



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Człowiek – najlepsza inwestycja

FENIKS

Wykłady z pokazami, UJK, cz. IV b

Zjawiska cieplne

Marek Pajek

*Instytut Fizyki
Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy
Jana Kochanowskiego w Kielcach*

(pisemna wersja wykładu plenarnego z pokazami z IV semestru zajęć)

Film z wykładu: www.feniks.ujk.edu.pl/index.php/pol/Multimedia/Filmy/UJK



- 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

Część B

Niskie temperatury

Mimo, że termodynamika kojarzy nam się z ciepłem, to z punktu widzenia fizyki ciekawsze jest „zimno”, czyli układy w bardzo niskich temperaturach. W laboratoriach do otrzymywania niskich temperatur wykorzystujemy ciekły azot, którego temperatura wrzenia wynosi -195°C . Ciekły azot wylany na podłogę rozbiega się w postaci malutkich kuleczek przypominających nam krople wody biegające po rozgrzanej blasze. W istocie jest to takie samo zjawisko, bo podłoga jest bardzo „gorąca” dla ciekłego azotu, ma bowiem temperaturę większą o blisko 200°C . Ponieważ „życie” biologiczne jest ograniczone do zakresu temperatur w zakresie $0-100^{\circ}\text{C}$, nasze wyobrażenia o świecie niskich temperatur są bardzo słabe. Możemy się o tym przekonać demonstrując **kwiatek schłodzony w ciekłym azocie**, który ściśnięty w dłoni rozpada się z trzaskiem jak delikatna szklana bombka. Ciała elastyczne w niskich temperaturach tracą swoje własności: o tym przekonuje nas **kauczukowa lub tenisowa piłeczka** schłodzona w ciekłym azocie, która łatwo pęka przy próbie jej odbijania. Podobnie zamrożone w azocie miękkie **jabłko** rozpryskuje się na drobne kawałki jak porcelana po uderzeniu w podłogę.

Wiedząc, że gazy rozszerzają się znacznie przy ogrzewaniu, spodziewamy się, że powinny się silnie kurczyć podczas oziębiania. Aby to sprawdzić, przygotowaliśmy zagadkę: ile **nadmuchanych baloników** można zmieścić w naczyniu z ciekłym azotem o objętości w przybliżeniu równej objętości jednego balonika. Łatwo pokazać, że można ich tam zmieścić wiele, o czym przekonują się słuchacze po zliczeniu rozrzuconych po sali schłodzonych baloników, które wyglądają po wyjęciu z ciekłego azotu jak płaskie placki, ale natychmiast „rosną” w gorącym (temperatura pokojowa!) powietrzu w sali wykładowej. Można też zaskoczyć słuchaczy i pokazać, że na sali jest nawet więcej baloników niż umieszczono w ich obecności w naczyniu z azotem, jeśli przed wykładem schowamy w nim kilka dodatkowych baloników!

Pokazy z ciekłym azotem kończymy strzelaniem z **działka azotowego**, a dokładniej, z rury, do której nalewamy nieco ciekłego azotu a jej wylot zatykamy gumowym korkiem. Po chwili korek wystrzeliwuje z hukiem, co nam uświadamia, że rura jest „gorąca” dla ciekłego azotu, wywołując jego gwałtowne wrzenie i w konsekwencji gwałtowne zwiększenie ciśnienia w rurze skutkujące wystrzałem korka.

Inną substancją używaną do wytwarzania niskich temperatur na potrzeby laboratoryjne jest tzw. **suchy lód**, czyli zestalony dwutlenek węgla (CO_2). Jest on suchy, ponieważ sublimuje w temperaturze około -78°C , czyli przechodzi bezpośrednio z fazy stałej do gazowej z pominięciem fazy ciekłej. Dla porównania, znany nam dobrze lód powstający z zamrożonej wody jest „mokry” w tym sensie, że w temperaturze 0°C topi się, przechodząc w fazę ciekłą, czyli mokrą wodę. **Sublimację** suchego lodu łatwo zaobserwować wrzucając jego kawałki do naczynia z wodą. Wtedy gwałtownie wydzielają się w naczyniu pęcherzyki gazu CO_2 , który jest cięższy od powietrza i wypiera tlen, gasząc umieszczone wokół naczynia zapalone świeczki. Warto zaznaczyć, że woda w naczyniu staje się dobrze nam znaną wodą gazowaną do picia. Dodanie do naczynia kilku kropel płynu do zmywania naczyń

powoduje gwałtowne wydzielanie wielkiej ilości **piany**, a dodatkowe zabarwienie wody powoduje widowiskowe wytwarzanie kolorowej piany.

