



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Człowiek – najlepsza inwestycja

# FENIKS

## Wykłady z pokazami, UJK, cz. IV a

### 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](http://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

## Cześć A

### Wstęp

Niniejszy wykład dotyczący zjawisk cieplnych może być równie dobrze nazwany „ciepło-zimno”, gdyż demonstrujemy w nim zarówno obiekty bardzo „gorące”, jak i bardzo „zimne”, albo też bardziej uczenie – *termodynamika*, czyli część fizyki traktująca o zjawiskach cieplnych. Ale czym naprawdę zajmuje się termodynamika? Najprościej mówiąc, termodynamika opisuje „duże” (zwane makroskopowymi) układy składające się z bardzo wielkiej liczby cząstek (atomów, cząsteczek). Typowa liczba cząstek w układzie termodynamicznym jest rzędu niewyobrażalnie wielkiej liczby Avogadro (równej liczbie cząsteczek w jednym molu substancji), wynoszącej w przybliżeniu 6000000000000000000000000 (6 i 23 zera, co zapisujemy  $6 \times 10^{23}$ ). Dobrym przykładem układu termodynamicznego jest szklanka wody, zawierająca blisko  $10^{25}$  cząsteczek  $H_2O$ . Skoro układy termodynamiczne składają się z wielkiej liczby cząstek, a zachowanie pojedynczych cząstek opisuje znana nam *mechanika*, to powstaje pytanie czy termodynamika sprowadza się po prostu do mechaniki? Odpowiedź na to pytanie jest negatywna i zaskakująca: układy termodynamiczne wykazują pewne własności, których nie można opisać na gruncie mechaniki, na przykład wyróżniony kierunek w czasie samorzutnego zachodzenia procesów termodynamicznych, dążący do wyrównywania wszelkich różnic w układzie. Tę własność układów termodynamicznych nazywamy dążeniem układu do *równowagi termodynamicznej*, czyli pewnego stanu w którym zniwelowane są wszelkie różnice w układzie.

### *Równowaga termodynamiczna*

Dążność układów termodynamicznych do samorzutnego osiągnięcia stanu równowagi termodynamicznej zademonstrujemy na trzech prostych przykładach dotyczących przewodnictwa cieplnego, przewodnictwa elektrycznego i dyfuzji. Przyjrzyjmy się dokładniej dobrze znanemu zjawisku samorzutnego **przepływu ciepła** od ciała „cieplejszego” do „zimniejszego”. W tym celu mierzymy temperatury wody termometrem cyfrowym w zlewce z wrzątkiem umieszczonej w większej zlewce zawierającej wodę z kranu w temperaturze pokojowej (co to jest temperatura i jak ją mierzyć omówimy dokładniej później). Obserwujemy, że systematycznie temperatura gorącej wody się obniża, a temperatura wody z kranu się podnosi. Po kilku minutach obie temperatury się wyrównują, co wskazuje że układ osiągnął dość szybko równowagę termodynamiczną. Drugim przykładem nierównowagowego układu termodynamicznego jest prosty obwód elektryczny RC składający się z opornika i kondensatora, który zostaje w pewnej chwili naładowany napięciem 4.5 V z płaskiej baterijki. Mierzac woltomierzem cyfrowym napięcie na kondensatorze zauważamy, że szybko (po kilku sekundach) spada ono do zera, co wskazuje, że w układzie w którym występowała początkowo różnica potencjałów elektrycznych została ona zlikwidowana w wyniku przepływu **prądu elektrycznego**. A więc znów zniwelowana została niejednorodność w układzie (różnica potencjałów), tym razem poprzez przepływ prądu elektrycznego. Trzecim przykładem niwelowania różnic w układzie termodynamicznym jest obserwacja zachowania wkroplonej małej ilości barwinka

(bejca) do dużej zlewki z wodą. Widzimy, że w wyniku zachodzenia procesu **dyfuzji** w cieczy niejednorodna początkowo plama barwika powoli rozplywa się i po pewnym, rzędu godziny, czasie zauważamy, że woda w zlewce staje się jednorodnie zabarwiona. Świadczy to o wyrównaniu wszelkich różnic gęstości i osiągnięciu stanu równowagi w układzie.

