

C hwila bardziej wnikliwego zastanowienia nawet nad najbardziej oczywistymi obserwacjami przyrody może prowadzić do bardzo trudnych pytań. Ot, choćby tak prosta sprawa jak wyrównywanie temperatury, o której ostatnio była mowa, nie jest do końca tak oczywistą sprawą, jak mogłoby się wydawać. Każdy oczywiście wie, że gdy zetkniemy ze sobą dwa ciała o różnych temperaturach, to ciepło między nimi będzie przepływało tak, aby tę temperaturę wyrównać. Ale właściwie dlaczego tak się dzieje? Czy zawsze musi tak być? Czy ciepło musi zawsze przepływać tak, aby dążyć do wyrównania temperatury? Dlaczego nie może przepływać od ciała zimniejszego do



**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.

# Równowaga w przyrodzie

Tomasz Sowiński

TEKST TRUDNY

cieplejszego, jeszcze bardziej zwiększając różnicę? To pytania, które postawiły dziewiętnastowiecznych fizyków przed bardzo trudnym problemem do rozwiązania i prowadziły do zażartych dyskusji naukowych między nimi. Poszukiwanie odpowiedzi na te pytania jednego z nich – tego najwybitniejszego – kosztowały zresztą największą cenę: cenę życia.

## O PRZEPŁYWIE CIEPŁA

Wspomniane powyżej zjawisko samorzutnego przepływu ciepła od ciała cieplejszego do zimniejszego jest jedynie jednym z przykładów dochodzenia układów do stanu równowagi. W tym przypadku jest to dochodzenie do równowagi termicznej. Oto ciepło płynie w takim kierunku, aby doprowadzić do równości temperatur i tym samym uczynić zadość zerowej zasadzie termodynamiki. Jak pamiętamy, mówi ona, że temperatura to taka wielkość, której równość zapewnia brak samorzutnego przepływu ciepła.

Warto w tym miejscu podkreślić, że przekazywanie ciepła może zachodzić na wiele różnych sposobów. Najbardziej powszechne w przyrodzie jest przekazywanie ciepła poprzez **promieniowanie termiczne**. Jak wiemy, każde ciało, które ma niezerową temperaturę, emituje promieniowanie elektromagnetyczne (MT 01/2007). Temperatura ciała determinuje kształt krzywej widmowej promieniowania – im wyższa temperatura, tym widmo przesuwana się ku falam bardziej niebieskim. Dwa ciała znajdujące się obok siebie, nawet gdy nie są w kontakcie, wymieniają między sobą promienio-

wanie, dochodząc do stanu równowagi termicznej. Należy przy tym pamiętać, że w takim przypadku nigdy nie da się odizolować tych ciał od otoczenia – nawet gdyby miała być nim próżnia. Dlatego właśnie te ciała będą dążyły do równowagi również ze swoim otoczeniem! Na pewno, Drogi Czytelniku, słyszałeś o promieniowaniu mikrofalowym tła, które wypełnia cały Wszechświat. Jest to promieniowanie termiczne, którego widmo odpowiada widmu ciała doskonale czarnego o temperaturze 2,7 K. Można powiedzieć, że taka właśnie jest temperatura otoczenia dla wszystkich ciał odizolowanych od innych obiektów materialnych. Ciała, promieniując termicznie, dążą do uzyskania stanu równowagi z tym właśnie otoczeniem – ze Wszechświatem o temperaturze 2,7 K.



Innym sposobem przekazywania ciepła jest **przewodnictwo cieplne**. Aby zrozumieć, czym jest przewodnictwo cieplne, przypomnijmy sobie (MT 06/2008), że temperatura ciała to nic innego jak pewna miara energii chaotycznego ruchu cząsteczek tworzących ciało. Im temperatura wyższa, tym „większy” jest chaotyczny ruch. Jeśli dwa ciała mają bezpośredni kontakt ze sobą, to na skutek oddziaływania na powierzchni ciał cząsteczki „bardziej ruchliwe” z ciała cieplejszego będą pobudzały do aktywniejszego ruchu te z ciała zimniejszego. Tak pobudzone do ruchu cząsteczki na skutek oddziaływań wewnątrz zimniejszego ciała będą pobudzały swoich sąsiadów. Temperatura ciała będzie rosła – ciepło „rozplynie się” po całym ciele. Oczywiście energia tego ruchu pochodzi wprost z energii chaotycznego ruchu cząsteczek w ciele cieplejszym. Skoro energia zmagazynowana w ciele cieplejszym jest oddawana, to cząsteczki będą zwalniały – temperatura ciała będzie więc malała.

