczamy nad płomieniem palnika, utrzymując ją w płomieniu przez kilkanaście sekund.
3. Po tym czasie próbujemy powtórnie przełożyć ją przez oczko klucza.

 Zachowaj ostrożność korzystając z palnika gazowego!

Okazuje się, że jest to niemożliwe. Kulka nie mieści się w otworze klucza.

## Objaśnienie

Zjawisko zmiany objętości ciał przy zmianach temperatury nazywamy rozszerzalnością cieplną. Przyczyny zjawiska rozszerzalności cieplnej ciał należy szukać w strukturze mikroskopowej ciał, a więc w sieci krystalicznej. Wzrost temperatury ciała sprawia, że drgania cieplne atomów, z których zbudowane jest dane ciało, są coraz szybsze, wzrasta amplituda tych drgań, a to powoduje wzrost średnich odległości pomiędzy atomami. Efektem tych zmian jest wzrost objętości ogrzanego ciała. Należy pamiętać, że zmiana rozmiarów ciała, wywołana zmianą temperatury zależy od: rodzaju substancji, rozmiarów początkowych ciała oraz zmiany temperatury. Ilościowy opis tego zjawiska najlepiej rozpocząć od przypadku, w którym jeden z wymiarów jest znacznie większy od dwóch pozostałych. W takiej sytuacji mówimy o rozszerzalności liniowej ciała. Elementarny przyrost temperatury  $\Delta T$  ciała, którego długość całkowita wynosi  $l$ , powoduje przyrost długości  $\Delta l$  określony zależnością:

$$\Delta l = \alpha l \Delta T, \quad (8.1)$$

gdzie  $\alpha$  jest współczynnikiem rozszerzalności liniowej. W sposób analogiczny można zapisać równanie określające zmianę objętości ciał  $\Delta V$  pod wpływem zmiany temperatury:

$$\Delta V = \gamma_{sr} V \Delta T, \quad (8.2)$$

gdzie  $\gamma_{sr}$  jest uśrednionym współczynnikiem rozszerzalności objętościowej. Przybliżony związek pomiędzy współczynnikiem rozszerzalności liniowej i objętościowej jest następujący:

$$\gamma = 3\alpha. \quad (8.3)$$

W przypadku ciał o budowie polikrystalicznej i ciał amorficznych, wartość współczynnika rozszerzalności liniowej nie zależy od kierunku (brak anizotropii), wówczas jest jednakowy w kierunku  $x$ ,  $y$  i  $z$ . Ciała monokrystaliczne wykazują zależność wartości współczynnika od kierunku i w takiej sytuacji należy określić trzy główne współczynniki rozszerzalności liniowej dla trzech osi krystalograficznych kryształu.



Rysunek 8.1. Klucz oczkowy z kulką w temperaturze pokojowej

Znane są ciała o budowie krystalicznej dla których wartości współczynników rozszerzalności liniowej wzdłuż dwóch osi krystalograficznych są dodatnie (wzrost wymiarów ciała ze wzrostem temperatury), natomiast trzeci współczynnik jest ujemny, co oznacza zmniejszanie się wymiaru ciała w kierunku trzeciej osi krystalograficznej przy wzroście temperatury. Zjawisko, w którym ciało zmniejsza swoje rozmiary przy wzroście temperatury nazywa się anomalną rozszerzalnością cieplną.

Dobrze znanym ciałem krystalicznym wykazującym anomalny współczynnik rozszerzalności cieplnej jest lód, a najbardziej znaną cieczą posiadającą taką anomalie jest woda w zakresie temperatur 0–4°C.



Rysunek 8.2. Klucz oczkowy z kulką ogrzaną za pomocą palnika do wyższej temperatury

## KONWEKCJA

### Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z jednym z mechanizmów przenoszenia ciepła.

### Materiały

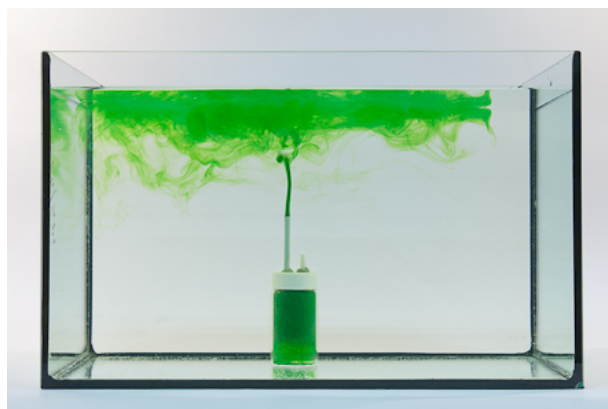
- akwarium,
- woda,
- słoik z zakrętką,
- atrament,
- dwie słomki do napojów,
- plastelina.

### Wykonanie

1. Akwarium napełniamy zimną wodą.
2. W zakrętce naczynia robimy dwa otwory na słomki.
3. Słomki umieszczamy w otworach tak by jedna prawie całkowicie mieściła się w słoiku, a druga prawie całkowicie wystawała z naczynia.
4. Uszczelniamy plasteliną szczeliny między słomkami a zakrętką.
5. Do słoika wlewamy gorącą, zabarwioną atramentem wodę i zakręcamy przygotowaną zakrętką.
6. Słoik zanurzamy pionowo w akwarium z zimną wodą.
7. Zabarwiona woda będzie wypływać ze słoika do akwarium, a zimna woda z akwarium wpływać do słoika.
8. Powtórzmy to samo doświadczenie z zimną wodą w słoiku.

### Objaśnienie

Konwekcja jest jednym z mechanizmów przenoszenia ciepła. Gdy pewna część cieczy lub gazu zostanie ogrzana, rozszerza się, a jego gęstość maleje. Wskutek czego wznosi się do góry, a z sąsiednich miejsc napływają chłodniejsze warstwy. Wynikiem tego jest powstawanie prądów konwekcyjnych. Przykładem konwekcji jest ruch mas powietrza w ogrzewanym pomieszczeniu — temperatura powietrza pod sufitem jest wyższa, a na podłodze niższa



Rysunek 9.1. Ruchy konwekcyjne gorącej wody (zabarwionej na zielono)



## AERODYNAMIKA

### Cel ćwiczenia

Badanie zachowania się ciał w strumieniu powietrza.

### Doświadczenie I

#### Materiały

- dwie kartki papieru,
- dwa patyczki lub słomki do napojów,
- suszarka lub dmuchawa.

#### Wykonanie

1. Do patyczków/słomek przymocujemy kartki papieru, które następnie zbliżamy do siebie na pewną odległość tak, aby patyczki były wzajemnie równoległe (na tej samej wysokości), a kartki zwisały w dół.
2. Strumień powietrza dmuchawy/suszarki kierujemy pionowo w dół, pomiędzy kartki papieru.

Wbrew intuicji obserwujemy, że kartki papieru zaczynają się zbliżać do siebie, momentami dotykając się.

#### Objaśnienie

Przeływający między kartkami strumień powietrza ma ciśnienie dynamiczne skierowane równoległe do kierunku jego przepływu. Przepływ powietrza powoduje obniżenie ciśnienia statycznego działającego pro-

stopadle do powierzchni kartek, a więc powoduje obniżenie ciśnienia w obszarze pomiędzy nimi. Wielkość obniżenia ciśnienia jest odwrotnie proporcjonalna do prędkości przepływu powietrza, co oznacza, że im większa jest szybkość przepływającego powietrza, tym bardziej obniża się ciśnienie. W efekcie tego pomiędzy zewnętrznymi i we-



Rysunek 10.1. Kartki papieru w strumieniu powietrza — prawo Bernoulliego

wewnętrznymi powierzchniami kartek powstaje różnica ciśnień powodująca zbliżanie się kartek do siebie.

