



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Człowiek – najlepsza inwestycja

# FENIKS

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

## Pakiet nr 2:

### Energia i jej przemiany

**Prof. dr hab. Krzysztof FIAŁKOWSKI**

*Institut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego*

*Uniwersytet Jagielloński*

Wersja UJ/1.0, wrzesień 2009

Zawarte w tym opracowaniu materiały przeznaczone są do wspomaganie 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 wspomaganie 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

# Energia i jej przemiany



1. Wstęp.....	1
1.1. Uwagi wstępne .....	1
2. Energia i praca mechaniczna, moc .....	2
3. Praca i przemiany energii dla sił grawitacyjnych.....	4
4. Przemiany energii w obecności sił sprężystości .....	7
5. Przemiany energii z uwzględnieniem sił tarcia.....	8
6. Energia wewnętrzna i przekazywanie energii na sposób ciepła. ....	10
7. Przemiany energii mechanicznej i energii wewnętrznej .....	13
8. Energia elektrostatyczna i energia fal elektromagnetycznych* .....	15
9. Energia i praca prądu elektrycznego* .....	18
10. Energia przemian chemicznych i biologicznych*.....	21
11. Energia jądrowa*.....	22
12. Uniwersalność prawa zachowania energii w mikro- i makroświecie* .....	24

## 1. Wstęp

Zgodnie z zapowiedzią zawartą w „Informacjach dla nauczycieli” pakiet poświęcony jest fundamentalnej dla fizyki zasadzie zachowania energii z różnymi jej przejawami. Omówione zostaną przykłady procesów, w których energia jest zachowana, ale zamienia się w inne rodzaje, np. energia kinetyczna w energię potencjalną grawitacyjną, energia potencjalna sprężystości w energię kinetyczną itp. Szczegółowo przedstawione będą procesy zmiany energii wewnętrznej przez wykonanie pracy i/lub przez wymianę ciepła, z podkreśleniem roli sił tarcia.

Pakiet stanowi zestaw tekstów „co powinniśmy wiedzieć”, w których omawiane są kolejne kategorie procesów z przytoczeniem użytecznych wzorów i tematów, które warto podkreślić na lekcji, wybór przykładowych problemów i zadań rachunkowych, oraz wybór doświadczeń do wykonania w szkole. Tematy, które w całości lub w części wykraczają wyraźnie poza podstawę programową, oznaczone są gwiazdką.

### 1.1. Uwagi wstępne

Energia jest jednym z podstawowych pojęć fizycznych, ale równocześnie należy do terminów najtrudniejszych do zdefiniowania. Encyklopedie zwykle podkreślają trzy fakty:

1. jest to pojęcie wspólne dla wszystkich działów fizyki, wielkość określająca stan dowolnego układu fizycznego,
2. jest to wielkość zachowana we wszystkich procesach zachodzących w układach izolowanych,
3. jest to wielkość charakteryzująca zdolność układu do wykonania pracy.

Ten ostatni fakt pozwala na związanie pojęcia fizycznego z potocznym znaczeniem słowa „energia”, rozumianego jako skłonność i zdolność do intensywnego działania („energia kogoś roznosi”, „wziął się energicznie do pracy”). Gdy więc przedstawiamy uczniom po raz pierwszy pojęcie energii, dobrze jest podkreślić tę spójność z potocznym rozumieniem tego słowa, a zarazem zapowiedzieć, że zrozumienie tego pojęcia następuje stopniowo po wprowadzeniu pojęcia pracy, a zwłaszcza po omówieniu procesów, w których następują przemiany różnych form energii. Można jednak od razu zapowiedzieć, że energia ciała (lub układu ciała) będzie wzrastać, jeśli wykonano nad nim pracę, a zmniejszać się, jeśli to ono wykonuje pracę.

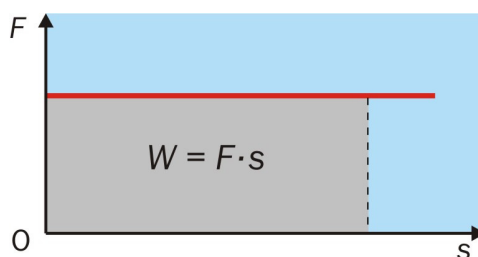
## 2. Energia i praca mechaniczna, moc

### Co powinniśmy wiedzieć:

W języku potocznym słowo „praca” oznacza dowolną czynność zawodową, a więc zarówno kopanie rowów czy też malowanie ścian, jak i pisanie programów komputerowych. Nawet „praca fizyczna” może oznaczać czynność, która nie spowoduje żadnych zmian (np. jeśli ktoś przez pomyłkę wyniesie z mieszkania na ulicę niewłaściwe sprzęty i musi odnieść je z powrotem na poprzednie miejsce). Jednak w fizyce praca jest wykonana tylko wtedy, gdy siła działająca na jakieś ciało powoduje jego przemieszczenie w kierunku działania siły. Praca  $W$  to wielkość, która dla przemieszczenia w kierunku zgodnym z kierunkiem działania siły jest równa iloczynowi wartości tego przemieszczenia  $s$  i wartości siły  $F$ :

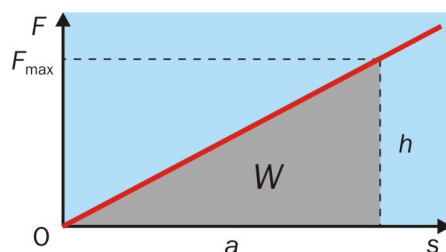
$$W = F \cdot s. \quad (2.1)$$

Wzór ten jest słuszny, gdy siła jest stała podczas ruchu. Można jednak znaleźć łatwo uogólnienie na przypadek zmiennej siły, jeśli rozważymy wykres zależności siły od drogi przebywanej od początku ruchu. Dla stałej siły wygląda on oczywiście tak



Rysunek 2.1

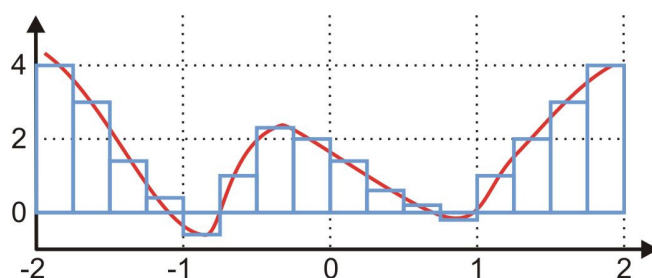
a praca jest równa polu prostokąta zawartego pod wykresem. Okazuje się, że dla dowolnie zmiennej siły (np. rosnącej proporcjonalnie do przesunięcia, jak dla rozciąganej sprężyny; będzie o tym mowa w rozdziale 3) praca jest także równa polu powierzchni figury zawartej pod wykresem (choć nie jest to już prostokąt).



Rysunek 2.1

Ten fakt można łatwo zrozumieć: dowolną krzywą można przybliżyć małymi odcinkami poziomymi i pionowymi. Zatem pracę można obliczyć w przybliżeniu dzieląc ruch na małe odcinki, w których wartość siły jest stała. Praca wykonana na takim odcinku jest równa polu małego prostokąta, a całkowita praca sumie tych pól, która przybliżyła pole powierzchni figury pod wykresem

# Energia i jej przemiany



Rysunek 2.3

Oczywiście obliczenie tego pola może być bardzo trudne i w ogólnym przypadku wymaga zastosowania metod wyższej matematyki. Jednak w rozważanym przypadku rozciągania sprężyny o długość  $a$  pole trójkąta łatwo obliczyć i praca będzie równa

$$W = F_k \cdot a / 2 \quad (2.2)$$

gdzie  $F_k$  jest końcową wartością siły.

Można także uogólnić wzór (2.1) na pracę na przykład, gdy kierunek działania siły nie jest zgodny z kierunkiem przemieszczenia. Należy wtedy rozłożyć siłę na składową równoległą i prostopadłą do tego kierunku. Pracę wykonuje tylko składowa równoległa  $F_r$ , więc

$$W = F_r \cdot s. \quad (2.3)$$

Zmianę energii w zjawiskach mechanicznych wyraża się przez tak obliczoną wykonaną pracę

$$\Delta E = W. \quad (2.4)$$

Zauważmy, że energia ciała może w różnych procesach rosnąć albo maleć. Zatem praca wykonana przez siłę może być dodatnia, albo ujemna. Przyjmujemy zawsze, że praca wykonana nad ciałem jest dodatnia, jeśli w wyniku działania siły energia ciała rośnie, a ujemna, jeśli energia ciała maleje (np. gdy zwrot siły jest przeciwny do zwrotu przemieszczenia).

W praktycznych przypadkach na ciało działa z reguły wiele sił. Wykonana praca zależy tylko od siły wypadkowej, czyli wektorowej sumy wszystkich sił, a ściślej od jej składowej równoległej do kierunku przemieszczenia. Często jednak prościej jest badać taki problem rozważając oddzielnie pracę wykonaną przez różne siły (przy czym z reguły niektóre z nich są dodatnie, a niektóre ujemne). Oczywiście suma tych prac musi być równa pracy wykonanej przez siłę wypadkową. Dyskusja równoważności tych podejść nie wydaje się jednak konieczna na poziomie gimnazjum.

W wielu zjawiskach i zastosowaniach ważne jest nie tylko, jaką pracę wykonujemy, ale także to, jak szybko można ją wykonać. Miarą szybkości wykonywania pracy jest *moc* równa stosunkowi pracy do czasu, w jakim została wykonana

$$M = W/t. \quad (2.5)$$

Jeśli praca nie jest wprost proporcjonalna do czasu, to moc jest zmienna i można definiować moc chwilową, odpowiadającą stosunkowi wykonanej pracy do czasu dla bardzo krótkich kolejnych odcinków czasu. Natomiast wzór (2.5) określa wtedy moc średnią.

## **Problemy:**

2.1. Jeśli siła rośnie proporcjonalnie do wychylenia z położenia początkowego  $x_i$  i osiąga wartość  $F_k$  w położeniu końcowym  $x_k=x_i+a$ , to zgodnie z wzorem (2.2) praca wykonana jest równa  $F_k \cdot a/2$ . Ile wyniesie praca wykonana na tej samej drodze przez siłę zmieniającą się z  $x$  zgodnie z wzorem  $F=F_k \cdot (x_k - x)/a$ ?

2.2. Jaką pracę wykona siła, która na odcinku o długości  $a$  rośnie proporcjonalnie do przebytej drogi od wartości zero do  $F$ , następnie pozostaje stała na odcinku o długości  $b$  i maleje liniowo do zera na kolejnym odcinku o długości  $c$ ?

2.3. Fakt, że praca stałej siły jest iloczynem wartości siły i wartości przemieszczenia, jest podstawą działania maszyn prostych. Zamiast działania wielką siłą (potrzebną np. do podniesienia wielkiego ciężaru) na krótkiej drodze, możemy działać znacznie mniejszą siłą na dłuższej drodze. Pomijając straty energii oblicz, na jakiej drodze  $s$  musisz działać siłą  $F_2=100$  N (naciskając dźwignię lub kręcąc korbą), aby podnieść samochód (do czego potrzebna jest siła  $F_1=10000$  N) o  $h=20$  cm.

## **Doświadczenia**

### **2.1. Praca i droga**

*Niezbędne przedmioty:* Siłomierz, ciężarek z zaczepem, statyw, bloczek, mocna nitka.

*Przebieg doświadczenia* Podnieś powoli zawieszony na siłomierzu ciężarek o masie  $m$  (np.  $0,1$  kg) na wysokość  $h$ . (np.  $0,5$  m) Jakie były wskazania siłomierza? Jaką pracę wykonałeś? Teraz zawieś ciężarek na nitce przełożonej przez umocowany do statywu bloczek i pociągnij nitkę siłomierzem w dół tak, aby podnieść ciężarek na tą samą wysokość. Porównaj wyniki. Na koniec zawieś ciężarek na lekkim bloczku, przez który przełożono nitkę umocowaną jednym końcem do statywu a drugim końcem do siłomierza i podnieś siłomierz tak, aby ciężarek podniósł się znów o  $h$ . O ile musiałeś podnieść siłomierz i jakie były jego wskazania? Jaką pracę wykonałeś?

*Forma zapisu wyników:* Tabela wskazań siłomierza.