Opisany powyżej sposób przekazywania ciepła nazywamy właśnie przewodnictwem cieplnym. Jak widać, kluczowym zjawiskiem, dzięki któremu ciała mogą przekazywać ciepło w ten właśnie sposób, jest bezpośrednie oddziaływanie międzycząsteczkowe. Jeśli cząsteczki oddziałują ze sobą silnie, to ciepło po ciele będzie rozplynało się bardzo szybko. O takich ciałach mówimy, że są dobrymi **przewodnikami cieplnymi**. Jeśli jest odwrotnie, to mówimy, że są **izolatorami cieplnymi**. Na pewno potrafisz w swoim otoczeniu znaleźć dobre przewodniki i izolatory cieplne. Wystarczy pójść do kuchni i zobaczyć z czego zrobione są garnki. Nie bez powodu są one metalowe! Metale to bowiem najlepsze przewodniki ciepła. Ucha garnków



są natomiast drewniane albo wykonane z tworzyw sztucznych. To są właśnie izolatory. One tak słabo przewodzą ciepło, że choć ich temperatura przy samym garnku jest bardzo wysoka, to w miejscu, w którym je trzymamy ręką, jest wystarczająco niska, aby się nie oparzyć.

Przewodnictwo cieplne polega na bezpośrednim oddziaływaniu blisko położonych cząsteczek.



## Konwekcja wymuszona

Można zatem powiedzieć, że jest to związane z przekazywaniem ruchu pomiędzy poszczególnymi drobinami. Jednak przekazywanie ciepła może się również odbywać poprzez mieszanie się makroskopowych ilości substancji. Tak dzieje się na przykład w szklance wody, gdy do ciepłej wlewamy zimną i mieszamy łyżeczką. Wtedy trudno jest powiedzieć, które cząsteczki „ciepłe” oddziałują z którymi „zimnymi”. Raczej jest to oddziaływanie wszystkich ze wszystkimi. Taki sposób wymiany ciepła i tym samym dochodzenia do stanu równowagi jest bardzo efektywny i szybki. Szybki w tym sensie, że temperatura bardzo szybko się wyrównuje. Taki proces nazywamy **konwekcją**, a właściwie powinniśmy nazwać konwekcją wymuszoną. Mieszanie zostało bowiem wymuszone zewnętrzną siłą mechaniczną.

W przyrodzie zachodzi również konwekcja samorzutna (swobodna). W odróżnieniu od poprzedniej polega ona na spontanicznym przepływie mas materii wywołanych różnicą temperatur. Ma to kluczowe znaczenie np. w kształtowaniu klimatu na Ziemi. Ciepłe powietrze unosi się do góry, zimniejsze opada na dół. To właśnie dzięki temu zjawisku powstają niektóre chmury, tworzą się mgły, powstaje miraż nad rozgrzanym asfaltem. Zapewne będziemy jeszcze mieli okazję dokładniej się nad tym zjawiskiem zastanowić. Dodajmy jeszcze tylko, że bezpośrednią przyczyną konwekcji samorzutnej jest najczęściej różnica gęstości gazów o różnej temperaturze. Na skutek tej różnicy gazy dążą do jej wyrównania i następuje wymiana makroskopowej porcji materii.

## RÓWNOWAGA CHEMICZNA

Równowaga termiczna nie jest jednak jedyną, do której prowadzą procesy samorzutne. Inną bardzo powszechną w przyrodzie równowagą jest tzw. **równowaga chemiczna**. Nazwa ta jest trochę myląca, więc opiszemy dokładniej, jak należy ją rozumieć. Po pierwsze (tak jak należało się spodziewać), w równo-



## Osiągnięcie równowagi chemicznej

wadze chemicznej nie zachodzą żadne reakcje chemiczne, tzn. jeśli mamy pewną mieszaninę różnych substancji, to pomiędzy cząsteczkami je tworzącymi nie zachodzą żadne procesy chemiczne. Jeśli na przykład zmieszamy ze sobą dwie substancje – kwas solny i wodorotlenek sodu, to w sposób spontaniczny na skutek reakcji chemicznej powstanie woda i sól (chlorek sodu). Fizyk powie, że te dwie substancje osiągnęły w sposób spontaniczny równowagę, gdy reakcja chemiczna się zakończy. Jak widać, procesy chemiczne prowadzą zazwyczaj do powstawania nowych substancji, które już są w równowadze.

