

Druga zasada termodynamiki to jedno z najtrudniejszych do zrozumienia praw przyrody. W najprostszym, szkolnym sformułowaniu mówi ona, że procesy spontaniczne zawsze przebiegają tak, aby entropia nie malała. Spontaniczna ewolucja dowolnego układu fizycznego prowadzi zawsze w kierunku uzyskania stanu równowagi, który ma największą możliwą entropię. Jeśli natomiast układ już na początku jest w równowadze, to ewolucja pozostawi go w tym stanie. Z punktu widzenia mikroskopowego entropia jest miarą liczby mikrostanów realizujących dany makrostan (MT 12/2008) układu. Stan równowagi jest natomiast stanem, który można zrealizować na najwięcej z możliwych sposobów. To właśnie dlatego procesy spontaniczne, których naturą jest przypadkowość, prowadzą do równowagi. Po prostu prawdopodobień-



Tomasz Sowiński jest asystentem w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. W 2005 roku skończył z wyróżnieniem studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie fizyki teoretycznej, a trzy lata później uzyskał tam stopień naukowy doktora. Od lat zajmuje się popularyzacją nauk przyrodniczych. W roku 2008 otrzymał tytuł Mistrza Popularyzacji Nauki „Złoty Umysł” w konkursie Prezesa Polskiej Akademii Nauk.

RÓWNOWAGA TERMICZNA

Punktem wyjścia do sformułowania tego termodynamicznego paradoksu, jakim jest demon Maxwella, jest zjawisko spontanicznego dochodzenia układu do równowagi termicznej. Załóżmy, że mamy izolowany termicznie pojemnik, w którym znajduje się gaz.

Tomasz Sowiński

Demon Maxwella

stwo ich trafienia jest największe. Może się zdarzyć oczywiście chwilowe odejście od równowagi, ale po chwili wszystko wraca do normy (MT 10/2008).

Takie podejście do procesów spontanicznych i samej entropii, jak przed chwilą opisane, jest jednak bardzo powierzchowne i bez większej refleksji może prowadzić do wielu nieporozumień i sprzeczności. Mówienie bowiem, że prawo wzrostu entropii jest wynikiem przypadkowego działania praw mikroświata, jest podcinaniem gałęzi, na której się siedzi. Okazuje się, że przy odrobinie pomysłowości i założeniu z góry, że prawami mikroświata rządzi statystyka, można doprowadzić do swoistych paradoksów termodynamicznych. Najbardziej znanym takim paradoksem w fizyce jest tzw. demon Maxwella wymyślony przez Jamesa Clerka Maxwella w drugiej połowie XIX wieku. Jest to chyba najlepszy przykład na to, jak można doskonale rozumieć matematyczny sens prawa wzrostu entropii i jednocześnie zupełnie nie rozumieć jego istoty fizycznej. Nie bez powodu paradoks ten jako pierwszy usłyszeli od Maxwella jego studenci. Nie bez powodu też został on do dziś jednym z najlepszych testów dla przyszłych fizyków.

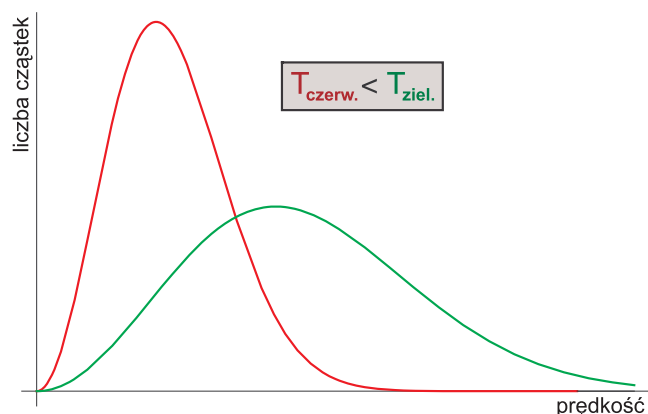


... prawo wzrostu entropii jest wynikiem przypadkowego działania praw mikroświata ...

Demon Maxwella to efekt sprytnego PR

Na początku pojemnik podzielony jest na dwie części nieprzepuszczającą ciepła ani cząsteczek gazu przegrodą. Dodatkowo przyjmijmy, że gaz znajdujący się po jednej stronie przegrody ma inną temperaturę niż ten znajdujący się po drugiej stronie. Następnie usuwamy przegrodę i patrzymy, do czego prowadzi spontaniczny proces. Oczywiście okaże się, że temperatura obu części gazu zaczyna się wyrównywać – cieplejsza część gazu ogrzewa zimniejszą. Jeśli tylko odpowiednio długo poczekamy, temperatura całego gazu ustali się na jakiejś wartości pośredniej. Krótko mówiąc, gaz osiągnie równowagę termiczną (MT 08/2008).

