Materiały do wykładu

Fizyka w doświadczeniach

Krzysztof Korona

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

2010 - 2026

Materiały do celów dydaktycznych przeznaczone dla studentów Uniwersytetu Warszawskiego,
Wykorzystanie ich w innych celach jest możliwe pod warunkiem uzyskania zgody autora.

II Ciepło i cząsteczki

Dział "Ciepło i cząsteczki" obejmuje zagadnienia, którymi zajmuje się termodynamika czyli nauka o cieple. Ciepło kryje się we wnętrzu materii zbudowanej z atomów. Pokażemy między innymi, jak przez rozważania nad ruchem poszczególnych atomów i cząsteczek, można dojść do praw opisujących zjawiska z życia codziennego.

Wykład 4. Temperatura i ciśnienie



Rys. 4.0 Zachód słońca nad morzem w Świnoujściu.

4.1 Wstęp

Podstawowymi wielkościami fizycznymi w termodynamice są temperatura i ciepło. Wielkości te są charakterystyczne dla otaczających nas stosunkowo dużych obiektów. Ciała takie złożone są z bardzo wielu atomów i cząsteczek. Składniki budowy materii są

niedostrzegalne gołym okiem, stąd mówimy, że są obiektami mikroskopowymi. W odróżnieniu od nich, duże przedmioty nazywamy 'makroskopowymi'.

Okazuje się, że w stosunku do pojedynczych atomów i cząsteczek nie można stosować pojęć temperatury i ciepła. Można jedynie mówić o ich energii. Każda cząsteczka może mieć inną energię. Przejście od świata atomów do normalnych, makroskopowych rozmiarów odbywa się przez uśrednianie pewnych wielkości fizycznych po ogromnej liczbie składników materii. Zajmuje się tym fizyka statystyczna.

Plan wykładu:

1. Wstęp
2. Co to jest temperatura?
3. Ciepło
4. Przemiany gazowe
5. Rozszerzalność cieplna
6. Podsumowanie

4.2 Co to jest temperatura?

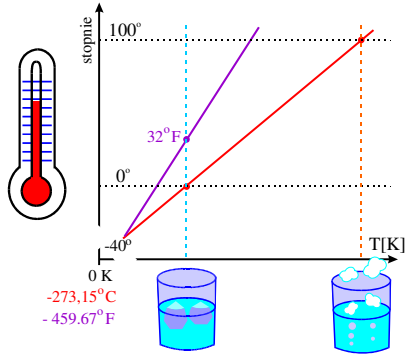
Temperatura jest jedną z najczęściej mierzonych i używanych w życiu codziennym wielkości fizycznych. Dobrze jest przecież wiedzieć przed wyjściem z domu, czy trzeba założyć czapkę, czy nie. Jednak nie każdy użytkownik termometru zna ścisłą definicję temperatury. Poniżej przedstawiam dwie z nich.

Definicja 1.

Temperatura to wielkość pokazywana przez termometr będący w stanie równowagi termodynamicznej z badanym ciałem.

Tak zdefiniowana temperatura może zależeć od sposobu ustalenia skali.

Skale temperatury (!)



Rys 4.1 Skale temperatury: Celsjusza i Fahrenheita

Aby móc określić temperaturę, wprowadzono różne skale temperatury. W Polsce najczęściej używana jest skala Celsjusza. Aby zdefiniować skalę, wystarczy podać dwa punkty. Dla skali **Celsjusza** podawano kiedyś:

1. Temperatura zamarzania wody = 0°C,
2. Temperatura wrzenia wody = 100°C.

Definicja współczesna jest trochę bardziej precyzyjna:
Punkt potrójny wody = 0,01°C, zmiana o 1°C odpowiada 1 K.
W takiej skali temperatura wrzenia wody pod ciśnieniem normalnym wynosi t = 99,97°C.

W krajach anglosaskich używa się skali **Fahrenheita,** (Gabriel Fahrenheit urodził się w 1686 w Gdańsku), którą zdefiniowano kiedyś w oparciu o dwa punkty:

1. Temperatura zamarzania mieszaniny H_2O:NH_4Cl = 0°F,
2. Temperatura wrzenia wody = 212°F.

Później skalę **Fahrenheita** zdefiniowano w oparciu o skalę Celsjusza:
t[°F] = 9/5 t[°C] + 32.

Podstawową skalą układu SI (używaną przez fizyków) jest bezwzględna skala temperatury mierzona w kelwinach, K. Skala ta zdefiniowana jest w oparciu o temperaturę zera bezwzględnego i wartość stałej Boltzmana k_B. Temperatura zera bezwzględnego to najniższa możliwa temperatura, a więc temperatura podawana w kelwinach nie może być ujemna.
Zgodnie z decyzją Conférence Générale des Poids et Mesures w układzie SI temperatura zdefiniowana jest (od 20 maja 2019) przez następujące parametry:

- Zero bezwzględne T = 0 K.
- 1 K odpowiada energii termicznej $k_B = 1{,}380649 \cdot 10^{-23}$ J/K.

W takiej skali temperatura punktu potrójnego wody wynosi 273,16 K.
Otrzymujemy zatem prosty przelicznik temperatury bezwzględnej, T, na skalę Celsjusza:

$$t[^{o}C] = T[K] + 273{,}15 \qquad (4.1)$$

Co to jest temperatura?

Odpowiedź pierwszą poznaliśmy:
Temperatura to jest to, co mierzy termometr.