Jednak równowaga chemiczna to coś więcej niż tylko brak reakcji chemicznych. Fizycznie o równowadze chemicznej mówimy również wtedy, gdy nie ma spontanicznego przepływu materii, tzn. gdy wszystkie parametry układu są tak dobrane, że nie wymuszają makroskopowego przepływu cząsteczek. W tym sensie zatem wspomniana wcześniej konwekcja jest również procesem dochodzenia do równowagi chemicznej – gaz dąży do wyrównania gęstości w całej swej objętości i materia przepływa z jednego obszaru do innego.

Zauważmy, że przepływ prądu elektrycznego jest również procesem dochodzenia do równowagi chemicznej. Jeśli w jakimś obszarze przewodnika zmagazynowana jest nadmiarowa liczba ładunków elektrycznych, to na skutek spontanicznego procesu ładunki te rozpiąną się po przewodniku tak, aby działające na każdy z nich siły elektryczne się równoważyły. W przypadku, gdy nie ma żadnych zewnętrznych sił elektrycznych, równowaga zostanie osiągnięta, gdy gęstość ładunków w przewodniku się wyrówna w całej objętości.

Przedstawiony przed chwilą przykład z prądem elektrycznym jest bardzo pouczający z jeszcze jednej istotnej przyczyny. Otóż pozwala on zrozumieć, że równowaga zależy nie tylko od własności samej substancji (**parametrów stanu układu**), ale również od czynników zewnętrznych (**parametrów kontroli**). Jeśli ten sam przewodnik umieścimy w zewnętrznym polu

elektrycznym, to ładunki, które były w równowadze, zaczną znów przemieszczać się w przewodniku, poszukując nowej równowagi. Zmieniając zewnętrzne pole elektryczne, zmieniamy jakby położenie równowagi, do którego prowadzą procesy spontaniczne. To bardzo istotne, aby zrozumieć, że równowaga zależy od warunków, w jakich się znajduje dana substancja.

## WZÓR BAROMETRYCZNY

W przypadku gazów jest podobnie. Jeśli gaz jest zamknięty w szczelnym pudełku, to procesy spontaniczne dążą do wyrównania gęstości w całym jego obszarze. Jeśli jednak umieścimy tak zamknięty gaz w zewnętrznym polu grawitacyjnym, to natychmiast okaże się, że nie jest to stan równowagi – nastąpi przepływ makroskopowej ilości gazu tak, aby ją osiągnąć. Równowaga w takim przypadku jest osiągnięta dla zmieniającej się z wysokością gęstości gazu.



## Równowaga gazu w polu grawitacyjnym

W stanie równowagi gaz znajdujący się niżej będzie miał większą gęstość. Dość prostym rachunkiem można pokazać, że jeśli gaz ma ustaloną temperaturę w całej swojej objętości, to zależność gęstości od wysokości dana jest tzw. wzorem barometrycznym

$$\rho(h) = \rho_0 e^{-\alpha h}$$

gdzie  $\rho_0$  jest gęstością gazu na wysokości, od której zaczynamy ją mierzyć, a  $\alpha$  pewnym parametrem, który zależy od temperatury gazu, masy tworzących go cząsteczek i natężenia pola grawitacyjnego. Chwila refleksji nad tym wzorem od razu wprawni Czytelnikowi pozwała zrozumieć, dlaczego wraz z wysokością zmienia się gęstość atmosfery, z którą muszą się zmagać zdobywcy najwyższych szczytów górskich. I choć wzór ten nie uwzględnia zmieniającej się wraz z wysokością temperatury, to z dobrym przybliżeniem opisuje faktyczną zmianę gęstości powietrza.