Zjawiska związane ze stacjonarnym przepływem wyidealizowanych płynów (cieczy i gazów), opisuje prawo Bernoulliego wyrażone równaniem:

$$p_0 + \rho g h + \frac{\rho V^2}{2} = \text{const}, \quad (10.1)$$

gdzie  $p_0$  – ciśnienie zewnętrzne,  $\rho g h$  – ciśnienie hydrostatyczne,  $\frac{\rho V^2}{2}$  – ciśnienie dynamiczne. Dwa pierwsze człony równania  $p_0$  i  $\rho g h$  można określić mianem ciśnienia statycznego. Prawo Bernoulliego mówi, że dla danego przepływu stacjonarnego, czyli takiego, podczas którego w każdym miejscu w płynie prędkość ruchu pozostaje stała, suma ciśnień: statycznego (zewnętrznego i hydrostatycznego) i dynamicznego jest stała.

## Doświadczenie II

### Materiały

- piłeczka ping-pongowa lub styropianowa,
- suszarka lub dmuchawa.

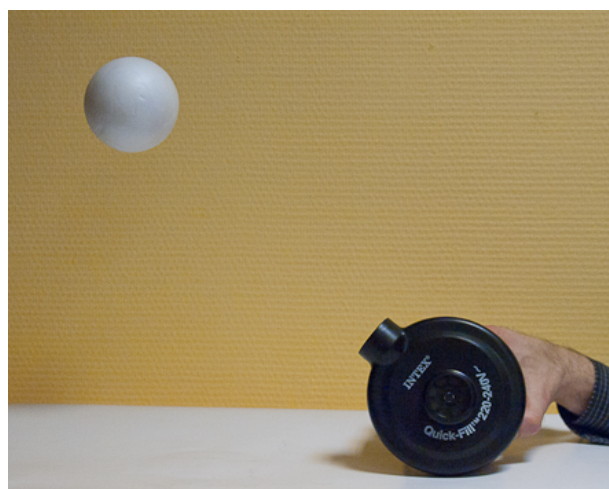
### Wykonanie

1. Strumień powietrza z suszarki/dmuchały kierujemy pionowo w górę.
2. W strumieniu powietrza umieszczamy piłeczkę.

Piłeczka unosi się w strumieniu powietrza, nawet po odchyleniu strumienia powietrza od pionu.

## Objaśnienie

Strumień powietrza napotyka ją na swojej drodze piłeczkę opływa ją ze wszystkich stron. W tym miejscu następuje przewężenie strumienia, dzięki czemu w okolicy piłeczki powietrze porusza się z większą prędkością, co oznacza wzrost ciśnienia dynamicznego. Zgodnie z prawem Bernoulliego wzrostowi ciśnienia dynamicznego (zależnego od prędkości) towarzyszy obniżenie ciśnienia statycznego i dookoła piłeczki tworzy się pas obniżonego ciśnienia, względem ciśnienia panującego na zewnątrz strumienia. Ta różnica ciśnień powoduje utrzymywanie piłeczki w strumieniu powietrza w płaszczyźnie prostopadłej do strumienia. Ponadto, siła ciężkości piłeczki jest równoważona przez siłę wynikającą z ciśnienia dynamicznego strumienia powietrza. Wysokość unoszenia się piłeczki zależy od jej masy i od szybkości strumienia powietrza.



Rysunek 10.2. Piłeczka styropianowa w strumieniu powietrza — prawo Bernoulliego

# POMPA PRÓŻNIOWA

## Cel ćwiczenia

Przeprowadzenie doświadczeń wykorzystujących pompę próżniową.

## Doświadczenie I

### Materiały

- zestaw próżniowy: pompa i klosz,
- balon,
- gumowa rękawiczka,
- pianka do golenia,
- „zwiędnięte” jabłko.

### Wykonanie

Wykorzystując pompę próżniową można wykonać szereg bardzo interesujących doświadczeń. Pod kloszem pompy próżniowej umieszczamy po kolei:

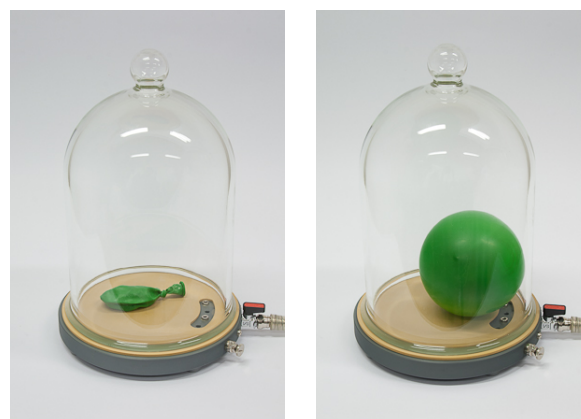
1. Zawiązany nienadmuchany balon.
2. Zawiazaną gumową rękawiczkę.
3. Niewielką ilość pianki do golenia.

W każdym przypadku obniżanie ciśnienia pod kloszem pompy powoduje wzrost objętości umieszczonych pod kloszem przedmiotów. Zapowietrzenie klosza prowadzi do uzyskania przez przedmioty pierwotnego kształtu. Pod kloszem pompy umieszczamy „zwiędnięte” jabłko i odpompowujemy powietrze. Obniżenie ciśnienia pod kloszem powoduje, że skórka jabłka zaczyna się wygładzać, spr-

wiając wrażenie, jakby jabłko odzyskiwało świeżość.

### Objaśnienie

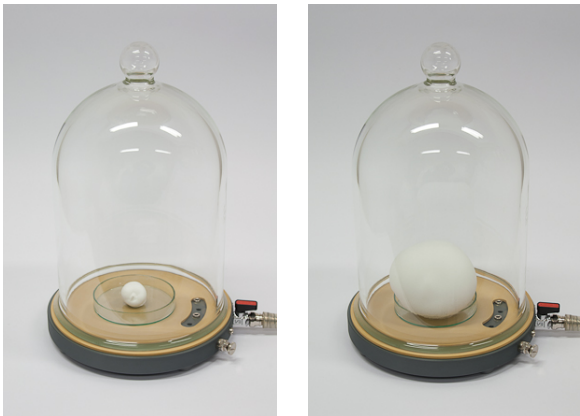
Gdy pod kloszem pompy panuje ciśnienie atmosferyczne, a balon jest wypełniony znikomą ilością powietrza, na powłokę balonu działa ciśnienie zewnętrzne — atmosferyczne. Wypompowanie powietrza spod klosza pompy prowadzi do obniżenia pod nim ciśnienia. Niewielka ilość powietrza znajdująca się w balonie zaczyna się rozprężać, dążąc do wyrównania ciśnień wewnątrz i na zewnątrz balonu. Ciśnienie wywierane przez cząsteczki powietrza na powierzchnię balonu od wewnętrznej strony musi zrównoważyć ciśnienie panujące na zewnątrz (pod kloszem) oraz ciśnienie związane ze sprężystością balonu.



Rysunek 11.1. Zawiązany balon umieszczony pod kloszem pompy próżniowej: pod ciśnieniem atmosferycznym oraz przy obniżonym ciśnieniu



Rysunek 11.2. Gumowa rękawiczka umieszczona pod kloszem pompy próżniowej: pod ciśnieniem atmosferycznym oraz przy obniżonym ciśnieniu

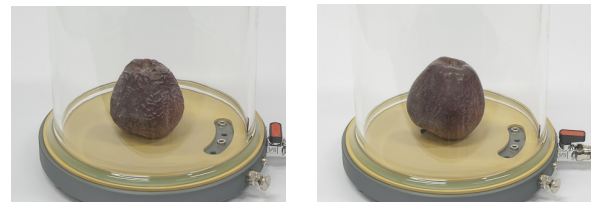


Rysunek 11.3. Pianka do golenia umieszczona pod kloszem pompy próżniowej: pod ciśnieniem atmosferycznym oraz przy obniżonym ciśnieniu

Z tego względu ciśnienie wewnątrz balonu jest wyższe od ciśnienia pod kloszem. W wyniku tego wzrasta objętość zajmowana przez powietrze w balonie i mamy wrażenie, że balon nadmuchuje się. Warto pamiętać, że ilość powietrza w balonie nie zmieniła się w czasie tej przemiany gazowej, a temperaturę można uznać za stałą. Posługując się równaniem Clapeyrona:

$$pV = nRT, \quad (11.1)$$

gdzie:  $p$  – ciśnienie,  $V$  – objętość,  $n$  – liczba moli gazu,  $R$  – stała gazowa, a  $T$  – temperatura, można wykazać, że wraz z obniżaniem się ciśnienia gazu wewnątrz balonu musi zwiększać się jego objętość (jeśli temperatura



Rysunek 11.4. „Zwiędnięte” jabłko umieszczone pod kloszem pompy próżniowej: pod ciśnieniem atmosferycznym oraz przy obniżonym ciśnieniu

jest stała, czynnik  $nRT$  jest stały, a wówczas, gdy maleje ciśnienie wzrastać będzie objętość). W podobny sposób można wyjaśnić zachowanie się innych przedmiotów umieszczonych pod kloszem pompy próżniowej.

