



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Człowiek – najlepsza inwestycja

# FENIKS

- długofalowy program odbudowy, popularyzacji i wspomagania fizyki w szkołach w celu rozwijania podstawowych kompetencji naukowo-technicznych, matematycznych i informatycznych uczniów

## **Pakiet nr 5:**

### **Zimno, zimniej, najzimniej – od lodów do kriogeniki**

**prof. dr hab. Andrzej MAGIERA**

*Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego  
Uniwersytet Jagielloński*

**mgr Grzegorz KNAPIK**

*II Liceum Ogólnokształcące im. Jana III Sobieskiego w Krakowie*

**mgr Małgorzata KNAPIK**

*VII Liceum Ogólnokształcące im. Marii Dąbrowskiej w Krakowie*

Wersja UJ/1.0, luty 2009

Zawarte w tym opracowaniu materiały przeznaczone są do wspomagania pracy nauczycieli i uczniów w czasie zajęć pozalekcyjnych w szkołach biorących udział w projekcie edukacyjnym FENIKS. Materiały do realizacji w czasie zajęć na uczelniach uczelnie przygotowują niezależnie.

<http://feniks.ujk.kielce.pl/>  
[feniks@th.if.uj.edu.pl](mailto:feniks@th.if.uj.edu.pl)



*- długofalowy program odbudowy, popularyzacji i wspomagania fizyki w szkołach w celu rozwijania podstawowych kompetencji naukowo - technicznych, matematycznych i informatycznych uczniów*

Projekt współfinansowany jest ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Celem zajęć pakietu nr 5 „Zimno, zimniej, najzimniej – od lodów do kriogeniki” jest zapoznanie uczniów z pojęciem temperatury, metodami pomiaru temperatury, związkiem temperatury z mikroskopową budową materii, metodami uzyskiwania niskich temperatur, własnościami materiałów w niskich temperaturach, nowymi zjawiskami pojawiającymi się w bardzo niskich temperaturach oraz zastosowaniami niskich temperatur.

Pakiet został podzielony na tematy, z których każdy wprowadza kolejne metody i urządzenia stosowane do uzyskiwania coraz niższych temperatur. Zalecana jest realizacja tematów w przedstawionej kolejności, co pozwala na utrzymanie logicznego toku realizacji pakietu. Ramy czasowe realizacji tematu powinny zostać ustalone przez prowadzącego zajęcia. Jeden temat może być realizowany na więcej niż jednym zajęciach.

Podstawę każdego tematu stanowią proste eksperymenty. Większość doświadczeń powinna zostać wykonana na zajęciach w szkole. Niektóre eksperymenty wykonywane będą w czasie zajęć na pracowni na uczelni. Część doświadczeń związana z kriogeniką może być przedstawiona w postaci filmów, animacji lub wykonana jako demonstracje na uczelni. Na podstawie wyników eksperymentów i obserwacji wykonanych w doświadczeniach należy omówić zagadnienia związane z tematem. Przykłady tych zagadnień przedstawione są w każdym temacie. Niektóre z zagadnień opisane są bardziej szczegółowo, umożliwiając nauczycielowi lepsze przygotowanie się do zajęć. Niektóre z przedstawionych zagadnień można pominąć, jeżeli zostaną uznane przez nauczyciela jako zbyt trudne dla prowadzonej grupy. Można pominąć omawianie tematów 10 i 11 jeżeli zostaną uznane za zbyt trudne. Jakkolwiek należy wtedy z tematu 11 omówić zjawisko nadprzewodnictwa wraz z wszystkimi towarzyszącymi efektami. Wskazane jest także omówienie zastosowań kriogeniki, które zawarte są w temacie 11.

#### **Spis tematów:**

- 1. Temperatura**
- 2. Prawa gazu doskonałego**
- 3. Termometr gazowy, temperatura zera bezwzględnego**
- 4. Związek temperatury z mikroskopową budową materii**
- 5. Proces adiabatyczny**
- 6. Chłodzenie przez parowanie**
- 7. Temperatura zamarzania roztworu**
- 8. Skraplanie gazu**
- 9. Przekaz ciepła**
- 10. Efekt magnetokaloryczny – adiabatyczne rozmagnesowanie**
- 11. Nowe własności substancji w bardzo niskich temperaturach**

## Temat 1: Temperatura

Celem zajęć jest wprowadzenie pojęcia temperatury i jednocześnie innych wielkości używanych do opisu układów termodynamicznych, które będą przydatne w dalszych częściach pakietu. Omówić należy pojęcie równowagi termodynamicznej, które pozwala sformułować zerową zasadę termodynamiki wprowadzającą temperaturę. Poprzez cechowanie termoskopu wprowadzić należy skalę Celsjusza. Wycechowany termoskop wykorzystać jako termometr do wyznaczenia czasu relaksacji układu.

### **Eksperymenty:**

- 1) **odczuwanie temperatury**
- 2) **cechowanie termoskopu**
- 3) **dochodzenie do stanu równowagi**

#### *1) Odczuwanie temperatury*

Przygotować cztery naczynia ustawiając je w rzędzie. Do lewego naczynia naleć zimną wodę, do prawego naczynia nalać bardzo ciepłą wodę, do dwóch środkowych naczyń nalać letnią wodę. Doświadczenie wykonują samodzielnie uczniowie. Lewą rękę wkładamy do zimnej wody, prawą rękę wkładamy do ciepłej wody. Następnie obydwie ręce zanurzamy jednocześnie do letniej wody. Lewą ręką odczuwamy większą temperaturę letniej wody niż prawą ręką.

#### *2) Cechowanie termoskopu*

Termoskop można zakupić (np. w firmie Zamkor, cena 45,50 zł) lub wykonać samodzielnie używając niewielkiej butelki i cienkiej rurki. Na zlewce ustawiamy lejek wyłożony bibułą. Do lejka wsypujemy pokruszony lód i zalewamy niewielką ilością wody. Po kilku minutach na dnie lejka znajduje się woda o temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$ , w której zanurzamy koniec termoskopu. Oczekujemy aż poziom cieczy w termoskopie ustabilizuje się i zaznaczamy na rurce poziom cieczy. Następnie wkładamy termoskop do wrzącej wody o temperaturze  $100^{\circ}\text{C}$ . Czekamy na ustabilizowanie się poziomu cieczy w termoskopie i zaznaczamy na rurce poziom cieczy w termoskopie. Korzystając z linijki odcinek pomiędzy dwoma zaznaczeniami dzielimy na 100 równych części, otrzymując wykalibrowany termometr.

#### *3) Dochodzenie do stanu równowagi*

Ochłodzić silnie termoskop wkładając go do mieszaniny wody z lodem. Następnie włożyć termoskop do zlewki z gorącą wodą i co minutę mierzyć wskazania termoskopu, aż przestaną się zmieniać. Wykonać wykres temperatury wskazywanej przez termoskop w funkcji czasu. Doświadczenie pokazuje, iż termoskop potrzebuje pewnego czasu, aby wskazania nie zmieniały się. W tym czasie termoskop i układ mierzony dochodzą do stanu równowagi. Dopiero po tym czasie możemy odczytać temperaturę wody w zlewce.

### **Tematy do omówienia**

- 1) Wprowadzenie parametrów używanych do opisu układów termodynamicznych (temperatury, ciśnienia, objętości, energii wewnętrznej i entropii) przez jakościowe obserwacje typu:
  - a) szklanka z gorącą wodą ochładza się w pokoju – pojęcie temperatury
  - b) szklanka z gorącą wodą ochładza się w pokoju – kierunek upływu czasu – pojęcie entropii
  - c) pompowanie balonika – można określić ciśnienie i objętość gazu, zwrócić uwagę na zależność pomiędzy ciśnieniem i objętością

- d) przemiany zgromadzonej energii – energia wewnętrzna. Ogrzewanie domu przez spalanie drewna – łatwy proces (zamiana kilku stopni swobody na wiele stopni swobody). Ruch samochodu dzięki spalaniu benzyny – trudny proces (zamiana kilku stopni swobody na jeden stopień swobody)– konieczny jest silnik.
- 2) Odczucie temperatury – konieczność konstrukcji układu do pomiaru temperatury.
  - 3) Równowaga termodynamiczna – układy są w takich stanach, iż po ich połączeniu układ złożony jest w równowadze. Układ jest w stanie równowagi jeżeli nie obserwujemy zależności jego parametrów od czasu (woda z dodanym lodem po rozpuszczeniu lodu ma stałą niezmienną w czasie temperaturę) oraz gdy nie ma zależności od historii układu (dwie szklanki z wodą o różnej temperaturze po ostygnięciu w powietrzu w pokoju zawierają wodę o tej samej temperaturze).
  - 4) Zerowa zasada termodynamiki – istnieje pewna wielkość skalarna (temperatura), która jest własnością wszystkich układów, taka że równość temperatur jest warunkiem koniecznym i wystarczającym istnienia równowagi termicznej.
    - a) Jeżeli układ A jest w równowadze termicznej z układem B oraz układ B jest w równowadze termicznej z układem C, to układ A jest w równowadze termicznej z układem C.
    - b) Przykład iż zerowa zasada termodynamiki nie jest trywialna. Jeżeli A ma taki sam kolor jak B oraz B ma taki sam kolor jak C to A ma taki sam kolor jak A. Jeżeli A zna B oraz B zna C, to niekoniecznie A zna C.
  - 5) Skala Celsjusza.
  - 6) Dochodzenie do stanu równowagi – czas relaksacji

## Temat 2: Prawa gazu doskonałego

Celem zajęć jest eksperymentalne sprawdzenie praw przemian gazu doskonałego. Eksperymenty pozwalają ostatecznie na wprowadzenie równania stanu gazu doskonałego.

### **Eksperymenty:**

- 1) **prawo Boyle'a – Mariotta**
- 2) **prawo Gay – Lussac'a**
- 3) **zależność parametrów gazu do ilości gazu**

Można kupić prosty zestaw (sargentwelch.com, cena 15 \$) lub można go zbudować samodzielnie. Do wykonania układu pomiarowego konieczne są strzykawki (jedna o pojemności 50 ml, druga o pojemności 100 ml) oraz dwie małe deseczki. Wypustkę w strzykawce do mocowania igły obcinamy a otwór wypełniamy kawałkiem plastiku i uszczelniamy go klejem do plastiku. W jednej z deseczek wycinamy otwór tak aby pasował do niego koniec strzykawki. W otworze tym mocujemy strzykawkę tak aby nie mogła się poruszać. Do końca tłoka montujemy drugą deseczkę. Należy zwrócić uwagę aby tłok zamocować dość dokładnie na środku deseczki.

#### **1) Prawo Boyle'a – Mariotta**

Mierzymy średnicę tłoka i obliczamy pole powierzchni tłoka. Smarujemy tłok jakimś smarem aby łatwiej mógł poruszać się w cylindrze strzykawki. Smar ten służy jednocześnie jako dodatkowe uszczelnienie. Wkładamy tłok do cylindra strzykawki. Kładziemy na deseczce przymocowanej do tłoka przedmioty o znanym ciężarze. Przy każdym obciążeniu mierzymy objętość gazu w strzykawce. Znając pole powierzchni tłoka oraz ciężar którym obciążaliśmy tłok, obliczamy ciśnienie wywierane na gaz w strzykawce (należy dodać zewnętrzne ciśnienie atmosferyczne). Wykonujemy wykres zależności objętości od ciśnienia oraz wykres zależności objętości od odwrotności ciśnienia. Dla drugiego wykresu powinniśmy otrzymać zależność liniową, skąd wnioskujemy iż  $V = \text{const.}/p$ .

