

Docho-dzenie układów do stanu równowagi wydaje się być powszechnym prawem przyrody. Nie znamy dziś żadnego eksperymentalnego faktu, który przeczyłby tej zasadzie. Jest to zdumiewające tym bardziej, gdy uświadomimy sobie, że choć na różnych skalach prawa przyrody są bardzo różne, to zawsze jest tak, że układy fizyczne dążą do równowagi. Co jest ta-

Trochę o mieszaniu się gazów

Tomasz Sowiński

kiego tajemniczego w stanie równowagi, że tak bardzo cała przyroda do tego stanu dąży? A może pytanie należy postawić na głowie i zapytać: co jest takiego tajemniczego w przyrodzie, że zawsze dąży ona do stanu równowagi? Jakkolwiek byśmy o to pytali, jedno nie ulega wątpliwości – warto zgłębić tę tajemnicę.

MIESZANIE GAZÓW

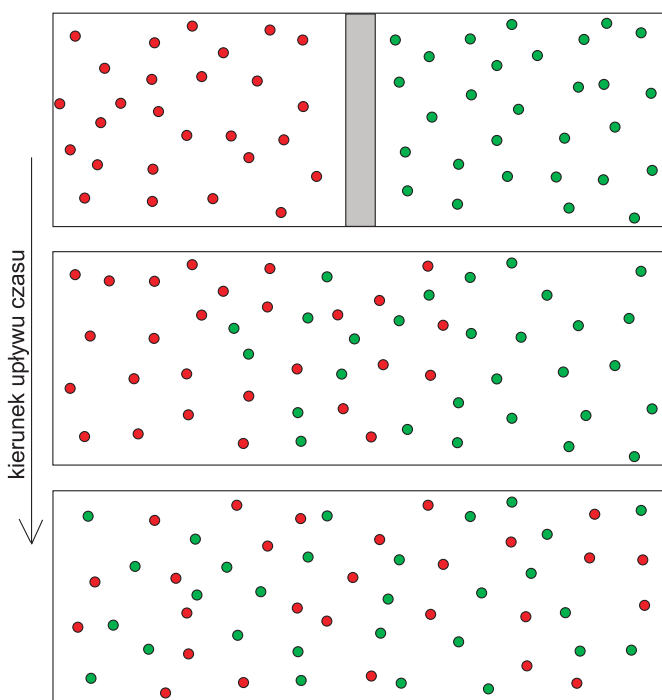
Jednym z klasycznych przykładów dochodzenia układów do stanu równowagi jest mieszanie się gazów. Sytuacja fizyczna jest bardzo prosta. Oto mamy szczelne naczynie, które podzielone jest na dwie części nieprzepuszczalną przegrodą. W każdej z tych części znajduje się inny gaz. Oczywiście nie ma fizycznego znaczenia, jakie to są gazy, więc nazwijmy je umownie **gaz A** i **gaz B**. Bardzo istotne jest jedynie to, że te dwa gazy są **różne**. Różne w tym sensie, że gdyby ktoś dał nam w jakiś sposób cząsteczkę jednego z nich, to bez żadnych wątpliwości umielibyśmy stwierdzić, którego gazu jest to cząsteczka. Gazy te są więc absolutnie rozróżnialne. Jak widać, tę rozróżnialność gazów podkreślam w tym miejscu bardzo stanowczo i zapewne zastanawiasz się Drogi Czytelniku, jaki jest w tym cel. Otóż jak się w niedalekiej przyszłości okaże, założenie o bezwzględnej rozróżnialności gazów jest fundamentalnym stwierdzeniem, które pozwala uniknąć wielu paradoksów. Ale o tym będziemy mieli jeszcze okazję podyskutować.

Istnieją sobie zatem te dwa gazy w swoich częściach naczynia i wypełniają te części równomiernie. W pewnym momencie otwieramy przegrodę, która je rozdziela i obserwujemy, co się dzieje. Nie będzie oczywiście żadną niespodzianką, jeśli powiem, że wraz z upływem czasu gazy te będą się mieszały ze sobą i po pewnym czasie całe naczynie zostanie wypełnione ich mieszaniną. Graficznie można to przedstawić tak:



Tomasz Sowiński w 2005 roku skończył z wyróżnieniem studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie fizyki teoretycznej. Obecnie jest asystentem w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN.

Z zamiłowania zajmuje się popularyzacją nauki. W roku 2005 był nominowany do nagrody w konkursie Popularyzator Nauki organizowanym przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji oraz Polską Agencję Prasową.