Odpowiedź druga:
Temperatura jest pewną właściwością badanej materii. Temperatura jest określona niezależnie od tego, czy ją mierzymy, czy nie. Aby odkryć jakie właściwości materii opisuje temperatura, należy zbadać ruch atomów i cząsteczek.

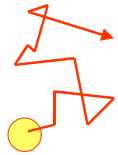
Ruchy Browna w mleku (!)

Przyrządy i materiały

- świeże mleko,
- mikroskop.

Przebieg doświadczenia

Kroplę mleka, nieco rozcieńczonego wodą, wkładamy pod mikroskop z powiększeniem 100 razy.
Staramy się zaobserwować cząsteczki tłuszczu.
Okazuje się, że cząsteczki tłuszczu drgają, a obserwacja prowadzona przez dłuższy czas pokazuje, że poruszają się w sposób chaotyczny.



Rys. 4.2 Ruch cząsteczek pod mikroskopem

Ruchy te nazywamy ruchami Browna. Powstają one na skutek uderzeń niewidocznych cząsteczek wody, w której są zanurzone obserwowane cząsteczki tłuszczu. Cząsteczki wody poruszają się nieustannie i znacznie szybciej niż cząsteczki tłuszczu.

Dla pojedynczego atomu lub cząsteczki nie można określić temperatury. Natomiast atomy mają określoną energię kinetyczną E_k. Średnia energia kinetyczna policzona dla wielu atomów $\langle E_k \rangle$ daje ich temperaturę. (Symbol $\langle x \rangle$ oznacza średnia wartość x.)

Definicja 2.

Temperatura jest miarą uśrednionej energii atomów (i cząsteczek).

Na przykład:
dla gazu 2-wymiarowego $T = \langle E_k \rangle / k_B$,
dla gazu 3-wymiarowego $T = {}^2/_3 \langle E_k \rangle / k_B$.
Równanie te są prawdziwe oczywiście tylko wtedy, gdy temperaturę liczymy w skali bezwzględnej (w kelwinach).P
Przedstawione powyżej związki pomiędzy energią kinetyczną a temperaturą zadane są przez stałą Boltzmana, zdefiniowaną w układzie SI jako wartość stała:
$k_B = 1{,}380649 \cdot 10^{-23}$ J/K,
w jednostkach mikroskopowych $k_B = 0{,}0861$ meV/K.

Energia termiczna atomów, k_BT, wyrażona w podstawowych jednostkach układu SI jest bardzo mała. W temperaturze pokojowej wynosi ok. $4 \cdot 10^{-21}$ J. Energię tę wygodniej jest podawać w jednostkach charakterystycznych dla cząstek elementarnych i atomów, czyli w elektronowoltach, eV. W temperaturze pokojowej energia termiczna wynosi około 25 meV.

4.3 Ciepło

Energia może być rozproszona w ciałach na wiele sposobów:
1. Energia kinetyczna ruchu postępowego (w kierunku x, y i z).
2. Energia kinetyczna ruchu obrotowego (ϕ i θ) - tylko cząsteczki.
3. Energia drgań (energia kinetyczna + energia sprężystości).
4. Energia elektronów (chemiczna) - o ile jest dostępna.
5. Inne...

Wszystkie te formy energii zsumowane razem dają energię wewnętrzną układu. Gdy energia ta przepływa, mówimy o **cieple**.

Ciepło (!)

Ciepło jest energią wewnętrzną przepływającą pomiędzy dwoma ciałami.

Jednostką energii jest dżul [J], więc **ciepło** też mierzymy w dżulach.
Ciepło mierzymy często w kaloriach. Obowiązuje następujący przelicznik:
1 cal = 4,1868 J.

Warto zapamiętać, że:
Jedna kaloria [cal] rozgrzewa 1 g wody o 1°C (= 1 K).
Jedna kcal rozgrzewa 1 kg (1 litr) wody o 1°C.

W jakiej temperaturze parzymy herbatę?

Przyrządy i materiały
- czajnik,
- kubki, szklanki, filiżanki,
- termometr,

Przebieg doświadczenia

Do różnych naczyń wlewamy wrzątek i mieszamy przez minutę, a następnie sprawdzamy temperaturę termometrem. Można przy okazji wrzucić torebkę herbaty i cukier, aby otrzymać gotowy napój i nie mieszać "na próżno".

Obserwujemy, że w różnych naczyniach temperatura spada o różną wartość. Najmniej spadnie w cienkościennym metalowym kubku, najwięcej w masywnych, szklanych lub fajansowych. Wiąże się to z przejmowaniem ciepła przez ścianki naczynia. Ścianki te mają pojemność cieplną, która jest proporcjonalna do ich masy oraz ciepła właściwego.

Metale mają mniejszą pojemność cieplną w porównaniu ze szkłem. Woda natomiast ma dużą pojemność cieplną.

Ile ciepła mieści się w materii?

Ciepło właściwe jest różne dla różnych substancji.

Jedna kaloria [cal] rozgrzewa 1 g wody o 1°C, z czego wnioskujemy, że:

1 gram wody magazynuje 1 kalorię na 1°C (= na 1 K).

Mówimy, że **pojemność cieplna 1 g** wody, czyli jej **ciepło właściwe** wody wynosi, **c** = 1 cal/(g·K)

Znając ciepło właściwe, możemy obliczyć ilość zgromadzonego ciepła, Q, na podstawie wzoru:

$$Q = c\, m\Delta T, \qquad (4.2)$$

gdzie: ΔT – różnica temperatur powstała dzięki zgromadzeniu ciepła.