Dla każdego, kto uważnie czytał nasze dotychczasowe rozważania, proces dochodzenia do równowagi termicznej ma oczywiste źródło. Jest nim zależność prędkości cząsteczek tworzących gaz od temperatury tego gazu. Wrócimy na chwilę do tego problemu. Jakiś czas temu (MT 06/2008) omawialiśmy tzw. rozkład prędkości Maxwella, czyli rozkład prawdopodobieństwa napotkania w gazie o ustalonej temperaturze cząsteczki o konkretnej prędkości. Wykres tej zależności był następujący:



Jak widać, im większa temperatura gazu, tym więcej jest cząsteczek, które mają większą prędkość. Choć oczywiście zawsze można trafić na cząsteczkę bardzo wolną. Wraz ze wzrostem temperatury przybywa jednak cząstek, które mają większą prędkość. Tym samym, gdy wylosujemy jedną z nich, prawdopodobieństwo, że będzie ona miała dużą prędkość, zwiększa się. Proces wyrównywania temperatury wydaje się dość jasny. Przeciętna cząsteczka tworząca cieplejszy gaz porusza się szybciej od tej, która tworzy gaz chłodniejszy i gdy w nią uderza, przekazuje jej część swojej energii kinetycznej (jest ona proporcjonalna do kwadratu prędkości). Tym sposobem po zderzeniu obie cząsteczki mają inne prędkości, które zazwyczaj są niższe od prędkości początkowej cząsteczki gazu cieplejszego, a większe niż prędkość początkowa cząsteczki gazu zimniejszego. Wciąż mówię „zazwyczaj” i odnoszę się do sytuacji typowej, gdyż oczywiście może się tak przytrafić, że cząsteczka wolniejsza akurat tak uderzy w tę szybszą, że rozpędzi ją jeszcze bardziej. Takie sytuacje są jednak mniej prawdopodobne. Summa summarum po wielu takich zderzeniach temperatura obydwu gazów będzie się raczej wyrównywała. Oczywiście mówiąc o tym wyrównywaniu temperatur, lekko się powtarzam. Chciałbym jednak, aby była tu całkowita jasność, bo dogłębne zrozumienie mikroskopowego procesu wyrównywania

się temperatur dwóch gazów jest kluczowe do zrozumienia istoty paradoksu demona Maxwella.

Zanim przejdziemy już do samego paradoksu chciałbym jeszcze powiedzieć o jednej istotnej sprawie. Chodzi o entropię. Nie będzie chyba zaskoczeniem dla nikogo, jeśli powiem, że podczas procesu wyrównywania temperatury rozważanego przez nas gazu entropia układu, traktowanego jako całość, zwiększyła się. Proces był spontaniczny, więc musiało tak być, bo jest to treść drugiej zasady termodynamiki. Ale oczywiście pozostaje pytanie bardziej szczegółowe: czy można to jakoś po prostu wyliczyć? Odpowiedź brzmi oczywiście TAK i już w przyszłym miesiącu podam kilka przykładów, w których w sposób jednoznaczny wyliczymy entropię na początku i na końcu procesów spontanicznych i jawnym rachunkiem pokażemy, że ona rzeczywiście wzrosła. Do tego będzie nam potrzebny wzór na entropię, który również podam. Ale o tym wszystkim za miesiąc. Teraz wspominał tylko o tym w ramach reklamy następnego tekstu. A tak naprawdę, aby choć trochę zaspokoić niecierpliwych.