Stwierdzenie, że wraz z upływem czasu gazy zaczną się mieszać i ostatecznie dojdą do stanu, który będzie doskonałą ich mieszaniną, wydaje się trywialne. Stanem równowagi dwóch gazów zamkniętych w jednym naczyniu jest przecież ich doskonała mieszanina. Wydaje się, że to przecież oczywiste, że tak musi być. Czyżby? Zastanówmy się chwilę, skąd w nas takie przekonanie.

Molekuły gazów poruszają się wewnątrz dostępnego im naczynia w sposób dla nich naturalny, tzn. każda z nich ma jakąś prędkość i leci sobie po prostej do chwili, aż napotka ścianę albo inną molekułę. Wtedy w wyniku zderzenia następuje zmiana jej kierunku ruchu. I tak w koło Macieju. Dzieje się tak

dla każdej z cząsteczek tworzących gaz. No i właśnie dlatego się mieszają. To proste!!! Eureka!

LUKA W ROZUMOWANIU

Chwileczkę... ale czy rzeczywiście z tego, że molekuly poruszają się po prostej, a przy zderzeniach zmienia się kierunek ich ruchu, wynika już, że gazy muszą się wymieszać? A co z odwracalnością praw fizyki? Być może w szkole już słyszałeś, Szanowny Czytelniku, a jeśli nie, to teraz Ci o tym opowiem, że prawa fizyki newtonowskiej, które rządzą ruchem molekuł, są odwracalne w czasie. Ni mniej, ni więcej oznacza to tylko tyle, że jeśli jakiś ruch jest dopuszczony przez prawa fizyki Newtona, to dopuszczony jest również ruch dokładnie odwrotny, tzn. po tej samej trajektorii, tylko w drugą stronę.

ODWRACALNOŚĆ W CZASIE

Aby lepiej zrozumieć tę zadziwiającą symetrię odwrócenia w czasie (tak naukowo nazywają to fizycy), wyobraźmy sobie proste zjawisko spadku swobodnego. Załóżmy, że z pewnej wysokości spuszcza my kamień pionowo w dół. Wraz z upływem czasu zwiększa się jego prędkość i jednocześnie spada jego odległość od powierzchni ziemi. Opisujące to wzory



Zjawisko spadku swobodnego

na pewno dobrze pamiętasz ze szkoły, więc nie będziemy ich tutaj przytaczać. Skoncentrujmy się raczej na owej symetrii. Kamień uderza w ziemię z pewną prędkością, która jest jednoznacznie wyznaczona przez początkową wysokość, z jakiej spadał kamień. Wyobraźmy sobie teraz, że nadajemy temu kamieniowi leżącemu na ziemi dokładnie tę samą prędkość, z jaką uderzył on w ziemię, ale pionowo w górę. Kamień zaczyna się unosić i wraca dokładnie na tę samą wysokość, z której wtedy spadał. Dodatkowo w każdym konkretnym momencie tego ruchu, na określonej wysokości, kamień ma taką samą prędkość (tylko w przeciwnym kierunku), jaką miał na tej wysokości,

gdy spadał. Można to udowodnić wprost z zasady zachowania energii.

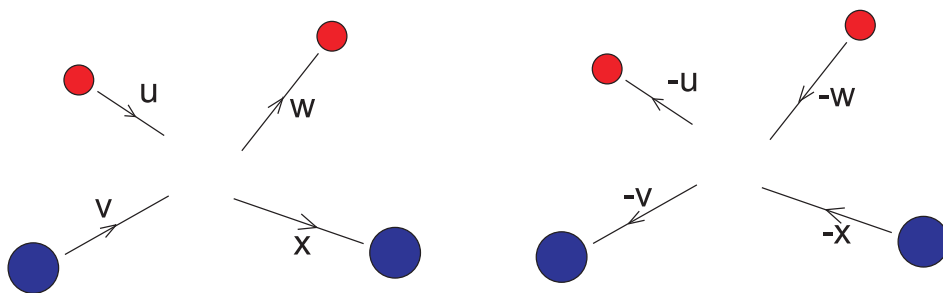
To wszystko razem oznacza, że gdyby ktoś nakręcił film spadającego kamienia i puścił go nam od tyłu, to nie potrafilibyśmy odróżnić go od puszczonego w przód filmu z kamieniem wyrzuconym do góry z prędkością, z jaką kamień spadający uderzył w ziemię. I nierozróżnialność tych dwóch sytuacji jest fundamentalna. To podobieństwo, a wręcz identyczność, tych dwóch ruchów jest właśnie manifestacją owej symetrii odwrócenia w czasie.

Odwracalność w czasie



Podobnie jest z bardziej skomplikowanymi ruchami, którymi rządzą prawa Newtona. Gdybyśmy dla przykładu przeprowadzili taką analizę dla rzutu ukośnego, to doszlibyśmy do analogicznych wniosków. Jeśli kamień wystrzelony z punktu X z prędkością v_1 pod kątem α doleciał do punktu Y, uderzając w ziemię pod kątem β z prędkością v_2 , to wystrzelony z punktu Y z prędkością v_2 pod kątem β doleci do punktu X i uderzy tam z prędkością v_1 pod kątem α .