#### **2) Prawo Gay – Lussac'a**

Przygotowany do pomiarów (tak jak w poprzednim doświadczeniu) układ wykładamy do przezroczystego naczynia obciążając dolną deseczkę poprzez położenie na niej jakichś ciężarków. Obciążamy tłok poprzez położenie na nim jakiegoś przedmiotu. Dla temperatury pokojowej odczytujemy objętość gazu w strzykawce. Do naczynia nalewamy wcześniej przygotowaną zimną wodę nie zmieniając obciążenia tłoka. Odczekujemy około 3 minuty i mierzymy objętość gazu w strzykawce oraz temperaturę wody. Wymieniamy wodę w naczyniu kolejno na wodę o temperaturze około 40°C, 60°C oraz 80°C. Dla każdej temperatury mierzymy objętość gazu w strzykawce. Wykonujemy wykres zależności objętości od temperatury. Powinniśmy otrzymać zależność liniową, czyli  $V = \text{const.} \cdot T$ .

#### **3) Zależność parametrów gazu do ilości gazu**

Powtarzamy pomiary opisane w pierwszym doświadczeniu dla drugiej strzykawki. Zauważamy, iż przy takim samym ciśnieniu, dla większej strzykawki otrzymujemy dwukrotnie większą objętość niż dla strzykawki mniejszej.

### **Tematy do omówienia**

- 1) Prawo Boyle'a – Mariotta –  $pV = \text{const.}$
- 2) Prawo Gay – Lussac'a –  $V/T = \text{const.}$
- 3) Dla stałej temperatury i ciśnienia sprawdzamy zależność objętości od liczby cząstek –  $N$ .
- 4) Otrzymane eksperymentalnie zależności łączymy w równanie Clapeyrona  $pV = NkT$ .

### **Temat 3: Termometr gazowy, temperatura zera bezwzględnego**

Celem zajęć jest wykonanie termometru gazowego oraz wyznaczenie przy jego pomocy zależności ciśnienia gazu od temperatury. Ekstrapolacja wyników do ciśnienia  $p=0$  pozwala na wyznaczenie temperatury zera bezwzględnego. Wprowadzona jest skala temperatur Kelwina. Dyskutowane są różne cechy fizyczne, które można wykorzystać do pomiaru temperatury. Omawiane są temperatury spotykane we Wszechświecie.

#### **Eksperymenty:**

- 1) termometr gazowy**
- 2) wyznaczenie temperatury zera bezwzględnego**
- 3) budowa pirometru**

#### **1) Budowa termometru gazowego przy stałej objętości**

Do aluminiowej puszkę po napoju (najlepiej użyć aluminium, ponieważ ma dobre przewodnictwo cieplne) włożyć szklaną lub metalową rurkę uszczelniając ją gumą do żucia, woskiem lub klejem. Do rurki przymocować elastyczną plastikową rurkę. Tą plastikową rurkę przymocować do pionowej deseczki tak, aby można ją było przesuwając w kierunku pionowym. Najniższy punkt rurki powinien znajdować się 20-30 cm poniżej pokrywy puszkę. Do plastikowej rurki wlać zabarwioną wodę lub denaturat. Poziom ciecży po obu stronach najniższego punktu rurki powinien być taki sam. Zaznaczyć poziom ciecży w części rurki znajdującej się bliżej pokrywy puszkę. Złapać kolbę dłońmi i zaobserwować zmianę poziomu ciecży w rurce.

#### **2) Temperatura zera bezwzględnego**

Puszkę umieścić w większym naczyniu wypełnionym wodą z lodem. Odczekać około 2 minut na ustalenie się równowagi (poziom ciecży w rurce nie ulega zmianie). Przesunąć część rurki przymocowaną do deseczki tak, aby ciecż w części rurki bliżej puszkę powróciła na zaznaczoną wcześniej pozycję. W ten sposób zapewniona jest stała objętość gazu używanego do pomiaru. Odczytać różnicę poziomu ciecży w rurkach i obliczyć ciśnienie gazu w puszcze. Zmierzyć temperaturę kąpielii wodnej, w której znajduje się puszkę. Powtórzyć pomiary dla kilku różnych temperatur kąpielii wodnej. Wykonać wykres zależności temperatury i ciśnienia gazu w puszcze. Dobrać skalę wykresu tak, aby zawierała ciśnienie  $p=0$  oraz temperaturę  $t=-280^{\circ}\text{C}$ . Przez punkty pomiarowe przeprowadzić linię prostą aż do punktu  $p=0$  i odczytać z wykresu odpowiadającą temu punktowi temperaturę.

#### **3) Budowa pirometru**

Do wykonania pirometru konieczne jest kartonowe pudełko po butach, 4 baterie 1.5V, żarówka 6V i 100 mA, liniowy potencjometr 470  $\Omega$ , cienkie kabelki, miliamperomierz. Połączyć baterie szeregowo i przy pomocy drucików poprzez miliamperomierz i potencjometr podłączyć do nich żarówkę. W boku pudełka wyciąć dwie leżące blisko siebie szczeliny, a w przeciwnym boku jeden otwór obserwacyjny. Przymocować żarówkę do pudełka przy jednej ze szczelin. Osłonić żarówkę tak aby zewnętrzne światło nie wpadało do szczeliny oraz aby żarówka na świeciła do drugiej szczeliny. Otwór obserwacyjny okleić ciemną folią lub ciekłą folią aluminiową. Skierować wolny szczelinę na ciało, którego temperaturę chcemy mierzyć. Regulować potencjometrem prąd płynący przez żarówkę tak aby jasność żarówki była taka sama jak badanego ciała. Odczytać wskazania miliamperomierza. Można porównać wskazania amperomierza przy obserwacji żarówki, słońca itp. Przy odpowiedniej kalibracji tego pirometru można przy jego pomocy określić temperaturę Słońca.

#### **Tematy do omówienia**

- 1) Równanie gazu doskonałego dla ustalonej objętości przy ciśnieniu  $p=0$ . Możemy wybrać skalę temperatury tak, aby w tych warunkach była ona równa zero.
- 2) Skala Kelwina. Dla rozrzedzonych gazów temperatura jest proporcjonalna do ciśnienia  $T(p) = ap + b$ . Mamy „naturalne” zero skali, czyli temperaturę, dla której znika ciśnienie  $p = 0 \Rightarrow b = 0$ . Drugi punkt wybieramy jako punkt potrójny wody (czyli współistnienie wody, lodu i pary wodnej) w którym temperatura i ciśnienie wynoszą  $T_3$  i  $p_3$  przyjmujemy, że w tym punkcie  $T_3 = 273.16$  K. Dla tak wybranej skali otrzymujemy temperaturę  $T=273.16 p/p_3$ , przyjmujemy iż 1 kelwin = 1 K odpowiada  $T_3/273.16$ . Otrzymana bezwzględna skala temperatur powiązana jest ze skalą Celsjusza  $T_C = T - 273.15^{\circ}\text{C}$ , stopień C = stopień K
- 3) Różne cechy fizyczne obiektów można użyć do pomiaru temperatury. Wcześniej (w temacie 1) było wykorzystanie rozszerzalności cieczy, w termometrze gazowym wykorzystaliśmy ciśnienie gazu. Tu należy przedstawić zależność napięcia kontaktowego termopary od temperatury, eksperyment cechowania termopary prowadzony będzie na pracowni na uczelni. Przedyskutować należy także zależność oporu od temperatury, ponieważ eksperyment ten będzie wykonywany na pracowni na uczelni.

Omówić metody pomiaru temperatury korzystając z przykładowej tabelki

cecha fizyczna	rodzaj termometru
objętość cieczy	rtęć $-39^{\circ}\text{C} - 356^{\circ}\text{C}$ , spirytus $-85^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$
ciśnienie gazu przy stałej objętości	termometr gazowy
opór elektryczny przewodników	platyna 14 K – 630 K
barwa obiektu	pirometr $> 1000$ K
elektryczne napięcie kontaktowe	termopara $-270^{\circ}\text{C} - +1700^{\circ}\text{C}$

Omówić temperatury we Wszechświecie korzystając z przykładowej tabelki

$10^{12}$ K	Wszechświat po $10^{-4}$ s po Wielkim Wybuchu, wewnątrz czarnych dziur, zderzenia ciężkich jonów
$10^7$ K	wnętrze Słońca, Tokamak
$10^4$ K	powierzchnia Słońca
$10^3$ K	topnienie miedzi
77 K	wrzenie ciekłego azotu
4 K	skraplanie helu
$10^{-6}$ K	najniższa osiągnięta w laboratorium

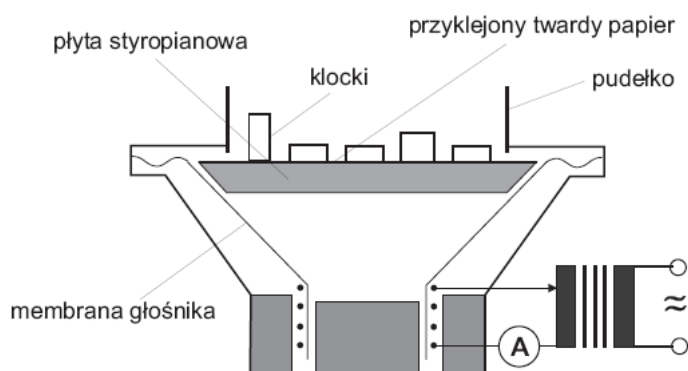
## Temat 4: Związek temperatury z mikroskopową budową materii

Celem zajęć jest demonstracja związku temperatury z energią wewnętrzną układu. Do tego celu służy prosty mechaniczny model gazu – tzw. gaz klockowy.

### **Eksperymenty:**

- 1) **gaz klockowy**
- 2) **zależność energii wewnętrznej od temperatury**
- 3) **energia wewnętrzna przy temperaturze zmierzającej do zera**

#### 1) *Model gazu – gaz klockowy*



Opisany model gazu bardziej dokładnie omówiony jest w artykule opublikowanym w *Postęпах Fizyki* tom 36 str. 161. Na rysunku przedstawione jest proste urządzenie do obserwacji mikroskopowego zachowania się obiektów termodynamicznych. Do zbudowania układu doświadczalnego konieczny jest głośnik o mocy przynajmniej kilkunastu watów oraz z dość dużą membraną. Z głośnika należy zdjąć osłonę tak, aby widoczna była membrana głośnika. Do tej membrany dopasować płytę styropianową tak, aby stykała się ona z membraną. Na wierzchnią warstwę styropianu nakleić twardy karton. Zamiast płyty styropianowej można wykorzystać odpowiednio grubego kartonu. Po włożeniu płyty styropianowej brzegi głośnika okleić twardym kartonem tak, aby tworzyły pudełko. Pobudzanie głośnika do drgań można zrealizować na wiele sposobów. Głośnik może być pobudzany do drgań prądem z transformatora, drgając wtedy z częstotliwością prądu sieci 50 Hz. Jako generatora drgań można także wykorzystać komputer z głośnikiem podłączonym na wyjście audio komputera. Najlepszą metodą pobudzania głośnika jest użycie wzmacniacza, do którego podłączony jest głośnik. W przypadku wykorzystania komputera lub wzmacniacza należy przygotować wcześniej nagranie drgań sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz. Można to wykonać korzystając z darmowych programów komputerowych (np. z programu AUDACITY). Jeżeli używamy wzmacniacza nagranie wykonujemy na płycie CD. Aby uzyskać ilościowe informacje o amplitudzie drgań można pomiędzy urządzenie generujące drgania a głośnik włączyć amperomierz. Na płycie styropianowej należy umieścić kilkadziesiąt klocków. Ilość klocków, które mogą być wprawione w drgania przez głośnik zależy od ich ciężaru i od mocy głośnika. Najlepiej, jeżeli klocki są prostopadłościanami uciętymi z jakiegoś pręta (drewnianego, plastikowego lub metalowego) o przekroju prostokątnym. Ten tzw. gaz klockowy jest modelem materii pozwalającym badać powiązanie mikroskopowych parametrów układu z parametrami makroskopowymi. Model gazu klockowego można wykorzystać także do obserwacji przejść fazowych. Wtedy najlepiej zamiast klocków można użyć plastikowych kuleczek. Można wtedy obserwować parowanie cieczy (kuleczki przy dużej amplitudzie drgań



wyskakują z pudełka) i tworzenie ciała stałego (kuleczki przy małej amplitudzie drgań tworzą coś w rodzaju struktury krystalicznej).