*Wyniki i wnioski:* Dla podanych wartości  $m$  i  $h$  siłomierz wskazywał około  $1$  N i wykonałeś pracę  $0,5$  J. Przy podnoszeniu ciężarka przez bloczek wyniki powinny być bardzo podobne, jeśli można pominąć siły tarcia, o których będzie mowa w rozdziale 5. Przy podnoszeniu ciężarka zawieszzonego na bloczku siłomierz musimy podnieść o  $1$  m, aby podnieść ciężarek o  $0,5$  m. Siłomierz powinien przy tym wskazywać około  $0,5$  N (jeśli bloczek jest lekki w porównaniu z ciężarkiem), więc wykonana praca będzie znów równa.

## **3. Praca i przemiany energii dla sił grawitacyjnych**

### **Co powinniśmy wiedzieć:**

Rozważmy najpierw energię potencjalną związaną z siłami grawitacji. Na każde ciało o masie  $m$  znajdujące się w pobliżu powierzchni Ziemi działa siła  $mg$  (za wartość  $g$  przyjmujemy tu i we wszystkich zadaniach  $10$  m/s<sup>2</sup>). Aby je podnieść na wysokość  $h$ , należy wykonać pracę. Siła, którą musimy działać, musi być co najmniej równa co do wartości sile grawitacji (w rzeczywistości musi być oczywiście nieco większa, aby ciało poruszało się do góry). Zatem wykonamy pracę  $W$  równą  $mgh$ . Wtedy energia ciała

# Energia i jej przemiany



wzrośnie o energię potencjalną grawitacji równą tej pracy

$$\Delta E_p = mgh. \quad (3.1)$$

Zauważmy, że energię potencjalną można obliczyć tylko względem poziomu  $E_p=0$  przyjętego umownie. Załóżmy, że wysokość jednego piętra wynosi  $h_1=4$  m. Jeśli ciało o masie  $m=10$  kg podciągniemy na linie z wysokości pierwszego piętra na trzecie, to jego energia potencjalna względem pierwotnego położenia wyniesie  $2h_1mg=800$  J, ale względem poziomu ziemi  $3h_1mg=1200$  J (albo jeszcze więcej, jeśli parter nie ma podłogi na poziomie ziemi).

Spadające ciało traci energię potencjalną, ale zyskuje energię w innej postaci – energię kinetyczną. Ciało poruszające się z prędkością  $v$  ma energię kinetyczną  $E_k$  równą

$$E_k = mv^2/2. \quad (3.2)$$

Można sprawdzić, że dla stałej siły (jak siła grawitacji) wzór ten wynika z prawa zachowania energii, jeśli pamiętamy, że stałe przyspieszenie grawitacyjne powoduje liniowy wzrost prędkości z czasem

$$v = gt. \quad (3.3)$$

Zatem w czasie  $t$  ciało pod działaniem siły grawitacyjnej przebędzie drogę

$$h = gt^2/2 \quad (3.4)$$

i przyrównując energię potencjalną do kinetycznej otrzymujemy po podstawieniu wzoru (3.4) do (3.1) wzór (3.2).

Dla sił takich, jak grawitacyjne (tzw. sił potencjalnych) obowiązuje prawo zachowania energii mechanicznej, które mówi, że całkowita energia ciała, czyli suma energii potencjalnej i kinetycznej, pozostaje stała. W powyższym przykładzie na wysokości  $h$  ciało spoczywało, więc jego całkowita energia była równa energii potencjalnej względem wysokości zerowej. Skoro na wysokości zerowej energia potencjalna jest równa zeru, całkowita energia jest równa energii kinetycznej. Zatem te dwie energie muszą być równe. Zauważmy, że nic się nie zmieni, gdyby umówić się, że na wysokości zerowej energia potencjalna wynosi  $E_0$ : wtedy na wysokości  $h$  energia ta będzie równa  $E_0 + mgh$ , a energia kinetyczna nabyta podczas spadania będzie równa różnicy tych energii, czyli znów  $mgh$ .

Na koniec przypomnijmy, że wszystkie powyższe rozważania są dobrym przybliżeniem jedynie w pobliżu powierzchni Ziemi, a ściślej przy założeniu, że rozważane wysokości są pomijalnie małe w porównaniu z długością promienia Ziemi. Dla większych wysokości przyspieszenie  $g$  nie jest stałe, bo wartość siły przyciągania grawitacyjnego działającego na ciało o masie  $m$  zmienia się zgodnie z prawem powszechnej grawitacji Newtona

$$F = Gmm_z/r^2, \quad (3.5)$$

gdzie  $G$  jest stałą grawitacyjną,  $m_z$  masą Ziemi, a  $r$  odległością ciała od środka Ziemi. Kierunek i zwrot tej siły jest skierowany od ciała do środka Ziemi. Zatem przyspieszenie grawitacyjne, którego wartość to  $F/m$ , jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości od środka Ziemi.

## Problemy

3.1. Skoczek o tyczce po przeskokowaniu poprzeczki uderzył w materac zeskoku z szybkością  $v = 10$  m/s. Przyjmując wartość przyspieszenia grawitacyjnego  $g = 10$  m/s<sup>2</sup>, pomijając opór powietrza i zakładając, że ciało skoczka przy uderzeniu w materac było ułożone podobnie jak nad poprzeczką, oblicz wysokość, którą pokonał skoczek.

# Energia i jej przemiany



3.2. Z jaką szybkością rzucono piłką tenisową w podłogę, jeśli po odbiciu poleciała na wysokość 20 m? Przyjmij wartość przyspieszenia grawitacyjnego, jak w poprzednim przykładzie i załóż, że odbicie nastąpiło bez znaczącej straty energii.

3.3. Na jakiej wysokości trzymał rękę siedzący na balkonie człowiek, jeśli odbita od ziemi pionowo z szybkością  $v_1 = 20\text{m/s}$  piłka uderzyła w rękę z szybkością  $v_2 = 10\text{m/s}$ ?

## **Doświadczenia**

### **3.1. Wahadło**

*Niezbędne przedmioty:* ciężarek z zaczepem, statyw, mocna nitka, stoper.

*Przebieg doświadczenia:* Sporządź wahadło, zawieszając na dość długiej nitce niewielki ciężarek. Wykonaj serię obserwacji wychylając wahadło pod różnymi, ale zawsze niewielkimi kątami i mierząc czas powrotu do pierwotnego położenia (aby zmniejszyć niepewność zmierz czas np. dziesięciu wahań). Co zaobserwowałeś?

*Forma zapisu wyników:* Tabela czasów dla różnych wychyleń.

*Wyniki i wnioski:* czas wahań nie zależy znacząco od kąta wychylenia. W najwyższym położeniu ciężarek spoczywa, więc cała jego energia to energia potencjalna, która jest tym większa, im wyższy jest kąt wychylenia. Zatem równa tej energii energia kinetyczna w najniższym punkcie toru ciężarka także rośnie z kątem wychylenia. Im bardziej wychylamy wahadło, tym szybciej przyspiesza ono, aby osiągnąć większą szybkość w najniższym punkcie toru. Ten wzrost szybkości kompensuje wydłużenie toru dla większych kątów wychylenia. Dokładne wyjaśnienie, dlaczego ta kompensacja jest tak dokładna dla niewielkich wychyleń, wynika ze szczegółowego opisu matematycznego ruchu wahadła.

### **3.2. Przekaz energii wahadła wózkowi**

*Niezbędne przedmioty:* ciężarek z zaczepem, statyw, mocna nitka, wózek.

*Przebieg doświadczenia:* Połóż pod punktem zawieszenia wahadła wózek o masie zbliżonej do masy ciężarka tak, aby ciężarek puszczony po wychyleniu uderzył w wózek. Co widzisz?

*Forma zapisu wyników:* notatki.

*Wyniki i wnioski:* po uderzeniu ciężarek odbija się, jeśli był lżejszy, lub zwalnia, jeśli był cięższy; dla zbliżonej wartości mas ciężarek może się zatrzymać. Wózek toczy się tym szybciej, im silniej wychyliliśmy wahadło. Zatem ciężarek przekazał wózkowi całość lub część swojej energii kinetycznej. Ta przekazana energia jest równa (lub proporcjonalna do) pierwotnej energii potencjalnej, a zatem tym większa, im większe było wychylenie. Ułamek energii przekazany przez ciężarek wózkowi zależy tylko od stosunku ich mas i jest największy (równy jedności), jeśli masy są równe.

### **3.3. Odbijanie piłki**

*Niezbędne przedmioty:* piłka z twardej gumy.

*Przebieg doświadczenia:* Puść piłkę z twardej gumy na podłogę z wysokości blatu stołu. Zaobserwuj, na jaką wysokość podskoczy po odbiciu. Teraz lekko rzuć ją w dół z tej samej wysokości. Co zaobserwowałeś? A teraz rzuć ją równie lekko w górę. Co widzisz?

*Forma zapisu wyników:* notatki.

*Wyniki i wnioski:* piłka odbija się na wysokość nieco mniejszą, niż ta, z której została upuszczona. Skoro

# Energia i jej przemiany



jej energia zmalała, to widocznie przy odbiciu przekazała część energii podłodze (a w gruncie rzeczy jeszcze większą część przejęła na podgrzanie w wyniku odkształcenia, o czym będzie mowa później). Jeśli piłkę rzucimy, to dodatkowa energia kinetyczna pozwoli jej na odbicie na pierwotną wysokość, lub nawet wyżej. (Jeśli będziemy ją „klepali” w najwyższym punkcie, to może stale odbijać się na jednakową wysokość – „kozłowanie”). Jeśli rzucimy w górę z tą samą szybkością, to odbije się na tę samą wysokość, bo energia kinetyczna nie zależy od zwrotu prędkości.

## 3.4. Ślady upadku

*Niezbędne przedmioty:* miseczka, mąka, piłeczka pingpongowa, piłeczka gumowa, kulka metalowa

*Przebieg doświadczenia:* Wypełnij miseczkę mąką lub suchym piaskiem na głębokość co najmniej 5 cm. Upuść na nią piłeczkę pingpongową z wysokości 10, 20, 30, 40 i 50 cm. Porównaj głębokości, na jakie zagłębiła się. Powtórz doświadczenie z piłeczką gumową o identycznej wielkości, a potem z kulką szklaną albo metalową.

*Forma zapisu wyników:* Tabela głębokości śladów.

*Wyniki i wnioski:* piłeczka zagłębia się na głębokość tym większą, im większa była wysokość, z której ją upuszczono. Głębokość rośnie także z masą piłeczki. Jeśli jednak zmienimy rozmiary piłeczki, okaże się, że mała kulka zagłębia się bardziej, niż duża o tej samej masie i upuszczona z tej samej wysokości. Nie można więc używać tej głębokości jako miary energii kinetycznej w chwili upadku.

## 4. Przemiany energii w obecności sił sprężystości

*Co powinniśmy wiedzieć:*

W życiu codziennym często mamy do czynienia z siłami sprężystości. Kiedy idziemy przez las, zgięta przez nas gałąź prostuje się i może uderzyć osobę idącą za nami. Powierzchnia uderzającej w ziemię piłki „wgniała się” na krótką chwilę, a potem znów prostuje powodując ponowne wyrzucenie piłki w powietrze. Rozciągnięcie sprężyny treningowej wymaga znacznej siły, a kiedy ją puścimy, kurczy się ponownie do pierwotnej długości. We wszystkich tych przykładach z dobrym przybliżeniem można przyjąć, że wartość siły sprężystości jest proporcjonalna do odkształcenia

$$F = kx. \quad (4.1)$$

Zatem rozciągnięcie (lub zgniecenie) sprężyny o długość  $x$  wymaga siły, której zwrot musi być przeciwny do siły sprężystości, a wartość dana wzorem (4.1). Praca wykonana przez taką siłę podczas rozciągania sprężyny od chwili początkowej do końcowej będzie równa polu pod wykresem zależności  $F$  od  $x$ , a więc trójkąta o bokach równych  $x$  i  $kx$ , czyli

$$W = kx^2/2. \quad (4.2)$$

Sprężyna, nad którą wykonaliśmy taką pracę, nabiera potencjalnej energii sprężystości równej tej pracy

$$E_p = kx^2/2. \quad (4.3)$$

Skoro siły sprężystości są także siłami potencjalnymi, to w zjawiskach związanych z nimi obowiązuje prawo zachowania energii mechanicznej. Energia potencjalna sprężystości może być zamieniana na inne formy energii. Naciągając sprężynę strzelby – zabawki możemy wystrzelić przy jej pomocy piłkę, która odbierze tę energię w postaci energii kinetycznej. Jeśli wystrzelimy ją pionowo w



# Energia i jej przemiany



górze, po chwili piłka zatrzyma się, bo energia kinetyczna zmieni się w energię potencjalną grawitacji, a następnie zacznie spadać, znów uzyskując energię kinetyczną.