## Doświadczenie II

### Materiały

- zestaw próżniowy: pompa i klosz,
- przezroczyste naczynie.

### Wykonanie

1. Do przezroczystego naczynia wlewamy do połowy jego objętości wodę o temperaturze pokojowej.
2. Naczynie wstawiamy pod klosz pompy i odpompowujemy powietrze.

W pewnym momencie przy dostatecznie niskim ciśnieniu panującym pod kloszem, zauważamy wydostające się w kierunku powierzchni pęcherzyki powietrza. Sprawia to wrażenie podobne do tego, jakie obserwujemy podczas wrzenia wody.

### Objaśnienie

Obniżanie ciśnienia pod kloszem powoduje, że na powierzchnię cieczy nie działa ciśnienie zewnętrzne/atmosferyczne. Cząsteczki wody o największej energii kine-

tycznej mogą wydostać się poza powierzchnię wody pokonując wzajemne siły spójności — zjawisko parowania. Po pewnym czasie woda zaczyna parować całą objętością czyli wrze. Cząsteczki wody o najwyższych energiach opuściły objętość wody, a zatem średnia energia kinetyczna cząsteczek wody w naczyniu zmalała, co doprowadziło do obniżenia jej temperatury. Można to sprawdzić mierząc temperaturę wody przed i po wykonaniu doświadczenia.



Rysunek 11.5. Szklanka z wodą o temperaturze pokojowej umieszczona pod kloszem pompy próżniowej: pod ciśnieniem atmosferycznym oraz przy obniżonym ciśnieniu



Rysunek 11.6. Budzik umieszczony pod kloszem pompy próżniowej

## Doświadczenie III

### Materiały

- zestaw próżniowy: pompa i klosz,
- budzik.

### Wykonanie

1. Pod kloszem pompy próżniowej umieszczamy głośno dzwoniący budzik.
2. Odpompowujemy powietrze spod klosza.

### Objaśnienie

Fale dźwiękowe są falami mechanicznymi, które do propagacji wymagają ośrodka sprężystego. Takim ośrodkiem jest na przykład powietrze. Fale dźwiękowe rozchodzące się w gazach są falami podłużnymi. W momencie gdy klosz pompy wypełniony jest powietrzem, fala dźwiękowa wytwarzana przez budzik jest słyszalna, natomiast po odpompowaniu powietrza spod klosza, w jego przestrzeni znajduje się znikoma ilość powietrza, co powoduje znaczne utrudnienie w propagacji fali, a co za tym idzie, dźwięk przestaje być słyszalny.



## BALONOWA „KULA MAGDEBURSKA”

### Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z zagadnieniem podciśnienia.

### Materiały

- balon,
- dwie szklanki,
- gorąca i zimna woda.

### Wykonanie

1. Balon napełniamy powietrzem tak by jego powierzchnia nie była mocno napięta.
2. Wlewamy do szklanek gorącą wodę.
3. Po ogrzaniu szklanek wylewamy wodę i przyciskamy otworem do powierzchni balonu, tak by znalazł się pomiędzy szklankami.
4. Szklanki chłodzimy zimną wodą (gdy zrobimy to zbyt gwałtownie szklanki mogą pęknąć).
5. Trzymając jedną szklankę obracamy do pionu układ szklanka–balon–szklanka.
6. Zaobserwujemy, że układ się nie rozpada.

⚡ Zachowaj ostrożność stosując gorącą wodę!

### Objaśnienie

Napełnienie szklanek gorącą wodą powoduje ich ogrzanie oraz ogrzanie powietrza wypełniającego szklanki. Ogrzane powietrze zwiększa swoją objętość. Przyłożony balon

zamyka pewną objętość powietrza w szklankach. Chłodzenie szklanek zimną wodą powoduje obniżanie temperatury, a tym samym zmniejszenie ciśnienia wewnątrz naczynia, a również ciśnienia wywieranego przez powietrze na ścianki szklanek oraz na elastyczną powłokę balonu. Ciśnienie powietrza wewnątrz szklanek jest niższe od ciśnienia powietrza wewnątrz balonu. Wytworzone podciśnienie powoduje zassanie elastycznej powłoki balonu do wnętrza szklanek. Przy odpowiednio dużej różnicy ciśnień rozdzielanie układu wymaga użycia dużej siły.



Rysunek 12.1. Elastyczna powłoka balonu zassana do wnętrza szklanek

## ZGNIATANIE PUSZEK — IMPLOZJA

### Cel ćwiczenia

Zapoznanie się ze zjawiskami towarzyszącymi zmianie ciśnienia.

### Materiały

- aluminiowa puszka,
- naczynie z zimną wodą,
- źródło ciepła, np. kuchenka gazowa,
- szczypce i rękawice ochronne.

### Wykonanie

1. Do puszki wlewamy około 5 ml wody.
2. Puszke podgrzewamy nad palnikiem doprowadzając do wrzenia wody.
3. Po wygotowaniu wody chwytamy puszkę szczypcami i szybkim ruchem odwaracając dnem do góry wkładamy do zimnej wody.
4. Zaobserwujemy zgniecenie puszki, któremu towarzyszy efekt akustyczny.

⚡ Zachowaj ostrożność korzystając z palnika gazowego!

### Objaśnienie

Woda w ogrzewanej puszcze paruje, a w temperaturze  $100^{\circ}\text{C}$  wrze (w warunkach równowagi termodynamicznej, gdy ciśnienie pary wodnej nasyconej jest równe ciśnieniu otoczenia woda wrze). Para wodna miesza się z powietrzem i wydostaje się przez otwór w puszcze. Z upływem czasu w objętości

puszki znajduje się coraz mniej powietrza, a coraz więcej pary wodnej. Po całkowitym wygotowaniu wody, w puszcze znajduje się para wodna i niewielka ilość powietrza. Włożenie w tym momencie puszki do zimnej wody powoduje schłodzenie pary wodnej a następnie jej skroplenie. Pary wodnej może być tylko tyle aby ciśnienie odpowiadało ciśnieniu pary nasyconej w danej temperaturze, a nadmiar skrapla się. W wyniku skroplenia się pary wodnej ciśnienie wewnątrz puszki gwałtownie spada. W temperaturze  $100^{\circ}\text{C}$  ciśnienie pary nasyconej dla wody wynosi  $102\,135\text{ Pa}$ , a po schłodzeniu do temperatury  $20^{\circ}\text{C}$  wynosi  $2\,337\text{ Pa}$ . W wyniku różnicy ciśnienia atmosferycznego na zewnątrz i niskiego ciśnienia wewnątrz puszki zostaje ona zgnieciona. Opisane zjawisko polegające na gwałtownym zapadnięciu się materii w zamkniętym obszarze, pod wpływem podciśnienia, nazywa się implozją.



Rysunek 13.1. Implozja puszki

## MIRAŻ W AKWARIUM

### Cel ćwiczenia

Obserwacja zjawiska mirażu.

### Materiały

- akwarium,
- zimna woda,
- sól kuchenna,
- lejek,
- naczynie,
- wskaźnik laserowy.