Zjawisko dyfuzji w gazie można zademonstrować wypuszczając strumień dymu z **wytwornicy dymu**, który dość szybko rozplywa się w powietrzu i „znika”, co w istocie potwierdza fakt wyrównania się różnic gęstości i osiągnięcia stanu równowagi (przynajmniej przybliżonej, bo nie widzimy już różnic gęstości!). Rozplywanie się dymu można zademonstrować również w sposób bardziej widowiskowy, wytwarzając kółka dymu poprzez delikatnie uderzenie w folię zakrywającą plastikowe wiadro, w którego dnie wycięty został niewielki otwór, a do wiadra napuszczony został dym z wytwornicy. **Kółka z takiego sztucznego „papierosa”** świetnie demonstrują dążność układów termodynamicznych do niwelowania wszelkich różnic w układzie, a w szczególności szybkiego rozplywania się wytworzonych struktur-kółek. Innym interesującym aspektem tej demonstracji jest pokazanie że kółka dymu w istocie wizualizują podłużne fale biegnące wytwarzane w wiadrze. Fale te unoszą niemały pęd, o czym możemy się łatwo przekonać „zestrzeliwując” z głowy zaproszonego słuchacza lekki kubek plastikowy. W ten sposób strzelanie z szybko znikających kółek dymu pozwala łatwiej zapamiętać podstawowe własności układów termodynamicznych: samorzutne niwelowanie różnic w układzie i dążenie do osiągnięcia stanu równowagi termodynamicznej.

## *Temperatura i jej pomiar*

Temperatura jest wielkością pojawiającą się w termodynamice, gdyż jest własnością układu wielu cząstek. Dlatego też poznając mechanikę nic o temperaturze nie mówiliśmy. Czym jest więc temperatura? Aby na to pytanie odpowiedzieć, musimy się najpierw dowiedzieć, że fizycy, mając istotne kłopoty z opisem układów termodynamicznych, stworzyli specjalną metodę opisu tych układów zwaną *termodynamiką fenomenologiczną*, czyli zjawiskową. Termodynamika fenomenologiczna nie interesuje się mikroskopową budową układów termodynamicznych, a jedynie stara się je opisać poprzez parametry takie jak, na przykład, temperatura, ciśnienie, czy też objętość, które umiemy mierzyć dostępnymi przyrządami (makroskopowymi). Definicja temperatury stworzona na gruncie termodynamiki fenomenologicznej niewiele nam o niej mówi: według zerowej zasady termodynamiki temperatura to pewna wielkość (nie określona jednoznacznie!) która się wyrównuje gdy ciała osiągają równowagę termodynamiczną. Tak więc temperatura to wielkość mierzona przyrządami zwanymi termometrami, która zmienia się wraz z nagrzewaniem (lub oziębianiem) ciał. Termometr wykorzystuje zmiany znanych własności fizycznych ciał (objętość, napięcie w obwodzie, kolor) które zależą, jak pokazuje doświadczenie, od stopnia ich nagrzania, a więc i temperatury. Najprostsze i najstarsze termometry wykorzystują zjawisko rozszerzalności gazów i cieczy. **Termometr Galileusza** (kolba wypełniona powietrzem i zatkana korkiem w którym umieszczona jest cienka rurka wypełniona zabarwioną cieczą, której poziom mierzy ciśnienie powietrza w kolbie) wystarczy podgrzać dłońmi, aby zaobserwować wzrost poziomu cieczy świadczący o wzroście ciśnienia spowodowanego wzrostem temperatury. Tak więc widzimy że temperaturę możemy mierzyć poprzez pomiar

linijką długości (wysokości słupka cieczy). Tak właśnie postąpił Celsjusz, wyznaczając dobrze nam znaną skalę 100-stopniową: mieszaninie wody z lodem przypisał temperaturę „zero”, a wrzącej wodzie temperaturę „100 stopni”. Różnica wskazań termometru w tych punktach podzielona na 100 równych części określa jeden stopień Celsjusza ( $1^{\circ}\text{C}$ ). Podobne doświadczenie z kolbą całkowicie wypełnioną zabarwioną wodą pokazuje, że poziom wody nie zmienia się w zauważalny sposób po ogrzaniu kolby dłońmi. Dopiero po umieszczeniu kolby we wrzątku poziom wody gwałtownie zaczyna się podnosić, co świadczy o tym, że ciecze rozszerzają się podczas ogrzewania, ale znacznie słabiej niż gazy. Rozszerzalność termiczna cieczy wykorzystywana jest w **termometrach cieczowych**, których najbardziej znanym przykładem jest termometr rtęciowy. W takim termetrze rozszerzająca się rtęć zawarta jest w bardzo cienkiej, ledwo widocznej rurce, aby niewielki przyrost jej objętości przy wzroście temperatury o jeden stopień odpowiadał około jednemu centymetrowi. Aby wyraźnie zobaczyć słupek rtęci zazwyczaj obracamy termometrem i w pewnym położeniu widzimy „gruby” (powiększony) słupek rtęci. Dzieje się tak, ponieważ szklana obudowa termometru jest w przekroju soczewką i w istocie „dobrze” widzimy w takim termetrze powiększony przez soczewkę obraz słupka rtęci.