W prostych doświadczeniach często musimy już od początku uwzględnić zarówno siły sprężystości, jak i siły grawitacji. Kiedy położymy ciało na pionowej sprężynie, to położenie równowagi będzie inne, niż dla nieobciążonej sprężyny. Nie ma to jednak znaczenia dla rozważań związanych z prawem zachowania energii, jeżeli jesteśmy wciąż w zakresie liniowej zależności siły od wychylenia. Jeśli siła  $mg$  spowodowała wychylenie  $x_0$ , a wychylenie w wyniku dodatkowej siły  $F$  wyniesie  $x$ , to wzór (4.1) stosuje się także dla sumy tych sił  $F' = F + mg$  oraz sumy wychyleń  $x' = x + x_0$ .

## Problem

4.1. Na sprężynie o współczynniku  $k = 100$  N/m ułożono kulkę metalową o masie  $m = 0,1$  kg i naciśnięto ją tak, że kulka obniżyła się o  $l = 0,1$  m. Na jaką wysokość  $h$  wyleci kulka? Pomiń opór powietrza.

## Doświadczenie

### 4.1. Energia grawitacyjna i sprężysta.

*Niezbędne przedmioty:* sprężyna, kulki metalowe, długa linijka.

*Przebieg doświadczenia:* Ustaw pionowo sprężynę, a obok niej linijkę. Połóż na niej kulkę metalową. Zmierz odległość  $x$  między położeniem końca sprężyny przed- i po położeniu kulki. Naciśnij kulkę tak, aby „skrócenie” wzrosło dwukrotnie. Puść kulkę. Zmierz wysokość, na jaką polecą. Sprawdź, jak wyniki zależą od masy kulki.

*Forma zapisu wyników:* Tabela zmierzonych długości sprężyny i wysokości lotu kulki.

*Wyniki i wnioski:* Energia grawitacyjna kulki położonej na sprężynie jest o  $\Delta E = mgx$  mniejsza, niż w momencie dotknięcia sprężyny. Ta różnica energii jest równa energii sprężystości  $E_p = kx^2/2$ . Dwukrotnie większe odkształcenie sprężyny zwiększa czterokrotnie energię sprężystości, więc kulka powinna polecieć na wysokość  $4x$  od momentu puszczenia (czyli  $3x$  od położenia równowagi). Zmiana masy kulki powinna zmienić wartość  $x = mg/k$ , ale nie stosunek wysokość lotu kulki do  $x$ .

## 5. Przemiany energii z uwzględnieniem sił tarcia

### Co powinniśmy wiedzieć:

Przy spadaniu swobodnym gęstych ciał z niewielkiej wysokości i ruchu niewielkiego wahadła mogliśmy pominąć siły oporu powietrza, bo były znacznie mniejsze od siły ciężkości. Oczywiście siły oporu nie są jednak zerowe i po pewnym czasie doprowadzą do zmniejszenia maksymalnego wychylenia, a w końcu do zatrzymania wahadła. Przy toczeniu uderzonej kulki po płaskim podłożu widzieliśmy, że już po krótkim czasie kulka zatrzymuje się. Co stało się w obu przypadkach z energią kinetyczną? Zgodnie z prawem zachowania energii musiała być ona zużyta na wykonanie pracy. Była to praca przeciw siłom oporu powietrza lub siłom tarcia tocznego.

Tarcie jest zjawiskiem powszechnym, a dla ruchu posuwistego po podłożu siły tarcia są znacznie większe niż wspomniane wyżej siły oporu powietrza i tarcia tocznego. Pchnięty na płaskim stole klocek zatrzymuje się niemal natychmiast. Przyczyną tarcia i oporu powietrza jest oddziaływanie cząsteczek stykających się powierzchni, albo cząsteczek powierzchni ciała i powietrza.

Dokładny opis mikroskopowy tych zjawisk jest bardzo skomplikowany. Wynika z niego, że dla niewielkich szybkości siła tarcia posuwistego i tocznego nie zależy od prędkości, a wartość siły oporu

# Energia i jej przemiany



powietrza jest w przybliżeniu proporcjonalna do wartości prędkości. Wartość siły tarcia jest proporcjonalna do składowej siły ciężkości prostopadłej do powierzchni, po której porusza się ciało.

$$F_t = fmg \quad (5.1)$$

Współczynnik proporcjonalności  $f$  nazywamy współczynnikiem tarcia i zależy on od materiału, z którego zbudowane jest ciało i podłoże. We wszystkich przypadkach zwrot sił tarcia jest przeciwny do zwrotu prędkości, są to więc siły hamujące. Jeśli na ciało poruszające się ruchem posuwistym albo tocznym nie działa żadna siła oprócz siły tarcia (jak w ruchu po poziomej płaszczyźnie), to praca wykonana przeciw tej sile jest równa iloczynowi wartości tej siły  $F_t$  i drogi  $s$  przebytej do zatrzymania ciała

$$W = F_t \cdot s. \quad (5.2)$$

Rozważmy teraz spadanie w powietrzu. Skoro siła oporu rośnie proporcjonalnie do wartości prędkości, a siła ciężkości jest stała, to po osiągnięciu pewnej prędkości siły te będą się równoważyć i ciało zacznie poruszać się ze stałą prędkością. Jej wartość zależy oczywiście od kształtu i gęstości ciała. Dla sporej kulki metalowej siły oporu można zaniedbać nawet dla znacznej wysokości spadania, ale dla kartki papieru już po sekundzie może zmieniać się kierunek prędkości, ale nie jej wartość.

Co dzieje się z energią potencjalną kulki, skoro nie jest ona już zużywana dla zwiększania energii kinetycznej kulki? Jej część oddawana jest powietrzu, które zaczyna się poruszać. Jednak większość energii zamieniana jest w inny jej rodzaj, o którym będzie mowa za chwilę: w energię wewnętrzną kulki i powietrza.

Uwzględnienie sił tarcia lub oporu ośrodka powoduje, jak widać, zmianę sformułowania prawa zachowania energii. Jeśli siły działające na ciało związane były z energią potencjalną zależną tylko od położenia ciała, zachowana była energia samego ciała (suma energii kinetycznej i potencjalnej), a o źródłach tych sił mogliśmy zapomnieć. Taki opis był zresztą przybliżony: gdy ciało spada ruchem przyspieszonym na Ziemię, to i Ziemia doznaje przyspieszenia, ale jej ogromna masa powoduje, że zmiana jej energii kinetycznej jest pomijalnie mała. Pomijanie energii kinetycznej sprężyny, na której umieszczamy ciało, jest już znacznie gorszym przybliżeniem, jeśli jej masa nie jest bardzo mała. Ogólnie należy pamiętać, że zachowana jest energia całego układu ciał oddziałujących, a nie pojedynczego ciała.

## **Problem**

5.1. Na kulkę o masie  $m=0,1\text{kg}$ , która stoczyła się po równi z wysokości  $h=0,1\text{m}$  działa siła tarcia tocznego  $F_t=0,05\text{N}$ . Jaką drogę przebędzie kulka po poziomym stole przed zatrzymaniem?

## **Doświadczenia**

### **5.1. Zatrzymanie ruchu w wyniku tarcia**

*Niezbędne przedmioty:* ciężarek z zaczepem, statyw, mocna nitka, wózek, linijka.

*Przebieg doświadczenia:* W opisanym powyżej doświadczeniu 3.2. zbadaj, jak zależy droga przebyta przez wózek do momentu zatrzymania od wysokości, na którą podnieśliśmy ciężarek przy wychyleniu wahadła.

*Forma zapisu wyników:* tabela wartości wysokości wahadła i drogi przebywanej przez wózek.

*Wynik i wnioski:* Siła tarcia nie zależy od prędkości, to wykonana praca jest proporcjonalna do przebytej drogi. Pierwotna energia potencjalna jest proporcjonalna do wysokości, na którą podniesiono ciężarek wychylonego wahadła. Zatem przebyta droga powinna być proporcjonalna do tej wysokości.

## 5.2. Zależność siły tarcia od masy i ustawienia ciała

*Niezbędne przedmioty:* siłomierz, dwa klocki z zaczepami, drobnoziarnisty papier ścierny.

*Przebieg doświadczenia:* Przyczep siłomierz do klocka i odczytaj wskazania przy jednostajnym ciągnięciu po powierzchni stołu. Następnie weź drugi identyczny klocek i przyczep do pierwszego, a potem znów odczep i połóż na pierwszym. Jak zmieniają się wskazania siłomierza w tych przypadkach? Porównaj wskazania siłomierza przy ciągnięciu klocka położonego na stole większą i mniejszą powierzchnią oraz na stole odsłoniętym i przykrytym papierem ściernym.

*Forma zapisu wyników:* Tabela wskazań siłomierza.

*Wynik i wnioski:* W obu przypadkach ciągnięcia dwóch klocków siłomierz wskaże w przybliżeniu dwukrotnie większą siłę, niż dla jednego klocka. Wynika to wprost z wspomnianej proporcjonalności siły tarcia do składowej siły ciężkości prostopadłej do powierzchni stołu. Dla dwóch klocków siła ta jest dwukrotnie większa i wtedy, gdy leżą na sobie, i wtedy, gdy są przyczepione do siebie. Obrócenie klocka na większy lub mniejszy bok też nie wpływa na wskazania. Natomiast pokrycie stołu papierem ściernym zwiększa znacznie siłę oporu, bo dla takiego materiału znacznie większy jest współczynnik tarcia.

## 5.3. Siły oporu powietrza

*Niezbędne przedmioty:* zeszyt i dwie wyrwane z niego kartki papieru.

*Przebieg doświadczenia:* Weź dwie identyczne kartki papieru. Wypuść obie równocześnie z ręki, jedną trzymaną poziomo, a drugą pionowo. Która spadła szybciej? Teraz kartkę trzymaną pionowo zgnieć w kulkę i wypuść obie równocześnie z ręki. Która spadnie szybciej na podłogę? Teraz weź zeszyt, z którego pochodziły kartki i wypuść go z ręki równocześnie z pojedynczą kartką. Co spadnie szybciej?

*Forma zapisu wyników:* notatki.

*Wynik i wnioski:* kartka trzymana pionowo spadła szybciej, niż trzymana poziomo (choć zapewne obróci się w trakcie spadania i znacznie zwolni), zmięta kartka spadła szybciej, niż gładka, a zeszyt szybciej niż pojedyncza kartka. Wynika to z faktu, że siła oporu powietrza zależy głównie od rozmiarów ciała w kierunkach poprzecznych do ruchu, a siła grawitacji od masy.

## 6. Energia wewnętrzna i przekazywanie energii na sposób ciepła.

### *Co powinniśmy wiedzieć:*

W poprzednim punkcie mogliśmy mieć wątpliwości, czy prawo zachowania energii obowiązuje w obecności sił tarcia. Przecież kulka, która zatrzymała się, straciła energię kinetyczną, a nie zyskała potencjalnej energii grawitacji, bo znajduje się na tej samej wysokości. Co stało się z energią kinetyczną? Podobne pytanie można było zresztą zadać wcześniej w przypadku wahadła oraz kulki odbijanej między sprężynami: wiemy przecież, że w obu przypadkach po pewnym czasie ruch ustaje.

Siły tarcia, oporu powietrza i pokrewne powodują, że ciało zużywa swoją energię kinetyczną na wzrost *energii wewnętrznej* swojej i otoczenia.

Czym jest energia wewnętrzna? Aby na to odpowiedzieć, musimy odwołać się do opisu mikroskopowego materii. Jak wiemy, każde ciało zbudowane jest z cząsteczek chemicznych. W ciałach stałych cząsteczki są ciasno „upakowane”, a ich położenie względem siebie jest w przybliżeniu ustalone,

# Energia i jej przemiany



w cieczech cząsteczki są podobnie gęsto ułożone, ale mogą się przemieszczać, a w gazach średnie odległości między cząsteczkami są znacznie większe od ich rozmiarów, więc poruszają się swobodnie między zderzeniami. We wszystkich przypadkach cząsteczki nie są jednak nigdy w spoczynku i poruszają się z prędkościami, które mogą być bardzo wielkie (np. rzędu setek metrów na sekundę dla cząsteczek gazów w temperaturze pokojowej). Jak wspomniano, dla ciał stałych jest to ruch drgający względem ustalonego położenia, a dla gazów swobodny ruch między zderzeniami.