Z pomocą suchego lodu, podobnie jak ciekłego azotu, można doskonale strzelać. Tym razem ładowanie rury-strzelby polega na zalaniu w niej wodą małego kawałka suchego lodu, a po krótkim czasie proces sublimacji doprowadza do wystrzału pozwalającego słuchaczom lepiej zapamiętać, co to jest sublimacja.

Przemiany fazowe

Omawiane powyżej procesy są przykładami przemian fazowych dotyczących zmian stanu skupienia: topnienia i krzepnięcia, wrzenia i skraplania oraz sublimacji i resublimacji. Ponieważ sublimację suchego lodu omawialiśmy dokładniej wcześniej, teraz zademonstrujemy zarówno sublimację jak i resublimację chlorku amonu (NH_4Cl). Podgrzewając w kolbie sproszkowany **chlerek amonu** doprowadzamy do intensywnego wydzielania białego gazu NH_4Cl , który po schłodzeniu kolby osadza się ponownie na jej ściankach w postaci białego osadu. W ten sposób pokazujemy sublimację i resublimację chlorku amonu.

Czy dobrze nam znany lód (H_2O) sublimuje i resublimuje? Tak, możemy to zauważyć uważnie obserwując, że zimą pokrywa lodu na chodnikach zmniejsza się nawet wtedy, gdy podczas długo utrzymującego się mrozu lód się nie topi (sublimacja). Niekiedy też drzewa pokrywa piękna szadź w wyniku odwrotnego procesu resublimacji. Widzimy więc że zarówno **sublimację** i **resublimację** wody możemy zaobserwować wokół nas.

Omawiane zmiany stanów skupienia substancji są tak zwanymi **przemianami fazowymi I rodzaju**, to znaczy takimi, które zachodzą w ściśle określonej temperaturze przemiany i charakteryzuje je pobieranie lub wydzielanie ściśle określonej ilości energii na jednostkę masy substancji (tzw. ciepło właściwe przemiany fazowej). Niezerową wartość ciepła przemiany topniejącego lodu można zademonstrować obniżając poprzez **zasolenie** temperaturę topnienia mieszaniny wody z lodem (tak postępują drogowcy zimą soląc nasze drogi!). W wyniku obniżenia o kilkanaście stopni temperatury krzepnięcia lodu w takiej mieszaninie okazuje się, że mokre naczynie zawierające tę mieszaninę przymarza szybko do deseczki. Dlaczego? Ponieważ stopienie lodu wymaga pobrania energii (ciepło przemiany) z zewnątrz, tym samym doprowadzając do obniżenia lokalnie temperatury otoczenia i prowadząc do przymarznięcia naczynia.

Innym przykładem, tym razem wydzielania energii (ciepła przemiany) w przemianie fazowej I rodzaju jest proces gwałtownej krystalizacji **przechłodzonego roztworu tiosiarczanu sodowego**. Przechłodzona ciecz jest stanem substancji, która winna być w stanie stałym w danej temperaturze, ale tego stanu nie osiągnęła ze względu na niemożność zainicjowania przemiany w fazę stałą (brak zarodków nowej fazy). Wrzucenie do takiej przechłodzonej cieczy niewielkiej ilości skryształowanego tiosiarczanu sodowego powoduje gwałtowną krystalizację roztworu w całej objętości, czemu towarzyszy intensywne wydzielanie ciepła, co demonstruje podnoszący się słupek cieczy w kolbie (termometr gazowy).