### Wykonanie

1. Do akwarium wlewamy wodę (1/3 objętości).
2. W naczyniu przygotowujemy wodny roztwór soli (zalecany roztwór nasycony).
3. Na dno akwarium przez lejek wlewamy wodny roztwór soli.
4. Po pewnym czasie (czas zależny od temperatury wody) kierujemy wiązkę światła na ściankę boczną akwarium — uzyskamy efekt podobny do tego na zdjęciu.

⚡ Użycie wskaźnika laserowego wymaga szczególnej ostrożności!

### Objaśnienie

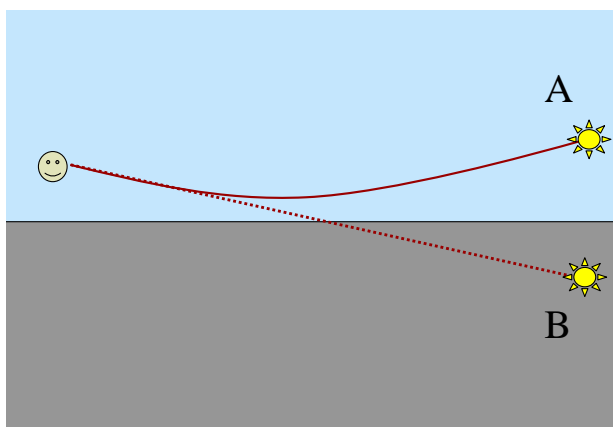
Miraż jest zjawiskiem, które często można zaobserwować latem na rozgrzanej szosie. Warunkiem koniecznym do zaobserwowania

mirażu jest przejście światła przez ośrodek o stopniowej zmianie gęstości (a dokładniej o stopniowej zmianie współczynnika załamania światła). Z pewnej odległości na powierzchni rozgrzanej promieniami słońca szosy widać „kałużę wody”, ale po dojechaniu do tego miejsca okazuje się ono suche. To złudzenie optyczne powstaje na skutek zakrzywienia toru światła słonecznego nad powierzchnią drogi. Nagrzana powierzchnia szosy ogrzewa powietrze, które wraz z wysokością jest coraz chłodniejsze. Im cieplejsze jest powietrze tym mniejsza jest jego gęstość i mniejszy współczynnik załamania. Światło słoneczne padając ukośnie na powierzchnię Ziemi, przechodzi przez warstwę powietrza o coraz mniejszej gęstości a więc mniejszym współczynniku załamania światła i stopniowo następuje zakrzywienie drogi optycznej tego światła w górę (światło przechodząc z ośrodka gęstszego do rzadszego ulega załamaniu pod większym kątem). Wreszcie dla pewnego kąta padania światło ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu i dalej przechodząc przez ośrodek o coraz większym współczynniku załamania, nadal załamuje się i odchyła w górę. W wyniku tego obserwator przedstawiony na rysunku 14.1 patrząc „na wprost”, widzi w punkcie B światło słoneczne, które w rzeczywistości pochodzi z punktu A (obserwator nie jest w stanie prześledzić drogi promienia światła słonecznego).

Miraż można także zaobserwować przy bardzo niskich temperaturach, np. na Arktyce gdzie zimne, gęste powietrze leży najniżej tuż przy powierzchni Ziemi i stopniowo

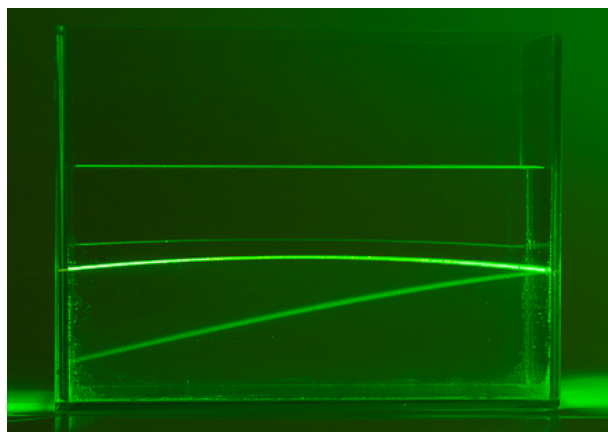


coraz wyżej jest coraz cieplejsze, czyli zmniejsza się gęstość (występuje tutaj sytuacja odwrotna do tej, która zachodzi latem nad gorącą powierzchnią). W takim przypadku obserwator ulega złudzeniu optycznemu – ma wrażenie, że przedmiot, który jest daleko na powierzchni Ziemi będzie widoczny na niebie.



Rysunek 14.1. Ilustracja zjawiska mirażu

W przeprowadzonym doświadczeniu występuje sytuacja podobna do przypadku na Arktyce, czyli gęstszy ośrodek o większym współczynniku załamania znajduje się w dolnej części akwariium, a rzadszy o mniejszym współczynniku załamania w jego górnej części. Torem biegu światła jest łuk.



Rysunek 14.2. Miraż w akwariium

## WIDMO ŚWIATŁA „BIAŁEGO”

### Cel ćwiczenia

Obserwacja widma światła „białego”.

### Materiały

- źródło światła z żarówką wolframową,
- przezroczyste, prostopadłościennym naczynie szklane,
- woda,
- lusterko,
- biała kartka A4 z bloku technicznego,
- czarna kartka A4 z bloku technicznego,
- taśma klejąca,
- nożyczki.

### Wykonanie

Ćwiczenie wykonujemy w zaciemnionym pomieszczeniu.

1. Naczynie szklane napełniamy wodą.
2. W pewnej odległości od naczynia umieszczamy białą kartkę, która będzie służyła jako ekran.
3. W naczyniu z wodą umieszczamy lusterko; kąt nachylenia lusterka dobieramy tak, aby powierzchnia odbijająca lusterka tworzyła kąt większy niż  $90^\circ$  z powierzchnią wody i jednocześnie skierowana była na ekran.
4. Do białej kartki, stanowiącej ekran, przyklejamy taśmą czarną kartkę z wyciętą poziomo szczeliną o długości około 10 cm i szerokości 1 cm.

5. Światło kierujemy przez szczelinę na lusterko.
6. Dobieramy kąt ustawienia lusterka tak, aby na ekranie widoczne było widmo światła w postaci barwnego pasma kolorów: czerwonego, pomarańczowego, żółtego, zielonego, niebieskiego oraz fioletowego — obserwujemy rozszczepienie światła „białego”.

Podobny efekt można zaobserwować dla światła słonecznego. Ćwiczenie wykonujemy w słoneczny dzień najlepiej rano lub wieczorem gdy promienie słońca padają pod małym kątem na powierzchnię Ziemi.

1. Z białej kartki tworzymy ekran i ustawiamy w pewnej odległości od szklanego naczynia.
2. Lusterko umieszczamy w naczyniu z wodą tak, aby powierzchnia odbijająca lusterka tworzyła kąt większy niż  $90^\circ$  z powierzchnią wody — kąt zależy od pory dnia, czyli kąta padania promieni słonecznych na powierzchnię Ziemi.
3. Zmieniamy w sposób ciągły kąt ustawienia lusterka tak, aby na ekranie widoczne było widmo światła słonecznego w postaci barwnego pasma kolorów: czerwonego, pomarańczowego, żółtego, zielonego, niebieskiego oraz fioletowego.

## Objaśnienie

Światło „białe”, którego klasycznym źródłem jest Słońce jest mieszaniną wielu barw: czerwonej, pomarańczowej, żółtej, zielonej, niebieskiej oraz fioletowej i tworzy ciągłe widmo fal elektromagnetycznych w zakresie widzialnym od ok. 400 do 700 nm. Podobnie światło żarówki wolframowej jest światłem „białym” o widmie ciągłym w zakresie widzialnym. Jeśli światło „białe” skierujemy na powierzchnię wody w miejscu gdzie tworzy się menisk wypukły (na granicy woda–lusterko siły spójności wody powodują powstanie menisku wypukłego), obserwujemy załamanie promieni światła. Sferyczna powierzchnia menisku zwiększa zakres kąta padania światła. Po przejściu z powietrza do wody światło o różnych długościach fali rozchodzi się z różnymi prędkościami, a więc załamuje się pod różnym kątem — obserwujemy tzw. rozszczepienie światła „białego”. Załamane promienie światła o różnych barwach są następnie odbijane od lusterka zgodnie z prawem odbicia, czyli pod tym samym kątem, co kąt padania, który dla fal o różnych długościach jest różny. Po odbiciu od lusterka rozszczepione promienie rozchodzą się w kierunku powierzchni wody i na granicy woda–powietrze ulegają ponownie załamaniu, przy czym kąt załamania dla poszczególnych fal jest większy niż kąt padania.