Suma energii kinetycznych wszystkich cząsteczek ciała w *tym ruchu* to właśnie główny składnik energii wewnętrznej. Oczywiście każde ciało (np. kulka metalowa) może mieć także energię kinetyczną związaną z ruchem tej kulki *jako całości*. Kiedy tocząca się kulka zatrzymuje się, to znaczy, że energia ta została przekazana cząsteczkom kulki i podłoża, zwiększając energię wewnętrzną tych ciał. Podobnie, jeśli w naczyniu wypełnionym gazem upuścimy piłeczkę, to jej energia potencjalna grawitacji zmieni się w energię kinetyczną, a następnie (zapewne po kilku odbiciach od dna) w energię wewnętrzną piłeczki, gazu i dna naczynia.

Dodajmy, że cząsteczki mają na ogół oprócz energii kinetycznej także i energię potencjalną związaną z ich wzajemnym oddziaływaniem. Energia ta jest także składnikiem energii wewnętrznej, ale zwykle jej zmiany są mniejsze niż zmiany energii kinetycznej i często można je pominąć. Oddziaływanie między atomami, z których zbudowane są cząsteczki, jest znacznie silniejsze, ale energia potencjalna związana z tymi oddziaływaniami praktycznie nie zmienia się w procesach fizycznych. Wrócimy do niej przy omawianiu przemian chemicznych.

Aby sprawdzić, czy prawo zachowania energii jest słuszne także przy uwzględnieniu energii wewnętrznej, musimy dysponować jakąś inną metodą oceny energii cząsteczek. Taką metodą jest pomiar temperatury, która jest także związana ze średnią energią kinetyczną chaotycznego ruchu pojedynczej cząsteczki. Związek temperatury i energii wewnętrznej nie jest jednak taki sam dla wszystkich ciał: temperatura mierzy tylko średnią energię kinetyczną ruchu postępowego cząsteczki, a energia wewnętrzna jest sumą energii kinetycznych cząsteczek związanych z wszystkimi rodzajami ich ruchów, także np. obrotów i wibracji. Zatem temperatura zawsze rośnie przy zwiększaniu energii wewnętrznej ciała, ale dla różnych rodzajów ciał ten wzrost może być różny; miarą tych różnic są różnice tzw. *ciepła właściwego*.

Użyte tu słowo „ciepło” jest podobnie trudne do zdefiniowania jak energia. Przez długi czas fizycy uważali, że ogrzewanie ciał oznacza nasycanie ich jakimś specjalnym rodzajem materii („cieplikiem”). Dziś wiemy, że to nie jest prawda, a ogrzewanie zmienia tylko stan cząsteczek materii. Jednak nie jest poprawne określanie energii kinetycznej ruchu tych cząsteczek jako „ciepła” (w potocznym języku efekt działania sił tarcia często określa się niesłusznie jako „zamięną pracę na ciepło”). Obecnie mówimy, że „oddawanie”, lub „odbieranie” ciepła to przekazywanie energii wewnętrznej od jednego ciała do drugiego, poprawne więc jest mówienie o przekazywaniu energii na sposób ciepła, albo prościej, o cieplnym przepływie energii.

Z takim przekazywaniem energii mamy do czynienia zawsze, gdy stykają się dwa ciała o różnej temperaturze. Przekazywanie może być bardzo szybkie, jeśli np. wymieszymy dwa gazy, albo bardzo wolne: np. kawałek lodu może pływać nawet w dość ciepłej wodzie bardzo długo, zanim się stopi. Zależy to od tego, ile cząsteczek ciała o wyższej temperaturze ma kontakt z cząsteczkami ciała o niższej temperaturze, od tego, czy „ogrzone” cząsteczki o wyższej średniej energii kinetycznej pozostają na swoim miejscu, czy przemieszczają się w obszar, gdzie ta energia jest mniejsza, a także od innych własności danego rodzaju materii, decydujących o jego *przewodnictwie cieplnym*.

Nie wchodząc w szczegóły teorii można powiedzieć ogólnie, że duże przewodnictwo cieplne występuje w ciałach stałych, w których znaczna część elektronów nie jest związana z atomami i cząsteczkami, ale może swobodnie się przemieszczać. Są to te same ciała, które dobrze przewodzą prąd

# Energia i jej przemiany



elektryczny, a więc przede wszystkim metale. Potwierdza to codzienne doświadczenie: metalowy kubek z gorącą herbatą trudno utrzymać w ręce, bo parzy nam palce, a podobny kubek z porcelany albo fajansu można trzymać bez trudności, bo temperatura jego zewnętrznej powierzchni jest znacznie niższa, niż temperatura herbaty we wnętrzu.

Dla cieczy niemetalicznych i dla gazów przewodnictwo cieplne jest znacznie mniejsze, więc głównym mechanizmem przekazywania energii wewnętrznej jest mieszanie ich „porcji” o różnych temperaturach. Naturalną przyczynę takiego mieszania omówimy poniżej w jednym z problemów.

Skoro energia wewnętrzna związana jest z sumą energii cząsteczek, a temperatura ze średnią energią pojedynczej cząsteczki, to stosunek tych wielkości musi być proporcjonalny do liczby cząstek, a zatem i do masy ciała  $m$ . Wzór na zmianę energii wewnętrznej przez zmianę temperatury ma więc postać

$$\Delta E_w = cm\Delta T, \quad (6.1)$$

gdzie  $c$  jest wspomnianym już ciepłem właściwym, czyli energią potrzebną do ogrzania  $1$  kg materii o  $1^\circ\text{C}$  (czyli  $1$  K, bo w skali bezwzględnej temperatury zmiana temperatury jest taka sama, jak w skali Celsjusza).

## **Problemy:**

6.1. Przy ogrzewaniu większość ciał „rozszerza się”, czyli zmniejsza swoją gęstość. Zatem ciecz o wyższej temperaturze ma mniejszą gęstość. Jeśli chcesz szybko zagrzać wodę w piekarniku elektrycznym przy niewielkim zużyciu energii, to którą grzałkę lepiej włączyć: górną czy dolną?

6.2. Jeśli zmiana energii wewnętrznej jest proporcjonalna do masy ogrzewanego ciała i do różnicy temperatur, to ile wrzątku należy wlać do 6 litrów wody o temperaturze pokojowej ( $20^\circ\text{C}$ ), aby otrzymać wodę do mycia (o temperaturze ok.  $40^\circ\text{C}$ )?

## **Doświadczenia:**

### **6.1. Przekazywanie energii wewnętrznej w wodzie**

*Niezbędne przedmioty:* Probówka, statyw z uchwytem, palnik, woda.

*Przebieg doświadczenia:* Aby sprawdzić poprawność rozumowania przedstawionego w rozwiązaniu problemu 6.1. należy prawie do pełna do probówki (nie krótszej niż 20 cm) zimnej wody z kranu i trzymając ją blisko dna podstaw górną część probówki pod płomień palnika. Dotknij dna naczynia, gdy woda zacznie wrzeć. Uwaga: nie trzymaj probówki bezpośrednio palcami, ale w uchwycie albo przez grubą rękawicę, a wylot probówki skieruj „od siebie” i sprawdź, czy nikt nie stoi zbyt blisko.

*Forma zapisu wyników:* notatki.

*Wynik i wnioski:* choć woda zacznie wrzeć, dno probówki pozostanie prawie zimne. Wynika stąd, że przekazywanie energii wewnętrznej od górnych do dolnych warstw wody jest bardzo wolne, jeśli nie następuje mieszanie, a gorąca woda jest mniej gęsta od zimnej, więc pozostaje w górnej części probówki.

### **6.2. Bilans cieplny**

*Niezbędne przedmioty:* Kalorymetr, menzurka lub waga, naczynie, palnik, termometr, woda lub olej.

*Przebieg doświadczenia:* Sprawdź w kalorymetrze, że mieszanie wody (lub innej cieczy) o różnych temperaturach  $T_1$  i  $T_2 > T_1$  oraz różnych masach  $m_1$  i  $m_2$  daje zawsze w przybliżeniu temperaturę  $T$ , którą można wyliczyć z warunku

# Energia i jej przemiany



$$m_1(T-T_1)=m_2(T_2-T), \quad (6.2)$$

czyli

$$T=(m_2T_2+m_1T_1)/(m_1+m_2). \quad (6.3)$$

Zastanów się, jaką zmianę tego wyniku da uwzględnienie wymiany energii wewnętrznej z otoczeniem podczas wlewania cieczy do kalorymetru, jeśli  $T$  jest większe/mniejsze od temperatury pokojowej.

*Forma zapisu wyników:* Tabela mas i temperatur cieczy przed zmieszaniem i temperatury po zmieszaniu w kalorymetrze.

*Wynik i wnioski:* zmierzona temperatura końcowa będzie nieco mniejsza od wyliczonej dla dużych  $T$ , a mniejsza dla małych, bo w pierwszym przypadku strata energii wewnętrznej gorącej wody będzie większa niż ewentualny zysk energii ogrzewanej przez powietrze wody zimnej (praktycznie ogrzewanej tylko na powierzchni), a w drugim przypadku pierwszy efekt będzie nieobecny albo znacznie słabszy. Uwaga: przy wysokich temperaturach najpoważniejszą zmianę wyniku może spowodować parowanie wody, które trudno ściśle uwzględnić, lepiej więc używać cieczy, które wolno parują, jak olej.

## 7. Przemiany energii mechanicznej i energii wewnętrznej

### *Co powinniśmy wiedzieć:*

W omawianych przykładach z siłą tarcia i siłami oporu powietrza przemiana energii była „jednokierunkowa”: energia kinetyczna ciała malała na rzecz energii wewnętrznej ciała i otoczenia, prowadząc zwykle do zatrzymania ruchu, jeśli nie podtrzymywało go działanie siły. Można więc zadać ważne pytanie: czy możliwa jest przemiana odwrotna, w której część (a może całość?) energii wewnętrznej przekształci się w inne formy energii?

Odpowiedź na to pytanie jest niezbyt prosta: można przekształcić w energię mechaniczną część energii wewnętrznej ciała, ale warunki, w których można tego dokonać, dotyczą nie tylko tego ciała, ale i otoczenia, z którym wymienia ono energię.

Zacznijmy więc znów od procesów, w których energia mechaniczna przekształcana jest na energię wewnętrzną. Zapytajmy na początek, dlaczego takich procesów nie używamy na co dzień w kuchni. Przecież wykonując pracę, np. mieszając energicznie wodę, dostarczamy jej energii, a zatem podnosimy jej temperaturę. Czy nie moglibyśmy w ten sposób zagotować wody na herbatę?

Odpowiedź jest niestety negatywna. Ciepło właściwe wody to w przybliżeniu  $4,19 \text{ kJ}/(\text{K}\cdot\text{kg})$ . Oznacza to, że do podgrzania litra wody o zaledwie 1 stopień należy wykonać pracę równoważną podniesieniu masy  $100 \text{ kg}$  na wysokość ponad  $4 \text{ m}$ . Działając na mieszadło siłą  $10 \text{ N}$  i kręcąc jego korbą po obwodzie o długości  $1 \text{ m}$  wykonamy taką pracę po  $400$  obrotach, a więc teoretycznie po wykonaniu  $32000$  obrotów podnieśliśmy temperaturę od pokojowej do temperatury wrzenia. Niestety, zajęłoby to kilka godzin i w tym czasie przeważająca część dostarczonej energii (rosnąca z temperaturą) zostałaby oddana otoczeniu.

Zatem przemiana energii mechanicznej na wewnętrzną jest rzadko korzystna. Zwykle wzrost energii wewnętrznej jest zbyt mały, aby wywołać pożądane skutki (choć są wyjątki, np. rozpalanie ognia przez wiercenie drewnianym patykiem w drewnianej podstawie, znane już ludziom pierwotnym). Z reguły zjawiska, w których zwiększamy energię wewnętrzną kosztem mechanicznej uważamy za „straty” powodujące, że nie możemy w pełni wykorzystać źródeł energii do wykonania pracy. Zwykle jednak nawet znaczne straty nie powodują widocznych efektów cieplnych. Zamiana ogromnej energii kinetycznej na wewnętrzną prowadzi do dość nieznacznego ogrzania. W samochodach osobowych o masie rzędu

# Energia i jej przemiany



tysiąca kg wyhamowanie z szybkości 40 m/s do zatrzymania powoduje oczywiście podgrzanie opon i hamulców, ale już po kilkuset metrach dalszej jazdy opływ powietrza ochładza je do poprzedniej temperatury bez konieczności montażu specjalnych układów chłodzących (a przecież masa opon i hamulców to znikomy ułamek masy samochodu!).