Tabela 4.1 Ciepło właściwe różnych substancji
c_V – ciepło właściwe przy stałej objętości, c_M – ciepło molowe, R - stała gazowa = 8,314 J/(mol·K).

Substancja	c_V [J/(g·K)]	c_M [J/(mol·K)]	c_M/R
hel, He	3,116	12,46	1,50
ksenon, Xe	0,158	12,47	1,50
azot, N_2	0,742	20,80	2,50
dwutlenek węgla, CO_2	0,653	28,70	3,45
woda, H_2O	4,19	75,20	9,04
ołów, Pb	0,12	24,90	2,99
miedź, Cu	0,397	25,24	3,04
złoto, Au	0,129	26,70	3,21

Ciepło molowe to ciepło potrzebne do ogrzania 1 mola danej substancji o 1 K. Mol to dokładnie $N_A = 6{,}02214076 \cdot 10^{23}$ cząsteczek (N_A nazywamy liczbą Avogadra).

Podana w trzeciej kolumnie wielkość odniesienia R, to stała gazowa. Wiąże się ona z poznaną już stałą Boltzmana:

$$R = k_B N_A. \qquad (4.3)$$

Z trzeciej kolumny tabeli 4.1 widać, że ciepło molowe jest wielokrotnością wielkości R/2.

Czyli, aby ogrzać o 1 stopień 1 mol helu lub ksenonu potrzeba 3·R/2, a na 1 mol azotu (N_2) potrzeba 5·R/2 ciepła.

Po podzieleniu przez liczbę cząsteczek w molu, N_A, zauważymy, że średnia energia przypadająca na cząsteczkę (lub atom) jest wielokrotnością $k_B/2$. Wiąże się to z zasadą ekwipartycji energii.

Zasada ekwipartycji energii:

Na każdy stopień swobody układu przypada energia $E = 1/2\, k_B T$.

Przykłady:

1. Gazy 1-atomowe:

Posiadają energię kinetyczną ruchu postępowego. Ruch może odbywać się w trzech kierunkach: x, y i z. Otrzymujemy zatem wynik: $E = \frac{3}{2} k_B / \text{atom}$. Zgadza się to z danymi dla gazów jednoatomowych He i Xe.

2. Gazy o wielo-atomowych cząsteczkach mają dodatkowo energię związaną z ruchem obrotowym.

Energia kinetyczna ruchu obrotowego wiąże się z dodatkowymi dwoma stopniami swobody, katami φ i θ. Otrzymujemy zatem wynik: $E = \frac{5}{2} k_B / \text{atom}$. Zgadza się to z danymi dla dwuatomowego azotu N_2.

3. Gazy ze "sprężystymi" cząsteczkami i kryształy:

Energia drgań ma 6 stopni swobody:

3 stopnie to energia kinetyczna (v_x,v_y,v_z),

+ 3 stopnie od energii sprężystości (x,y,z).

Otrzymujemy zatem wynik: $E = 3k_B / \text{atom}$. Wynik ten odpowiada wartościom z tabeli 4.1 dla Pb, Cu i Au.

Transport ciepła

Ciepło może przepływać za pomocą różnych zjawisk, przy czym najważniejsze to: przewodzenie ciepła, konwekcja i promieniowanie.

Transport ciepła przez konwekcję

Konwekcja unosi ciepło razem z materią. Polega na przepływie materii, która odbiera ciepło z ciepłego źródła i przenosi do miejsc chłodniejszych.

Konwekcja jest bardzo efektywna w garnku z zupą, ale potrafi też

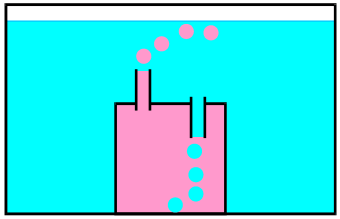
przenosić ciepło na duże odległości. Przykładem mogą być prądy morskie lub konwekcja we wnętrzu Ziemi.

Dym z komina (konwekcja)

Przyrządy i materiały

- akwarium, wiadro lub inny duży pojemnik na wodę,
- słoik z metalową zakrętką,
- słomki do picia lub inne rurki,
- klej wodoodporny lub plastelina.

Przebieg doświadczenia



Rys. 4.3 Słoik z kominem

W zakrętce od słoika robimy dwie dziurki i wklejamy w nie dwie rurki: jedną skierowana do góry, drugą do dołu. Połączenie rurek z pokrywką powinno być szczelne. Do słoika wlewamy trochę barwnika (np. nieco atramentu, torebkę herbaty itp.) i zalewamy do pełna gorącą wodą.

Następnie słoik wstawiamy do dużego naczynia z zimną wodą. Zimna woda ma większy ciężar właściwy od ciepłej i wpływa do słoika przez rurkę skierowaną w dół. Natomiast ciepła woda ze słoika unosi się do góry i wypływa przez komin, czyli rurkę skierowana do góry. Wypływająca, zabarwiona woda wygląda, jak dym unoszący się z komina. W obu przypadkach: wody i dymu, mamy do czynienia z

konwekcją.

Do wytworzenia konwekcji potrzebna jest ciecz lub gaz, pole grawitacyjne i różnica temperatur.

Transport ciepła przez przewodnictwo

Transport ciepła przez przewodzenie nie wymaga ruchu materii. Do tego rodzaju transportu potrzebna jest różnica temperatur i ośrodek przewodzący.