Obserwujemy wzmocnienie efektu rozszczepienia światła „białego”, na ekranie widzimy barwne, ciągłe widmo światła „białego”.



Rysunek 15.1. Układ do obserwacji widma światła „białego”

## SPEKTROSKOP

## Cel ćwiczenia

Obserwacja widma żarówki wolframowej oraz energooszczędnej za pomocą spektroskopu.

## Materiały

- źródło światła — lampa z żarówką wolframową lub energooszczędną,
- czarny karton,
- siatka dyfrakcyjna lub płyta CD,
- żyłki,
- nożyczki,
- nóż z ostrzem łamanym,
- linijka,
- czarna taśma klejąca,
- cyrkiel,
- ołówek.

## Wykonanie

1. Z czarnego kartonu wycinamy prostokąt o wymiarach  $20 \times 15$  cm; prostokąt zwiżamy i skleamy tak, aby uzyskać „tubę” o długości 20 cm.
2. Z pozostałej części kartonu wycinamy dwa koła o średnicy takiej samej jak średnica „tuby” — w jednym kole wycinamy prostokąt i przykleamy siatkę dyfrakcyjną.
3. W drugim kole wycinamy na środku szczelinę, do której symetrycznie przykleamy dwie żyłki tak, aby utworzyły wąską szczelinę o szerokości około 0,5 mm.
4. Następnie przy pomocy czarnej taśmy

izolacyjnej z jednej strony „tuby” przykleamy koło z siatką dyfrakcyjną, a z drugiej koło ze szczeliną z żyłek.

5. W celu obserwacji widm kierujemy szczelinę spektroskopu na różne źródła światła. Od strony siatki dyfrakcyjnej spektroskopu obserwujemy widmo światła, w postaci barwnych pasm w przypadku żarówki wolframowej oraz selektywnych barwnych linii w przypadku żarówki energooszczędnej.



Rysunek 16.1. Spektroskop do obserwacji widm źródeł światła

Zastosowanie czarnego kartonu oraz czarnej taśmy pozwala na izolację spektroskopu od zewnętrznych, przypadkowych źródeł światła oraz eliminację niepożądanych odbić wewnątrz spektroskopu.

## Objaśnienie

Spektroskop jest przyrządem optycznym służącym do analizy światła. Światło „białe” po przejściu przez wąską szczelinę pada na siatkę dyfrakcyjną i ulega rozszczepieniu. Fale o poszczególnych długościach ulegają ugięciu na szczelinach siatki dyfrakcyjnej pod różnym kątem. Kąt ugięcia jest największy dla światła czerwonego i najmniejszy dla fioletowego.

W przestrzeni za siatką dyfrakcyjną fale interferują ze sobą, tworząc obszary jasne i ciemne, odpowiadające wzmocnieniu lub wygaszeniu fal świetlnych, przy czym warunki interferencji są różne dla poszczególnych długości fal. Obraz rozszczepionej wiązki światła, powstający przy użyciu spektroskopu nazywamy widmem. Światło emitowane przez różne źródła składa się z fal elektromagnetycznych o różnych, charakterystycznych długościach fali. Klasyczna żarówka z żarzącym się drutem wolframowym emituje promieniowanie o widmie ciągłym, zawierającym wszystkie długości fal w zakresie widzialnym. Widmo żarówki energooszczędnej różni się znacznie; obserwujemy selektywne linie emisyjne.

## OGNISKOWA NACZYNNIA Z WODĄ ORAZ SZKLANEJ SOCZEWKI

### Cel ćwiczenia

Wyznaczenie ogniskowej naczynia z wodą oraz ogniskowej szklanej soczewki.

### Materiały

- źródło światła,
- szklana soczewka sferyczna dwuwypukła,
- szklane naczynie o sferycznych ściankach,
- woda,
- kartka białego papieru,
- czarny karton,
- linijka,
- nożyczki.

### Wykonanie

Ćwiczenie wykonujemy w zaciemnionym pomieszczeniu.

1. Naczynie szklane napełniamy wodą i ustawiamy na białej kartce papieru.
2. W czarnym kartonie wycinamy dwie pionowe szczeliny o długości około 4 cm i szerokości około 1 mm, oddalone o około 1 cm.
3. Światło kierujemy przez szczeliny na szklane naczynie i obserwujemy drogę światła.
4. Na kartce zaznaczamy punkt, w którym skupiają się promienie światła — po przejściu przez szczeliny, równoległe promienie padają na ściankę szkla-

nego naczynia wypełnionego wodą, gdzie ulegają załamaniu na granicy ośrodków (powietrze–szkło–woda).

5. Następnie mierzymy odległość pomiędzy środkiem naczynia a punktem skupienia promieni świetlnych w celu wyznaczenia ogniskowej układu.

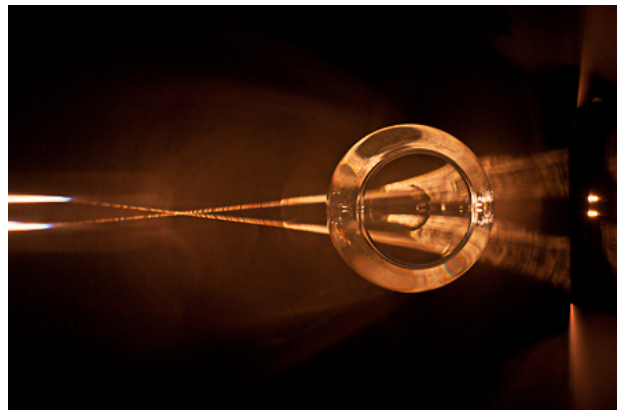
Podobne skupienie promieni świetlnych uzyskamy ustawiając zamiast naczynia z wodą sferyczną, szklaną soczewkę skupiającą.

### Objaśnienie

Światło po przejściu przez szczeliny jest ograniczone do wąskich, równoległych wiązek. Na granicy powietrze–szkło światło ulega załamaniu, przy czym ze względu na krzywiznę ścianki naczynia oraz różnicę współczynników załamania szkła (około 1,5) oraz powietrza (około 1,0) światło załamane jest pod większym kątem od kąta padania. Pod tym samym kątem promienie świetlne wpadają do wody, gdzie ponownie na granicy szkło–woda ulegają załamaniu. Przy przejściu ze szkła, o większym współczynniku załamania do wody o mniejszym współczynniku załamania (około 1,33), promienie świetlne są ponownie załamane pod kątem większym niż kąt padania na granicę szkło–woda. Krzywizna ścianki naczynia powoduje dodatkowe zwiększenie kąta załamania promieni świetlnych. W rezultacie promienie świetlne załamują się do wnętrza

naczynia. Na przeciwległej ścianie naczynia promienie świetlne ulegają ponownie załamaniu, a następnie za naczyniem skupiają się. Sferyczne, szklane naczynie wypełnione wodą powoduje załamanie i skupienie światła, działa zatem jak soczewka skupiająca. Punkt skupienia promieni świetlnych jest ogniskiem układu. W wyniku tego przedmioty obserwowane za naczyniem wydają się większe niż są w rzeczywistości.

Szklana, dwuwypukła soczewka sferyczna umieszczona w powietrzu (lub innym ośrodku o współczynniku załamania mniejszym niż współczynnik załamania materiału, z którego wykonano soczewkę) zmienia równoległą wiązkę promieni świetlnych w wiązkę zbieżną. Jeśli padające promienie świetlne są równoległe do osi głównej soczewki, to po przejściu przez soczewkę promienie skupiają się w jednym punkcie leżącym na osi soczewki. Jeśli padające równoległe promienie tworzą pewien kąt z osią soczewki, wówczas punkt skupienia promieni nie leży na osi soczewki lecz na płaszczyźnie przechodzącej przez ognisko promieni równoległych do osi głównej. Płaszczyzna ta jest prostopadła do osi głównej soczewki i nazywa się płaszczyzną ogniskową soczewki. Punkt, w którym promienie świetlne skupiają się po przejściu przez soczewkę nazywa się ogniskiem soczewki. Odległość pomiędzy środkiem soczewki a ogniskiem nazywa się ogniskową soczewki.



