Mikroskopowa i makroskopowa teoria gazów i cieczy

Zadania do ćwiczeń (J. Matulewski), wersja z dnia 10 października 2002
Najnowsza wersja dostępna w sieci: http://www.phys.uni.torun.pl/~jacek/dydaktyka/fizyka2.pdf

Stałe fizyczne

Ciśnienie atmosferyczne:	$p_0 \approx 10^5$ Pa
Gęstość powietrza (t = 20°C):	$\rho_0 \approx 1.2$ kg/m^3
Gęstość wody:	$\rho_W \approx 10^3$ kg/m^3
Gęstość rtęci:	$\rho_{Hg} = 13.6 \cdot 10^3$ kg/m^3
Masa atomu wodoru:	$m_H = 1.67 \cdot 10^{-27}$ kg
Stała Boltzmana:	$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K
Liczba Avogadro:	$N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$
Stała gazowa:	R = 8.3144 J/K
Słońce	
promień	$R = 6.96 \cdot 10^8$ m
masa	$M = 2 \cdot 10^{30}$ kg

I. Hydrostatyka

1. Wyprowadzić prawo Pascala dla cieczy ważkiej.
2. Samochód podnoszony jest za pomocą windy hydraulicznej, która składa się z dwóch tłoków połączonych rurą. Duży tłok (na którym znajduje się samochód) ma średnicę 1m, a mały średnicę 10 cm.
   a) Jeżeli ciężar samochodu wynosi Q to z jaką minimalną siłą (w procentach ciężaru) należy zadziałać na mniejszy tłok, aby go unieść?
   b) O ile uniesie się samochód, jeżeli przesuniemy mały tłok o 1m?
   c) Obliczyć pracę wykonaną przez każdy z tłoków. Czy z punktu widzenia zasady zachowania energii ich wartości mogą się różnić?
3. Obliczyć ciśnienie na powierzchni Ziemi p_0 przyjmując, że wysokość atmosfery równa jest 30 km, a stała gęstość powietrza równa jest połowie prawdziwej gęstości na powierzchni Ziemi (tj. połowa z 1.2 kg/m^3)? Zaniedbać zmianę przyspieszenia Ziemskiego $g = const(h) = 10$ m/s^2. Założyć stałą gęstość atmosfery równą połowie gęstości na powierzchni Ziemi.
4. Obliczyć ciśnienie na powierzchni Ziemi przyjmując, że gęstość maleje liniowo z wysokością. (Wykorzystać różniczkową postać prawa Pascala.)
5. Obliczyć wysokość słupka cieczy w barometrze rtęciowym odpowiadającą ciśnieniu normalnemu. Ile wynosiłaby gdyby rtęć zastąpić wodą? Ile wynosiłaby wysokość słupka rtęci, jeżeli pionowa rurka nie byłaby zasklepiona? Gęstość rtęci to $13.6 \cdot 10^3$ kg/m^3.
6. Korzystając z prawa Pascala wyprowadzić prawo Archimedesa.
7. Jaki ciężar jest w stanie unieść balon na gorące powietrze jeżeli przy ogrzaniu gęstość powietrza zmalała do 75%? Średnica balonu równa jest 10 m.
8. W 1654 roku burmistrz Magdeburga Otto von Guericke, wynalazca pompy próżniowej, zademonstrował jak dwa ośmiokonne zaprzęgi nie mogły rozerwać dwóch odpompowanych z powietrza półkul mosiężnych. Pokazać, że siła F przyłożona do każdej z półkul potrzebna do ich rozerwania wynosi $F = \pi R^2 \Delta p$, gdzie $\Delta p = p_{zew} - p_{wew} = p_0 - 0.1 p_0$.
   (Halliday, Resnick, *Fizyka* tom 1, zadanie 3 z rozdziału 17)
9. Naczynia połączone:
   a) korzystając z prawa Pascala pokazać, że dla cieczy jednorodnej w u-rurce oba ramiona naczynia będą napełnione wodą do tej samej wysokości.
   b) do u-rurki napełnionej wodą wlano pewną ilość rtęci. Jaka jest różnica poziomów w obu ramionach naczynia? Jak zależy ona od ilości wlanej rtęci (wysokości utworzonego przez nią słupka)?