Z tej „przewagi” energii wewnętrznej wynika, że przemiany cieplne mogą istotnie dostarczyć nam wielkiej energii mechanicznej. Korzystaliśmy z tego przez niemal dwieście lat, gdy lokomotywy z kotłami parowymi ciągnęły po torach wielosettonowe pociągi. Obecnie energii pojazdom dostarczają częściej procesy spalania wewnętrznego w silnikach benzynowych lub wysokoprężnych, albo prąd elektryczny, ale i w tym ostatnim przypadku energia pochodzi zwykle z przemian cieplnych materii ogrzanej reakcjami spalania albo jądrowymi.

Jednak wzrost energii wewnętrznej materii przez jej ogrzanie do temperatury  $T_1$  jest dopiero pierwszym warunkiem do procesu przekształcenia jej w energię mechaniczną. Musimy dysponować także materią w niższej temperaturze  $T_2$  („chłodnicą”), a ułamek energii dostarczonej, którą można zamienić na energię mechaniczną, nie może przekroczyć wartości

$$\eta_0 = (T_1 - T_2) / T_1. \quad (7.1)$$

Dla pary wodnej w temperaturze bliskiej temperatury wrzenia i chłodnicy o temperaturze pokojowej ta wartość to w przybliżeniu 80/370, czyli niewiele ponad 20%.

We wspomnianych wyżej maszynach parowych ciśnienie pary wodnej powstającej przy zagotowaniu wody przesuwają części ruchome silnika, a ten ruch można przełożyć na ruch obrotowy kół. Nie będziemy tu omawiać szczegółowo konstrukcji silników parowych ani zachodzących w nich procesów. Wypada jednak przypomnieć, że w rzeczywistych silnikach sprawność  $\eta$ , czyli stosunek uzyskanej energii mechanicznej do energii dostarczonej przez spalanie paliwa, jest jeszcze mniejszy niż obliczony powyżej ułamek  $\eta_0$ . Znacznie lepszą sprawność można uzyskać, gdy parę podgrzewamy do wyższych temperatur, a tradycyjny silnik parowy zastępujemy przez turbinę, obracaną strumieniem pary. Omówienie różnych rodzajów silników cieplnych wykracza jednak znacznie poza zakres tego pakietu tematycznego.

Dodajmy, że wzrost energii wewnętrznej ciała może powodować inne skutki poza wzrostem temperatury. Należy tu wymienić np. zmiany stanu skupienia: topnienie ciał stałych i wrzenie cieczy. Zachodzi ono zwykle w stałej temperaturze: ogrzewanie lodu o temperaturze poniżej jego temperatury topnienia  $0^\circ \text{C}$  powoduje wzrost temperatury, ale po osiągnięciu temperatury topnienia dalsze ogrzewanie powoduje tylko stopniową zamianę lodu w wodę (zresztą dość wolną, bo ciepło topnienia lodu  $c_p$ , definiowane jako energia potrzebna do stopienia 1 kg lodu, jest bardzo duże: w przybliżeniu równe energii potrzebnej do podgrzania otrzymanej z lodu wody o 80 K). Temperatury topnienia zależą od ciśnienia, dlatego pod ostrzem łyżwy wywierającym wielkie ciśnienie na taflę lodu, lód topi się już w ujemnych temperaturach.

Podobnie jest z wrzeniem: przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym woda wrze w temperaturze  $100^\circ \text{C}$  (i właśnie te dwa zjawiska posłużyły w połowie XVIII wieku szwedzkiemu uczonemu Andersowi Celsiusowi, zwanemu w Polsce Celsjuszem, do wyznaczenia używanej do dziś skali temperatur). Zatem ogrzewanie wody, czyli zwiększanie jej energii wewnętrznej, prowadzi do wzrostu temperatury tylko do  $100^\circ \text{C}$ , a następnie temperatura pozostaje stała aż do zamiany całej wody w parę wodną. Ciepło parowania w temperaturze wrzenia  $c_w$ , definiowane jako ilość energii potrzebnej do zamiany 1 kg wody w parę, jest ogromne: wystarczyłoby do podgrzania o  $100^\circ \text{C}$  ponad 5 kg wody! Temperatura wrzenia zależy od ciśnienia znacznie silniej, niż temperatura topnienia; dlatego w górach, gdzie ciśnienie atmosferyczne jest niższe, woda zagotowuje się szybko, ale np. ugotowanie jajka na twardo trwa znacznie dłużej.

Zjawiska odwrotne do topnienia i wrzenia, czyli krzepnięcie i skraplanie, związane są z

# Energia i jej przemiany



oddawaniem dużej energii wewnętrznej otoczeniu ciała. Dlatego np. na początku zimy temperatura na brzegach zbiorników wodnych nie spada znacząco poniżej zera aż do zamarznięcia całej tafli wodnej. Nie opracowano jednak dotąd praktycznych metod wykorzystywania tej energii na większą skalę.

## **Problemy:**

7.1. Kulki gradu spadają z chmur, a podczas spadania topi się (i paruje) zewnętrzna warstwa kulki w wyniku oporu powietrza (który zwalnia także spадanie), zatem na ziemię docierają zwykle niezbyt wielkie kulki o niezbyt wielkiej szybkości. Czy kulki po uderzeniu w ziemię stopiłyby się, gdyby oporu powietrza nie było? Przyjmij pierwotną temperaturę kulek  $0^{\circ}\text{C}$ , wysokość, z której spadają  $h=1\text{ km}$  i załóż, że połowa energii kinetycznej zmieni się w energię wewnętrzną kulki, a połowa w energię wewnętrzną otoczenia. Jak wynik zależy od wysokości, z której spada grad?

7.2. Kula karabinowa o masie  $10\text{ g}$  i szybkości  $300\text{ m/s}$  trafia w cylinder zawierający  $1\text{ kg}$  wody i zostaje w nim całkowicie wyhamowana. O ile wzrośnie temperatura wody, jeśli pominiemy zmianę energii wewnętrznej kulki?

7.3. Przez spalanie opału dostarczono do silnika parowego podczas przejazdu pociągu energię  $E=100\text{ MJ}$  (co odpowiada spaleniu ok.  $5\text{ kg}$  węgla kamiennego). Jaki dystans  $s$  przejedzie po płaskim terenie pociąg, jeśli jego masa to  $100\,000\text{ kg}$ , siła tarcia stanowi ułamek  $u=10\%$  siły ciężkości, a sprawność silnika  $\eta=10\%$ ?

## **Doświadczenia:**

### **7.1 Zamiana energii mechanicznej na wewnętrzną**

*Niezbędne przedmioty:* Termometr lekarski, pasek płótna lub gruby sznurek.

*Przebieg doświadczenia:* Ogrzej termometr lekarski do temperatury ciała, a następnie owiń koniec termometru paskiem płótna lub sznurkiem i kilkakrotnie przesunij pocierając termometr. Co zaobserwujesz? Sprawdź, jak zmieni się wynik w zależności od czasu pocierania.

*Forma zapisu wyników:* tabela wskazań termometru.

*Wynik i wnioski:* wskazywana temperatura podniesie się, bo praca wykonana przy pocieraniu zwiększy energię wewnętrzną termometru. Wzrost temperatury jest w przybliżeniu proporcjonalny do czasu pocierania.

## **8. Energia elektrostatyczna i energia fal elektromagnetycznych\***

### **Co powinniśmy wiedzieć:**

Energia potencjalna związana z grawitacją nie jest jedyną energią tego typu znaną fizykom. W przyrodzie występują oddziaływania inne od grawitacyjnych. Najdawniej i najlepiej znane z nich są oddziaływania elektromagnetyczne. Ich najprostszym przejawem jest przyciąganie lub odpychanie ciał o niezerowym ładunku elektrycznym.

Opis tego oddziaływania jest zaskakująco podobny do opisu oddziaływań grawitacyjnych. Dla ciał o wymiarach pomijalnych w porównaniu z odległością między nimi, a także dla ciał o symetrii sferycznej, siły mają wartość proporcjonalną do iloczynu wartości ładunków, a odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między środkami ciał



# Energia i jej przemiany

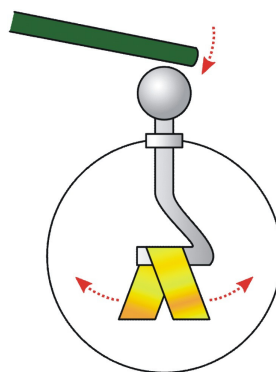


$$F=kQ_1Q_2/r^2, \quad (8.1)$$

przy czym kierunek siły jest wyznaczony przez prostą przechodzącą przez środki obu ciał. Ładunki jednakowego znaku odpychają się, a przeciwnego przyciągają.

Prawo powszechnej grawitacji Newtona ma podobną postać, a do tego wartości stałych proporcjonalności są takie, że np. siła grawitacyjna między dwoma ciałami o masach 1 kg jest o wiele rzędów wielkości mniejsza niż siła elektrostatyczna między oddalonymi o tę samą odległość ciałami o ładunkach 1 C. Może więc zaskakiwać fakt, że na każdym kroku odczuwamy siły grawitacji ziemskiej, a tylko bardzo rzadko obserwujemy efekty sił elektrostatycznych. Przyczyna tego jest jednak bardzo prosta: w „zwykłej” materii jest tyle samo ładunków dodatnich, co ujemnych i siły działające na nie znoszą się. Nawet gdy mówimy o „ciałach naelektryzowanych” mamy na myśli sytuację, gdy nadwyżka np. ładunków ujemnych stanowi znikomo mały ułamek (nie przekraczający zwykle jednej milionowej) ładunku wszystkich elektronów w danym ciele. Jedynie w mikroświecie, gdzie obserwujemy oddziaływania pojedynczych elektronów lub protonów, dominują siły elektrostatyczne (i ogólniej elektromagnetyczne, a także tzw. siły jądrowe, działające na bardzo małych odległościach), a efekty oddziaływań grawitacyjnych są pomijalnie małe.

Możemy jednak obserwować zjawiska związane z siłami elektrostatycznymi także i w makroświecie. Najprostszym przykładem takich efektów jest rozchylenie skrzydełek elektroskopu po dotknięciu go łaską szklaną lub ebonitową potartą o sukno.



Rysunek 8.1

Efekt ten tłumaczymy równoważeniem sił grawitacji (które doprowadziłyby do pionowego „zwisania” obu skrzydełek) przez odpychające siły elektrostatyczne. W języku prawa zachowania energii można powiedzieć, że naładowanie elektroskopu dostarczyło mu dodatkowej energii potencjalnej elektrostatycznej, której część zamieniła się na energię potencjalną grawitacyjną rozchylonych skrzydełek.

Energia potencjalna dla układu dwu ciał punktowych o niezerowych ładunkach jednoimiennych da się obliczyć z wzoru (8.1) jako praca, którą trzeba wykonać, aby zbliżyć te ładunki z nieskończoności (gdzie siły elektrostatyczne znikają) na odległość  $r$ . Niestety obliczenie to wymaga metod wyższej matematyki, ale wynik jest bardzo prosty

$$E_p=kQ_1Q_2/r. \quad (8.2)$$

Dla ładunków różnoimiennych identyczna praca będzie wykonana przez same przyciągające się ładunki. Oznacza to, że energia potencjalna układu dwu ładunków o różnych znakach jest ujemna w porównaniu ze stanem, gdy ładunki są nieskończenie odległe. Aby je rozdzielić, trzeba wykonać pracę. Co

# Energia i jej przemiany



gorsza, w fizyce klasycznej taki układ jest niestabilny – ładunki dążą do zetknięcia się i zubożenia, przy czym wyzwoliłaby się nieskończona (dla ładunków punktowych) energia. Tymczasem, jak wiemy, materia zbudowana jest z cząstek obojga znaków, które tworzą stabilne układy. Z tego faktu można wyciągnąć ważny wniosek: fizyka klasyczna nie może poprawnie opisywać mikroświata, w którym naładowane cząstki mają rozmiary pomijalnie małe w porównaniu z rozmiarami atomów.