DEMON MAXWELLA

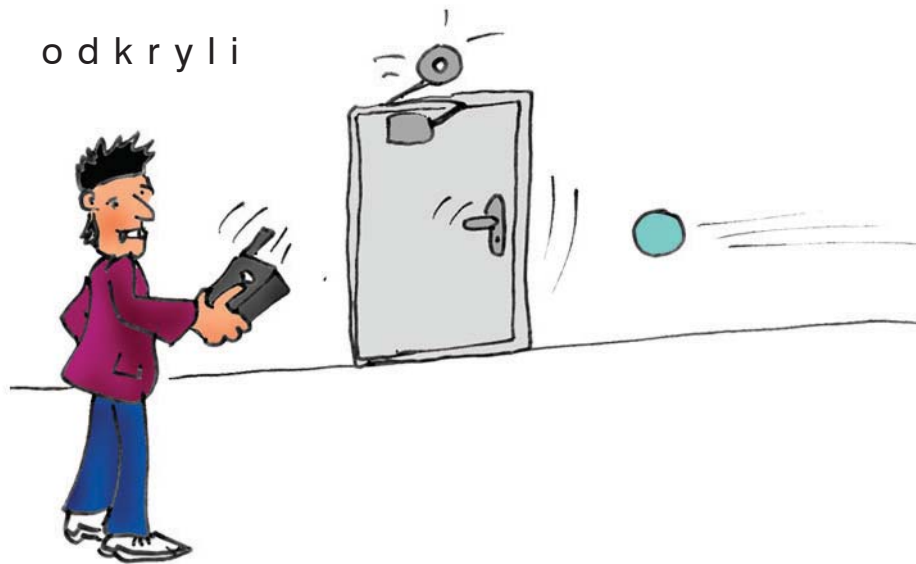
Przyszedł czas, aby powiedzieć, czym jest ów osławiony demon Maxwella. Otóż, jak do tej pory starałem się wszystkich przekonać, prawa fizyki w mikroświecie (nawet jeśli są odwracalne w czasie) działają w taki sprytny sposób, że entropia w procesach spontanicznych nigdy nie maleje. Generalnie jest to prawda, ale... Właśnie. Maxwell zaproponował fantastyczną sztuczkę, która pozwala z jednej strony być w zgodzie ze wszystkimi prawami fizyki, a jednocześnie sprawić, że procesy spontaniczne będą przebiegały wbrew drugiej zasadzie termodynamiki. Ta sztuczka polega na wprowadzeniu do układu jeszcze jednego elementu – właśnie tego demona.

Zacznijmy jednak od początku. A właściwie od końca procesu, który tak dogłębnie przed chwilą omówiliśmy. Załóżmy, że mamy gaz, który znajduje się w szczelnym i termicznie izolowanym pudełku i ma dobrze ustaloną temperaturę, tzn. jest w równowadze



równowaga termiczna

termicznej. Wyobraźmy sobie teraz, że przedzielamy owe pudełko termiczną przegrodą, która ma drzwiczki. Drzwiczki te mogą się otwierać i zamykać w sposób całkowicie kontrolowany. Gdy są one zamknięte, cząsteczki gazu nie mogą przelecieć na drugą stronę. Gdy są otwarte, przelatują bez żadnych przeszkód. No dobrze. Na razie wszystko wygląda w porządku. Ale teraz będzie najlepsze. Uwaga! Powtarzam za Maxwellem. Wyobraźmy sobie dodatkowo, że istnieje pewna mała istota (demon), która siedzi przy przegrodzie i może obserwować cząsteczki, które zbliżają się do drzwiczek z jednej lub drugiej strony. Ma ona też możliwość mierzenia prędkości tych cząsteczek. Przypomnijmy sobie na chwilę rozkład prędkości Maxwella w gazie o ustalonej temperaturze. Taki gaz jest mieszaniną cząsteczek o różnej prędkości, zatem znajdują się w nim i te bardzo szybkie, i te bardzo wolne. Demon wykonuje następujące zadanie. Gdy z prawej strony zbliża się cząsteczka szybciej, niż wynosi prę-



Dzięki takiemu zabiegowi paradoks Maxwella stał się szybko rozpoznawalny w świecie fizyki

kość średnia cząsteczek w gazie, to otwiera drzwiczki i pozwala jej przelecieć na drugą stronę. Gdy prędkość jest mniejsza od średniej, drzwiczki zamyka i cząsteczka się od nich odbija, pozostając w prawej części. I odwrotnie. Gdy z lewej strony zbliża się cząsteczka z prędkością mniejszą od średniej, to demon pozwala jej przelecieć na drugą stronę, a gdy większą, to zamyka drzwiczki i cząsteczka pozostaje po stronie lewej. To co najważniejsze to fakt, że demon wykonuje swoje zadanie zupełnie bez dotykania cząsteczek. Po prostu, gdy drzwiczki są otwarte, to cząsteczki przelatują bez żadnego problemu, gdy są zamknięte, to odbijają się idealnie sprężyste tak jak od zwykłej ścianki. Nie ma więc żadnego przekazywania energii pomiędzy demonem a cząsteczkami. On steruje tylko drzwiczkami, nic więcej. Cząsteczki zupełnie o tym nie wiedzą.