II. Równanie stanu gazu doskonałego

1. Obliczyć ciśnienie wywierane na ściany naczynia przez N elastycznych kulek o masie m i znanej średniej prędkości kwadratowej $\langle v^2 \rangle$. Wyprowadzić równanie stanu $pV = NkT$ jeżeli $\langle E_{kin} \rangle = m\langle v^2 \rangle / 2 = 3kT/2$. Sprawdzić wymiar stałej Boltzmana k.
2. Zakładając, że temperatura atmosfery nie zmienia się wraz z wysokością wyprowadź wzór opisujący zależność ciśnienia atmosferycznego od wysokości (wzór barometryczny).
3. Porównaj ciśnienie p_0 z ciśnieniem na głębokości 11 km pod powierzchnią wody.
4. Objętość pęcherzyka powietrza rośnie trzykrotnie, w czasie gdy unosi się z dna jeziora do powierzchni wody. Jaka jest głębokość jeziora jeżeli temperatura nie zależy od głębokości wody?
5. Pokrowiec balonu nie jest wypełniony całkowicie gazem. W miarę unoszenia się balonu ciśnienie atmosferyczne maleje i pokrowiec wydyma się. Na jakiej wysokości H gaz zajmie całą objętość balonu V_1, jeżeli jest on wypełniony helem, który na powierzchni Ziemi zajmował objętość V_0 (pod ciśnieniem p_0). Temperaturę traktujemy jako stałą. Zaniedbać zmianę przyspieszenia ziemskiego.
6. Temperatura wnętrza Słońca: Kula gazowa o promieniu $R = 6.96 \cdot 10^8$ m w próżni posiada stałą gęstość. Jej masa równa jest $M = 2 \cdot 10^{30}$ kg. Oszacuj temperaturę gazu jeżeli gazem tym jest atomowy wodór ($m_H = 1.67 \cdot 10^{-27}$ kg). Skorzystaj z prawa Pascala dla gazu jednorodnego, gdzie zamiast przyspieszenia ziemskiego zastosuj uśrednione przyspieszenie dla Słońca:
$$\bar{g} = \frac{1}{R}\int_0^R dr\, g(r).$$
7. Do barometru rtęciowego dostała się odrobina powietrza (nad rtęcią nie ma już próżni) powodując jego błędne wskazania. Słupek rtęci jest mniejszy niż powinien. Sprawdzono barometr: przy ciśnieniu atmosfery p_1 (znanym z przyrządu kontrolnego) wysokość słupka rtęci w zepsutym barometrze wynosi h_1, przy czym odległość górnego poziomu rtęci od zasklepionego końca rurki wynosi h'. Wyprowadź funkcję korygującą błąd zepsutego barometru, tj. funkcję której argumentem będzie wysokość słupka rtęci w zepsutym urządzeniu, a wartością prawdziwe ciśnienie atmosferyczne. Przyjąć, że temperatura jest jednakowa podczas kontroli i dalszych pomiarów. Gęstość rtęci $\rho_{Hg} = 13.6 \cdot 10^3$ kg/m^3.
8. Poziomo leżąca rurka porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym z przyspieszeniem a w kierunku swojej osi symetrii zaślepioną częścią do przodu. W rurce za pomocą rtęci odizolowana jest pewna ilość powietrza. Długość słupka powietrza podczas ruchu wynosi l_1, a długość słupka rtęci b. Jaką długość l_0 będzie miał słupek powietrza podczas spoczynku rurki po wyrównaniu temperatur.
9. Obliczyć ciśnienie panujące w sztywnej dętce rowerowej o objętości V_1 wiedząc, że przy jej pompowaniu wykonano n ruchów pompką o objętości roboczej V_2. Ciśnienie na zewnątrz oraz początkowe ciśnienie w dętce równe jest p_0. Zakładamy, że dętka ostygła po pompowaniu.