Niemniej już klasyczny opis energii potencjalnej oddziaływań elektrostatycznych pozwala na zrozumienie, skąd bierze się energia fizycznych i chemicznych przemian materii. Wprawdzie atomy i cząsteczki są jako całość neutralne elektrycznie, ale ładunki elektronów wchodzących w ich skład nie są rozłożone całkowicie losowo. W ciałach stałych cząsteczki tworzą często sieć krystaliczną, w której wzajemne oddziaływania powodują, że wychylenie każdej cząsteczki z położenia równowagi wymaga energii. Maksymalne wychylenia drgań wokół tego położenia stają się coraz większe, gdy dostarczamy energii i podwyższamy temperaturę ciała. Gdy dochodzimy do temperatury topnienia, cząsteczki mogą trwale „wyrwać się” ze swoich położań równowagi. Sieć zostaje zniszczona i ciało stałe przekształca się w ciecz, której cząsteczki mogą swobodnie przemieszczać się względem siebie. Odtąd temperatura mierzy średnią energię kinetyczną tego ruchu, a nie energię drgań. Skoro dla każdej cząsteczki wyrwanie jej z sieci wymaga określonej energii, energia potrzebna do stopienia ciała jest proporcjonalna do liczby cząsteczek, a więc do masy ciała, jak wspomniano już w poprzednim punkcie.

W nowoczesnym opisie oddziaływań elektromagnetycznych energię potencjalną układu naładowanych cząstek przypisujemy nie tym cząstkom, ale polu elektrycznemu, które wytwarzają w otaczającej je przestrzeni. Oczywiście umieszczenie w tej przestrzeni kolejnych naładowanych cząstek zmienia energię, więc wymaga wykonania pracy, albo pozwala na wykorzystanie energii uzyskanej dzięki wykonaniu przez nie pracy.

Ten opis pozwala na zrozumienie jeszcze jednego sposobu przekazywania energii, oprócz omówionych w p.6 przewodnictwa cieplnego i konwekcji: promieniowanie. Skoro pole elektromagnetyczne charakteryzuje się energią, to wszystkie formy promieniowania elektromagnetycznego (czyli fale elektromagnetyczne) niosą energię. Zatem np. ciało świecące wysyła energię, a ciało pochłaniające promieniowanie zyskuje energię. Dzięki temu mechanizmowi działają kuchenki mikrofalowe, w których potrawy nagrzewają się pochłaniając promieniowanie, dzięki niemu żarówka utrzymuje stałą temperaturę, choć stale dostarcza się jej energię przez przepływ prądu.

Wszyscy wiemy oczywiście, że promieniowanie elektromagnetyczne wysyłane przez Słońce ogrzewa powierzchnię Ziemi i wszystko, co się na niej znajduje. W gruncie rzeczy wszystkie ziemskie źródła energii oprócz elektrowni jądrowych zawdzięczają swoje istnienie temu „importowi” ze Słońca: paliwa kopalne to pozostałości roślin, które urosły dzięki energii słonecznej, a elektrownie wodne działają dzięki parowaniu nagrzewanych przez Słońce mas wody i ich powrotowi na Ziemię w formie deszczu lub śniegu. Nawet elektrownie wiatrowe wykorzystują prądy powietrza powstałe w wyniku nagrzania przez Słońce różnych obszarów powierzchni Ziemi do różnych temperatur. W XX wieku nauczyliśmy się też wykorzystywać energię słoneczną bardziej bezpośrednio, wytwarzając prąd elektryczny w bateriach słonecznych i nagrzewając wodę w instalacjach grzewczych pojedynczych domów.

## **Problemy:**

8.1. Dwa niewielkie ciała naładowane jednoimiennymi ładunkami zbliżono z odległości 2 m do 1 m, a następnie z 1 m do 0,5 m. Ile razy większą pracę trzeba było wykonać przy tym drugim przesunięciu?

8.2. Tzw. stała słoneczna, czyli moc dostarczana przez promieniowanie słoneczne na powierzchnię  $1 \text{ m}^2$  prostopadłą do kierunku padania promieni słonecznych to około  $1,3 \text{ kW}$ . Skoro silnik małego samochodu osobowego powinien mieć moc conajmniej  $25 \text{ kW}$ , przez jak dużą część bezchmurnego dnia mógłby jeździć samochód nosący na dachu  $4 \text{ m}^2$  baterii słonecznych, gdyby energię słoneczną wykorzystano bez strat?

## **Doświadczenie:**

### **8.1. Siły elektrostatyczne**

*Niezbędne przedmioty:* Statyw, nitka i dwa baloniki.

*Przebieg doświadczenia:* Potrzymaj tkaniną dwa jednakowe nadmuchane baloniki. Następnie zawieś je na nitkach blisko siebie. Co zaobserwujesz? Teraz obejmij jeden z baloników wilgotnymi rękami, a następnie znów zawieś blisko siebie. Co teraz zaobserwujesz?

*Forma zapisu wyników:* notatki.

*Wynik i wnioski:* nitki, na których wiszą baloniki, nie będą pionowe i równoległe. W pierwszym przypadku baloniki będą się odpychały, bo naładowano je jednakowym ładunkiem, a w drugim lekko przyciągały, bo na baloniku rozładowanym przez dotknięcie ładunek przemieści się tak, że bliżej balonika naładowanego zbierze się ładunek przeciwnego znaku.

## **9. Energia i praca prądu elektrycznego\***

### **Co powinniśmy wiedzieć:**

Silniki elektryczne wyparły dzisiaj z torów kolejowych nie tylko lokomotywy parowe, ale i spalinowe. Coraz częściej mówi się, że samochody przyszłości także będą korzystać z takich silników. Przyczyna tej rosnącej dominacji silników elektrycznych jest oczywista: prawidłowo działające silniki elektryczne są ciche, elastyczne i przede wszystkim nie wytwarzają spalin, więc nie zanieczyszczają środowiska. W jaki sposób energia jest wytwarzana, przechowywana i przetwarzana na energię mechaniczną w urządzeniach elektrycznych?

Nie będziemy tu oczywiście omawiać żadnych szczegółów budowy urządzeń elektrycznych. Wymienimy tylko po kolei ogniwa łańcucha tych urządzeń i role, które spełniają.

- Prądnice, które wytwarzają prąd elektryczny kosztem energii mechanicznej przez wykorzystanie zjawiska indukcji. W zjawisku tym prąd powstaje przez obracanie uzwojenia w polu magnetycznym (albo magnesu względem uzwojenia). Różnego typu prądnice są elementami elektrowni, wytwarzających prąd na skalę przemysłową. Ze względu na źródło energii mechanicznej użyte w nich, elektrownie dzielimy na tradycyjne ciepłe (gdzie spalanie paliw stałych, ciekłych lub gazowych dostarcza energii dla silników cieplnych, zwykle turbin gazowych), jądrowe, gdzie źródłem ciepła są reakcje łańcuchowe rozszczepiania jąder atomowych, wodne, gdzie energii dostarcza spadek wody w rzece, pływowe, gdzie wykorzystuje się ruch wody morskiej i wiatrowe, gdzie wiatr porusza skrzydła ogromnego wiatraka. Osobną kategorię stanowią elektrownie słoneczne, gdzie promieniowanie Słońca jest absorbowane w wielkich panelach i bezpośrednio przekształcane w prąd, albo użyte do ogrzewania wody jak opał w tradycyjnych elektrowniach cieplnych.

# Energia i jej przemiany



- Sieć energetyczna, przez którą przesyła się prąd z elektrowni do odbiorców. Dla ograniczenia strat prąd przesyła się pod wysokim napięciem liniami napowietrznymi lub kablami starannie izolowanymi od otoczenia.
- Ogniwa, baterie i akumulatory, w których „magazynujemy” prąd, jeśli potrzebujemy energii elektrycznej w urządzeniach, które nie mogą być bezpośrednio połączone z siecią. Wyróżniamy tu ogniwa i baterie jednorazowe, w których prąd powstaje w wyniku reakcji chemicznych zmieniających trwale ogniwa, akumulatory, w których zmiany te są odwracalne i po rozładowaniu akumulator można ponownie naładować z sieci, oraz ogniwa paliwowe, w których substancje służące do wytwarzania prądu podaje się w sposób ciągły odprowadzając równocześnie produkty reakcji.
- Silniki elektryczne, które zamieniają energię prądu elektrycznego na energię mechaniczną dzięki wykorzystaniu sił działających między przewodnikami, przez które płynie prąd. Zwykle wynikiem działania tych sił jest ruch obrotowy elementów mechanicznych napędzanego urządzenia.

Nie wspominamy tu o innych zastosowaniach prądu elektrycznego, jak różne procesy technologiczne, w których mniej ważna jest energia, a bardziej chemiczne i fizyczne zmiany w różnych ciałach powodowane przez przepływ prądu. Zajmiemy się tylko wspomnianym łańcuchem przemian od źródła energii służącej do wytwarzania prądu do silników przetwarzających energię prądu na energię mechaniczną.

Oczywiście wszystkie elementy tego łańcucha nie działają bez strat, polegających głównie na niepożądanym ogrzewaniu otoczenia. Ograniczanie strat, wspomniane już przy liniach sieci energetycznej, jest jednym z podstawowych zadań energetyki i wpływa na wybór typu elektrowni oraz ewentualnych urządzeń magazynujących prąd. Często też energię, której nie można wykorzystać do napędzania prądnic elektrowni, wykorzystuje się niezależnie do ogrzewania domów gorącą wodą lub parą („elektrociepłownie”) lub do przeprowadzania procesów technologicznych.

Teraz przejdźmy do podstawowego pytania: jaką energię niesie prąd elektryczny? Na początek rozważmy stały prąd płynący przez przewodnik, między końcami którego istnieje napięcie (różnica potencjałów)  $U$ . Gdyby między tymi końcami przeleciał ładunek  $Q$ , zostałby przyspieszony uzyskując energię kinetyczną równą  $QU$ . Kiedy ładunek porusza się w przewodniku, oddziałuje z jego cząsteczkami i oddaje im swoją energię kinetyczną zwiększając energię wewnętrzną przewodnika. Procesy te, których intensywność zależy od materiału przewodnika i jego rozmiarów, ograniczają szybkość poruszania się ładunków. Okazuje się, że zgodnie z tzw. prawem Ohma natężenie prądu płynącego w przewodniku (czyli stosunek przepływającego ładunku do czasu przepływu,  $I=Q/t$ ) jest proporcjonalne do przyłożonego napięcia

$$I=U/R. \quad (9.1)$$

Współczynnik  $R$  nazywamy oporem przewodnika. Jak łatwo zgadnąć, jest on proporcjonalny do długości przewodnika (im dłuższy przewodnik, tym większe efekty oddziaływań ładunków z cząsteczkami przewodnika), a odwrotnie proporcjonalny do jego przekroju.

$$R=\rho l/S, \quad (9.2)$$

gdzie  $\rho$  jest tzw. oporem właściwym przewodnika zależnym od jego rodzaju i warunków fizycznych, np. temperatury (dla metali rośnie z temperaturą)..

Energia oddana cząsteczkom przewodnika w czasie  $t$  to

$$E=QU=UIt, \quad (9.3)$$

# Energia i jej przemiany



zatem moc prądu można wyrazić (używając prawa Ohma) na trzy sposoby:

$$M=UI=U^2/R=I^2R. \quad (9.4)$$

Wiadomo oczywiście, że ze źródłami prądu stałego mamy do czynienia jedynie lokalnie (baterie i akumulatory). Prąd elektryczny wytwarzany w prądnicach i elektrowniach nie jest stały w czasie: zmienia się nie tylko jego napięcie i natężenie, ale i kierunek przepływu („prąd przemienny”). Dla takiego prądu nie jest słuszny wzór (9.3), ale można używać tzw. skutecznego napięcia i natężenia, które odpowiadają wartościom  $U$  oraz  $I$  dla prądu stałego, który niósłby tyle samo energii. Takie wartości podaje się zwykle dla urządzeń elektrycznych.

Jeśli przyłożymy do końców różnych przewodników ustalone jednakowe napięcie, to energia zużyta na jego podgrzanie będzie tym większa, im mniejszy jest opór przewodnika. Przewodnik o bardzo małym oporze zostanie ogrzany tak gwałtownie, że może się spalić („krótkie spięcie”). Jeśli zaś przez kilka połączonych szeregowo przewodników płynie prąd o ustalonym natężeniu, to najwięcej energii na jednostkę długości wydzielą się tam, gdzie opór jest największy. Dlatego w instalacji elektrycznej należy unikać łączenia przewodów z różnych materiałów, na styku których może nastąpić korozja i pojawienie się warstwy o dużym oporze, której grzanie może doprowadzić do pożaru. Podobnie szkodliwe jest używanie przewodów o bardzo różnych przekrojach.