Nie wszystkie przemiany fazowe są przemianami I rodzaju. Na przykład przemiana ferromagnetyka w paramagnetyk jest **przemianą fazową II rodzaju**, nie posiadającej ciepła przemiany. Łatwo ją można zademonstrować podgrzewając palnikiem gazowym **gwóźdź stalowy**, przyciągnięty ostrzem przez magnes. Gdy temperatura ostrza osiąga tzw. temperaturę Curie, wynoszącą w tym przypadku 768°C, gwóźdź nagle odpada od magnesu, gdyż w tej temperaturze ferromagnetyk przechodzi w paramagnetyk, którego znacznie mniejsze namagnesowanie jest już niewystarczające do utrzymania gwoździa przy magnecie. Badanie przemian fazowych, mających duże znaczenie praktyczne i technologiczne, stanowi dziś ważny dział termodynamiki.

Zjawiska transportu

Poznanie natury ciepła pozwala nam zrozumieć istotę tzw. **zjawisk transportu**, czyli procesów termodynamicznych prowadzących do przenoszenia (transportu) energii, masy, pędu oraz ładunku elektrycznego. Procesy te znamy z życia codziennego jako, na pozór odległe od siebie, zjawiska przepływu ciepła, dyfuzji, lepkości czy prądu elektrycznego. Te różnorodne zjawiska mają jednak wspólną przyczynę, którą jest przenoszenie (transport) różnych wielkości poprzez przypadkowe zderzenia cząsteczek. W istocie zjawiska te już demonstrowaliśmy na początku wykładu (wyrównywanie temperatury wody, dyfuzja barwnika w cieczy, dyfuzja dymu w powietrzu, przepływ prądu elektrycznego w obwodzie). Istotną cechą tych procesów jest ich samorzutna kierunkowość. Jak wiemy, ciepło przepływa samorzutnie od ciała cieplejszego do zimniejszego, co stanowi treść II zasady termodynamiki. Teraz pokażemy, że ciepło w **pręcie metalowym** rozchodzi się dość wolno: podgrzewając palnikiem gazowym jeden koniec pręta zauważamy, że przyklejone parafiną wzdłuż jego boku paski papieru kolejno odpadają (po stopieniu się parafiny), ale dopiero po pewnym czasie. A więc upływa dość dużo czasu zanim poprzez zderzenia można przetransportować ciepło (pamiętamy, że jest ono energią kinetyczną chaotycznie poruszających się cząsteczek).

Zaskakująco słabe **przewodnictwo cieplne wody** demonstrujemy w prostym eksperymencie, w którym podgrzewamy palnikiem gazowym górną część szklanej próbówki napełnionej wodą, na dnie której znajdują się kawałki lodu przyciśnięte ciężarkiem, aby nie wypływał go góry. Okazuje się, że po chwili woda w górnej części próbówki wrze (temperatura 100°C), podczas gdy w dolnej jej części pozostaje niestopiony lód z wodą (temperatura 0°C). Tak duża różnica temperatur na odległości kilku centymetrów utrzymuje się przez długi czas, co potwierdza bardzo słabe przewodnictwo cieplne wody.

A jak gazy przewodzą ciepło? Okazuje się, że jeszcze słabiej niż ciecze, o czym przekonuje nas demonstracja **efektu Leidenfrosta**, polegającego na stosunkowo długim utrzymywaniu się kropelek wody na gorącej blasze lub podobnie kropelek ciekłego azotu na „gorącej” dla niego podłodze. Dodatkowo można pokazać, że gdy różnica temperatur nie jest duża, kropelki wyparowują bardzo szybko! Efekt ten wyjaśniamy następująco: dla dostatecznie dużej różnicy temperatur gwałtowne parowanie cieczy na granicy zetknięcia z podłożem powoduje wytworzenie cieniutkiej warstwy pary (poduszka gazowa) na której spoczywa kropla. W konsekwencji dalszy przepływ ciepła do kropli staje się ograniczony ze względu na słabe przewodnictwo

cieplne w warstwie pary. W ten sposób kropla może długo „tańczyć” na gorącym podłożu.