III. Twierdzenie o wiriale

1. Wyprowadź twierdzenie o wiriale dla N cząstek zakładając, że siły międzycząsteczkowe są symetryczne oraz cząsteczki nie oddziałują same ze sobą (tj. $\vec{F}_{ij} = -\vec{F}_{ji}$, $\vec{F}_{ii} = 0$).
2. Korzystając z twierdzenia o wiriale wyprowadź wzór na ciśnienie, a następnie równanie stanu gazu doskonałego.
3. Wyprowadź twierdzenie o wiriale jeżeli cząsteczki oddziałują na siebie siłami centralnymi o wartości $F_{ij} = -\alpha / r_{ij}^2$. W ostatecznej postaci wykorzystaj energię potencjalną dla tych sił.
4. Dowiedź, że na punkt materialny znajdujący się wewnątrz czaszy nie działają żadne siły.
5. Wyprowadź energię potencjalną oddziaływania punktu materialnego z kulą o promieniu R i masie M jeżeli punkt i środek ciężkości kuli są odległe o r_0.
6. Oblicz energię potencjalną jednorodnej kuli o promieniu R i masie M.
7. Znając energię potencjalną kuli gazowej znajdź, korzystając z twierdzenia o wiriale, temperaturę wnętrza Słońca. Wynik porównaj z uzyskanym w zadaniu II.5.

8. Korzystając z twierdzenia o wiriale dla jednej cząstki $\langle E_{kin}\rangle = -0.5\langle \vec{F}\circ\vec{r}\rangle$ udowodnić, że jeżeli na cząstkę działa siła centralna $\vec{F}(r)$ o energii potencjalnej $E_p(r) = -\alpha/r^n$ to $\langle E_{kin}\rangle = \dfrac{n}{n-2}E$, gdzie $E = E_{kin} + E_p = const$ to całkowita energia mechaniczna układu.
   Rozważyć przypadek
   $n = -2$ (oscylator harmoniczny).
9. Zakładając, że w obłoku gazowym składającym się molekuł wieloatomowych (o f obrotowych stopniach swobody, $0 \le f < 3$) oddziaływujących grawitacyjnie spełnione jest twierdzenie o wiriale $\langle \mathrm{E}_{kin.\,ruchu\ postępowego}\rangle = -\frac{1}{2}\langle \mathrm{E}_p\rangle$. Pokazać, że ciągła emisja promieniowania z mocą L powoduje kurczenie obłoku.

IV. Termodynamika fenomenologiczna (1 zasada termodynamiki)

1. Halliday, Resnick, *Fizyka* tom 1, zadanie 32 z rozdziału 22: Układ termodynamiczny przeprowadzany jest ze stanu początkowego A (p_A = 20 N/m^3, V_A = 1 m^3) do stanu końcowego B (p_B = 20 N/m^3, V_B = 3 m^3) i z powrotem do A poprzez stan C (p_C = 40 N/m^3, V_C = 3 m^3).
   a) Sporządź wykres we współrzędnych p i V.
   b) Uzupełnić tabelę wstawiając + i – odpowiednio, jako znaki wielkości termodynamicznych związanych z każdym etapem.

	Q	W	ΔU
AB			+
BC	+		
CA			

   c) Obliczyć wartość liczbową pracy wykonanej przez układ podczas zamkniętego obiegu $ABCA$.
2. W izolowanym naczyniu zmieszano trzy części identycznego płynu o różnych temperaturach (znane masy i temperatury poszczególnych części). Jaka będzie temperatura płynu po ustaleniu równowagi?
3. Do izolowanego naczynia z wodą o masie m_W, cieple właściwym c_W i temperaturze t_W wrzucono kostki lodu o łącznej masie m_L, cieple właściwym c_L, cieple topnienia L i temperaturze t_L. Jaka będzie temperatura końcowa?
4. Procesy izoparametryczne w gazie doskonałym:
   a) doświadczenie Gay-Lussaca i Joula,
   b) wyprowadzić wzór Mayera: $C_p - C_v = R$. (Można przyjąć, że substancji jest 1 mol),
   c) wyprowadzić równanie adiabatycznego sprężania/rozprężania gazu doskonałego wiążącego ciśnienie i objętość, a następnie korzystając z niego wyprowadzić wzór na pracę wykonaną przez układ w trakcie tej przemiany. Znaleźć także związki między p i T oraz T i V,
   d) obliczyć pracę i ciepło w procesach izoparametrycznych (w tym adiabatycznym) gazu doskonałego przy znanych początkowej i końcowej objętości, ciśnieniu i temperaturze,
5. Opierając się na zasadzie ekwipartycji uzasadnij dlaczego dla powietrza (mieszanina N_2 i O_2) $\gamma = C_p/C_V = 1.4$. Ile wynosi γ dla atomowego wodoru (Słońce) oraz dla cząsteczki dwutlenku węgla?
6. Proces adiabatyczny prowadzi do ośmiokrotnego sprężenia ($V = V_0/8$) powietrza w stanie normalnym. Ile razy wzrośnie jego temperatura? Jaką pracę wykona tłok, jeżeli ma objętość 500cm^3?
7. Orear, *Fizyka*, tom 1, zadanie 19 z rozdziału 13. Jeden mol gazu N_2 (azot cząsteczkowy C_V = 4.96 J/K, C_p = 6.95 J/K, $\gamma = C_p/C_V = 1.40$) o objętości V_1 = 22.4 litrów i pod ciśnieniem atmosferycznym rozpręża się adiabatycznie do objętości do objętości $V_2 = 2V_1$. Następnie spręża się go izotermicznie do objętości początkowej:
   a) Ile wynosza p_2 i T_2?
   b) Ile wynosi praca ΔW_{12} wykona podczas rozprężania adiabatycznego?