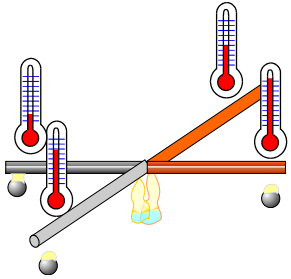
Najlepszymi przewodnikami ciepła są metale. Dotykając metalu odczuwamy zimno. Dzieje się tak dlatego, że metal szybko odprowadza ciepło z naszego ciała.

Transport ciepła w metalowych pręta (!)

Przyrządy i materiały

- metalowe pręty wykonane z miedzi, mosiądzu, aluminium, stali i innych metali, połączone razem w środku,
- ciężarki (nakrętki, kulki stalowe),
- wosk,
- palnik.

Przebieg doświadczenia



Rys. 4.4 Rozgrzewanie prętów

Do końca każdego metalowego pręta przyklejamy woskiem ciężarek. Następnie grzejemy palnikiem metalowy krążek, do którego przymocowane są pręty.

Obserwujemy, jak w miarę ogrzewania układu prętów wosk zaczyna się topić. Stopiony wosk przestaje trzymać i ciężarki odpadają. Wosk topi się z różnym opóźnieniem w zależności od materiału z jakiego zrobione są pręty. Najszybciej ulega stopienie wosk na pręcie miedzianym, potem na aluminiowym. Najwięcej czasu potrzeba, aby ciepło dopłynęło do ciężarka przyklejonego do stalowego pręta.

Współczynnik przewodnictwa cieplnego, λ, wynosi dla miedzi 400 W/Km, a dla stali 50 W/Km.

Eksperyment ten uświadamia nam także, że ciepło potrzebuje czasu, aby dopłynąć do określonego miejsca.

Do transportu ciepła przez konwekcję i przewodnictwo potrzebna jest materia. Z tej przyczyny próżnia jest bardzo dobrym izolatorem cieplnym.

Obserwujemy gasnąca żarówkę. Dlaczego umieszczony w próżni drucik żarówki tak szybko stygnie? - Dzięki promieniowaniu.

Transport ciepła przez promieniowanie (!)

Wszystkie ciała promieniują, a promieniowanie to niesie ciepło. Wystarczy zatem, aby ciało nie było zasłonięte, a nastąpi wypromieniowanie ciepła. Należy pamiętać też, że każde ciało pochłania ciepło. Aby wystąpił efektywny transport ciepła przez promieniowanie między dwoma ciałami, muszą mieć one różne temperatury. Do emisji promieniowania nie jest niezbędna wysoka temperatura, ale do transportu ciepła od jednego ciała do drugiego jest potrzebna różnica temperatur.

Piecyk o różnych barwach:

Przy pomocy czułego termometru (termostos, czujnik podczerwieni) mierzymy energię wypromieniowaną przez rozgrzany piecyk. Piecyk ma dwie ścianki pomalowane na czarno i dwie srebrne.



Rys. 4.5 Srebrno-czarny piecyk

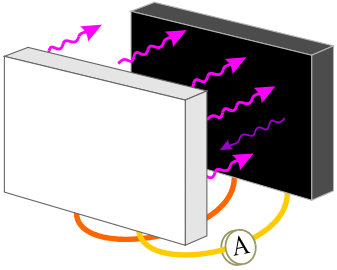
Która strona lepiej promieniuje?

Okazuje się, że czarne ścianki lepiej promieniują niż jasne.

Czyż nie jest paradoksem, że im ciemniejsze ciało tym jaśniej świeci?

Niewątpliwie ciała mają ciemną barwę wtedy, gdy odbijają mało światła. Ciemna barwa oznacza zatem wysoką absorpcję. Dlaczego jednak ciała, które silniej pochłaniają światło również silniej je emitują?

Wyobraźmy sobie, że byłoby na odwrót jasne ciała świeciłyby lepiej.



Rys. 4.6 Świetlne perpetuum mobile

Wtedy dwa ciała: jasne i ciemne umieszczone w próżni (izolacja

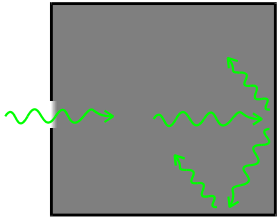
termiczna) wymieniałyby się ciepłem szybciej w jedną stronę, od jasnego do ciemnego. Promieniowanie i absorpcja od ciała ciemnego do jasnego byłyby słabsze. Po jakimś czasie jasne ciało ostygłoby, a ciemne ogrzałoby się. Jeżeli odłączylibyśmy do takich ciał termoparę, to otrzymalibyśmy prąd, a wiec energię. Układ taki wytwarzałby energię z niczego.

Aby zasada zachowania energii nie była naruszana, prawdopodobieństwo emisji promieniowania musi być proporcjonalne do prawdopodobieństwa absorpcji. Oznacza to, że ciała ciemniejsze muszą też lepiej promieniować.

Transport ciepła ze Słońca przez promieniowanie jest źródłem energii dla całej biosfery. Obecnie ludzie wykorzystują część tej energii budując elektrownie słoneczne. Oblicza się, że aby zaspokoić obecne potrzeby ludzkości wystarczyłoby przetworzyć 2% energii słonecznej z obszaru pustyń.

Ciało doskonale czarne

Wzorcem zdolności promieniowania jest ciało doskonale czarne, czyli takie, które pochłania wszystkie padające fotony.