### 2) *Zależność energii wewnętrznej od temperatury*

Ustalamy amplitudę generowanego dźwięku. Na drgający styropian wrzucamy klocki. Oczekujemy około 2 minut i wyłączamy generator dźwięku. Liczymy ilość klocków znajdujących się w dostępnych stanach energetycznych. W przypadku prostopadłościanów są to trzy stany energetyczne rozróżniane przez ścianę, na której stoi prostopadłościan. Pomiar powtarzamy dla różnej amplitudy generowanego dźwięku.

### 3) *Energia wewnętrzna dla zerowej temperatury*

Powoli zmniejszamy amplitudę drgań w generatorze dźwięku. Dochodzimy w ten sposób do zerowej amplitudy. Sprawdzamy ilość klocków w różnych stanach energetycznych.

## Tematy do omówienia

- 1) We wprowadzeniu omówić mikroskopową budowę materii a w szczególności mikroskopowy model gazu doskonałego.
- 2) Znaleźć zależność energii potencjalnej klocka od położenia jego środka masy.
- 3) Wykonać pomiary liczby klocków w odpowiednich stanach energetycznych dla różnej amplitudy drgań. Obliczyć całkowitą energię klocków i wykonać wykres zależności tej energii całkowitej od amplitudy drgań. Otrzymujemy jakościową zależność: całkowita energia klocków (identyfikowana z energią wewnętrzną układu) rośnie ze wzrostem amplitudy drgań głośnika (utożsamianą z temperaturą).
- 4) Omówić ciśnienie, jako zmianę pędu cząsteczki uderzającej w ścianę. Mamy sześciąt o boku  $L$  i zawierający  $N$  cząstek gazu. Pęd przed uderzeniem w ścianę  $= mv$ , pęd po uderzeniu  $= -mv$ , więc zmiana pędu wynosi  $\Delta p = 2mv$ . Jeżeli odległość między ścianami naczynia wynosi  $L$  to czas w jakim cząstka powróci i ponownie uderzy w ścianę wynosi  $\Delta t = 2L/v$ . W tym czasie ścianie przekazywany jest pęd  $\Delta p$ , więc siła wywierana na ścianę wynosi  $F = \Delta p / \Delta t = mv^2/L$ . Dla  $N$  cząstek i pola powierzchni ściany  $L^2$  otrzymujemy ciśnienie  $p = Nm v^2 / L^3$ , i pamiętając iż objętość  $V = L^3$  dostajemy  $pV = Nm v^2$ . Do tej pory rozważania były jednowymiarowe. Uwzględniając, iż prędkość jest wektorem w 3 wymiarach i zakładając, że składowe prędkości w każdym kierunku są sobie równe (średnio) otrzymujemy, że kwadrat prędkości cząstki  $= 3$  razy kwadrat składowej prędkości. Co ostatecznie daje  $pV = Nm v^2 / 3$ . Z równania stanu gazu doskonałego mamy też  $pV = NkT$ , i pamiętamy iż energia kinetyczna cząstki (średnia) wynosi  $E_k = mv^2 / 2$ . Łącząc te wzory dostajemy  $E_k = 3/2 kT$ .
- 5) Osiąganie minimum energii wewnętrznej przy temperaturze zmierzającej do zera.

## Temat 5: Proces adiabaticzny

Celem zajęć jest pokazanie, iż w procesie adiabaticznym zachodzi zmiana temperatury układu. W szczególności przy adiabaticznym rozprężaniu gazu następuje spadek temperatury gazu. Proces ten wykorzystywany jest w rozprężarkach kriogenicznych, których zasadę działania można przy okazji zaprezentować.

### **Eksperymenty:**

- 1) powstawanie skroplonej pary wodnej nad otwieraną butelką lub puszką**
- 2) skraplanie pary wodnej**
- 3) adiabaticzne rozprężanie gazu**
- 4) izotermiczne rozprężanie gazu**

#### ***1) Otwieranie butelki z gazowanym napojem***

Wyjaśnić dlaczego nad otwieraną puszką lub butelką z napojem gazowanym powstaje mgiełka skroplonej pary wodnej. Eksperyment ten można także wykonać przy użyciu butli do wina. Do butli wrzucamy dwie zapalone zapalniczki. Ich dym służy jako ośrodki kondensacji pary wodnej. Butlę zatykamy szczelnie korkiem, w którym zamontowane są dwie rurki. Jedna z rurek jest zgięta a do drugą rurkę podłączamy do kranu i powoli nalewamy wodę do butli. W miarę jak w butli przybywa wody, ciśnienie gazu w butli rośnie. Zanim nadwyżka ciśnienia spowoduje wypchnięcie korka, puszcza zgiętą rurkę. Zachodzi adiabaticzne rozprężenie gazu, ochłodzenie gazu w butli i skroplenie pary wodnej, które obserwujemy poprzez mgiełkę tworzącą się w butli.

#### ***2) Skraplanie pary wodnej***

Do doświadczenia potrzebny jest słoik, gumowa rękawiczka i zapalniczki. Słoik powinien być tej wielkości, aby można było do niego swobodnie włożyć dłoń. Do słoika nalewamy niewielką ilość wody. Do słoika wkładamy gumową rękawiczkę palcami w dół. Koniec rękawiczki mocujemy szczelnie wokół brzegu słoika. Wkładamy rękę do rękawiczki i gwałtownie ją zaciskamy. W tej sytuacji nie obserwujemy żadnego efektu. Następnie przed przymocowaniem rękawiczki wrzucamy do słoika dwie palące się zapalniczki. Dym z płonących zapalniczek, który znajdzie się w słoiku będzie stanowił centra kondensacji pary wodnej. Ponownie montujemy rękawiczkę na słoiku i powtarzamy doświadczenie. Teraz obserwujemy powstawanie mgiełki w słoiku spowodowane skraplaniem się pary wodnej. Zaciskanie ręki można powtarzać wielokrotnie i przez kilka minut można obserwować skraplanie się pary wodnej.

#### ***3) Adiabaticzne rozprężanie gazu***

Butlę do robienia wina (o pojemności przynajmniej 10 litrów) owinąć aluminiową folią spożywczą. Do butli dopasować gumowy korek, w którym należy wykonać trzy otwory. Do otworów włożyć szklane lub metalowe rurki, które po włożeniu należy uszczelnić woskiem ze świecy. Do pierwszej rurki należy podłączyć pompkę rowerową elastyczną gumową lub plastikową rurkę. Do drugiej rurki należy podłączyć elastyczną plastikową rurkę, która będzie wykorzystywana do pomiaru ciśnienia. Swobodny koniec plastikowej rurki przymocować do pionowej deseczki, tak aby najniższy punkt rurki znajdował się 20 cm poniżej korka butli do wina. Do tak przygotowanej rurki nalać ciecz (zabarwiona woda, denaturat, itp.). Do trzeciej rurki w korku podłączyć krótki, elastyczny wężyk gumowy lub plastikowy. Zacisnąć wężyk i napompować powietrza do butli. Uważać aby nie wytworzyć zbyt dużej różnicy ciśnień, ponieważ może doprowadzić to do wylania cieczy znajdującej się w rurce. Zgiąć lub zacisnąć rurkę połączoną do pompki. W czasie sprężania gaz w butli uległ ogrzaniu. Należy więc teraz poczekać aż gaz w butli osiągnie temperaturę otoczenia (poczekać aż przestanie zmieniać się poziom cieczy w rurkach). Szybko otworzyć i

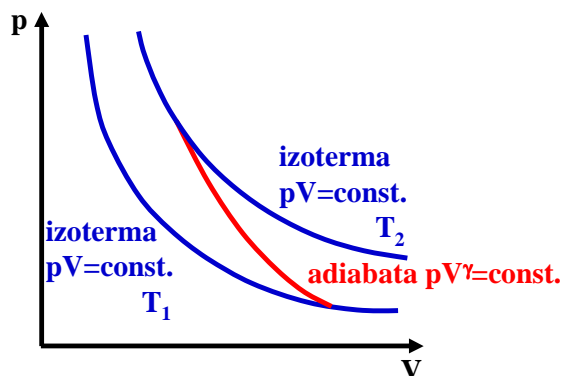
zamknąć wężyk powodując rozprężanie gazu w butli. Należy to zrobić odpowiednio szybko, aby proces był adiabatyczny, oraz dostatecznie wolno, aby gaz w butli osiągnął ciśnienie zbliżone do atmosferycznego. Gaz w butli w wyniku procesu adiabatycznego ulega ochłodzeniu i ma ciśnienie atmosferyczne (poziom cieczy w rurkach jest taki sam). Gaz w butli ogrzewa się i poziom cieczy w rurkach zmienia się. Gdy gaz w butli osiągnie temperaturę otoczenia poziom cieczy w rurkach przestaje się zmieniać. Odczytujemy wtedy różnicę poziomu cieczy w rurkach i obliczamy ciśnienia gazu w butli. Korzystając z równania gazu doskonałego można obliczyć temperaturę gazu w butli zaraz po adiabatycznym rozprężeniu.

#### 4) *Izotermiczne rozprężanie gazu*

Doświadczenie wykonujemy analogicznie jak opisane w poprzednim punkcie. W przypadku rozprężania izotermicznego wężyk do rozprężania gazu otwieramy bardzo powoli. Po wyrównaniu ciśnienia w butli z ciśnieniem atmosferycznym zaciskamy wężyk. Obserwujemy iż w tym przypadku ciśnienie gazu w butli nie wzrasta. Oznacza to iż gaz w butli ma przez cały czas temperaturę równą temperaturze otoczenia, czyli przy powolnym rozprężaniu zachodzi proces izotermiczny.

#### Tematy do omówienia

- 1) Proces jest adiabatyczny, jeżeli nie ma wymiany ciepła z otoczeniem. Można to osiągnąć, jeżeli jest izolacja cieplna lub proces jest przeprowadzony szybko (czas przebiegu procesu jest dużo mniejszy od czasu relaksacji).
- 2) Otwieranie butelki lub puszki gazowanego napoju.
- 3) Różnica pomiędzy adiabatą i izotermą. Przy adiabatycznym rozprężaniu gazu następuje jego ochłodzenie.



- 4) Wykorzystanie rozprężania adiabatycznego w kriogenice. Omówienie działania rozprężarek tłokowych i turbinowych oraz rury pulsacyjnej można znaleźć na stronach internetowych

[http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~kriogen/Wyklady/pods\\_krio/Wyklad3.pdf](http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~kriogen/Wyklady/pods_krio/Wyklad3.pdf)

[http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~kriogen/Wyklady/pods\\_krio/Wyklad11.pdf](http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~kriogen/Wyklady/pods_krio/Wyklad11.pdf)

[http://ranier.hq.nasa.gov/sensors\\_page/Cryo/CryoPT/CryoPTHist.html](http://ranier.hq.nasa.gov/sensors_page/Cryo/CryoPT/CryoPTHist.html)

## Temat 6: Chłodzenie poprzez parowanie

Celem zajęć jest pokazanie, iż w przejściach fazowych wydzielane lub pobierane jest ciepło. W szczególności w procesie topnienia lodu temperatura mieszaniny wody z lodem nie ulega zmianie. Podobnie w procesie parowania temperatura mieszaniny pary i cieczy nie ulega zmianie. Ponieważ parująca ciecz pobiera ciepło z otoczenia, efekt ten może być wykorzystany do osiągnięcia niskich temperatur. Chłodzenie przez parowanie wykorzystywane jest w chłodziarkach kompresorowych. Wyjaśniona jest zasada działania lodówki oraz wykorzystywanych w kriogenice chłodziarek używających helu.