c) Ile wynosi praca ΔW_{23} wykona podczas sprężania izotermicznego?
d) Ile wynosi całkowita praca oddana na zewnątrz?
e) Ile wynosi temperatura końcowa T_3?
f) Ile wynosi $C_V(T_1 - T_3)$?
g) Narysuj wykresy $p(V)$, $p(T)$, $T(V)$ itd.

8. Obliczyć sprawność silnika parowego η (cykl Carnota) przy znanych temperaturach T_1 (po adiabatycznym sprężaniu) i T_3 (po adiabatycznym rozprężaniu).
9. Obliczyć sprawność cyklu złożonego z izobarycznego rozprężenia, adiabatycznego rozprężenia, izobarycznego sprężenia i adiabatycznego sprężenia oraz pokazać, że jest ona mniejsza od sprawności cyklu Carnota pracującego pomiędzy taką samą temperaturą minimalną i maksymalną. Znany jest stosunek $C_p/C_V = \gamma$ gazu. Przyjąć 1 mol substancji.
10. Obliczyć sprawność cyklu: 1-2 izobaryczne rozprężenie, 2-3 adiabatyczne rozprężenie, 3-4 izochoryczne zmniejszenie ciśnienia, 4-1 adiabatyczne sprężenie, jeżeli znane są temperatury w chwilach 1, 2 i 4 oraz $C_p/C_V = \gamma$.
11. Obliczyć sprawność cyklu: 1-2 adiabatyczne rozprężenie, 2-3 izobaryczne zmniejszanie objętości, 3-1 izochoryczne zwiększenie ciśnienia, jeżeli znane są temperatury w chwilach 1 i 3 oraz $C_p/C_V = \gamma$.
12. Obliczyć sprawność cyklu: 1-2 izobaryczne rozprężenie, 2-3 adiabatyczne rozprężenie, 3-4 izobaryczne zmniejszanie objętości, 4-1 adiabatyczne sprężenie, jeżeli znane są temperatury w chwilach 1 i 4.
13. Gaz doskonały podlega cyklicznej przemianie: 1-2 izobaryczne ogrzanie, 2-3 izotermiczne zwiększenie ciśnienia oraz 3-1, której wykresem we współrzędnych (p,T) jest odcinek leżącej na prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych. Mając daną pełną informację o stanie (p_1,V_1,T_1) oraz znając kąt α prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych i punkt (p_2,T_2) w układzie współrzędnych (p,T) oblicz parametry stanu (p_3,V_3,T_3). Naszkicuj przebieg tej przemiany we współrzędnych (p,V).