Rys. 4.7 Model ciała doskonale czarnego

Model ciała doskonale czarnego możemy zbudować, na przykład, w

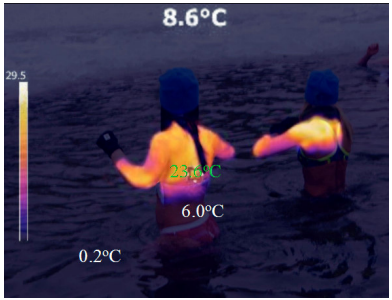
postaci pudełka z dziurą. Światło, które wleci przez otwór będzie odbijało się we wnętrzu pudełka dopóki nie zostanie zaabsorbowane.

Promieniowanie ciała doskonale czarnego

Długość fali, λ_{max}, odpowiadającą maksimum natężenia świecenia ciała o temperaturze T, określa prawo Wiena.

$$\lambda_{max} = {}^{b}/_{T}\,, \qquad (4.4)$$

gdzie: b = 2900 μm K.



Rys. 4.8 Ludzie kapiący się w przerębli, zdjęcie zrobione kamerą na podczerwień w zakresie fal 10 - 14 μm.

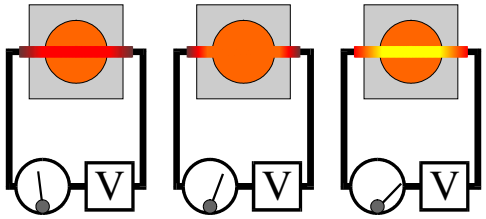
Zgodnie z prawem Wiena, ciało o temperaturze 37°C świeci falami mającymi maksimum dla 9,4 μm, co odpowiada częstości 32 THz i energii fotonów 132 meV. Zatem obserwując ludzi przy pomocy kamery podczerwonej będziemy widzieli, że świecą. Na rysunku 4.8 można zaobserwować, że woda, lód i części ciała, które były zanurzone w wodzie, mające temperaturę koło 0°C, nie świecą. Natomiast rozgrzane części ciała wyraźnie emitują podczerwień.

Pomiar temperatury przez pomiar promieniowania (!)

Znając właściwości związane ze świeceniem ciał, możemy wykorzystać je do pomiaru temperatury na odległość.

Termometr na podczerwień.

Do wyznaczenia temperatury możemy wykorzystać pomiar natężenia promieniowania. W ten sposób działają najprostsze termometry wyposażone w detektory promieniowania podczerwonego.



Rys. 4.9 Pirometr. Na lewym i prawy rysunku drut na odpowiednio za niższą i wyższą temperaturę od temperatury badanego ciała. Na środkowym rysunku temperatura jest dobrze dobrana.

Dokładniejszy pomiar wymaga określenia długości fali promieniowania i wyznaczenia temperatury za pomocą prawa Wiena. W ten sposób działa pirometr (rys. 4.9).

W pirometrze porównuje się barwę badanego ciała z barwą rozgrzanego drutu (lub innego elementu), którego temperaturę możemy regulować i mierzyć np. przez pomiar oporu.

4.4 Przemiany gazowe

Zamiana pracy na ciepło

Jeżeli wykonujemy jakąś pracę, której efekty nie są w widoczny sposób gromadzone w postaci energii (potencjalnej, kinetycznej itp), to musimy poszukać straconej energii mierząc temperaturę. Na przykład, gdy kując metal młotkiem, albo kręcąc korbą, która napotyka duży opór na osi, podłączymy termoparę, to zaobserwujemy wzrost temperatury. Kując lub kręcąc korbą wykonaliśmy pracę. Obserwacja temperatury pokazuje, że otrzymaliśmy ciepło. Doświadczenie to dowodzi, że pracę można zamienić na ciepło.

Na podstawie tego typu eksperymentów sformułowana została pierwsza zasada termodynamiki.

I zasada termodynamiki

Zmiana energii wewnętrznej układu jest równa energii wymienionej na sposób pracy i ciepła.

Najprostszym do zrozumienia obiektem badań termodynamiki jest gaz. Gaz idealny (w założeniu) składa się z cząsteczek, które oddziałują ze sobą tylko w momencie zderzenia. Gaz jest jednorodny i można go opisać używając niewielu parametrów: temperatury, objętości, ciśnienia itd. Wzajemne zależności pomiędzy parametrami obserwujemy w trakcie przemian gazowych, czyli ściskania gazu, podgrzewania itp.

W celu ułatwienia analizy zjawisk termicznych w gazie, opisujemy je przy pomocy takich przemian gazowych, w których pewne parametry uznajemy za stałe, a zmiany pozostałych obserwujemy. Na przykład:

Przemiana izobaryczna (p = const) to zmiana temperatury i objętości przy stałym ciśnieniu.

Schładzanie balonika azotem (!)

Przyrządy i materiały

- balon, najlepiej wypełniony helem,
- ciekły azot.

Przebieg doświadczenia

Balon napełniamy gazem, a następnie polewany ciekłym azotem. Widać, że balon kurczy się, czyli kurczy się gaz w środku balonika. Azot wrze w temperaturze 77 K, a więc 4 razy niższej od pokojowej. W przypadku balonu wypełnionego gazem idealnym, na przykład, helem objętość zmniejsza się około 4 razy. Jeżeli balon wypełniony jest powietrzem, to może się ono skroplić i objętość balonu spadnie jeszcze bardziej.