Rysunek 17.1. Układ do wyznaczania ogniskowej naczynia z wodą



## KAMERA OTWORKOWA

### Cel ćwiczenia

Obserwacja obrazu świecącego przedmiotu przy pomocy kamery otworkowej.

### Materiały

- źródło światła, np. lampa z żarówką wolframową,
- kartonowe pudełko prostokątne,
- czarny papier,
- kalka techniczna,
- czarna taśma klejąca,
- szpilka,
- nożyczki,
- klej.

### Wykonanie

Doświadczenie wykonujemy w zaciemnionym pomieszczeniu, w którym jedynym źródłem światła jest świecąca żarówka.

1. Kartonowe pudełko wyklejamy od środka czarnym papierem aby wyeliminować zbędne odbicia światła rozchodzącego się wewnątrz.
2. W jednej ścianie pudełka robimy przy pomocy szpilki mały otwór o średnicy ok. 0,3 mm.
3. Przeciwległą ściankę pudełka usuwamy i zastępujemy kalką techniczną – „matówką”.
4. Świecącą żarówkę ustawiamy przed otworem — na kalce zaobserwujemy odwrócony obraz żarówki.

### Objaśnienie

Świecąca żarówka wysyła promienie świetlne, które rozchodzą się prostoliniowo we wszystkich kierunkach. Otwór o odpowiednio dobranej średnicy ogranicza wpadające do pudełka promienie świetlne, nie zmieniając jednocześnie ich kierunku. Promienie rozchodzą się wewnątrz pudełka prostoliniowo, a na kalce obserwujemy odwrócony obraz świecącej żarówki. Wielkość otworu musi być dobrana optymalnie. Jeśli średnica otworu jest porównywalna z długością fali padającego światła, wówczas na skutek dyfrakcji promieni świetlnych na brzegach otworu występuje interferencja ugiętych promieni i otrzymamy rozmyty obraz. Wielkość otworu można obliczyć ze wzoru:

$$d = 1,9 \sqrt{f\lambda}, \quad (18.1)$$

gdzie  $d$  jest średnicą otworu,  $f$  ogniskową, czyli odległością otworu od obrazu,  $\lambda$  długością fali.



Rysunek 18.1. Kamera otworkowa



Ostrość otrzymanego obrazu zależy od średnicy otworu, im mniejszy otwór tym wyraźniejszy obraz. Jednocześnie jednak zmniejszenie otworu powoduje niepożądany efekt — zmniejszenie jasności. Wielkość przedmiotu, czyli powiększenie lub pomniejszenie, zależy od odległości otworu od świecącego przedmiotu oraz odległości pomiędzy otworem a miejscem, w którym powstaje obraz na kalce.



Rysunek 18.2. Obraz włókna żarówki otrzymany przy użyciu kamery otworkowej

## OBRAZ POWSTAJĄCY W „APARACIE”

### Cel ćwiczenia

Obserwacja obrazu przedmiotu przy pomocy „aparatu”.

### Materiały

- źródło światła lub oświetlony przedmiot,
- soczewka skupiająca,
- kartonowe pudełko prostopadłościowe,
- kartonowa tuba,
- czarny papier,
- kalka techniczna,
- czarna taśma klejąca,
- klej,
- nożyczki.

### Wykonanie

Doświadczenie wykonujemy w zaciemnionym pomieszczeniu, w którym jedynym źródłem światła jest świecąca żarówka.

1. Kartonowe pudełko wyklejamy od środka czarnym papierem, aby wyeliminować zbędne odbicia światła rozchodzącego się wewnątrz.
2. Na jednej ścianie pudełka wycinamy otwór i umieszczamy w nim „tubę”.
3. Na końcu „tuby” umieszczamy soczewkę skupiającą o ogniskowej równej długości „tuby”.
4. Przeciwległą ściankę pudełka usuwamy i zastępujemy kalką techniczną — „matówką”.
5. Kierujemy tubę na źródło światła

(żarówkę lub dobrze oświetlony przedmiot) — na kalce powstaje odwrócony obraz przedmiotu; zbliżając i oddalając pudełko od przedmiotu ustawiamy ostrość obrazu.

### Objaśnienie

Świecąca żarówka lub dobrze oświetlony przedmiot wysyła promienie świetlne rozchodzące się prostoliniowo we wszystkich kierunkach. Sferyczna, szklana, dwuwypukła soczewka skupia promienie świetlne pochodzące od oświetlonego przedmiotu wewnątrz pudełka w punkcie nazywanym ogniskiem soczewki. Światło po skupieniu w ognisku soczewki rozchodzi się dalej prostoliniowo, tworząc na kalce odwrócony obraz przedmiotu. Wielkość obrazu zależy od odległości obserwowanego przedmiotu od przedniej ściany „aparatu”.



Rysunek 19.1. „Aparat”, źródło światła i oświetlony przedmiot — kubek



Rysunek 19.2. Obraz źródła światła i oświetlonego przedmiotu — kubka otrzymany przy użyciu „aparatu”



Rysunek 19.3. Obraz kubka otrzymany przy użyciu „aparatu”

## WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA ZAŁAMANIA ŚWIATŁA WODY

### Cel ćwiczenia

Wyznaczanie współczynnika załamania przy wykorzystaniu zjawiska dyfrakcji i interferencji światła.

### Materiały

- przezroczyste, prostopadłościennym naczynie szklane,
- źródło światła — wskaźnik laserowy,
- siatka dyfrakcyjna,
- biały kartka,
- kalka techniczna,
- taśma klejąca,
- nożyczki,
- pisak,
- linijka.

### Wykonanie

Doświadczenie wykonujemy w zaciemnionym pomieszczeniu.

1. Naczynie napełniamy do połowy objętości wodą.
2. Na jednej ścianie naczynia montujemy siatkę dyfrakcyjną.
3. Po przeciwnej stronie naczynia, do zewnętrznej ścianki, przyklejamy kalkę techniczną.
4. Światło lasera kierujemy na siatkę dyfrakcyjną tak, aby za siatką przechodziło przez powietrze — na kalce zaznaczamy

pisakiem położenie prążków interferencyjnych.

5. Przy pomocy linijki mierzymy odległość  $y_1$  pomiędzy prążkiem zerowego i pierwszego rzędu.
6. Przesuwamy wskaźnik laserowy równolegle i ponownie kierujemy światło na siatkę dyfrakcyjną tak, aby za siatką przechodziło przez wodę — na kalce zaznaczamy położenie prążków interferencyjnych i mierzymy odległość  $y_2$  pomiędzy prążkiem zerowego i pierwszego rzędu.
7. Wyznaczamy współczynnik załamania światła wody względem powietrza, korzystając ze wzoru:

$$n = \frac{y_1}{y_2}. \quad (20.1)$$

⚡ Użycie wskaźnika laserowego wymaga szczególnej ostrożności!

### Objaśnienie

Względny współczynnik załamania światła na granicy woda–powietrze definiuje zależność:

$$n = \frac{v_1}{v_2}, \quad (20.2)$$

gdzie  $v_1$  i  $v_2$  to prędkości rozchodzenia światła odpowiednio w powietrzu i wodzie. W próżni światło rozchodzi się z prędkością  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s. W każdym innym ośrodku

światło rozchodzi się z mniejszą prędkością zgodnie z zależnością:

$$v = \frac{c}{n}, \quad (20.3)$$

gdzie  $n$  jest bezwzględny współczynnikiem załamania ośrodka.