Ciała stałe, takie, jak na przykład znane nam dobrze metale, rozszerzają się termicznie jeszcze słabiej niż ciecze. Do obserwacji rozszerzalności termicznej metali trzeba wykorzystywać bardziej subtelne przyrządy zwane **dylatometrami**, które umożliwiają mierzenie bardzo małego przyrostu długości ciał. W doświadczeniu porównujemy wzrost długości pręta stalowego i mosiężnego podgrzewanych płonącym denaturatem. W tym przypadku niewielki (prawie niewidoczny) wzrost długości prętów można zademonstrować przy pomocy wygiętej wskazówki-drucika: wydłużający się pręt naciska na krótkie ramię wskazówki, której dużo dłuższe ramię wychyla się wystarczająco dużo, aby takie wychylenie odczytać na odpowiedniej skali.

## *Natura ciepła*

Zrozumienie istoty temperatury jest w istocie pytaniem o naturę ciepła. Czym jest więc ciepło? Łatwo można zademonstrować, że ciepło jest jakoś związane z pracą, a więc też z energią. Pracę możemy zamienić na ciepło w widowiskowej demonstracji polegającej na **ściskaniu wirującej metalowej rurki zawierającej eter**, który w wyniku wydzielanego ciepła w momencie ściskania rurki paruje znacznie szybciej, co widzimy w postaci wysokiego słupa ognia unoszącego się nad rurką po podpaleniu pary eteru. Zmniejszenie zacisku powoduje zmniejszenie wysokości słupa ognia, co jasno wskazuje na zamianę pracy na ciepło. Zamiana ciepła na pracę jest nam znana z zasady działania maszyn parowych, również w popularnego wiersza „Lokomotywa” J. Tuwima. Na wykładzie pokazujemy trzy przykłady takich maszyn cieplnych: strzelającą armatkę parową i wirujący młynek parowy (w obu przypadkach podgrzewamy „maszyny” płonącym denaturatem), oraz wirujący wiatraczek napędzany światłem silnej żarówki (w tym przypadku wykorzystywana jest różnica w przekazie pędu w zderzeniach fotonów światła z poczernioną i wypolerowaną częścią skrzydełek wiatraczka). Doświadczenia te przekonują nas że ciepło to energia – ale jaka energia?

Obecnie przyjmujemy, że długą dyskusję o naturze ciepła prowadzoną w XIX w. zakończyli ostatecznie Albert Einstein i polski fizyk Marian Smoluchowski, którzy niezależnie w 1905 roku wyjaśnili naturę tzw. **ruchów Browna**, czyli chaotycznych ruchów małych cząstek-pyłków w cieczy (wodzie), obserwowanych pod mikroskopem (ruchy Browna rozdrobionych cząsteczek oleju w wodzie obserwujemy właśnie na ekranie!). Wyjaśnienie przyczyny ruchów Browna zakładało przyjęcie koncepcji kinetycznej budowy materii, według której jest ona zbudowana z atomów lub ich układów – cząsteczek, które są w ustawicznym chaotycznym ruchu (pamiętamy z mechaniki że ruch jednostajny nie wymaga działania żadnej przyczyny!). W tym ujęciu przypadkowe ruchy Browna są wynikiem zderzeń niewidzialnych dla nas cząsteczek wody (rozmiar atomowy!) z widocznymi pod mikroskopem znacznie większymi cząstkami pyłków. Tak więc zrozumienie natury ruchów Browna jest w istocie pośrednim „zobaczeniem” chaotycznych ruchów cząsteczek materii. Teraz wszystko staje się jasne! Ciepło jest energią kinetyczną chaotycznego ruchu cząsteczek (przekazywaną od ciała cieplejszego do zimniejszego), natomiast temperatura jest miarą średniej energii kinetycznej cząsteczki. Odpowiedź na pytanie, jaka jest natura ciepła formalnie udziela I zasada termodynamiki, stwierdzająca, że zmiana energii wewnętrznej układu termodynamicznego może być spowodowana wykonaniem pracy lub przekazem ciepła. Tak więc ciepło jest formą energii!

Mikroskopowy obraz podgrzewanej materii można zademonstrować w ciekawym doświadczeniu modelowym wyjaśniającym naturę rozszerzalności metali omawianej wcześniej. W uproszczonym ujęciu „atomowym” pręt metalowy jest szeregiem atomów rozłożonych w jednakowych odległościach wzdłuż pewnej prostej, co dobrze można zrealizować umieszczając w szklanej rurze ustawionej pionowo szereg piłeczek pingpongowych. Naturalne przypadkowe ruchy atomów można zrealizować umieszczając **piłeczki pingpongowe w rurze szklanej** na drgającej membranie głośnika zasilanego sygnałem losowym (szumem) o regulowanej mocy. Obserwujemy, że zwiększaniu mocy głośnika towarzyszy zwiększony ruch chaotyczny piłeczek (drgania) i jednocześnie zwiększenie ich efektywnej długości całkowitej. W ten sposób możemy zrozumieć, dlaczego metale się rozszerzają przy podgrzewaniu!