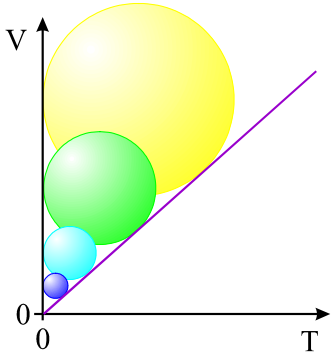
Gdy przestaniemy polewać balonik azotem, to gaz zwiększy swoją objętość i balon z powrotem stanie się okrągły.

Ciśnienie gazu w trakcie schładzania i ogrzewania jest praktycznie stałe i równe ciśnieniu atmosferycznemu. Zatem możemy przyjąć, że jest to przemiana izobaryczna, opisana prawem Guy-Lusaca.

Prawo Guy-Lussaca:

W warunkach stałego ciśnienia objętość gazu jest proporcjonalna do temperatury.

$$V = T \cdot \text{const.} \qquad (4.5)$$



Rys. 4.10 Zależność V = T·const,

Prawo to pozwala nam i wymaga od nas, aby wprowadzić bezwzględną skalę temperatury.

Jeżeli bowiem objętość jest liniową funkcją temperatury, to istnieje taka temperatura, przy której objętość spada do zera. Temperaturę tę uznajemy za zero bezwzględne. Ponieważ objętość nie może być mniejsza od zera, więc nie może też istnieć temperatura mniejsza od zera bezwzględnego.

W skali Kelwina, T = 0 K, jest zatem temperaturą odniesienia.

Aby zdefiniować całą skalę potrzebujemy znać wielkość stopnia. Wartość ta została określona dzięki zdefiniowaniu stałej Boltzmanna k_B w 2019 roku przez XXVI Generalną Konferencję Miar.

Jeden kelwin, to temperatura, w której energia termiczna wynosi $k_B = 1{,}380649 \cdot 10^{-23}$ J,

Temperatura punktu potrójnego wody nadal wynosi około 273,16 K, ale nie jest już punktem definiującym skalę.

Balon z worka na śmieci

Przyrządy i materiały

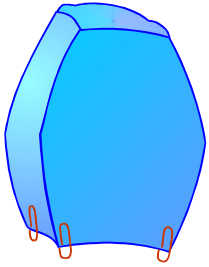
- worek na śmieci, cienki
- 4 spinacze biurowe,
- świeczki, 5 – 7 sztuk

Przebieg doświadczenia

Worek foliowy obciążamy spinaczami na brzegach. Zapalamy

świeczki i napełniamy balon rozgrzanym powietrzem. Należy uważać, aby folia nie zaczęła się topić.

Gdy ogrzewamy powietrze wewnątrz balonu przy stałym ciśnieniu, zwiększamy jego objętość, a więc cześć powietrza ucieka. Balon będzie zatem lżejszy o wagę powietrza, które uciekło. Ciężar balonu z ciepłym powietrzem będzie mniejszy od siły wyporu i balon uniesie się w górę.



Rys. 4.11 Balon z worka

Dane dla balonu z wykładu:
Ciężar worka = 4,6 G,
ciężar 4 spinaczy = 1,6 G,
razem Q_S = 6,2 G.
Pojemność worka = 35 *l*.

Ciężar powietrza w worku w temperaturze pokojowej, T = 300 K, wynosi Q_0 = 42 G.

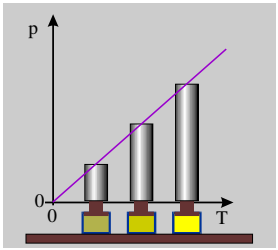
Pomiar temperatury wykazuje, że balon unosi się, gdy temperatura powietrza w środku osiągnie około 100°C. Ciężar powietrza w worku w wyższej temperaturze:

100°C = 373 K z prawa Guy-Lussaca obliczmy:

$Q_1 = 42\text{G} \cdot 300\text{ K}/373\text{K} = 33{,}8$ G,

A więc balon będzie lżejszy o ΔQ = 42 G – 33,8 G = 8,2 G, co wystarczy, aby się uniósł.

Przemiana izochoryczna



Rys. 4.12 Zależność ciśnienia od temperatury

Przemiana izochoryczna polega na zmianie ciśnienia i temperatury gazu (mogącego wymieniać ciepło z otoczeniem) **przy stałej objętości**. Zaobserwowano, że gaz (w zakresie, w którym może być uważany za idealny) zmienia swoje ciśnienie proporcjonalnie do temperatury liczonej w skali bezwzględnej. Oznacza to, że w temperaturze 0 K gaz doskonały miałby zerowe ciśnienie. A w ujemnej temperaturze musiałby mieć ujemne ciśnienie. Ponieważ ciśnienie musi być większe od zera, wnioskujemy, że temperatura liczona w skali bezwzględnej też musi być większa od zera. Wnioskowanie to jest podobne, jak w przypadku przemiany izobarycznej.

Przemiana izochoryczna opisana jest przez:

Prawo Charlesa

Przy stałej objętości (w zamkniętym naczyniu) ciśnienie gazu jest proporcjonalne do temperatury.

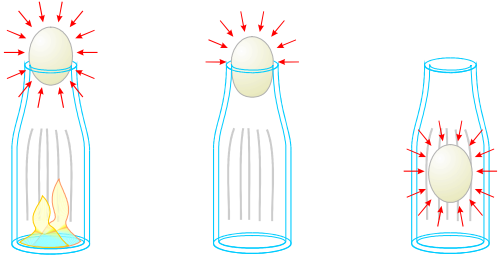
$$p = T \cdot const. \qquad (4.6)$$

Wciąganie jajka do butelki (!)