Odległość pomiędzy prążkami interferencyjnymi widocznymi na kalce zależy od długości fali  $\lambda$ , stałej siatki dyfrakcyjnej  $d$  oraz ośrodka, w którym światło rozchodzi się, i jest mniejsza wtedy, gdy światło rozchodzi się w wodzie niż wtedy, gdy rozchodzi się w powietrzu. Warunek dyfrakcji dla prążków pierwszego rzędu określają zależności:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_1 &= \frac{\lambda_1}{d}, \\ \sin \alpha_2 &= \frac{\lambda_2}{d}, \end{aligned} \quad (20.4)$$

gdzie  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  to kąty ugięcia pierwszego rzędu,  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  długości fal świetlnych rozchodzących się w powietrzu oraz w wodzie, a  $d$  jest stałą siatki dyfrakcyjnej.

Z geometrii układu otrzymujemy zależności:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_1 &= \frac{y_1}{l}, \\ \operatorname{tg} \alpha_2 &= \frac{y_2}{l}, \end{aligned} \quad (20.5)$$

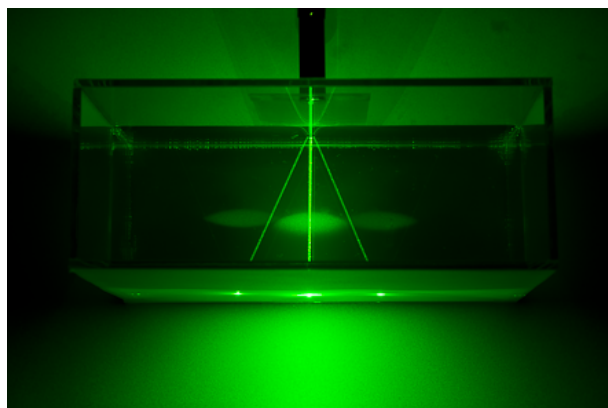
gdzie  $y_1$  oraz  $y_2$  to zmierzona odległość pomiędzy prążkami zerowego i pierwszego rzędu dla powietrza oraz wody, a  $l$  jest odległością od siatki dyfrakcyjnej do ekranu (kalki), równą w przybliżeniu wymiarowi naczynia.

Korzystając z przybliżenia dla małych kątów możemy założyć, że  $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$  i otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{y_1 d}{l}, \\ \lambda_2 &= \frac{y_2 d}{l}. \end{aligned} \quad (20.6)$$

Zależności pomiędzy prędkościami i długościami fal rozchodzących się w wodzie oraz w powietrzu opisują wzory:  $v_1 = \lambda_1 \nu$  oraz  $v_2 = \lambda_2 \nu$ , gdzie  $\nu$  jest częstotliwością fali generowanej przez źródło światła. Korzystając z definicji współczynnika załamania otrzymujemy wzór na współczynnik załamania światła wody względem powietrza:

$$n = \frac{y_1}{y_2}. \quad (20.7)$$



Rysunek 20.1. Propagacja światła w wodzie po przejściu przez siatkę dyfrakcyjną umieszczoną na przedniej ścianie szklanego naczynia

## KĄT GRANICZNY DLA WODY

### Cel ćwiczenia

Pomiar kąta granicznego przy przejściu światła z wody do powietrza.

### Materiały

- źródło światła — wskaźnik laserowy,
- przezroczyste, prostopadłościenné naczynie szklane,
- kątomierz,
- cyrkiel,
- biała kartka papieru,
- taśma klejąca,
- nożyczki.

### Wykonanie

Doświadczenie wykonujemy w zaciemnionym pomieszczeniu.

1. Naczynie napełniamy wodą.
2. Wykonujemy tarczę kątową — na kartce rysujemy przy pomocy cyrkla okrąg, a następnie skalujemy przy pomocy kątomierza w zakresie od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ , co  $1^\circ$ .
3. Umieszczamy tarczę na bocznej ścianie naczynia.
4. Źródło światła montujemy na obrotowym uchwycie.
5. Światło lasera kierujemy na ściankę naczynia pod pewnym kątem tak, aby przeszło przez ściankę naczynia do wody, a następnie z wody do powietrza.
6. Na tarczy kątowej odczytujemy kąt pa-

dania i kąt załamania światła na granicy woda–powietrze.

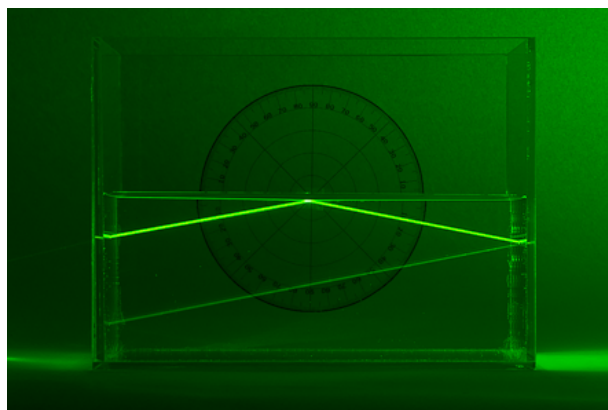
7. Zmieniamy w sposób ciągły kąt padania światła — na tarczy kątowej odczytujemy kąt padania, przy którym światło nie wydostaje się z wody i „ślizga” się po powierzchni, czyli załamuje się na granicy woda–powietrze pod kątem  $90^\circ$ .
8. Zwiększamy kąt padania i obserwujemy drogę światła — światło ulega wyłącznie odbiciu od powierzchni granicznej woda–powietrze.

⚡ Użycie wskaźnika laserowego wymaga szczególnej ostrożności!

### Objaśnienie

W doświadczeniu analizujemy zjawisko załamania światła przechodzącego z wody (środowisko o większym współczynniku załamania — około 1,33) do powietrza (środowisko o mniejszym współczynniku załamania — około 1,0). Światło na granicy woda–powietrze załamuje się, przy czym kąt padania jest mniejszy od kąta załamania. Kąt padania jest to kąt, jaki tworzy promień wychodzący z wody z prostą prostopadłą do powierzchni granicznej woda–powietrze. Kąt załamania jest to kąt, jaki tworzy promień światła rozchodzący się w powietrzu z prostą prostopadłą do powierzchni granicznej między dwoma ośrodkami. Przy pewnym kącie padania, nazywanym kątem granicznym, kąt załamania wynosi  $90^\circ$  i światło „ślizga” się po powierzchni. Przy

przejściu światła z wody do powietrza kąt graniczny wynosi  $48^\circ$ . Dla kątów padania większych od kąta granicznego światło ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu i pozostaje w wodzie. Ścianka naczynia jako płytka płasko-równoległa nie zmienia kierunku światła, powoduje jedynie równoległe przesunięcie drogi optycznej światła.



Rysunek 21.1. Całkowite wewnętrzne odbicie światła w wodzie



# DYFRAKCJA ŚWIATŁA NA OPTYCZNEJ SIATCE DYFRAKCYJNEJ ORAZ NA PŁYTCIE CD I DVD

## Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie stałej siatki dyfrakcyjnej oraz wyznaczenie odległości pomiędzy ścieżkami zapisu na płycie CD i DVD.

## Materiały

- wskaźnik laserowy,
- siatka dyfrakcyjna,
- płyta CD,
- płyta DVD,
- uchwyt do mocowanie siatki dyfrakcyjnej oraz płyty CD i DVD,
- uchwyt do mocowania wskaźnika laserowego,
- biała kartka z bloku technicznego – ekran,
- linijka,
- miara.

## Wykonanie

Wyznaczenie stałej siatki dyfrakcyjnej  $d$ .

1. Zestawiamy układ według schematu (rysunek 22.1).
2. Mierzymy odległość  $D$  pomiędzy ekranem a siatką dyfrakcyjną.
3. Mierzymy na ekranie odległość  $y$  między prążkiem zerowego i pierwszego rzędu.

4. Odczytujemy długość fali  $\lambda$  źródła światła.
5. Obliczamy stałą siatki dyfrakcyjnej  $d$  korzystając ze wzoru:

$$d = \frac{\lambda D}{y}. \quad (22.1)$$

Wyznaczenie odległości pomiędzy ścieżkami zapisu na płycie CD i DVD.