## 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) Świecek pod spiralą z folii metalowej
- 22) Wiatraczek w kloszu poruszany światłem



Stół z pokazami do wykładu *Natura ciepła*



Termometr Galileusza z pływającymi bańkami



Pileczki-rekwizyty do zamrażania w ciekłym azocie



Doświadczenie z wyrównywaniem się temperatury wody w dwóch zlewkach





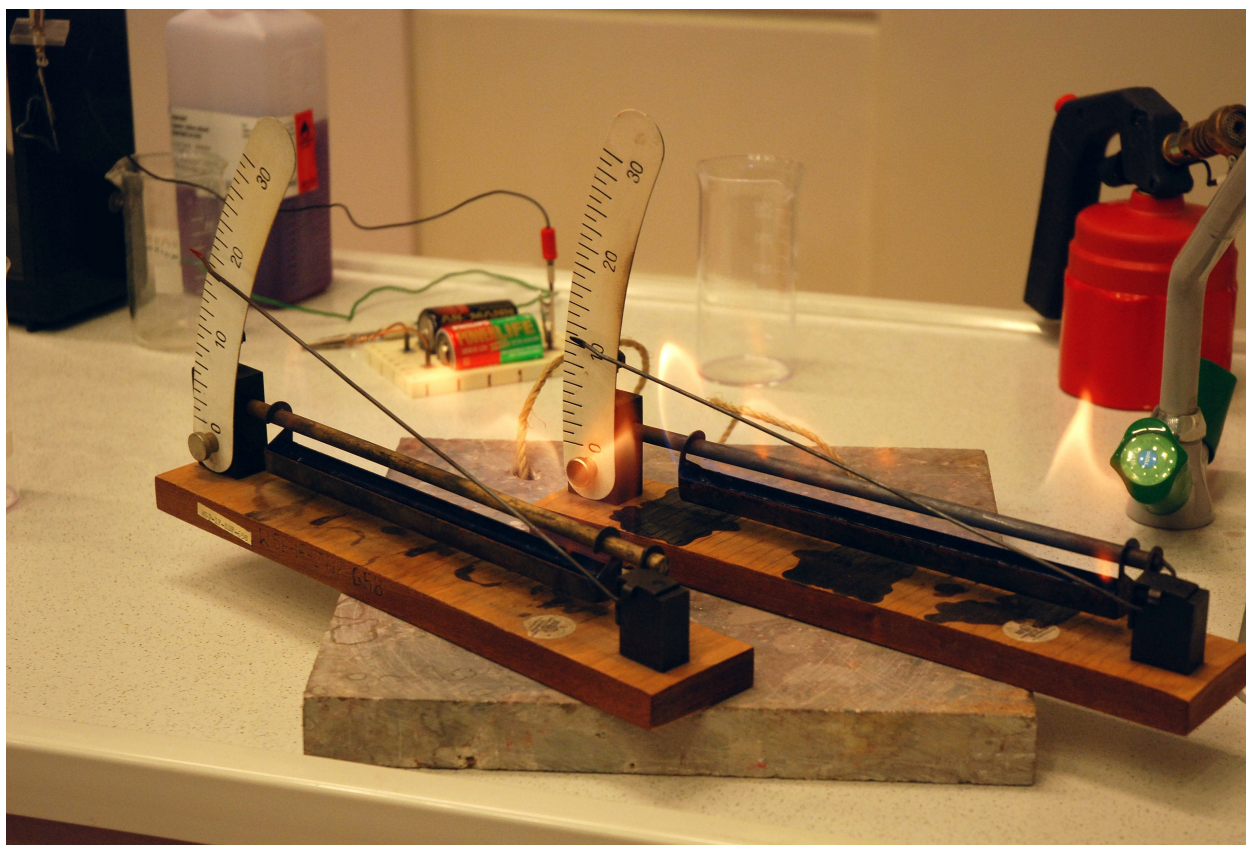
Wytwornica dymu



Strzelanie kółkami dymu z „papierosa”



Pierścień Gravesanda



Dylatometry z prętami mosiężnym i stalowym



Drgające piłeczki pingpongowe obrazujące rozszerzalność ciał stałych



Płonący eter w doświadczeniu obrazującym przemianę pracy w ciepło



Kolba z wiatraczkiem poruszany światłem



Ptaszek pijący wodę