Słabe przewodnictwo cieplne wody rodzi trudne pytanie. Jak to się dzieje, że wodę w czajniku możemy zagotować dość szybko, co wymaga nagrzania stosunkowo dużej objętości wody do temperatury 100°C? Okazuje się, że w tym przypadku mamy do czynienia z innym mechanizmem transportu ciepła, zwanym konwekcją. Jest to proces, w którym podgrzane „makroskopowe” obszary wody są unoszone do góry przez siłę wyporu (grawitacja!) w związku ze zmniejszoną gęstością podgrzanej wody. Proces ten umożliwia znacznie szybszy transport ciepła niż zderzenia cząsteczek, a jego charakterystyczną cechą jest pojawianie się chaotycznych **turbulencji** w przepływie podgrzewanej cieczy. **Konwekcyjny przepływ ciepła** łatwo można zademonstrować, obserwując ruch wody w podgrzewanej palnikiem kolistej rurce, w której rozpuszczają się wrzucone kryształki nadmanganianu potasu (KMnO_4). Gwałtowne rozpuszczanie nadmanganianu potasu obserwujemy jako kłębiące się wiry fioletowo-czerwone rozchodzące się szybko wzdłuż rurki. Dzięki zjawisku konwekcji woda w rurce bardzo szybko zabarwia się jednolicie. Proces nastąpił dużo szybciej, niż dla zabarwionej wody w zlewce pokazywanej na początku wykładu, gdzie o szybkości wyrównywania niejednorodności decydował proces dyfuzji w cieczy. Tak więc widzimy, że aby przygotować filiżankę herbaty, pomaga nam w tym konwekcja, związana z rozszerzaniem się cieczy i grawitacją, oraz w słabszym stopniu dyfuzja.

Wykaz pokazów

Część A - ciepło

- 1) Obserwacja wody w naczyniu, do której dodano barwnika – wyrównywanie się niejednorodności stężenia
- 2) Wyrównywanie się temperatur w zlewkach umieszczonych jedna w drugiej, gdzie jedna zlewka zawiera wodę gorącą a druga zimną
- 3) Wyrównywanie się potencjałów na okładkach naładowanego kondensatora zwartego opornikiem
- 4) Wytwornica dymu, dyfuzja w powietrzu
- 5) Puszczanie kółek z „papierosa” wykonanego z plastikowego wiaderka, ciśnienie akustyczne zrzucające kubeczek styropianowy z głowy asystenta
- 6) Termometr rtęciowy i jego konstrukcja (spłaszczona kapilara jako soczewka)
- 7) Termometr Galileusza z kapilarą, zjawisko rozszerzalności cieplnej gazu
- 8) Termometr cieczowy, zjawisko rozszerzalności cieplnej cieczy
- 9) Pierścień Gravesanda, rozszerzalność cieplna ciał stałych
- 10) Porównanie rozszerzalności cieplnej pręta mosiężnego i stalowego z pomocą dylatometru na płonący denaturat
- 11) Ruchy Browna, mikroskopowa budowa materii
- 12) Demonstracja rozszerzalności cieplnej ciał stałych z pomocą rury wypełnionej drgającymi piłeczkami pingpongowymi
- 13) Termopara, pomiar temperatury płomienia palnika
- 14) Pomiar temperatury na odległość z pomocą czujnika na podczerwień
- 15) Termometr ciekłokrystaliczny
- 16) Termometr Galileusza z kolorowymi bańkami w cieczy
- 17) Zamiana pracy na ciepło z pomocą ściskania fiolki z eterem obracanej przez wiertarkę
- 18) Zamiana ciepła na pracę: podgrzewanie zakorkowanej armatki z wodą
- 19) Prosta maszyna cieplna: młynek parowy
- 20) Ptaszek pijący wodę (fałszywe perpetuum mobile)
- 21) Świeczka pod spiralą z folii metalowej
- 22) Wiatraczek w kloszu poruszany światłem



Zamrażanie baloników w ciekłym azocie



Przygotowanie do rzutu o podłogę zamrożoną w ciekłym azocie piłką tenisową



Zabawa z balonikami



Po podgrzaniu balony odzyskują swój pierwotny kształt



Na górze próbki wrzenie, na dole lód!



Stopniowo odklejające się papierowe paski z podgrzewanego palnikiem pręta



Strzelanie w Koordynatora



Dyrygent i pierwszy skrzypek



Termometr Galileusza



Rozpryskujący się zmrożony w ciekłym azocie kwiatek



Wykład



Zimny mały balonik



Baloniki wróciły do pierwotnych kształtów



Dwutlenek z sublimującego suchego lodu gasi świece



Kolorowa piana z dwutlenku węgla powstającego z sublimującego suchego lodu



Widok auli z lotu ptaka