Z wzorów (9.3) i (9.4) wynika najprostsze możliwe zastosowanie prądu elektrycznego: do ogrzewania lub oświetlenia (gdzie źródłem światła jest odpowiednio ogrzane włókno żarówki lub gaz świetlówkowy). Zauważmy, że prawo zachowania energii gwarantuje nam stuprocentową wydajność grzejników elektrycznych: cała energia prądu płynącego przez grzejnik jest zamieniana na energię wewnętrzną przewodów, a następnie oddawana otoczeniu. Jeśli grzejnik jest wyposażony w wentylator, to przekazywanie może być bardzo szybkie i całe powietrze w pomieszczeniu szybko uzyska wyższą temperaturę.

Prąd elektryczny może być oczywiście wykorzystywany i do wielu innych celów. Jednak dokładna analiza przekazywania energii prądu np. w silnikach, które używają prądu przemiennego, wymaga znajomości wyższej matematyki i nie będziemy jej tu omawiać.

Ogrzewanie przewodnika, przez który płynie prąd, może być pożądane (we wspomnianych wyżej grzejnikach i żarówkach), albo szkodliwe (w przewodach doprowadzających prąd ze źródła do odbiornika). Gdybyśmy przesyłali z elektrowni do miasta prąd pod takim samym napięciem, pod jakim dostarczamy go odbiorcom ( $U=230$  V), to znaczna część przesyłanej energii byłaby stracona na ogrzewanie tych przewodów. Dla ustalonego oporu przewodnika i mocy, którą chcemy przesłać, energia wydzielona w przewodzie przesyłowym będzie oczywiście tym większa, im większe natężenie prądu. Dlatego aby ograniczyć straty przesyłowe, zmieniamy napięcie prądu przy użyciu transformatorów (które zmieniają napięcie i natężenie tak, że iloczyn  $UI$  nie ulega zmianie) tak, aby z elektrowni do miast prąd płynął pod jak najwyższym napięciem, a przed dostarczeniem go do odbiorców został zmieniony na bezpieczniejszy prąd o „zwykłym” napięciu (patrz problem 9.1.).

## **Problemy:**

9.1. Załóżmy, że przewidywany pobór mocy dla miasta to  $M=115$  MW. Pod jakim napięciem  $U'$  należy przesyłać prąd, aby straty w przewodach o oporze  $R=0,13 \Omega$  nie przekroczyły 1%?

9.2. Bezpieczniki na przewodach doprowadzających prąd do mieszkania przerywają obwód po przekroczeniu natężenia  $I=50$  A. Ile żarówek o mocy  $M=100$  W każda może świecić się równocześnie w mieszkaniu?

# Energia i jej przemiany



## **Doświadczenia:**

### **9.1. Czas gotowania wody**

*Niezbędne przedmioty:* Grzałka lub dwie, naczynie o pojemności 0,5 litra, woda, zegarek.

*Przebieg doświadczenia:* Sprawdź, ile czasu zajmuje doprowadzenie do wrzenia 0,5 l wody grzałką. Jeśli masz dwie różne grzałki, sprawdź, jak czas zależy od mocy. Sprawdź, jak wynik zmieni się, jeśli garnek przykryjemy i owiniemy izolacją cieplną. Porównaj wyniki z przewidywaniami, w których pomijamy straty ciepłe na parowanie, przewodnictwo i promieniowanie.

*Forma zapisu wyników:* tabela czasów.

*Wyniki i wnioski:* zagotowanie wody następuje po czasie odwrotnie proporcjonalnym do mocy grzałki. Dla mocy 1000 W to czas rzędu 5 minut. Przykrycie i owinięcie izolacją skraca ten czas o około jedną minutę. Energia potrzebna na ogrzanie wody to  $E=4,2\text{kJ/kg/}1^{\circ}\text{C}\cdot 0,5\text{kg}\cdot 80^{\circ}\text{C}\approx 170\text{kJ}$ , więc przy pominięciu strat grzałka dostarczy takiej energii w czasie  $t=E/M=170$  s, czyli poniżej 3 minut.

## **10. Energia przemian chemicznych i biologicznych\***

### **Co powinniśmy wiedzieć:**

Jak już wielokrotnie wspominaliśmy, podstawowym źródłem energii dla ogromnej części procesów fizycznych i technologicznych są chemiczne reakcje spalania. Dlaczego właściwie przy spalaniu węgla i jego związków, jak ropa czy gaz ziemny, wyzwala się energia?

Dokładny opis procesów chemicznych wymaga znajomości struktury cząsteczek i ich oddziaływań, a to wykracza poza możliwości fizyki klasycznej. Można jednak zrozumieć jakościowo, na czym polegają te reakcje i co dzieje się z energią podczas ich przebiegu.

W punkcie 8. omawialiśmy potencjalną energię elektrostatyczną. Wspomnieliśmy tam, że wbrew zasadom fizyki klasycznej stany atomów i cząsteczek, w których elektrony krążą po orbitach wokół jąder, są stabilne. Energia pojedynczej cząsteczki składa się z sumy energii potencjalnych i kinetycznych jej składników, którą można nazwać energią własną, oraz z energii kinetycznej cząsteczki jako całości. O temperaturze i energii wewnętrznej ciała decydują tylko energie kinetyczne całych cząsteczek.

Podczas reakcji chemicznych atomy wchodzące w skład cząsteczek zamieniają się miejscami, opuszczają cząsteczki lub tworzą nowe, więc suma energii własnych cząsteczek może ulec zmianom. Jeśli suma energii własnych nowych cząsteczek ma większą energię niż starych, do zajścia reakcji musimy dostarczyć energii i reakcję taką nazywamy endotermiczną lub endoenergetyczną. Jeśli natomiast suma energii własnych maleje, nadwyżka energii zostaje przekazana energiom kinetycznym cząsteczek, co powoduje wzrost temperatury i energii wewnętrznej ciała. Takie reakcje nazywamy egzotermicznymi (albo egzoenergetycznymi) i należą do nich właśnie reakcje spalania.

Energia wydzielana w takich reakcjach może być bardzo wielka. Dla typowych paliw technologicznych jest rzędu 10 MJ/kg, jak już wspomniano w zadaniu 7.3, a dla zadań szczególnych, jak napęd lotniczy i raketowy, używa się jeszcze wydajniejszych paliw. Najczęściej energię taką przekształca się w energię kinetyczną w silnikach cieplnych, albo w energię prądu elektrycznego w elektrowniach.

Podobne, choć mniej gwałtowne reakcje chemiczne wykorzystywane są przez organizmy żywe dla dostarczania energii potrzebnej do utrzymywania właściwej temperatury i umożliwiającej im ruch. W tym ostatnim przypadku jednak łańcuch procesów przekształcających energię wewnętrzną na

# Energia i jej przemiany



mechaniczną jest bardzo skomplikowany i nie ma tu miejsca na jego omawianie.

## **Problemy:**

10.1. Jaką wartość prędkości może uzyskać pocisk o masie  $m=20$  g, który wystrzelono spalając wybuchowo  $m'=2$  g prochu, jeśli energia spalania to  $S=25$  MJ/kg i pocisk przejął 20% tej energii?

10.2. Meteoryt węglowy uderza w atmosferę ziemską i w wyniku oporu powietrza ogrzewa się i spala całkowicie nad powierzchnią Ziemi. Przy jakiej wartości prędkości względem Ziemi energia kinetyczna przekazana atmosferze będzie równa energii spalania, jeśli energia spalania węgla to  $S=20$  MJ/kg? Jaka będzie przy tej prędkości całkowita wartość przekazanej energii, jeśli masa meteorytu wynosiła  $m=10$  kg.

10.3. W przepisach dietetycznych podaje się zwykle „kaloryczność” potraw, czyli ilość energii dostarczoną organizmowi przez zjedzenie odpowiedniej ilości pokarmu. W uproszczonych przeliczeniach można przyjąć, że spożycie 1 g tłuszczu dostarcza około 35 kJ energii, a cukru lub białka o połowę mniej. Czy „spalanie” potraw jest wydajniejsze, czy mniej wydajne od spalania węgla (20 MJ/kg)? Pamiętaj, że typowe potrawy zawierają co najmniej połowę (a niekiedy do 95%) wody, która nie ma wartości energetycznej.

## **11. Energia jądrowa\***

### **Co powinniśmy wiedzieć:**

Każdy atom materii składa się z elektronów i maleńkiego jądra, którego rozmiary liniowe są dziesiątki tysięcy razy mniejsze od atomu. Ładunek jądra jest dodatni i dokładnie równoważy ujemny ładunek elektronów, tak, że atom jako całość jest neutralny elektrycznie. Natomiast masa jądra jest o wiele większa od sumy mas elektronów w atomie, która stanowi ułamek promila całkowitej masy atomu. Jądro zbudowane jest z dwóch rodzajów cząstek: naładowanych dodatnio protonów i neutralnych neutronów. Gdyby uwzględnić tylko znane wcześniej oddziaływania grawitacyjne i elektromagnetyczne, układ taki nie mógłby być stabilny, bo odpychanie elektrostatyczne protonów zgromadzonych w jądrze natychmiast doprowadziłoby do jego rozerwania. Ten fakt doprowadził fizyków do wniosku, że między protonami i neutronami w jądrze działają inne oddziaływania, nazwane silnymi oddziaływaniami jądrowymi, a dziś zwykle krótko oddziaływaniami silnymi.

Teoria oddziaływań silnych jest bardzo skomplikowana i nie można jej przedstawić w ramach fizyki klasycznej. Można jednak zrozumieć jakościowo niektóre zjawiska zachodzące w jądrach, jeśli uwzględnimy fakt, że przedstawiana przez nas dotychczas rola energii w fizyce jest słuszna tylko w przybliżeniu i zmienia się w poprawnej teorii klasycznej: szczególnej teorii względności.

Nie będziemy oczywiście omawiać tu postulatów szczególnej teorii względności ani jej wszystkich konsekwencji. Z punktu widzenia prawa zachowania energii ważny jest przede wszystkim jeden wniosek z tej teorii: zmieniony związek między energią kinetyczną ciała i jego prędkością. Wzór (3.2) zostaje zastąpiony przez znacznie bardziej złożoną relację

$$E_k = mc^2 \sqrt{1 - v^2/c^2} - mc^2 \quad (11.1)$$

gdzie  $c$  jest prędkością światła w próżni. Dla  $v \ll c$  wzór (3.2) jest bardzo dobrym przybliżeniem wzoru (11.1) (nawet dla  $v=0,2c$  różnica między nimi to tylko 3%), ale dla wielkich prędkości jest zupełnie inaczej ze względu na fakt, że dla żadnego ciała wartość prędkości nie może osiągnąć  $c$  – energia dąży do nieskończoności, gdy  $v$  dąży do  $c$ . Szczególnie ważne jest zaś, że całkowita energia ciała, na które nie działają żadne siły zewnętrzne, nie jest w szczególnej teorii względności równa jej energii kinetycznej,

# Energia i jej przemiany



lecz pierwszemu wyrazowi we wzorze (11.1). Całkowita energia ciała swobodnego  $E$  jest więc równa sumie energii kinetycznej  $E_k$  i nowego rodzaju energii: energii spoczynkowej

$$E_0 = mc^2. \quad (11.2)$$

Dla procesów, w których wartości prędkości są dużo mniejsze od  $c$ , nie ma to żadnego znaczenia: jak już wspomniano, energia potencjalna ciała jest określona tylko z dokładnością do stałej, można więc do niej dodać energię spoczynkową i nic się nie zmieni. Natomiast dla układów ciał poruszających się z wielkimi prędkościami względem siebie i oddziałujących siłami odpowiadającymi wielkim energiom potencjalnym użycie poprawnych, a nie przybliżonych wzorów prowadzi do zaskakujących wniosków.