Ale to nie wszystko. Owa symetria odwrócenia w czasie działa również w przypadku idealnych zderzeń (tzw. zderzeń sprężystych) różnych ciał. W tej sytuacji trochę trudno jest sobie to wyobrazić, bo nasuwający się od razu model stołu bilardowego nie jest zbyt dobry. Zderzenia bil na takim bowiem stole prawie nigdy nie są sprężyste. Lepszym modelem byłby taki stół, gdzie kauczukowe zastąpiłyby twarde bile. One odbijają się od siebie (poza nielicznymi wyjątkami) prawie sprężysto. Jak wygląda w takiej sytuacji realizacja owej symetrii? Załóżmy, że dwie piłeczki podążają po takich trajektoriach, które zapewniają ich zderzenie. Podczas zderzenia zmieniają się oczywiście kierunki ich prędkości i zaraz po nim oddalają się one od siebie. Gdyby ktoś nagrał tę sytuację kamerą i puścił ją od tyłu, to to co widzielibyśmy na ekranie telewizora, wyglądałoby dokładnie tak samo jak realna sytuacja, którą można zrealizować na stole. Wystarczy ustawić piłki w takich miejscach, w jakich znalazły się one po zderzeniu, odwrócić ich prędkości na przeciwne i zderzenie zajdzie dokładnie w tył. Schematycznie można to przedstawić następująco



Jeśli możliwa jest jedna sytuacja, to możliwa jest również druga

Najważniejsza nauka, jaka płynie z tej krótkiej dygresji o odwracalności w czasie, jest taka: **Jeśli istnieje jakiś proces przebiegający po jakiejś trajektorii zgodnie z prawami Newtona, to istnieje inny proces przebiegający dokładnie po tej samej trajektorii zgodnie z prawami Newtona, w którym jedyną różnicą jest odwrócenie prędkości na przeciwnie^(*).**

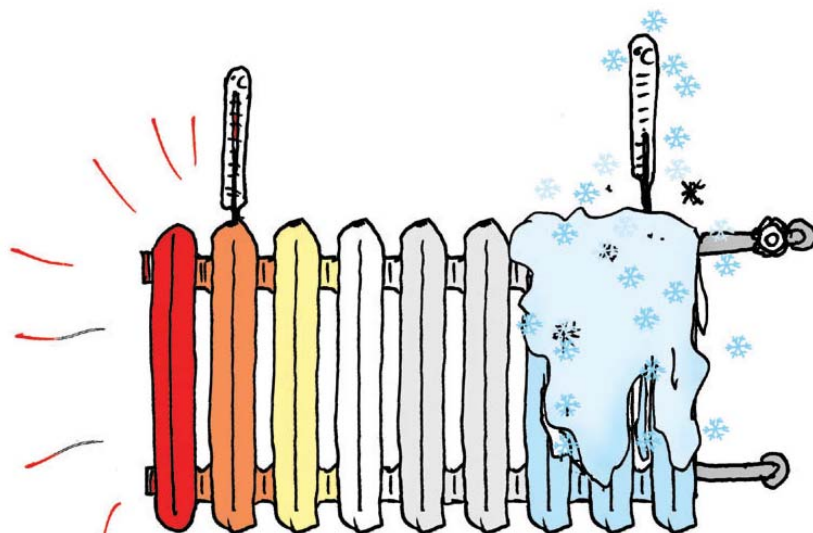
MIESZANIE GAZÓW - ZAGADKA!

Wróćmy teraz do naszego początkowego zagadnienia mieszania gazów. Jak już sobie powiedzieliśmy, ruchem molekuł w gazie rządzą proste prawa Newtona. Oczywiście są gazy, dla których prawa Newtona nie są adekwatne (np. tzw. gazy kwantowe), ale tutaj rozważamy sytuację najprostszą klasycznych gazów, takich jak np. tlen i azot w temperaturze pokojowej. Dodatkowo jest tak, że ich zderzenia w praktyce są zderzeniami sprężystymi. Musi istnieć zatem w takiej sytuacji symetria odwrócenia w czasie. Jak należy to rozumieć? Otóż dokładnie tak samo jak poprzednio przy zderzeniach piłeczek. Jeśli gaz startuje z pewnej konfiguracji początkowej i ewoluuje w jakiś konkretny sposób, to istnieje inna sytuacja początkowa dla tego gazu, dla której ewolucja będzie przebiegała dokładnie w przeciwnym kierunku. Zatem jeśli naturalne jest dla nas to, że dwa gazy początkowo znajdujące się w różnych miejscach tego samego pojemnika się mieszają, to naturalne powinno być również, że istnieje taka konfiguracja pomieszanych gazów, która będzie ewoluowała w czasie tak, aby te dwa gazy od siebie odseparować! Nie tylko dla Ciebie, miły Czytelniku, wygląda to dość podejrzanie. Mnie też się nie chce w to wierzyć. Ale wydaje się, że w naszym rozumowaniu nie ma żadnej logicznej luki.