### **Ekspertymenty:**

- 1) **zmiana temperatury mieszaniny wody i lodu przy dostarczaniu ciepła**
- 2) **demonstracja zabawki „pijący ptak”**
- 3) **chłodzenie ręki wilgotnym materiałem**
- 4) **chłodzenie poprzez odparowanie cieczy z namoczonego materiału**
- 5) **pomiar ciepła topnienia lodu – eksperyment wykonywany na uczelni**

#### ***1) Zmiana temperatury mieszaniny wody i lodu w czasie podgrzewania***

Mieszaninę wody z lodem umieścić w naczyniu wraz z zamocowanym termometrem. Naczynie ogrzewać i odczytywać temperaturę co jedną minutę. Podgrzewanie powinno być bardzo wolne, wodę należy przez cały czas mieszać, aby osiągnąć równomierny rozkład temperatury. Zaobserwować, iż temperatura mieszaniny nie ulega zmianie. Dopiero w momencie, kiedy cały lód ulega stopieniu temperatura wody zaczyna rosnąć.

#### ***2) Zabawka „pijący ptak”***

Zakupić zabawkę „pijący ptak”. Aby znaleźć sklepy internetowe oferujące zabawkę należy wyszukiwać wpisać „drinking bird”. Cena „pijącego ptaka” wynosi około 5 dolarów.

#### ***3) Chłodzenie ręki wilgotnym materiałem***

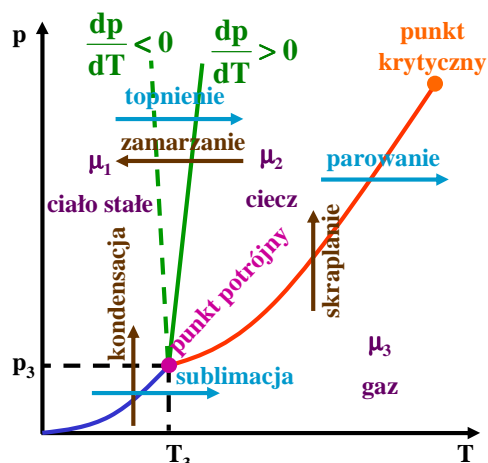
Zmoczyć materiał alkoholem (lepiej eterem). Owinąć go na ręce ucznia i zapytać co obserwuje.

#### ***4) Chłodzenie poprzez odparowanie cieczy z namoczonego materiału***

Dwie niewielkie butelki zatykamy szczelnie korkami, w których zamocowany jest szczelnie termometr (np. poprzez oblanie woskiem) Jedną z butelek owijamy mokrym materiałem. Można go nasączyć wodą, denaturatem, eterem itp. Co dwie minuty mierzymy 5-7 razy temperaturę w obydwóch butelkach. Doświadczenie można powtórzyć używając do nasączania materiału różnych cieczy.

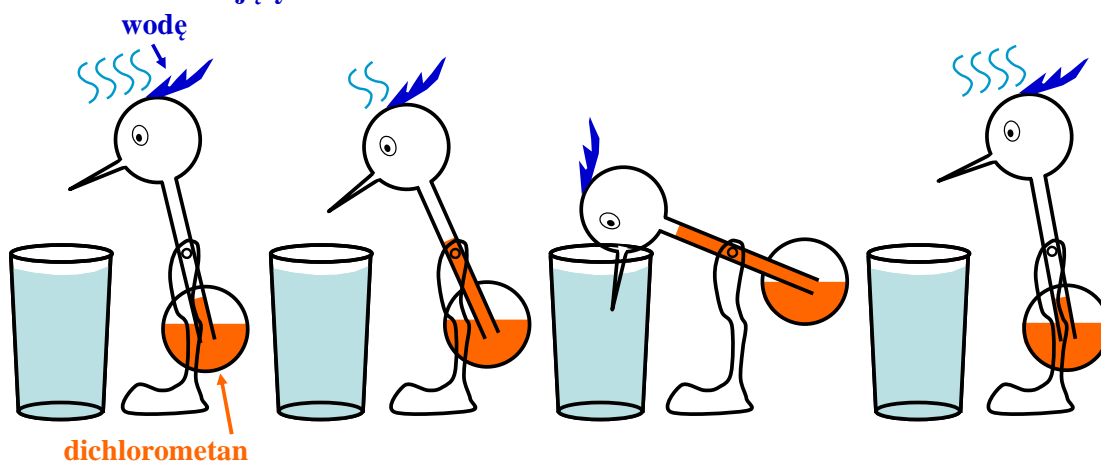
### **Tematy do omówienia**

- 1) Równowaga faz i przemiany fazowe. Utajone ciepło przemiany. Przedyskutować dlaczego w czasie podgrzewania mieszaniny wody i lodu temperatura wody nie ulega zmianie. Omówić wyznaczanie ciepła topnienia lodu przy użyciu kalorymetru. Eksperyment ten będzie przeprowadzony na pracowni na uczelni.



2) Wyjaśnienie jak działa „pijący ptak”.

**materiał absorbujący**



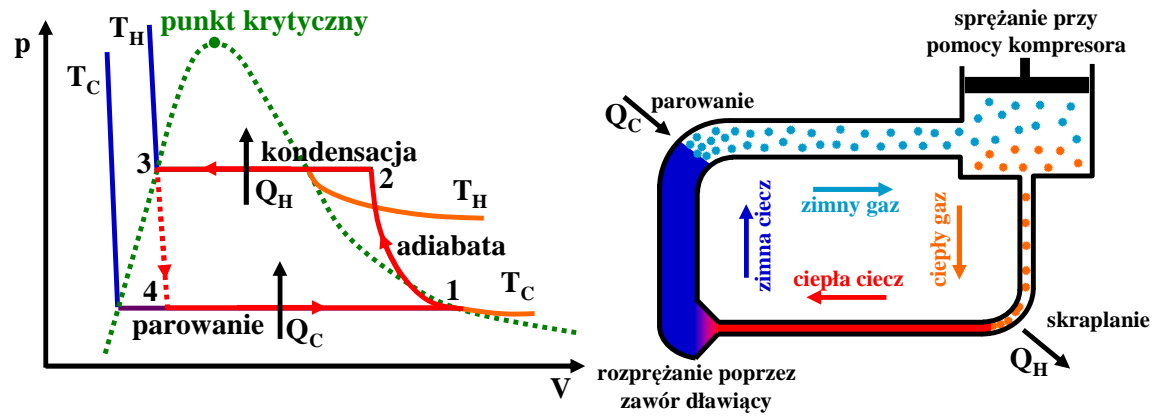
cała ciecz znajduje się w dolnej bańce  
środek ciężkości nisko  
woda paruje z głowy  
obniżając jej temperaturę  
pary cieczy skraplają się

spada ciśnienie w głowie  
wyższe ciśnienie w bańce  
wypycha ciecz do góry  
rośnie poziom cieczy  
w rurce i podnosi się środek ciężkości  
ptak nachyla się

dziób zanurza się w wodzie  
materiał na głowie  
nawilża się wodą ze szklanki  
ptak jest tak nachylony,  
że ciecz przestaje  
dopływać do rurki  
i zaczyna opadać do  
dolnej bańki

ciśnienie w głowie  
i w bańce wyrównuje się  
środek ciężkości obniża się  
cała ciecz przepływa do  
dolnej bańki, ptak prostuje się  
cały proces powtarza się

- 3) Układ w którym następuje odparowanie cieczy ochładza się. W czasie parowania z układu pobierane jest ciepło, które wykorzystywane jest na zmianę stanu skupienia cieczy. Omówić wyniki wykonanych eksperymentów z chłodzeniem przez parowanie.
- 4) Opis działania chłodziarki kompresorowej. W szczególności opis działania lodówki oraz chłodziarek kompresorowych wykorzystujących hel. Minimalne temperatury uzyskiwane są przy odparowaniu  $^3\text{He}$  – 0.3 K, oraz przy odparowaniu  $^4\text{He}$  – 1.3 K.



- 1 → 2 – adiabatyczne sprężanie gazu
- 2 → 3 – skraplanie gazu przy stałym ciśnieniu
- 3 → 4 – rozprężanie cieczy przez zawór dławiący (stała entalpia)
- 4 → 1 – parowanie cieczy przy stałym ciśnieniu

5) Pomiar ciepła topnienia lodu – eksperyment wykonywany na uczelni

## Temat 7: Temperatura zamarzania roztworu

Celem zajęć jest pokazanie, iż temperatura zamarzania roztworu jest niższa niż temperatura zamarzania czystego rozpuszczalnika. Efekt ten wykorzystywany jest do rozpuszczania lodu na drogach, a dawno temu był wykorzystywany np. do robienia lodów.

### **Eksperymenty:**

- 1) zmiana temperatury roztworu soli w wodzie w zależności od stężenia roztworu**
- 2) zmiana temperatury wrzenia roztworu w zależności od stężenia roztworu**
- 3) robienie lodów bez lodówki**

#### **1) *Zmiana temperatury roztworu soli w wodzie w zależności od stężenia roztworu***

Do zapinanej torebki plastikowej wkładamy odważony wcześniej lód. Wkładamy również termometr. Wstrząsamy około 5 minut i odczytujemy temperaturę. Do torebki dosypujemy odważoną ilość soli. Znowu wstrząsamy 5 minut i odczytujemy temperaturę. Doświadczenie powtarzamy dosypując coraz więcej soli. Otrzymujemy ostatecznie zależność temperatury roztworu od stężenia soli.

#### **2) *Zmiana temperatury wrzenia roztworu w zależności od stężenia roztworu***

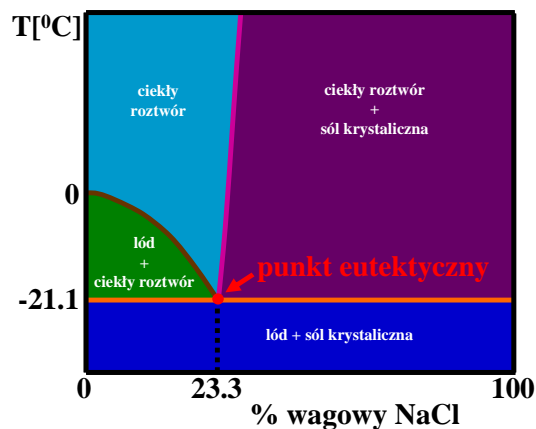
Do wykonania doświadczenia potrzebne są dwie identyczne zlewki lub niewielkie garnuszki. Do jednej zlewki wlewamy wodę, do drugiej zlewki wlewamy taką samą ilość stężonego roztworu soli. Przykryte zlewki stawiamy na maszynie do gotowania i podgrzewamy aż do wrzenia. Obserwujemy iż najpierw zaczyna wrzeć czysta woda, a dopiero później zaczyna wrzeć roztwór. W momencie kiedy ciecze zaczną wrzeć mierzymy ich temperaturę.

#### **3) *Robienie lodów bez lodówki***

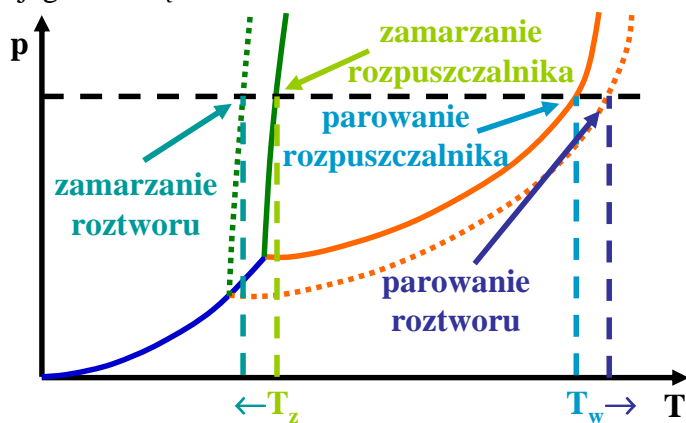
Do wykonania doświadczenia potrzebne są duże i małe zapinane torebki plastikowe. Do dużej torebki wsadzamy lód, do małej wlewamy mleko, cukier i cukier waniliowy. Z małej torebki wyciskamy powietrze przed zamknięciem. Wsadzamy małą torebkę do dużej wstrząsamy. Wyjmujemy małą torebkę i nie mamy lodów. Teraz dodatkowo do dużej torebki wsypujemy sól. Wsadzamy do niej małą torebkę i po usunięciu powietrza zamykamy i wstrząsamy przez 5 minut. Wyjmujemy małą torebkę z lodami waniliowymi. Tak przygotowane lody można bezpiecznie zjeść.