Po pierwsze, masa układu ciał nie jest sumą mas składników. Poprawna definicja masy układu, podobnie jak dla pojedynczego ciała, to stosunek energii do kwadratu prędkości światła w układzie spoczynkowym:  $m = E/c^2$ . Jeśli uwzględnić wzór (11.1) dla każdego ciała i energię oddziaływania wzajemnego ciał, to okaże się, że dla układów związanych masa jest mniejsza niż suma mas ciał wchodzących w skład układu o tzw. deficyt masy, równy energii wiązania (czyli różnicy sumy energii rozdzielonych składników układu i energii układu) podzielonej przez  $c^2$

$$\Delta m = E_w/c^2. \quad (11.3)$$

Deficyt masy jest niemierzalnie mały dla związków chemicznych, bo energia wiązania cząsteczki jest o wiele rzędów wielkości mniejsza od energii spoczynkowych atomów wchodzących w jej skład. Dlatego przez cały XIX wiek oczywiste wydawało się, że suma mas ciał reagujących nie zmienia się przy reakcji chemicznej, ale to nieprawda! Już pierwszy człowiek pierwotny, który zapalił gałąź, zamienił część energii spoczynkowej węgla w tej gałęzi i tlenu z powietrza na energię wewnętrzną powietrza. Energetyka jądrowa działa analogicznie, ale stosunek energii wiązania jądra do jego energii spoczynkowej  $E_w/E_0$  jest o kilka rzędów wielkości większy, niż dla cząsteczek i atomów i osiąga niemal 1% dla najsilniej związanych jąder (żelazo).

Jeśli więc umiemy przeprowadzić w reaktorze reakcje jądrowe, w których jądra o mniejszym stosunku  $E_w/E_0$  zamieniają się w jądra o większej wartości tego stosunku, to możemy odebrać nadwyżkę energii (np. w postaci energii wewnętrznej, czyli przez ogrzewanie substancji chłodzącej reaktor). Co ważne, ilość potrzebnego „paliwa” i odpadów po reakcji jest miliony razy mniejsza, niż w tradycyjnych elektrowniach spalających węgiel (kilogramy zamiast tysięcy ton!). Niestety „płaci się” za to koniecznością zabezpieczania przed szkodliwym promieniowaniem z reaktora, a zwłaszcza z odpadów.

Budowane obecnie reaktory wykorzystują *reakcje łańcuchowe rozszczepienia*, w których jądra ciężkich pierwiastków (głównie uranu i plutonu) rozszczepiają się na dwa znacznie lżejsze jądra w wyniku pochłonięcia neutronu. Jak wspomniano, stosunek  $E_w/E_0$  jest największy dla żelaza, a dla cięższych jąder maleje. Zatem rozszczepienie ciężkiego jądra na dwa lżejsze uwalnia ogromną ilość energii, unoszoną przez produkty reakcji. Są nimi oprócz jąder kwanty  $\gamma$ , których energia pochłaniana jest przez ośrodek zwiększając jego energię wewnętrzną i swobodne neutrony, które powodują kolejne rozszczepienia. Dlatego reakcję tę nazywamy łańcuchową; aby przebiegała spokojnie, a nie wybuchowo, należy dobrać warunki tak, aby po pewnym czasie tylko dokładnie jeden z powstałych neutronów powodował kolejne rozszczepienie. Wtedy liczba rozszczepień, a więc i moc reaktora, będzie stała w czasie. Energię wewnętrzną ośrodka odbiera się zwykle płynem chłodzącym (np. wodą), która po ogrzaniu napędza turbiny parowe, a te służą za napęd prądnic elektrowni.

Jeszcze większa różnica stosunku  $E_w/E_0$  występuje między najlżejszym złożonym jądrem: deuteronom, czyli jądrem izotopu wodoru - deuteru, a kolejnym stabilnym jądrem: cząstką  $\alpha$ , czyli jądrem helu. Jeśli zatem wykorzystamy *reakcję fuzji*, czyli łączenia dwu deuteronów w cząstkę  $\alpha$ , otrzymamy jeszcze większą ilość energii, a przy tym deuteru uzyskiwanego np. z wodoru w wodzie oceanów starczy



# Energia i jej przemiany



na miliony lat; nieporównanie dłużej niż uranu i plutonu ze skał skorupy ziemskiej. Niestety, jak dotąd umiemy przeprowadzać tę reakcję tylko wybuchowo, w tzw. bombie wodorowej, ale trwające od pół wieku prace nad konstrukcją fuzyjnej elektrowni jądrowej wydają się ostatnio budzić pewne nadzieje. W Cadarache we Francji rozpoczął się międzynarodowy projekt ITER, w którym reakcja ma zachodzić w plazmie utrzymywanej z dala od ścian przez pole magnetyczne, a w USA planowana jest budowa urządzenia, w którym energię do „zapłonu” reakcji dostarczać ma laser.

## **Problemy:**

11.1. Przy rozszczepieniu jądra uranu około 1 promila energii spoczynkowej zamienia się na energię kinetyczną produktów rozszczepienia, która następnie zamienia się na energię wewnętrzną płynu chłodzącego. Zakładając, że sprawność cieplnej elektrowni jądrowej wykorzystującej tę energię do produkcji prądu wynosi 20% oblicz, ile uranu potrzeba rocznie dla elektrowni o mocy  $M = 500$  MW pracującej bez przerw.

11.2. Energia wiązania jądra deuteru wynosi około 1/400 energii spoczynkowej tego jądra, a energia wiązania jądra helu deuteru wynosi około 3/400 jego energii spoczynkowej. Oznacza to, że przy łączeniu dwu jąder deuteru w jądro helu około 0,5% energii spoczynkowej można zamienić w energię wewnętrzną ośrodka. Sprawdź, ile razy większa jest „energia spalania” dla tej reakcji w porównaniu z typową energią uzyskaną ze spalania węgla:  $2 \cdot 10^7$  J/kg (20 MJ/kg).

## **12. Uniwersalność prawa zachowania energii w mikro- i makroświecie\***

### *Co powinniśmy wiedzieć*

Prawo zachowania energii jest podstawą opisu zjawisk zarówno w fizyce klasycznej, jak i w kwantowej teorii mikroświata. Zachowanie energii decyduje nie tylko o przebiegu procesów obserwowanych w życiu codziennym, ale i o warunkach emisji promieniowania z atomów i ich jąder, produkcji nowych krótko żyjących cząstek w zderzeniach cząstek o najwyższych energiach i rozpadów tych cząstek.

W gruncie rzeczy uwzględnienie prawa zachowania energii na poziomie mikroskopowym jest prostsze, niż w fizyce klasycznej. Wszystkie obiekty, z jakimi mamy tu do czynienia, można traktować na równych prawach: promieniowanie opisujemy jako emisję cząstek, cząstki swobodne charakteryzują się energią spoczynkową i kinetyczną, a stany związane cząstek także energią wiązania. Zatem w bilansie występują zawsze tylko te trzy rodzaje energii.

Pewną trudność w zrozumieniu uniwersalności prawa zachowania energii stanowią komplikacje z pojęciem masy. Jak wspomniano, precyzyjne pomiary pozwalają stwierdzić, że w różnych procesach suma mas produktów reakcji nie jest równa sumie mas ciał reagujących. Zwykle określa się to, jako „załamanie prawa zachowania masy” (i tak to określono w podręczniku, którego byłem współautorem). Niektórzy recenzenci bardzo skrytykowali to stwierdzenie: skoro we wszystkich procesach zachowana jest energia i pęd, a niezmiennicza masa układu zgodnie z teorią względności wyraża się przez nie

$$M^2 = E^2/c^4 - p^2/c^2, \quad (12.1)$$

to masa też musi być zachowana.

Jest to oczywiście prawda, ale zgodne z teorią względności określenie masy niezmienniczej stanu końcowego może być bardzo trudne. Jeśli w wyniku reakcji jądrowej rozszczepiono jądro na dwa lżejsze z równoczesną emisją kilku neutronów i promieniowania gamma, to do obliczenia tej masy musimy znać nie tylko masy tych wszystkich ciał, ale i ich energie oraz wartości i kierunki ich pędów. Właściwe jest

# Energia i jej przemiany



więc stwierdzenie, że masa nie jest „niezachowywana”, ale jest „nieaddytywna”: masa stanu końcowego nie jest sumą mas składników nawet wtedy, gdy nie oddziałują one między sobą, jeśli tylko poruszają się względem siebie.

Wydaje się jednak, że na poziomie szkolnym bardzo trudne byłoby uświadomienie uczniom, że masa stanu końcowego po rozszczepieniu zależy nie tylko od mas jąder i neutronów, ale i od ich pędów, a także od liczby kwantów promieniowania gamma i ich pędów. Zatem być może bezpieczniej jest powiedzieć, że masa izolowanego układu fizycznego *rozumiana jako suma mas składników nieoddziałujących* może ulegać zmianom w procesach fizycznych. Nie może natomiast zmienić się całkowita energia i pęd układu, a więc także obliczona zgodnie z wzorem (12.1) *masa niezmiennicza* układu.

Jedynym ograniczeniem stosowalności prawa zachowania energii w mikroświecie jest zasada nieoznaczoności Heisenberga. Mówi ona, że niepewność określenia energii układu fizycznego jest odwrotnie proporcjonalna do niepewności czasu, w którym tę energię wyznaczamy

$$\Delta E = \hbar / \Delta t \quad (12.2)$$

gdzie  $\hbar$  jest *stałą Plancka*, równą około  $10^{-34}$  Js. Oznacza to m.in., że cząstka, która żyje bardzo krótko, nie ma ściśle określonej energii spoczynkowej, a więc i masy. Mierząc sumy energii i pędów produktów jej rozpadu otrzymamy z wzoru (12.1) różne wartości masy dla różnych przypadków, a szerokość rozkładu tych wartości dana jest wzorem

$$\Delta m = \hbar / \tau c^2 \quad (12.3)$$

gdzie  $\tau$  jest średnim czasem życia cząstki.

Z zasady nieoznaczoności wynika też, że cząstka  $A$  może na krótki czas  $t$  emitować (a potem ponownie absorbować) inną cząstkę  $B$  o energii spoczynkowej (a więc i masie  $m_B$ ) odwrotnie proporcjonalnej do tego czasu. Emitowana cząstka może w tym czasie przelecieć drogę nie większą niż  $l = tc$  i jeśli na jej drodze znajdzie się inny obiekt, oddziałać z nim. Mówimy wtedy o oddziaływaniu przez wymianę cząstki  $B$  i o zasięgu  $R$  tego oddziaływania, który dany jest wzorem

$$R = \hbar / m_B c. \quad (12.4)$$

Właśnie takie rozumowanie przeprowadzone przez Hideki Yukawę dla oddziaływań jądrowych doprowadziło do przewidzenia istnienia mezonu  $\pi$ . Skoro zasięg oddziaływań, wiążących protony i neutrony w jądrze, jest rzędu 1 fm, Yukawa obliczył masę cząstki, której wymiana odpowiada za to oddziaływanie, jako kilkakrotnie mniejszą od masy protonu. Odkryty po kilkunastu latach w promieniowaniu kosmicznym mezon  $\pi$  ma istotnie masę równą około 1/7 masy protonu.

Wszystkie te efekty nie zmieniają jednak prostej zasady: całkowita energia izolowanego układu fizycznego nie może się trwale zmieniać ani w mikro-, ani w makroświecie. To prawo jest podstawą opisu fizycznego całego otaczającego nas świata.

## Problemy

12.1. Prawo zachowania energii dostarcza informacji o cząstkach, które oddziałują z materią tak słabo, że nie zostawiają żadnego śladu w aparaturze detekcyjnej. Jeśli spoczywająca cząstka o masie  $M$  rozpada się na dwie cząstki, to zgodnie z prawem zachowania pędu wartości pędów obu produktów rozpadu muszą być równe. Wykaż, że pomiar energii  $E_1$  i znajomość masy  $m_1$  dla jednej z tych cząstek pozwala na wyznaczenie masy  $m_2$  drugiej cząstki bez jej rejestracji.

## Energia i jej przemiany



12.2 Dla rozpadu na dwie cząstki spoczywającej cząstki o masie  $M$  energie produktów rozpadu są jednoznacznie wyznaczone przez masy tych cząstek  $m_1$  i  $m_2$ . Sprawdź, że jeśli  $m_1 \gg m_2$ , i  $M - m_1 \ll m_1$ , jak w rozpadach  $\alpha$  i  $\gamma$  jąder, to  $E_2 \approx (M - m_1)c^2$ , czyli energia emitowanej cząstki jest różnicą energii spoczynkowych jądra przed- i po rozpadzie. Jaka jest minimalna i maksymalna energia emitowanej cząstki, jeśli w rozpadzie powstaje trzecia cząstka o pomijalnie małej masie?