ANALOGIA Z PRZEPLYWEM CIEPŁA

Opisany wyżej problem odwracalności w czasie pojawia się również w innych problemach fizycznych. Z sytuacją całkowicie analogiczną mamy do czynienia w przypadku przepływu ciepła na sposób konwekcji (patrz MT 08/2008). Przypomnijmy, że konwekcja polega na samorzutnym przepływie materii pod wpływem różnicy temperatur. W ten sposób mieszają się gazy zimniejsze z cieplejszymi i temperatura się wyrównuje. No ale skoro przy mieszaniu gazów istnieje symetria odwrócenia w czasie, to istnieje ona również w procesach konwektywnych, dla których mieszanie jest kluczo-

wym zjawiskiem. Czy zatem można stworzyć taką sytuację, że gaz o ustalonej temperaturze nagle rozdzieli się na dwa obszary, z których jeden będzie miał większą temperaturę, a drugi mniejszą? Skoro istnieje symetria odwracalności w czasie, to wydaje się, że takiej sytuacji nie można wykluczyć.



Analogia z przepływem ciepła

Warto w tym miejscu dodać, choć nie będziemy się nad tym dłużej rozwodzić, że podobne rozumowanie można przeprowadzić dla innych sposobów przepływu ciepła i dojść do równie kuriozalnych wniosków. Jednym z nich jest wyrównywanie się temperatury dwóch stykających się ciał stałych. Jak już kiedyś wspominaliśmy, gdy zetkniesz dwa ciała, które mają różną temperaturę, to ciepło będzie przepływało w taki sposób, aby temperaturę tę wyrównać. Ale skoro istnieje symetria odwrócenia w czasie, to wydaje się, że możliwy powinien być również proces



odwrotny: mamy dwa zetknięte ciała o tej samej temperaturze i nagle ciepło zaczyna przepływać z jednego do drugiego w taki sposób, że drugie zaczyna się grzać kosztem pierwszego! To przecież jakiś absurd!!!

O CO TUTAJ CHODZI?

Gdy pierwszy raz w swoim życiu słyszałem takie opowiadanie, jaką dzisiaj sam opowiedziałem, poczułem, że usuwa mi się grunt logicznego myślenia pod nogami. Straciłem wiarę we wszystko, czego się wcześniej nauczyłem. Fizyka stała się dla mnie wielką tajemnicą, której chyba nie da się zgłębić. Dodatkowo los chciał, że było to niedługo po tym, jak pier-



wszy raz pomyślałem, że o fizyce wiem już bardzo dużo. Dostałem zatem wielką nauczkę, która napędziła mnie do dalszego studiowania praw przyrody. Czy można to wszystko jakoś zrozumieć? Choćby troszeczkę...

Podsumujmy. Obserwując przyrodę, widzimy, że w różnych procesach jest ewidentnie wyróżniony kierunek upływu czasu. Układy fizyczne bowiem zawsze **dążą do** stanu równowagi. Tak przynajmniej wynika z naszych doświadczeń. Przyszłość jest tam, gdzie jest bliżej do równowagi. Dzieje się to jednak w jakiś tajemniczy sposób przy jednoczesnym istnieniu fundamentalnej symetrii odwrócenia w czasie. Symetria ta oznacza, że jeśli możliwy jest jakiś proces fizyczny, to jest równocześnie możliwy proces odwrotny. Dlaczego zatem nie obserwujemy **odchodzenia** układów od stanu równowagi? To jest zagadnienie, które spróbujemy zgłębić już następnym razem. Na zachętę dodam, że do zrozumienia tego problemu bardzo przydadzą się nam: dwa psy i stado pcheł. To będzie nasz model fizyczny, który zbliży nas choć trochę do zrozumienia istoty tego problemu. Zapraszam! ●

(*) Dla uproszczenia opisaliśmy tutaj symetrię odwrócenia w czasie dla punktów materialnych. W takiej właśnie sytuacji symetria odwrócenia w czasie oznacza odwrócenie prędkości na przeciwne. Dla ciał fizycznych, które mogą obracać się wokół swojego środka masy, należałoby dodatkowo zmienić również kierunek obrotu ciała.