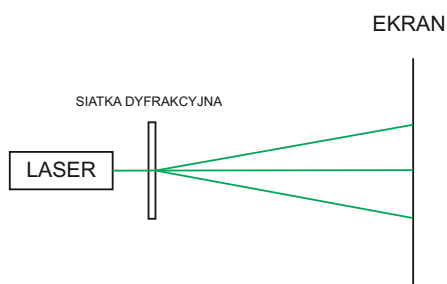
1. Zestawiamy układ według schematu (rysunek 22.2).
2. Mierzymy odległość  $D$  pomiędzy ekranem a płytą CD/DVD.
3. Mierzymy na ekranie odległość  $y$  między prążkiem zerowego i pierwszego rzędu.
4. Odczytujemy długość fali  $\lambda$  źródła światła.
5. Obliczamy odległość pomiędzy ścieżkami zapisu na płycie CD/DVD korzystając z tego samego wzoru co w przypadku siatki dyfrakcyjnej (równanie (22.1)).



Użycie wskaźnika laserowego wymaga szczególnej ostrożności!

## Objaśnienie

Optyczną siatkę dyfrakcyjną tworzy układ wąskich, równoległych, blisko siebie leżących szczelin. Światło po przejściu



Rysunek 22.1. Schemat układu do pomiaru stałej siatki dyfrakcyjnej

przez siatkę ulega dyfrakcji na poszczególnych szczelinach. W przestrzeni za siatką dyfrakcyjną ugięte wiązki światła interferują ze sobą. Na ekranie otrzymujemy obraz interferencyjny w postaci jasnego prążka zerowego rzędu oraz symetrycznie względem niego położonych jasnych prążków kolejnych rzędów. Kąt ugięcia, przy którym na ekranie obserwujemy jasne prążki interferencyjne jest określony wzorem:

$$\sin \alpha = \frac{n\lambda}{d}, \quad (22.2)$$

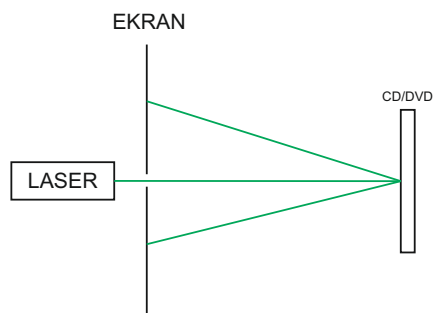
gdzie  $\alpha$  jest kątem ugięcia jasnych promieni względem symetralnej układu szczelin,  $d$  odległością między szczelinami,  $\lambda$  długością fali światła, a  $n$  określa rząd dyfrakcji. Ze wzoru wynika, że kąt ugięcia jest tym większy im większa jest długość fali  $\lambda$  i im mniejsza jest stała siatki dyfrakcyjnej  $d$ .

Na rysunku 22.3 przedstawiono schematycznie dyfrakcję światła przechodzącego przez dwie szczeliny i zaznaczono punkty, w których powstają jasne prążki interferencyjne zerowego oraz pierwszego rzędu. Jasne prążki interferencyjne powstają wtedy, gdy różnica dróg optycznych  $\Delta L$  promieni świetnych wychodzących z obu szczelin jest równa całkowitej wielokrotności długości fali  $\lambda$ . Dla pierwszego rzędu interferencyjnego musi zatem być spełniony warunek  $\Delta L = \lambda$ . Na podstawie rysunku określamy zależność:

$$\frac{\Delta L}{d} = \sin \alpha_1, \quad (22.3)$$

gdzie  $\alpha_1$  jest kątem ugięcia. Z rysunku określamy także zależność:

$$\frac{y}{D} = \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (22.4)$$

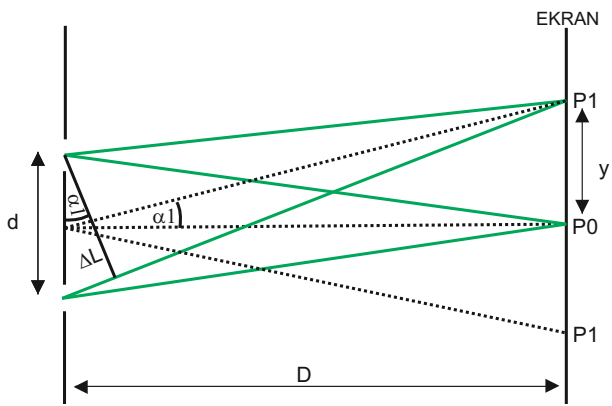


Rysunek 22.2. Schemat układu do pomiaru odległości między ścieżkami na płycie CD i DVD

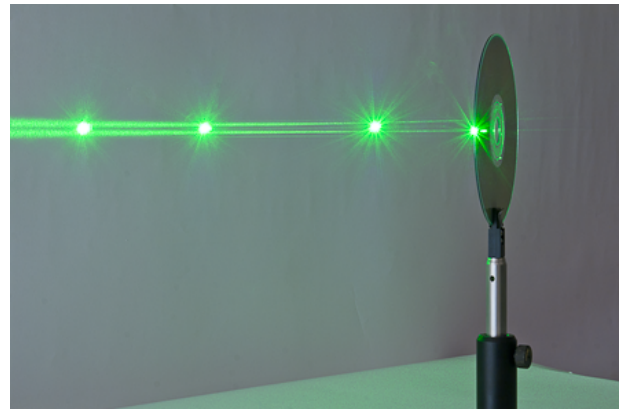
gdzie  $y$  jest odległością pomiędzy prążkiem zerowego i pierwszego rzędu, a  $D$  jest odległością pomiędzy siatką dyfrakcyjną a ekranem. Dla małych kątów można przyjąć, że  $\sin \alpha_1 \approx \operatorname{tg} \alpha_1$ , skąd po przekształceniach otrzymujemy następujący wzór na stałą siatki dyfrakcyjnej  $d$ :

$$d = \frac{\lambda D}{y}. \quad (22.5)$$

Korzystając z tego wzoru możemy określić także odległość pomiędzy ścieżkami zapisu na płytach CD i DVD, które traktujemy jak odbiciowe siatki dyfrakcyjne. Standardowe płyty kompaktowe wykonane są z poliwęglanowej płyty pokrytej cienką warstwą aluminium. Cyfrowe dane zapisane są na płycie CD w postaci wgłębień o określonej wielkości. Wgłębienia mają około 125 nm głębokości, 500 nm szerokości, a długość od 833 do 3560 nm. Odległość pomiędzy równoległymi wgłębieniami wynosi 1600 nm. Cyfrowy zapis tworzy na płycie spiralną ścieżkę biegnącą od środka do brzegu płyty. Do zapisu i odczytu danych na płycie CD stosuje się lasery o długości fali emitowanego promieniowania w zakresie 780–790 nm. Wielkości wgłębień na płytach DVD są mniejsze (około 400 nm), a odstęp pomiędzy ścieżkami cyfrowego zapisu wynosi 740 nm. Do zapisu i odczytu na płytach DVD stosuje się lasery o krótszej długości fali 635–650 nm. W wyniku tego na płytach DVD możliwe jest zwiększenie gęstości zapisu, czyli większa akumulacja danych.



Rysunek 22.3. Schemat do wyprowadzenia wzoru (22.5) — interferencja światła przechodzącego przez dwie szczeliny



Rysunek 22.4. Dyfrakcja światła na płycie CD

# LITERATURA

- [1] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy Fizyki*, tom 2 i 4, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003.
- [2] S. Szczęniowski, *Fizyka doświadczalna*, część I, II i IV, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1976.
- [3] K. Gębura, A. Marynowska, B. Mól, B. Śniadek, *Fizyka dla klasy 2. gimnazjum*, IMPULS, Wydawnictwo LektorKlett, Poznań 2000.
- [4] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *Feynmana wykłady z fizyki*, tom1.2, PWN, Warszawa, 2001.
- [5] A. H. Piekara, *Mechanika ogólna*, PWN, Warszawa, 1977.