## RÓWNOWAGA MECHANICZNA

Obok równowagi termicznej związanej z dążeniem układów do wyrównywania temperatury i rów-



Silnik parowy

nowagi chemicznej, której źródłem jest dążenie do wyrównania gęstości oraz wysycenia wszystkich reakcji chemicznych jest tzw. równowaga mechaniczna. Jest ona związana z siłami zewnętrznymi działającymi na gaz. Bardzo dobrym przykładem jest tutaj wspomniana już równowaga gazu w zewnętrznym polu grawitacyjnym. Ale mamy z nią do czynienia również za każdym razem, gdy na przykład dmuchamy w balon. Powiększa się on właśnie dlatego, że znajdujące się w nim powietrze dąży do uzyskania równowagi mechanicznej z siłami zewnętrznymi, które na niego działają – zewnętrznym ciśnieniem atmosferycznym i ciśnieniem pochodzącym od rozciągniętej gumy. Gaz rozpręża się do takiej objętości, aby zachodziła równowaga pomiędzy tymi ciśnieniami. Przy okazji warto dodać, że z tego natychmiast wynika, iż ciśnienie gazu znajdującego się w balonie jest większe niż ciśnienie atmosferyczne. Gaz musi się przecież przeciwstawić nie tylko zewnętrznemu ciśnieniu atmosferycznemu, ale również balonikowi, który na niego ciśnie.

Równowaga mechaniczna również zależy od zewnętrznych warunków. Ludzkość powszechnie wykorzystała ten fakt, budując silniki parowe. Sprężona para wytworzona w kotle, dążąc do stanu równowagi z otoczeniem, rozpręża się. Rozprężając się, może wykonać pracę mechaniczną, przesuwając tłok. Dokładnie tak jak w *Lokomotywie* Juliana Tuwima:

„(...)

To para gorąca wprawiła to w ruch,  
To para, co z kotła rurami do tłoków,  
A tłoki kołami ruszają z dwóch boków  
I gnają, i pchają, i pociąg się toczy,  
Bo para te tłoki wciąż tłoczy i tłoczy.  
(...)”

## RÓWNOWAGI RÓWNOCZESNE

Z opisanych powyżej przykładów płynie myśl, że rodzaj równowagi zależy od tego, z jaką sytuacją fizyczną mamy do czynienia. W zależności od tego, jakie są parametry stanu układu, możemy rozważać różne rodzaje równowagi. Przedstawione wcześniej trzy rodzaje równowagi są najczęściej występującymi w problemach fizycznych. Warto jednak dodać, że gdy mamy do czynienia z układami, które mają jakieś

dodatkowe „możliwości” zmiany swoich własności, musimy rozważać również inne równowagi. Tak będzie np. w przypadku materiałów magnetycznych. Wtedy ich namagnesowanie (fizycy mówią magnetyzacja) będzie parametrem stanu układu, a zewnętrzne pole magnetyczne parametrem kontroli. Jak widać, wszystko zależy od tego, jakimi wielkościami fizycznymi się posługujemy, aby opisać stan, w jakim znajduje się dany obiekt fizyczny.

W tym miejscu musimy podkreślić, że osiągnięcie równowagi jednego rodzaju wcale nie znaczy, że układ jest w równowadze innego rodzaju, np. dwa obszary tego samego gazu mogą mieć tę samą temperaturę, czyli być w równowadze termicznej, ale nadal mogą one mieć różną gęstość, czyli nie być w równowadze chemicznej. Układy dążą jednak spontanicznie do osiągnięcia wszystkich rodzajów równowagi. Jeśli ustalimy wszystkie dostępne nam parametry kontroli, to układ będzie samorzutnie ewoluował w czasie tak, aby osiągnąć równowagę dla każdego ze swoich parametrów stanu. Osiągnie tzw. **równowagę termodynamiczną**. Znajdzie się w stanie, w którym wszystkie parametry stanu już nie będą się zmieniały w czasie. Oczywiście do chwili, aż zaczniemy zmieniać parametry kontroli. Wtedy cały proces spontanicznego dochodzenia do równowagi zacznie się od początku.



## UNIWERSALNE PRAWO PRZYRODY

Dążenie do równowagi termodynamicznej wszystkich obiektów fizycznych wydaje się być ogólnym prawem przyrody, od którego nie ma wyjątku. Wszystkie procesy, które obserwujemy w przyrodzie, od Wszechświata do mikroświata, wydają się podlegać temu uniwersalnemu dążeniu. Jest to tak bardzo powszechny proces, że często nie zdajemy sobie z tego nawet sprawy. Pytanie, jakie się rodzi, jest oczywiście: dlaczego przyroda dąży do równowagi? Czy wychodząc z podstawowych praw fizyki, można jakoś uzasadnić konieczność istnienia takich właśnie procesów? A może prawa przyrody sugerują coś zupełnie innego? O tym już następnym razem. Zapraszam! •