Przyrządy i materiały

- butelka szklana z szyjką o średnicy ok. 4 cm (np. po mleku),
- jajko,
- denaturat, papier lub inny łatwopalny materiał.

Przebieg doświadczenia



Rys. 4.13 Wciąganie jajka do butelki

Ciśnienie atmosferyczne działa na każde ciało. Ciśnienie to jest duże i wynosi 1 kG/cm^2. Jajko ma powierzchnię ok. 70 cm^2, więc działa na nie siła około 70 kG (waga człowieka). Dopóki ciśnienie działa na jajko równomiernie, nic się nie dzieje.

Płomień rozgrzewa powietrze znajdujące się w butelce, które zwiększa swoją objętość (przemiana izobaryczna) i ucieka z butelki.

Po ostygnięciu, powietrze kurczy się, ale nie może wrócić do butelki, bo jajko działa jak korek. Na skutek przemiany izochorycznej (objętość gazu jest stała) ciśnienie powietrza wewnątrz butelki spada.

Jajo ściskane jest pełnym ciśnieniem atmosferycznym tylko w górnej części, w dolnej nie znajduje podparcia, więc jest wpychane do butelki.

Obraz mikroskopowy ciśnienia

Skąd się bierze ciśnienie gazu?

Atomy nie mają ciśnienia, a jedynie pęd, *p*. Ciśnienie powstaje jako efekt uderzeń wielu cząsteczek. Otrzymujemy je jako sumaryczną zmianę pędu policzoną dla atomów odbijających się od ścianki w jednostce czasu.

Siła jest równa zmianie pędu w jednostce czasu $\Delta p = F/\Delta t$.

Pęd zależy od liczby, N, masy, m, i prędkości, v, uderzających cząsteczek: $\Delta p = 2v \cdot N \cdot m$.

Liczba cząsteczek dobiegających do ściany w czasie, Δt, zależy od ich liczby w naczyniu, n, rozmiarów naczynia, *l*, i prędkości: $N = n \cdot v \cdot \Delta t/2l$.

Ciśnienie, p, to siła działająca na jednostkę powierzchni *S*:

$$p = \frac{\Delta p}{\Delta t \cdot S} = \frac{v^2 nm}{S \cdot l} = 2n < E_k > \propto E_{kS} \propto RT \qquad (4.7)$$

Otrzymujemy zatem wynik, że ciśnienie jest proporcjonalne do temperatury, co jest zgodne z prawem Charlesa.

Obraz mikroskopowy i makroskopowy

W skali makroskopowej mierzymy temperaturę i ciśnienie.

W skali mikroskopowej atomy nie mają temperatury, a jedynie energię. Atomy nie mają też ciśnienia, a jedynie pęd.

Temperatura jest miarą uśrednionej energii cząsteczek. Ciśnienie powstaje jako efekt uderzeń wielu cząsteczek wymieniających pęd ze ściankami naczynia.

Przejście od **skali mikroskopowej** do **makroskopowej** odbywa się przez uśrednianie pewnych wielkości fizycznych po ogromnej liczbie cząsteczek. Przejściem tym zajmuje się **fizyka statystyczna.**

Uśrednianie jest bardzo efektywne, bo nawet najmniejsze obiekty

makroskopowe składają się z bardzo wielu atomów:

- tranzystor w procesorze - 3 mln atomów.
- wirus grypy – około 100 mld atomów,
- kółko z ręcznego zegarka 10^{19} atomów.

Przemiana izotermiczna (T = const)

Przemiana izotermiczna polega na zmianie ciśnienia i objętości gazu (mogącego wymieniać ciepło z otoczeniem) przy stałej temperaturze.

Prawo Boyle'a-Mariotte'a:

Przy stałej temperaturze iloczyn ciśnienia i objętości gazu jest stały.

$$p \cdot V = \text{const} \qquad (4.8)$$

Warunek wymiany ciepła z otoczeniem jest istotny, gdyż inaczej ściskany gaz ogrzewa się. Gaz jednak bardzo chętnie wymienia ciepło z otoczeniem, więc wystarczy, że eksperyment przeprowadzimy powoli, a temperatura gazu będzie stała.

Ciśnienie w strzykawce (!)

Przyrządy i materiały

-strzykawka
-ciśnieniomierz

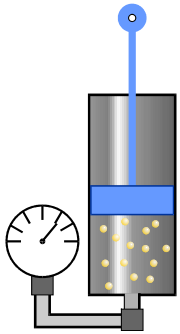
Przebieg doświadczenia

Strzykawkę ustawiamy w 2/3 objętości i łączymy z ciśnieniomierzem.

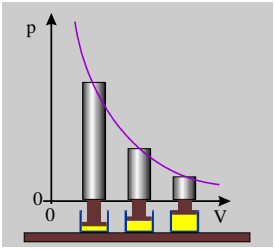
Naciskamy na tłok lub ciągniemy go z kontrolowaną siłą.

Mierzymy zależność pomiędzy objętością zamkniętej części strzykawki, a wskazaniami ciśnieniomierza.

Sprawdzamy zgodność z prawem Boyle'a-Mariotte'a.