### **Tematy do omówienia**

- 1) Zależność temperatury zamarzania roztworu od jego stężenia. Można omówić przedstawiony wykres. W pierwszym doświadczeniu wyznaczona jest jakościowo krzywa brązowa przedstawiona na rysunku. Jest to krzywa równowagi ciekłego roztworu oraz mieszaniny lodu i ciekłego roztworu. Należy zwrócić uwagę, iż dla temperatur i stężeń takich jak w eksperymencie najpierw zamarza woda. Przedyskutować iż pokazana metoda pozwala uzyskiwać tylko ograniczone niskie temperatury. W przypadku roztworu soli w wodzie jest to  $-21.1^{\circ}\text{C}$ , którą to temperaturę uzyskuje się dla stężenia 23.3% wagowego soli (jest to tzw. punkt eutektyczny).



- 2) Przesunięcie krzywych równowagi dla roztworów. Dwa pierwsze doświadczenia pozwalają na stwierdzenie, iż temperatura zamarzania roztworu maleje, a temperatura wrzenia rośnie. Jeżeli wcześniej udało się omówić wykres fazowy to teraz można przedyskutować jego zmianę dla roztworów.





## Temat 8: Skraplanie gazu

Celem zajęć jest demonstracja zachowania się układu złożonego z oddziałujących składników. Badana jest także ściśliwość gazów i cieczy. Na tej podstawie przedstawione jest zachowanie gazu rzeczywistego (gaz van der Waalsa) i omówione jest jego zachowanie się w różnych warunkach. Wiadomości te wykorzystane są do omówienia skraplania gazu w procesie Joule'a-Thomsona, skraplania powietrza wykonanego po raz pierwszy przez Wróblewskiego i Olszewskiego oraz proces Lindego stosowany na skalę przemysłową do skraplania gazu.

### **Eksperymenty:**

- 1) **pływające plasterki parówek**
- 2) **ściśliwość gazu i cieczy**
- 3) **współistnienie gazu i cieczy**

#### ***1) Plasterki parówek jako model gazu van der Waalsa***

Klika parówek o małej średnicy kroimy w plasterki o grubości około 0.5 cm. W garnku o dużej średnicy gotujemy wodę. Niewielką ilość plasterków wrzucamy do garnka. Po ogrzaniu plasterki parówek będą pływały na powierzchni. Wzburzamy wodę (nie poprzez proste zamieszanie) tak, aby plasterki wykonywały ruchy losowe. Obserwujemy, iż plasterki poruszają się niezależnie, ewentualnie rzadko zderzając się ze sobą. Nawet gdy woda nie jest silnie wzburzona plasterki poruszają się prawie niezależnie od siebie. Otrzymaliśmy symulację gazu doskonałego, ponieważ małe plasterki przy ich niewielkiej ilości możemy traktować jako punktowe. Dodajemy większą ilość plasterków i powtarzamy obserwację. W przypadku wzburzonej wody widzimy, iż plasterki poruszają się jak w poprzednim przypadku. Jeżeli woda nie jest wzburzona plasterki zaczynają się samorzutnie łączyć ze sobą. Otrzymaliśmy model gazu van der Waalsa i jednocześnie model skraplania takiego gazu. Po wykonaniu demonstracji gotowane parówki można najprawdopodobniej zjeść.

#### ***2) Ściśliwość gazu i cieczy***

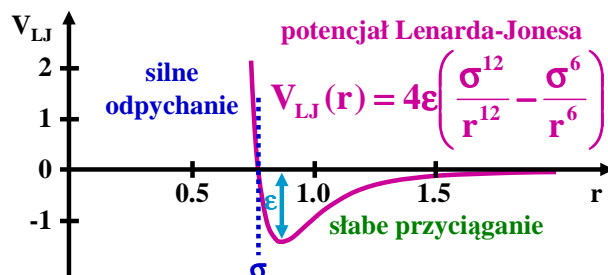
Tłok strzykawki przyklejamy na środku drewnianej lub plastikowej płytki. Do strzykawki wciągamy powietrze. Zatykamy wylot strzykawki i mocujemy ją tak aby płytka dołączona do tłoka znajdowała się na górze. Na płytkę kładziemy obciążenie i demonstrujemy, iż przy pomocy niewielkiej siły (czyli małego ciśnienia) potrafimy łatwo sprężyć gaz (czyli zmniejszyć objętość). Następnie do strzykawki wciągamy wodę, naciskając tłok wypompowujemy ze strzykawki powietrze. Zatykamy wylot strzykawki i demonstrujemy, iż przy zastosowaniu takiej samej siły jak poprzednio nie możemy ścisnąć cieczy (czyli następują bardzo małe zmiany objętości). Można zwiększyć obciążenie płytki (czyli powiększać ciśnienie) ciągle obserwując niewielkie zmiany objętości.

#### ***3) Współistnienie gazu i cieczy***

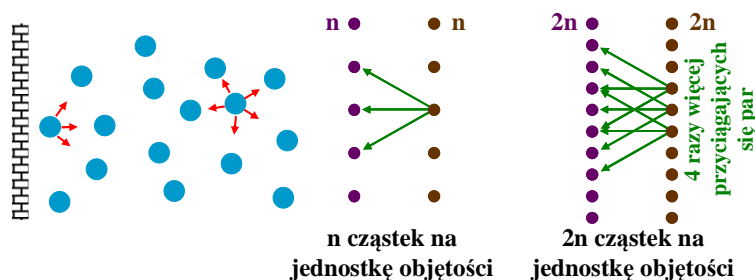
Gotujemy wodę w garnku pod szczelnym przykryciem. Po zagotowaniu wody podnosimy szybko pokrywkę. Obserwujemy, iż para wodna zgromadzona w garnku ulega skropleniu po zetknięciu z zimniejszym powietrzem.

### **Tematy do omówienia**

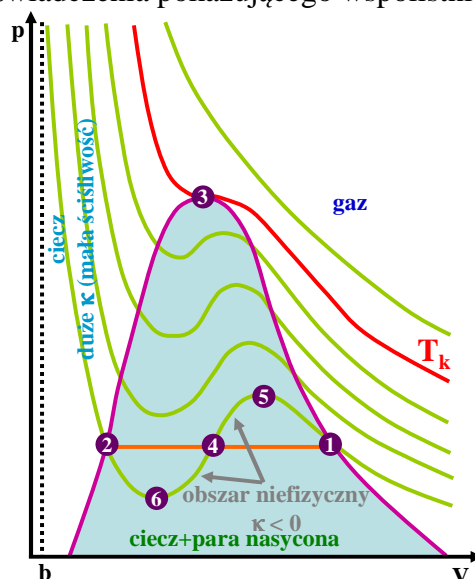
- 1) Oddziaływanie cząstek gazu rzeczywistego – potencjał Lenarda-Jonesa. Oddziaływanie omówić na przykładzie plasterków parówek. W przypadku parówek odpychanie związane jest ze skończonym rozmiarem plasterków i niemożnością przenikania się. Przyciąganie w przypadku plasterków związane jest z siłami przylegania.



- 2) Dzięki części długozasięgowej oddziaływania (przyciąganie na dużych odległościach) ciśnienie wywierane na ścianki naczynia jest mniejsze. Liczba par przyciągających się cząstek rośnie jak kwadrat liczby cząstek na jednostkę objętości, czyli jak  $N^2/V^2$ , więc działa ciśnienie zewnętrzne większe o  $aN^2/V^2$ .



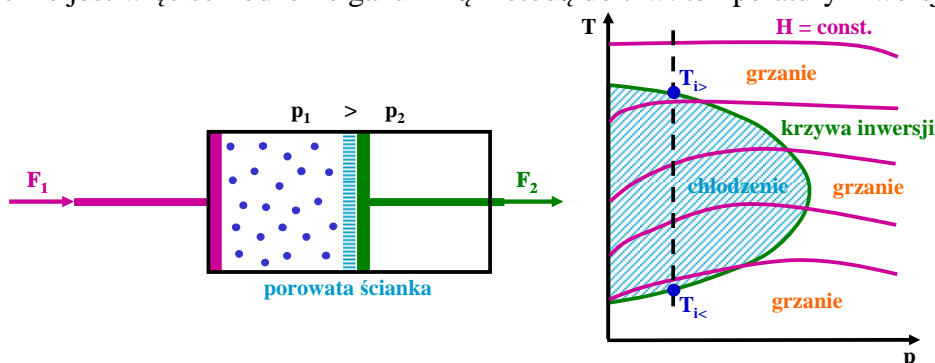
- 3) Dzięki krótkozasięgowej części oddziaływania (odpychanie na małych odległościach) objętość dostępna dla cząstek jest mniejsza. Cząsteczki nie mogą zbliżyć się na odległości mniejsze od  $\sigma$ . Objętość swobodna dostępna dla ruchu cząstek maleje i wynosi  $V - Nb$  (gdzie  $N$  – liczba cząstek,  $b$  – parametr zależny od  $\sigma$ ).
- 4) Ostatecznie otrzymujemy równanie stanu van der Waalsa  $\left( p + \frac{N^2}{V^2} a \right) (V - Nb) = NkT$
- 5) Izotermy gazu van der Waalsa w porównaniu z izotermami gazu doskonałego. Izotermy gazu doskonałego otrzymaliśmy już przy omawianiu tematu 2. Na podstawie badania ściśliwości gazu możemy narysować prawą część izotermy gazu van der Waalsa, a ze ściśliwości cieczy potrafimy narysować jej lewą część. Łączymy te dwie części linią prostą korzystając z doświadczenia pokazującego współistnienie gazu i cieczy.



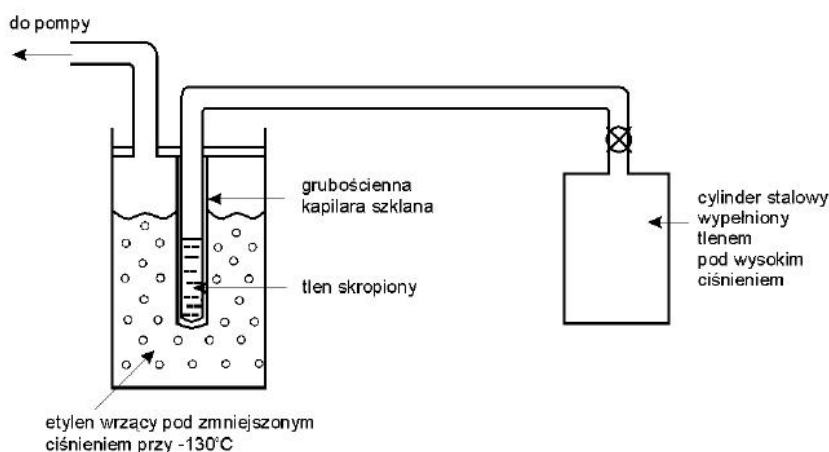
- 6) Omówić skraplanie gazu van der Waalsa korzystając z wykresu izoterm.
- 7) Proces Joule'a czyli rozprężanie swobodne przeprowadzany jest przy izolujących ścianach (brak wymiany ciepła) i bez wykonywania pracy (ponieważ wypływ jest swobodny). Nie zmienia się więc energia wewnętrzna gazu. Ponieważ dla gazu

doskonałego energia zależy tylko od temperatury gazu, to dla gazu doskonałego przy swobodnym wypływie nie ma zmiany temperatury. Dla gazów rzeczywistych następuje zawsze ich ochłodzenie. Związane jest to z istnieniem długozasięgowych oddziaływań przyciągających (np. typu Lenarda-Jonesa). Jeżeli gaz się rozpręży to odległości między cząstkami rosną, więc rośnie także energia wewnętrzna (staje się mniej ujemna) związana ze zmianą objętości. Aby nie nastąpiła zmiana energii wewnętrznej to musi zmaleć jej część od temperatury, czyli musi zmaleć temperatura.