V. Gazy rzeczywiste

1. Poprawki van der Waalsa do równania stanu
   a) poprawka do objętości w jakiej może znajdować się gaz (skończony rozmiar cząsteczek)
   b) poprawka do ciśnienia (ciśnienie wewnętrzne od oddziaływań krótkozasięgowych)
2. Oblicz współczynniki rozwinięcia wirialnego równania van der Waalsa
3. Wychodząc z równania van der Waalsa znajdź funkcję $p(V)$ i naszkicuj jej wykres.
4. Znajdź równanie na objętość przy ustalonych ciśnieniu i temperaturze. Dla jakich wartości parametrów p_k i T_k równanie to ma jeden pierwiastek wielokrotny? Znajdź ten pierwiastek V_k.
5. Równanie van der Waalsa w zmiennych zredukowanych
   a) wyraź stałe R, a, b przez parametry stanu krytycznego (p_k, V_k, T_k)
   b) napisz równanie van der Waalsa korzystając ze wzorów na stałe
   c) przejdź do bezwymiarowych zmiennych $\omega = V/V_k$, $\pi = p/p_k$, $\tau = T/T_k$.
6. Wyprowadź odpowiednik wzoru Mayera dla gazu van der Waalsa (tzn. znaleźć $C_p - C_V$)
7. Wyprowadzić współczynnik Joule'a-Thompsona dla gazu van der Waalsa.
8. Wykazać, że dla gazu doskonałego zmiana temperatury w zjawisku Joule'a-Thompsona nie zachodzi.
9. Oblicz temperaturę inwersji. Naszkicuj jej wykresy w funkcji objętości. Wyprowadź zależność temperatury inwersji od ciśnienia.

VI. Rozkłady kanoniczny i Maxwella

1. Rozważając układ A otoczony przez rezerwuar R wyprowadź rozkład prawdopodobieństwa znalezienia układu A w stanie r o ustalonej energii $E_{A,r}$ (zob. Wróblewski, Zakrzewski, tom 1).
2. Wyrazić energię średnią w rozkładzie kanonicznym korzystając z sumy stanów Z.
3. Unormować rozkład kanoniczny $f(\vec{v}) = Ce^{-\beta\frac{mv^2}{2}}$ w przestrzeni wektorów prędkości.

4. Korzystając z rozkładu kanonicznego dla jednej cząstki gazu swobodnego (cząstki swobodnej) wyprowadzić rozkład prawdopodobieństwa dla
   a) jednej składowej prędkości
   c) szybkości (długości wektora prędkości)
   Oraz obliczyć
   a) maksimum w rozkładzie prędkości
   b) maksimum w rozkładzie szybkości
   c) szybkość średnią
   d) średnią szybkość kwadratową
   e) średni rozrzut szybkości wokół szybkości średniej

VII. Termodynamika fenomenologiczna (2 zasada termodynamiki)

1. 200g argonu zajmuje połowę zbiornika przedzielonego przegrodą. Po drugiej stronie przegrody panuje próżnia. Obliczyć zmianę entropii gazu po usunięciu przegrody i swobodnym rozprężeniu gazu do pełnej objętości zbiornika.
2. Obliczyć zmianę entropii 1 mola powietrza w trakcie przemiany
   a) izobarycznej (temperatura zmienia się od t_1 do t_2)
   b) izochorycznej (temperatura zmienia się od t_1 do t_2)
   c) adiabatycznej
   d) izotermicznej (objętość zmienia się od V_1 do V_2).
3. Obliczyć zmianę entropii jednego mola dwutlenku węgla przy trzykrotnym wzroście jego temperatury jeśli ogrzewanie jest
   a) izochoryczne
   b) izobaryczne.
   Przy obliczaniu molowego ciepła właściwego pominąć drgania cząsteczek.
4. Wykazać, że w cyklu Carnota entropia jest zachowana.
5. Do wody o masie m_1 o temperaturze T_1 wlano wodę o temperaturze T_2 i masie m_2. Obliczyć zmianę entropii układu wiedząc, że ciepło właściwe wody wynosi c_W i zaniedbując wymianę ciepła z otoczeniem.
6. Znaleźć zmianę entropii kawałka metalu o masie m, którego ciepło właściwe zależy od temperatury zgodnie ze wzorem $c = a + bT$, podczas ogrzewania od temperatury T_1 do T_2.
7. Molowe ciepło właściwe kryształów w niskich temperaturach opisuje zależność $c=\alpha T^3$, gdzie α jest niezależną od temperatury stałą. Znaleźć zależność entropii od temperatury.