Rys. 4.14 pomiar zależność ciśnienia od temperatury



Rys. 4.15 Zależność ciśnienia od temperatury w przemianie izotermicznej

Zapoznaliśmy się z trzema prawami wiążącymi objętość, ciśnienie i temperaturę gazu:

T = const $\Rightarrow$ p·V = const

p = const $\Rightarrow$ V = T·const

V = const $\Rightarrow$ p = T·const

Podsumowaniem tych praw jest równanie stanu gazu doskonałego łączące te trzy zależności w jednym równaniu.

Równanie stanu gazu doskonałego (!)

Równanie stanu gazu doskonałego podane zostało przez Benoît P. É. Clapeyrona w 1834 r. stąd zwane jest również równaniem Clapeyrona.

Równanie to łączy trzy parametry gazu: temperaturę T, ciśnienie p i objętość V z ilością gazu mierzoną liczbą moli lub cząsteczek.

$$p\,V = n\,R\,T, \qquad (4.9)$$

gdzie: n - liczba moli gazu, R - stała gazowa:

$$p\,V = N\,k_B\,T, \qquad (4.10)$$

gdzie: N - liczba cząsteczek gazu, k_B - stała Boltzmana.

Jak łatwo zauważyć, z powyższych równań można od razu wyprowadzić równania opisujące przemiany izotermiczną, izochoryczną i izobaryczną.

4.5 Rozszerzalność cieplna

Rozszerzający się pod wpływem ogrzewania gaz zmienia swoją objętość zgodnie z prawem Guy-Lussaca (4.5), a więc w temperaturze pokojowej (około 300 K) objętość rośnie o 1/300 na każdy stopień.

Dla wąskiego zakresu temperatur, możemy powiedzieć, że objętość, V, w przybliżeniu zmienia się proporcjonalnie do zmian temperatury $\Delta V = \beta\,\Delta T$.

Parametr β (równy tutaj 0,33%) nazywamy współczynnikiem rozszerzalności objętościowej.

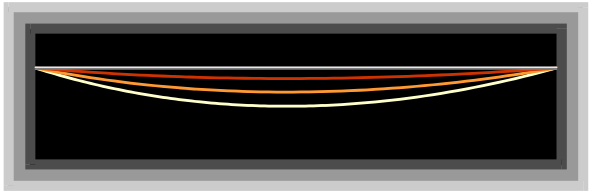
Często łatwiej jest nam mierzyć długość ciała, *l*, niż jego objętość

Zmiana długości, Δl, również powinna być proporcjonalna do zmiany temperatury, ΔT:

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l \qquad (4.11)$$

gdzie α - współczynniki rozszerzalności liniowej.

Na wykładzie rozszerzalność liniową demonstrujemy na przykładzie drutu, przez który przepuszczany jest prąd (rys. 4.16).



Rys. 4.16 Pod wpływem ciepła drut wydłuża się i opada.

Drut rozgrzewa się, co widać po zmianie jego barwy. Rozgrzany do wysokiej temperatury drut wydłuża się i opada.

Współczynnik rozszerzalności liniowej (dla jednego wymiaru) wiąże się ze współczynnikiem rozszerzalności objętościowej (dla trzech wymiarów):

$$\beta = 3\alpha. \qquad (4.12)$$

Różne substancje rozszerzają się z różną prędkością. W temperaturze pokojowej t = 20°C, czyli T = 293 K, aby dane ciało wydłużyć o 1% (lub zwiększyć objętość o 3%), trzeba ogrzać je do temperatury:

gazy:	$\alpha = 1{,}14 \cdot 10^{-3}$/K,	29°C,
woda:	$\alpha = 0{,}07 \cdot 10^{-3}$/K,	80°C,
stal:	$\alpha = 0{,}012 \cdot 10^{-3}$/K,	1100°C,
kwarc:	$\alpha = 0{,}0003 \cdot 10^{-3}$/K,	30000°C (> t topnienia)

Jak widać z powyższego zestawienia, współczynniki rozszerzalności są największe dla gazów, a najmniejsze dla ciał stałych.

4.6 Podsumowanie

1. Temperatura jest miarą uśrednionej energii atomów.
   Fizycy temperaturę mierzą w skali bezwzględnej:
   zero bezwzględne = 0 K.
   T = 0 K → t = -273,15°C.
   T := 1 K - energia termiczna wynosi $k_B = 1{,}380649 \cdot 10^{-23}$J

2. Ciepło jest energią, a ściślej ciepło jest energią wewnętrzną przepływającą pomiędzy dwoma ciałami.

3. Najjaśniej świecą ciała doskonale czarne, a więc takie, które pochłaniają całe padające na nie światło.
   Temperaturę można mierzyć przez promieniowanie posługując się prawem Wiena: $\lambda_{max} = b/T$.

4. Pracę można zamienić na ciepło.
   I zasada termodynamiki:
   Zmiana energii wewnętrznej układu jest równa energii wymienionej na sposób pracy i ciepła.

5. Prawa rządzące przemianami gazowymi.
   Boyle'a-Mariotte'a T = const $\Rightarrow p \cdot V$ = const,
   Guy-Lussaca p = const $\Rightarrow V = T \cdot$const,
   Charlesa V = const $\Rightarrow p = T \cdot$const.
   Parametry gazów opisuje równanie stanu gazu doskonałego (równanie Clapeyrona):
   $$p V = N k_B T,$$
   $$p V = n R T.$$

6. Współczynniki rozszerzalności są największe dla gazów, a najmniejsze dla ciał stałych.