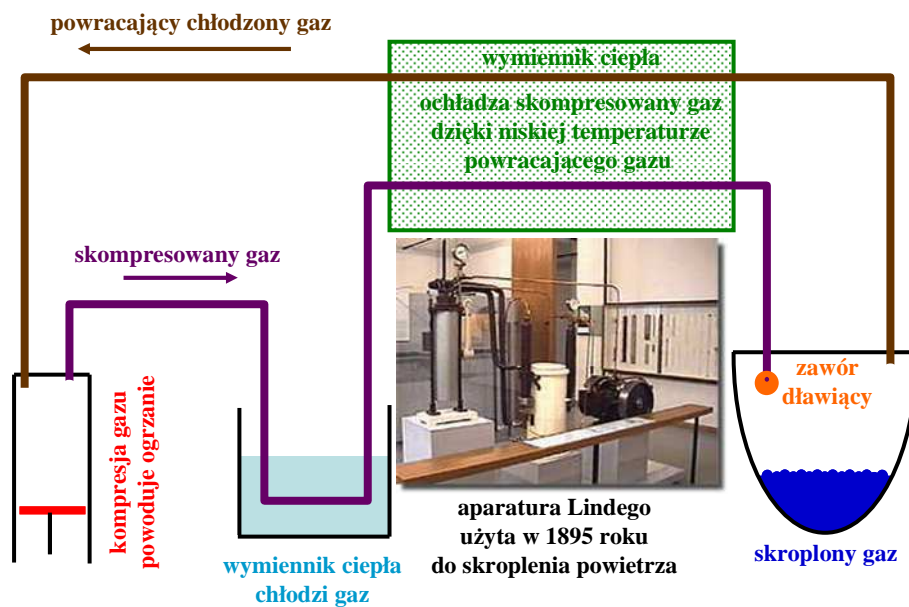
- 8) Proces Joule'a-Thomsona to ciągły przepływ gazu wymuszony przez ruch tłoków utrzymujących stałe ciśnienie  $p_1 > p_2$ , ścianki układu izolują go termicznie, w czasie procesu wykonywana jest praca, proces ten przebiega przy stałej entalpii. Gaz doskonały nie zmienia temperatury w tym procesie, gaz rzeczywisty może temperaturę zwiększać lub zmniejszać. Aby doprowadzić do zmniejszania temperatury w tym procesie konieczne jest więc schłodzenie gazu inną metodą do tzw. temperatury inwersji.



- 9) Skroplenie gazów przez Wróblewskiego i Olszewskiego. W 1882 roku francuski fizyk L. P. Cailletet osiągnął temperaturę  $-105^\circ\text{C}$  w kapilarze otoczonej wrzącym etylenem. Wróblewski i Olszewski przebudowali aparaturę Cailleteta. Znacznie obniżyli ciśnienie nad parującym etylenem (do  $1/30$  atm), co pozwoliło na uzyskanie temperatury  $-160^\circ\text{C}$ , a więc niższej od temperatury krytycznej tlenu (ok.  $-119^\circ\text{C}$ ). Więcej prostych informacji jest na <http://www.if.uj.edu.pl/Foton/83/pdf/anegdoty.pdf>



- 10) Cykl Lindego – skraplanie gazów na skalę przemysłową



## Temat 9: Przekaz ciepła

Celem zajęć jest omówienie przekazu ciepła w gazach poprzez konwekcję oraz przekaz ciepła poprzez promieniowanie. Demonstrowane jest przewodnictwo cieplne gazów w zależności od ich ciśnienia. Dodatkowo demonstrowane jest działanie osłon cieplnych w postaci folii aluminiowej. Eksperymenty umożliwiają omówienie budowy i zasady działania termosu oraz naczynia Dewara używanego do przechowywania skroplonych gazów.

### **Eksperymenty:**

- 1) **konwekcja w gazie**
- 2) **przekaz energii poprzez promieniowanie – radiometr**
- 3) **szybkość zmian temperatury przy kontakcie z powietrzem**
- 4) **szybkość zmian temperatury przy zastosowaniu osłony z folii aluminiowej**
- 5) **szybkość zmian temperatury przy kontakcie z powietrzem o niskim ciśnieniu**
- 6) **wykonanie naczynia Dewara i pomiar szybkości zmian temperatury**

#### **1) Konwekcja w gazie**

Serwetkę z bibuły rozdzielić na pojedyncze warstwy. Zwinąć z bibuły dwa ruloniki o średnicy około 4 cm. Papierową taśmą klejącą połączyć ze sobą ruloniki tak aby tworzyły wysoki komin. Postawić komin na szklanej lub metalowej płytce. Podpalić górę komina tak aby równo paliła się cała jego góra. Po spaleniu się całego komina pozostaje duży kawałek popiołu, który dzięki konwekcji ciepłego powietrza unoszony jest wysoko do góry.

#### **2) Przekaz energii poprzez promieniowanie – budowa radiometru**

Z białego kartonu wyciąć cztery prostokąty o bokach 0.5 i 1 cm. Jedną z powierzchni każdego prostokąta pomalować czarnym pisakiem. Do drugiej powierzchni każdego prostokąta nakleić folię aluminiową. Do jednego z końców zapalki przykleić przygotowane prostokąty, tak aby czarne powierzchnie znajdowały się po przeciwnych stronach. Przygotowana część powinna tworzyć koło łopatkowe. Do drugiego końca zapalki przykleić kilkucentymetrową nitkę. Drugi koniec nitki przykleić taśmą na środku patyczka. Kładąc patyczek na wierzchu słoika zawiesić w nim przygotowaną część. Dobrać wielkość słoika, długość patyczka i nitki tak aby całe urządzenie swobodnie zwisało w słoiku. Postawić przygotowany radiometr w nasłonecznionym miejscu. Po pewnym czasie powinien zacząć się obracać.

#### **3) Szybkość zmian temperatury przy kontakcie z powietrzem**

Przygotować dwa słoiki o zbliżonej średnicy takiej aby jeden słoik mieścił się w drugim. Na dnie większego słoika położyć drewniany klocek lub kawałek styropianu. Grubość klocka dobrać tak aby po włożeniu mniejszego słoika do większego brzegi słoików znalazły się na tym samym poziomie. Uszczelnić szparę pomiędzy brzegami słoika przy pomocy wosku ze świecy. Do małego słoika nalać gorącej wody. Zmierzyć zmianę temperatury wody w funkcji czasu.

#### **4) Szybkość zmian temperatury przy zastosowaniu osłony z folii aluminiowej**

Przygotować analogiczne urządzenie jak w trzecim doświadczeniu. Owinąć mały słoik aluminiową folią przed włożeniem go do dużego słoika. Zmierzyć zmianę temperatury wody w funkcji czasu.

#### **5) Szybkość zmian temperatury przy kontakcie z powietrzem o niskim ciśnieniu**

Przygotować analogiczne urządzenie jak w trzecim doświadczeniu. Przed uszczelnieniem szpary pomiędzy słoikami włożyć w nią gumową rurkę. Po uszczelnieniu szpary wypompować powietrze pomiędzy słoików. Po wypompowaniu powietrza zagiąć gumową rurkę aby odciąć pompkę od objętości pomiędzy słoikami. Można także cały czas



pompować tą objętość jeżeli jest to konieczne. Zmierzyć zmianę temperatury wody w funkcji czasu.

**6) Wykonanie naczynia Dewara i pomiar szybkości zmian temperatury**

Przygotować analogiczne urządzenie jak w trzecim doświadczeniu. Przed włożeniem małego słoika owinać go folią aluminiową. Przed uszczelnieniem szpary pomiędzy słoikami włożyć w nią gumową rurkę. Po uszczelnieniu szpary wypompować powietrze spomiędzy słoików. Po wypompowaniu powietrza zagiąć gumową rurkę aby odciąć pompkę od objętości pomiędzy słoikami. Można także cały czas pompować tą objętość jeżeli jest to konieczne. Zmierzyć zmianę temperatury wody w funkcji czasu

**Tematy do omówienia**

- 1) Przekaz ciepła poprzez konwekcję w gazach i własności izolacyjne próżni.
- 2) Przekaz ciepła poprzez promieniowanie. Pochłanianie i odbijanie promieniowania przez różne powierzchnie.
- 3) Zasada działania termosu i naczynia Dewara.

## **Temat 10: Efekt magnetokaloryczny – adiabatyczne rozmagnesowanie**

Celem zajęć jest powiązanie zjawisk magnetycznych z efektami termodynamicznymi. Demonstrowane jest zachowanie się różnych materiałów w polu magnetycznym. Dyskutowana jest mikroskopowa budowa tych materiałów. Na tej podstawie przedstawiony jest efekt magnetokaloryczny oraz możliwości uzyskiwania bardzo niskich temperatur.

### **Eksperymenty:**

- 1) ferromagnetyk w polu magnetycznym**
- 2) paramagnetyk w polu magnetycznym**
- 3) diamagnetyk w polu magnetycznym**
- 4) gorący ferromagnetyk w polu magnetycznym**

#### ***1) Ferromagnetyk w polu magnetycznym***

Nitkę o długości 1-2 metrów zamocować odpowiednio wysoko tak aby mogła utworzyć wahadło. Do swobodnego końca nitki przywiązać mały kawałek żelaza. Do żelaza zbliżyć magnes i pokazać iż niezależnie od tego z której strony go zbliżamy to jest zawsze przyciągane przez magnes. W tym doświadczeniu można użyć słabego magnesu. W kolejnych dwóch doświadczeniach konieczne jest użycie silnego magnesu. Dlatego w tym doświadczeniu najlepiej użyć tego samego magnesu, który będzie używany w pozostałych eksperymentach. Pozwoli to na porównanie efektów dla różnych materiałów.

#### ***2) Paramagnetyk w polu magnetycznym***

Do swobodnego końca nitki wcześniej skonstruowanego wahadła przywiązać mały kawałek aluminium. Do aluminium zbliżyć magnes neodymowy lub elektromagnes i pokazać iż niezależnie od tego z której strony go zbliżamy to jest zawsze przyciągane przez magnes. Porównać z przyciąganiem żelaza przez magnes. W przypadku aluminium efekt jest o wiele słabszy niż dla żelaza. W tym doświadczeniu konieczne jest zastosowanie silnego magnesu.

#### ***3) Diamagnetyk w polu magnetycznym***

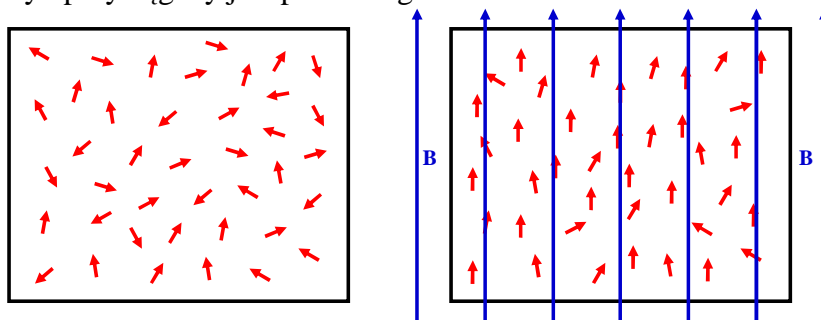
Do swobodnego końca nitki wcześniej skonstruowanego wahadła przymocować kulkę winogrona. Winogrono zawiera bardzo dużo wody, która jest diamagnetykiem. Do winogrona zbliżyć magnes neodymowy lub elektromagnes i pokazać iż niezależnie od tego z której strony go zbliżamy to jest zawsze odpychane przez magnes. W przypadku winogrona efekt jest bardzo słaby. W tym doświadczeniu konieczne jest zastosowanie silnego magnesu.