VIII. Hydrodynamika

1. Wyprowadzić równanie Bernoulliego dla rury o zmiennych przekroju i wysokości.
2. Wyprowadzić równanie ciągłości dla cieczy nieściśliwej
3. Wyprowadzić wzór pozwalający na pomiar prędkości cieczy za pomocą rurki Venturiego (zob. Halliday, Resnick, paragraf 18-5)
4. Dwie ciężarówki „TIR" jadą równolegle do siebie w tym samym kierunku z prędkością v w odległości A. Obliczyć siłę z jaką przyciągane są do siebie jeżeli kontenery mają długość L, wysokość H i szerokość W. Przyjąć, że powietrze jest nieściśliwe oraz, że z zewnętrznej strony obu ciężarówek ciśnienie nie jest zmieniane przez ich ruch. (Podpowiedź: założyć, że między ciężarówki dostaje się powietrze z wewnętrznej połowy szerokości W dla każdego z „TIRów"). Oszacuj siłę w sytuacji, gdy gęstość ośrodka równa jest gęstości wody (np. statki o tych samych rozmiarach z zanurzeniem równym wysokości kontenerów).
5. Zbiornik jest przedziurawiony na głębokości h pod powierzchnią cieczy. Przyjąć, że otwór jest na tyle mały, że można zaniedbać zmianę poziomu cieczy w zbiorniku.
   a) Obliczyć prędkość z jaką woda wypływa przez otwór (prawo Torricellego) i porównać z prędkością spadku swobodnego. Przedyskutować wyniki korzystając z zasady zachowania energii.
   b) Na jaką wysokość wzniosłaby się woda, gdyby w otworze byłaby zamocowana rurka kierująca ciecz pionowo do góry?

c) powtórz obliczenia dla sytuacji, w której ciecz z góry jest naciskana przez tłok, który wytwarza ciśnienie *p*.

6. Do cieczy o gęstości ρ poruszającej się z prędkością *v* wstawiamy zakrzywioną pod kątem prostym rurkę wylotem w stronę przeciwną do kierunku ruchu cieczy („pod prąd”). Jak wysoko uniesie się ciecz w tej rurce, jeżeli w rurce prostej ustawionej w tym samym miejscu prostopadle do kierunku ruchu ciecz podniesie się na wysokość *h*?
7. Na jakiej wysokości *h* od dna naczynia o pionowych ścianach należy umieścić otwór, aby strumień wody spadał na podłogę najdalej od podstawy? Poziom cieczy w naczyniu jest stale utrzymywany na tej samej wysokości *H* na poziomem podłogi, na której ustawione jest naczynie. Ile wynosi ta maksymalna odległość?

IX. Zjawiska transportu (Reif)

1. Wyprowadzić wzór na średnią drogę swobodną (*n* – koncentracja cząstek, σ – całkowity przekrój czynny, *p* – ciśnienie, *T* – temperatura) $l \approx 1/\sqrt{2}n\sigma = k_B T/\sqrt{2}p\sigma$
2. a) Pokazać, że dla powietrza w stanie normalnym średnia droga swobodna jest znacznie większa od promienia cząsteczek. Przyjąć promień cząsteczek równy jednemu angstremowi. b) Przy jakim ciśnieniu wielkości te byłyby porównywalne? c) Oszacuj czas swobodny.
3. Transport na przykładzie dyfuzji w jednym wymiarze (*n* – stężenie/gęstość substancji dyfundującej)
   a) wyprowadzić równanie dyfuzji: $n_t = Dn_{xx}$ (indeksy odznaczają odp. pochodne względem *x* i *t*)
   b) znaleźć współczynnik dyfuzji *D*
4. Wyjaśnić paradoks: Niech koncentracja cząsteczek nie zależy od czasu. Wówczas na mocy równania dyfuzji koncentracja zmienia się liniowo wzdłuż *x*. A zatem strumień cząstek jest niezerowy, cząstki poruszają się w kierunku malejącej koncentracji. Wobec tego koncentracja nie może nie zależeć od czasu.
5. Reif *Fizyka statystyczna*, zadanie 8.12. Prawdopodobieństwo przeżycia przez cząstkę czasu *t* bez zderzenia ...
6. Zadanie nieobowiązkowe: Równanie dyfuzji w trzech wymiarach: $n_t = D\nabla^2 n$ oraz uogólnione równanie dyfuzji w obecności źródła.

Podręczniki

J. Orear *Fizyka*, tom 1
A. Wróblewski, J. Zakrzewski *Wstęp do fizyki*, tom 1; tom 2, część 2
D. Halliday, R. Resnick *Fizyka*, tom 1
F. Reif *Fizyka statystyczna*

Zadania szczególnie ważne: III.3, III.6, III.7, III.8, III.9, IV.8, V.7