#### ***4) Gorący ferromagnetyk w polu magnetycznym***

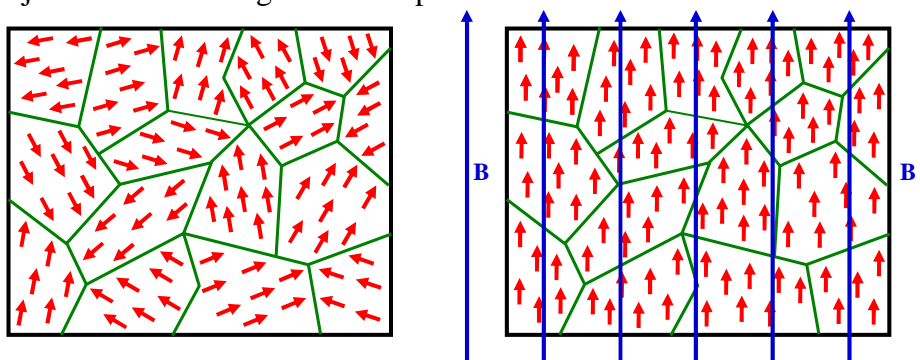
Do nitki o długości 10-20 cm przymocować mały magnes. Nitkę przywiązać do statywu tak aby magnes utworzył wahadło. Przygotować dwa statywy wykonane z izolatora (najłatwiej drewniane patyki umocowane do deseczki). Pomiędzy tymi statywami rozpiąć żelazny drucik trochę powyżej poziomu na którym znajduje się magnes wahadła. Zbliżyć wahadło z magnesu do drucika tak aby magnes został przyciągnięty przez drucik. Przy pomocy metalowych spinaczy podłączyć do drucika baterię 6 V. Spinacze powinny znaleźć się po przeciwnych stronach magnesu dotykającego drucik. Prąd przepływający przez drucik ogrzewa go. Po kilkunastu minutach drucik zaczyna się żarzyć i magnes odpada od drucika. Po odłączeniu baterii od drucika ulega on ostygnięciu i magnes znowu samodzielnie jest przyciągany przez drucik. Demonstracja ta służy pokazaniu punktu Curie, czyli temperatury w której ferromagnetyk przechodzi w paramagnetyk.

## Tematy do omówienia

- 1) W diamagnetykach przy braku zewnętrznego pola magnetycznego cząsteczki nie mają momentu magnetycznego. Zewnętrzne pole magnetyczne powoduje małe zaburzenie orbitali elektronów na skutek tego pojawia się słaba magnetyzacja materiału skierowana w kierunku przeciwnym do pola magnetycznego. Powoduje to iż diamagnetyk odpychany jest przez magnes.
- 2) W paramagnetykach cząsteczki mają własne momenty magnetyczne, które przy braku zewnętrznego pola magnetycznego skierowane są przypadkowo. W zewnętrznym polu magnetycznym momenty magnetyczne cząstek starają się ustawić równoległe do linii pola magnetycznego. Ruchy termiczne powodują, iż nie wszystkie momenty magnetyczne są równoległe do linii pola magnetycznego. Magnetyzacja materiału paramagnetycznego jest zgodna z kierunkiem pola magnetycznego, dlatego paramagnetyk przyciągany jest przez magnes.

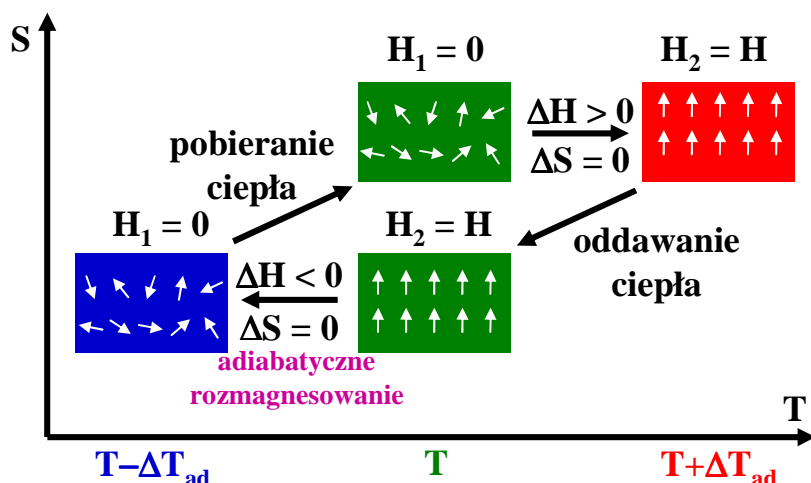


- 3) W ferromagnetyku istnieją domeny magnetyczne, czyli makroskopowe obszary, w których istnieje silny moment magnetyczny. Momenty magnetyczne sąsiadnych atomów są silnie sprzężone dzięki temu wewnątrz jednej domeny są one skierowane tak samo. Domeny mają duże momenty magnetyczne i w zewnętrznym polu magnetycznym momenty magnetyczne domen są skierowane tak samo. Energia domen w polu magnetycznym jest bardzo duża w porównaniu z energią termiczną. Magnetyzacja ferromagnetyka jest zgodna z kierunkiem pola magnetycznego. Dla ferromagnetyków istnieje pewna charakterystyczna temperatura (temperatura krytyczna), poniżej której następuje całkowite namagnesowanie próbki.



- 4) Chłodzenie przez adiabatyczne rozmagnesowanie paramagnetyka. Wykorzystując sole paramagnetyczne można impulsowo otrzymywać temperatury do 1 mili Kelwin. Chłodziarki wykorzystujące sole paramagnetyczne używane są w zakresach temperatur 1-20K. Poniżej na diagramie entropia-temperatura przedstawiony jest schemat chłodzenia przez adiabatyczne rozmagnesowanie. Więcej informacji jest na [http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~kriogen/Wyklady/pods\\_krio/Wyklad6.pdf](http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~kriogen/Wyklady/pods_krio/Wyklad6.pdf)





- 5) Gigantyczny efekt magnetokaloryczny. W 1997 roku odkryto, że dla pewnych substancji otrzymuje się bardzo silny efekt zmiany temperatury przy zmianie pola magnetycznego. Efekt ten występuje dla temperatur zbliżonych do pokojowych. Można więc budować nawet lodówki magnetyczne wykorzystujące ten efekt. Przykładem takiego urządzenia jest chłodziarka zbudowana przez Toshibę w 2004 roku.
- 6) Chłodzenie przez adiabaticzne rozmagnesowanie spinów jąder. Realizacja tego procesu i cykl przemian jest taki sam jak dla paramagnetyków. O ile w paramagnetyku wykorzystuje się momenty magnetyczne cząsteczek (pochodzące od elektronów znajdujących się na powłokach atomowych) to tutaj wykorzystuje się momenty magnetyczne jąder atomowych. Wartości jądrowych momentów magnetycznych są 1000 razy mniejsze niż wartości momentów magnetycznych atomów. Dzięki temu mniej chętnie ustawiają się zgodnie z kierunkiem pola magnetycznego. Pozwala to na uzyskiwanie bardzo niskich temperatur (mikro kelwin) przy ich adiabaticznym rozmagnesowaniu, jakkolwiek wymagane są o wiele większe pola magnetyczne.

## Temat 11: Nowe własności substancji w bardzo niskich temperaturach

Celem zajęć jest przedstawienie nowych własności substancji pojawiających się w bardzo niskich temperaturach oraz możliwości zastosowań kriogeniki. Omawiane jest zjawisko nadprzewodnictwa oraz nadciekłości. Przedstawione są przykłady zastosowań nadprzewodnictwa. Zaprezentowana jest chłodziarka rozcieńczalnikowa wykorzystująca efekt nadciekłości. Omówione są własności materiałów w niskich temperaturach.

### **Eksperymenty:**

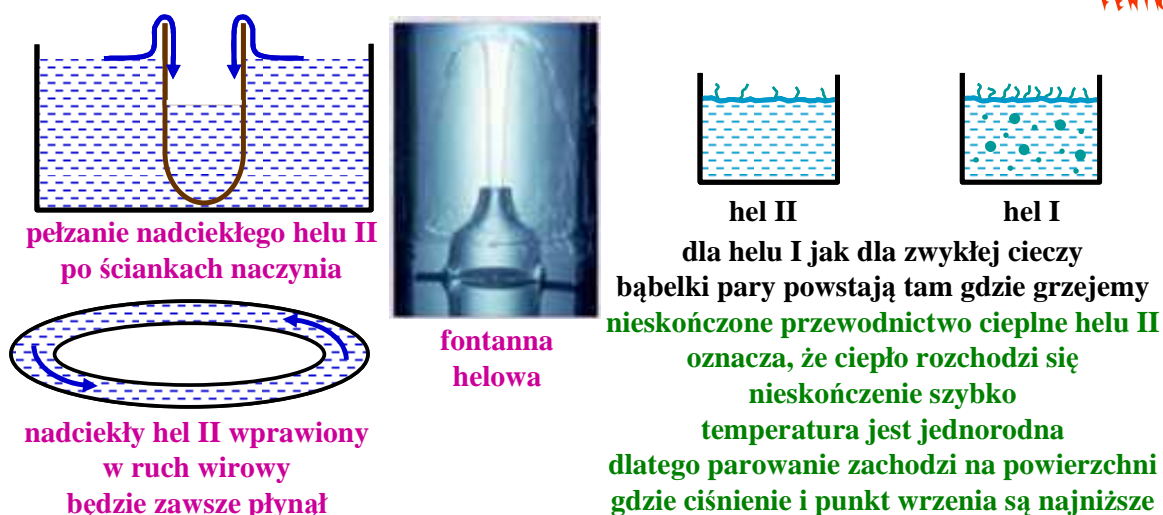
Wykonanie eksperymentów kriogenicznych w warunkach szkolnych jest praktycznie niemożliwe. Dlatego powinny zostać zaprezentowane na uczelni w postaci demonstracji. Możliwe do pokazania demonstracje to:

- 1) Fosforescencja skorupki jajka schłodzonego ciekłym azotem
- 2) Własności sprężyste ołowiu, kwiatów, gumy itp. schłodzonych ciekłym azotem
- 3) Zmniejszanie się oporu elektrycznego w niskich temperaturach
- 4) Lewitacja magnesu wykonanego z wysokotemperaturowego nadprzewodnika

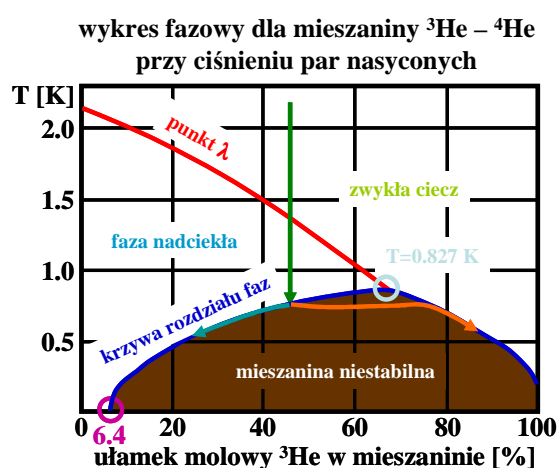
Efekty nadprzewodnictwa i ich zastosowanie w transporcie można pokazać na filmach dostępnych do skopiowania na stronie <http://www.ifw-dresden.de/offers/downloads/flyer>. Szczególnie można polecić film z kolejką magnetyczną (Magnetschwebbahn – Superconducting Levitation Train).

### **Tematy do omówienia**

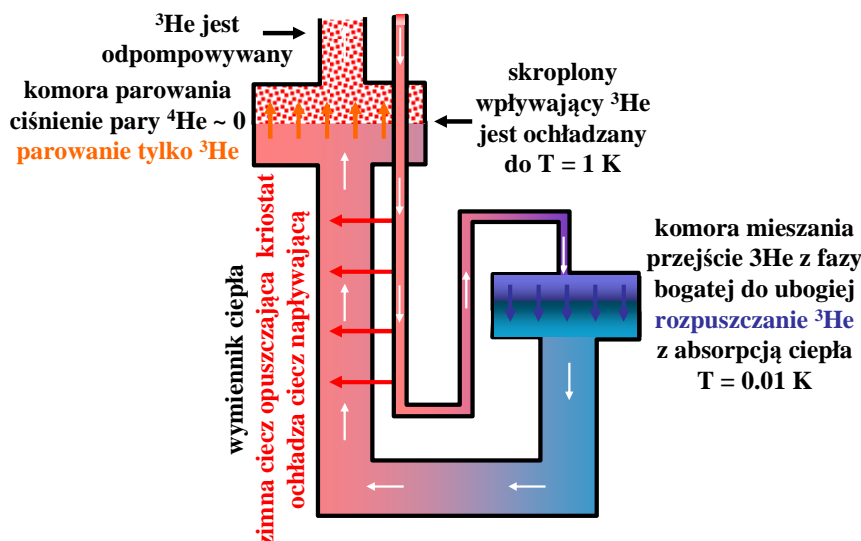
- 1) Własności helu w niskich temperaturach. Hel jest jedynym pierwiastkiem, który jest ciekły w temperaturze  $T = 0$  K ponieważ dzięki małej masie atomów i słabego oddziaływania pomiędzy nimi amplituda oscylacji atomów jest porównywalna z odległością atomów. Gdyby hel zrobił się ciałem stałym to roztopiłby się dzięki oscylacjom atomów. Nachylenie krzywej równowagi ciało stałe – hel II jest równe zero. Przy przejściu ciało stałe – hel II zmiana entropii wynosi zero, oznacza to iż ciecz jest tak samo uporządkowana jak ciało stałe. Przeprowadzone badania przy pomocy promieniowania X wskazują iż tylko ciało stałe jest uporządkowane przestrzennie. Oznacza to iż hel II musi być uporządkowany w przestrzeni pędu. Jako ciecz hel występuje w dwóch fazach: jako zwykła ciecz oraz hel nadciekły. W fazie nadciekłej (hel II) ciecz nie ma lepkości oraz przewodnictwo cieplne jest nieskończone. Dzięki brakowi lepkości obserwuje się pełzanie pościółkach naczynia, niekończący się ruch wirowy, fontannę helową. Dzięki nieskończonemu przewodnictwu cieplnemu parowanie zachodzi tylko na powierzchni.



- 2) Mieszanina  $^3\text{He}$  i  $^4\text{He}$  w niskiej temperaturze. Czysty  $^4\text{He}$  staje się nadciekły poniżej temperatury 2.172 K czysty  $^3\text{He}$  pozostaje zwykłą cieczą do temperatury 0.003 K. W mieszaninie  $^4\text{He}$  staje się nadciekły w temperaturach 2.172 K – 0.827 K w zależności od ułamka molowego  $^3\text{He}$ . W temperaturze 0.827 K następuje spontaniczne rozdzielanie mieszaniny na dwie fazy ciekłe rozdzielone meniskiem. Jedna faza jest bogata w  $^3\text{He}$  druga faza jest uboga w  $^3\text{He}$  (bogata w  $^4\text{He}$ ). Faza bogata w  $^3\text{He}$  ma mniejszą gęstość i pływa po fazie bogatej w  $^4\text{He}$ , stężenie  $^3\text{He}$  w fazie ubogiej nawet w niskich temperaturach wynosi co najmniej 6.4%. W zależności od koncentracji  $^3\text{He}$  rozdział na dwie fazy następuje w różnych temperaturach. Zależność ta opisana jest przez krzywą rozdziału faz. Powyżej tej krzywej mieszanina jest w zwykła cieczą lub jest w fazie nadciekłej, poniżej tej krzywej powstaje mieszanina niestabilna. Jeżeli oziębiamy roztwór o pewnym stężeniu to docieramy do krzywej rozdziału faz i następuje samorzutne rozdzielanie faz na ubogą w  $^3\text{He}$  i bogatą w  $^3\text{He}$ . Przy dalszym obniżaniu temperatury maleje koncentracja  $^3\text{He}$  w fazie ubogiej oraz rośnie koncentracja  $^3\text{He}$  w fazie bogatej.

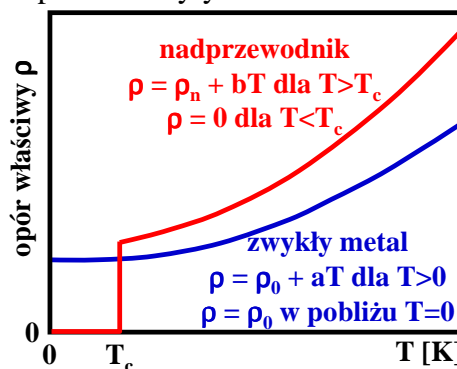
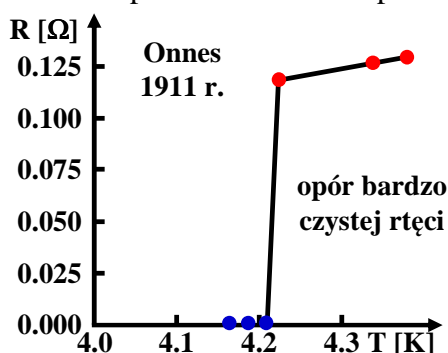


- 3) Chłodziarka rozcieńczalnikowa (zastosowanie nadciekłości). Lepkość i entropia fazy nadciekłej bogatej w  $^4\text{He}$  są równe zero dzięki temu są „próżnią” dla  $^3\text{He}$ . Rozcieńczanie  $^3\text{He}$  w fazie nadciekłej bogatej w  $^4\text{He}$  odbywa się efektywnie jako parowanie  $^3\text{He}$  do próżni. Więcej informacji znajduje się na stronie internetowej [http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~kriogen/Wyklady/pods\\_krio/Wyklad13.pdf](http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~kriogen/Wyklady/pods_krio/Wyklad13.pdf)

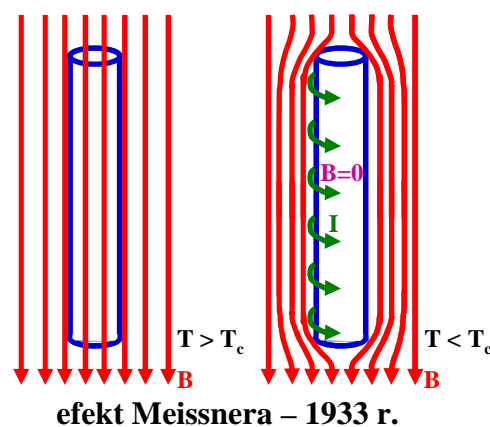
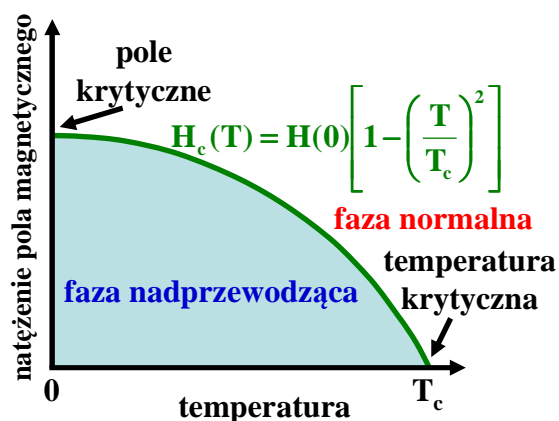


#### 4) Nadprzewodnictwo.

a) Zmiana oporu w niskich temperaturach, temperatura krytyczna.



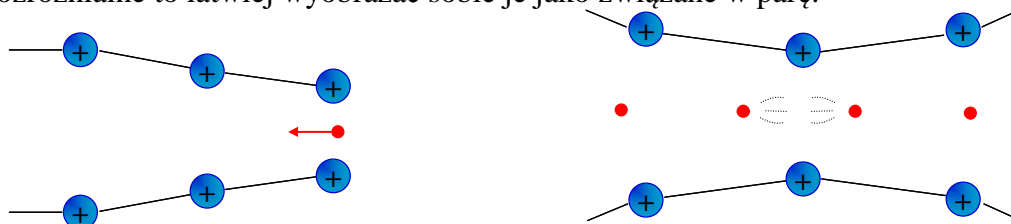
b) Pole magnetyczne i nadprzewodniki – efekt Meissnera (lewitacja), temperatura krytyczna i pole magnetyczne.



c) Zastosowania nadprzewodnictwa: magnesy nadprzewodzące (NMR, cyklotrony do terapii antynowotworowej, akcelerator LHC, pociąg MagLev), nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe (silniki dużej mocy, stacje łączności bezprzewodowej, kable, transformatory, tokamak).

d) Mikroskopowe wyjaśnienie nadprzewodnictwa – teoria BCS. Ujemnie naładowany elektron przelatuje obok dodatnio naładowanych atomów znajdujących się w sieci krystalicznej. Ruch elektronu powoduje zaburzenia sieci krystalicznej. Powoduje to powstanie drgań sieci krystalicznej (powstanie fononów) i dodatnie ładunki gromadzą się w pobliżu elektronu. Zanim elektron przeleci i zanim atomy sieci krystalicznej powrócą do położenia niezaburzonych, obszar zwiększonego ładunku

dodatniego przyciąga inny elektron. Dzięki temu dwa elektrony, które normalnie odpychają się, łączą się w parę. Siła wywierana przez fonony jest większa od siły odpychania elektronów. Powstaje para elektronów, które znajdują się w pewnej odległości od siebie. Para ta może poruszać się koherentnie wewnątrz kryształu, ponieważ elektrony są ekranowane przez fonony. Kiedy jeden z elektronów pary przechodzi w pobliżu jonu sieci krystalicznej, przyciąganie pomiędzy elektronem i jonem wywołuje wibrację sieci, która jest przenoszona do innych jonów, dopóki drugi elektron z pary nie zaabsorbuje tej wibracji. Całkowity efekt polega więc na emisji fononu przez elektron i absorpcji tego fononu przez inny elektron. Ta wymiana fononu powoduje powstanie siły przyciągającej pomiędzy elektronami, co daje efektywne wiązanie dwóch elektronów. Należy jednak pamiętać, iż pary Coopera ulegają ciągłemu łączeniu się i rozłączaniu. Jednak ponieważ elektrony są nierozróżnialne to łatwiej wyobrazić sobie je jako związane w parę.



**elektron przyciąga dodatnio naładowane atomy  
 powstaje obszar o zwiększonym ładunku dodatnim  
 do którego przyciągany jest inny elektron**

**dwa elektrony zwane parą Coopera  
 są wiązane i mogą poruszać się  
 swobodnie w sieci krystalicznej**

- 5) Zastosowania kriogeniki: technologia żywności (krioprezerwacja), kriomedycyna (krioterapia, zapłodnienie in vitro), kriobiologia, kriotechnika (nadprzewodnictwo, pompy próżniowe – kriopompy). Więcej na ten temat można znaleźć na stronie <http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~kriogen/Wyklady/DFN/DFN.pdf>