Musisz przyznać, Drogi Czytelniku, że konstrukcja Maxwella jest niebywała sama w sobie. Jak fizyk mógł wpaść na tak szalony pomysł: jakieś magiczne drzwiczki, demon... i co jeszcze? Może krasnoludki? A co z brzytwą Ockhama, która jest jednym z paradigmatów nauki? Czy naprawdę trzeba tworzyć taki dodatkowy byt jak demon, aby zrobić paradoks? Wtedy nie ma to przecież za dużego sensu. Ale prawdę mówiąc, dodatkowa istota wprowadzona przez Maxwella to tylko wynik dużego poczucia humoru i sprytnego PR. Dzięki takiemu zabiegowi jego paradoks stał się szybko rozpoznawalny w świecie fizyki i pozwolił zwrócić uwagę na bardzo poważny problem z drugą zasadą termodynamiki. Mówiąc całkowicie poważnie, to demona równie dobrze można sobie wyobrazić jako małe czujniki, który rejestruje zbliżające się cząsteczki i w zależności od ich prędkości otwiera bądź zamyka drzwiczki. Demon jest zatem tylko pewnym symbolem urządzenia decydującego o stanie drzwiczek na podstawie danych, które rejestruje i wcale nie musi być istotą żywą.

No, a gdzie jest paradoks? Może to jeszcze nie jest do końca jasne, ale działanie demona jest jawnym pogwałceniem drugiej zasady termodynamiki. Oto na skutek jego działania gaz, który na początku był w stanie równowagi termicznej, samorzutnie podzielił się na dwa gazy, z których prawy ma mniejszą temperaturę niż lewy. Faktycznie, na skutek selekcjonowania cząsteczek szybszych i wolniejszych od



Jakieś magiczne drzwiczki, demon... i co jeszcze? Może krasnoludki?

prędkości średniej demon rozdzielił gaz na dwie części. Średnia prędkość cząsteczek w lewej komorze jest większa niż średnia prędkość cząsteczek w komorze prawej. Zatem rzeczywiście temperatura, która jest miarą średniej prędkości cząsteczek w gazie, z lewej strony jest wyższa niż z prawej. To oznacza, ni mniej ni więcej, tylko tyle, że spontaniczny (z punktu widzenia gazu) proces doprowadził do zmniejszenia entropii w gazie. Jawnie więc została naruszona druga zasada termodynamiki! Przy najmniej takie jest pierwsze odczucie.

JAK ROZWIĄZAĆ TEN PARADOKS?

Rozwiązanie tego ciekawego paradoksu nie jest prostym zadaniem. Najprostsze z nich jest bezwzględne – coś takiego jak demon nie może istnieć. Gdyby bowiem istniało, to naruszałoby drugą zasadę termodynamiki, która wedle obecnej wiedzy jest niepodważalna. Takie rozwiązanie tego paradoksu rzeczywiście rozwiązuje problem. Maxwellowskie demony nie istnieją i już. Ale takie podejście nie powinno nas zadowolić, gdyż w przeciwieństwie do innych praw fizyki zasada wzrostu entropii jest raczej prawem empirycznym, potwierdzonym doświadczalnie, niż wynikiem teoretycznej analizy. Wiemy oczywiście, jakie może być teoretyczne źródło tej zasady. Jest to coś w rodzaju przypadkowości praw mikroświata. Ale z drugiej strony wiemy, że są one odwracalne w czasie (MT 09/2008) i tym samym tracimy pewność. Być może zatem nie ma żadnej fundamentalnej przeszkody, aby demon Maxwella mógł istnieć i działać w zgodzie z prawami przyrody?

Lepsze wytłumaczenie tego paradoksu podał węgiersko-niemiecki fizyk Leó Szilárd w 1929 roku. Otóż zasugerował on, że demona nie można traktować inaczej niż innych ciał fizycznych i skoro on znajduje się w tym pudełku i steruje drzwiczkami, to należy go potraktować jako część całego układu fizycznego. Gaz z demonem zachowuje się inaczej niż gaz bez demona, bo to są dwa różne układy fizyczne. W tym pierwszym przypadku niewątpliwie demon musi posiadać jakieś źródło swojej energii. Bez niej nie byłby w stanie mierzyć prędkości przelatujących cząsteczek ani sterować drzwiczkami. Z tego punktu widzenia nie ma nic dziwnego w tym, że entropia gazu zmalała. Stało się to bowiem z powodu rozproszenia (zmarnowania) energii uwięzionej na początku w źródle. A podczas rozpraszania energii jej entropia rośnie. Zapewne jest tak, że wzrosła ona bardziej, niż zmalała entropia gazu i ostatecznie entropia CAŁEGO układu, tzn. złożonego z gazu i demona, wzrosła. Druga zasada termodynamiki zatem nie została pogwałcona, bo odnosi się do całych układów izolowanych, a nie tylko do ich części.

Rozumowanie Szilárda wydaje się całkiem rozsądne i dobre. I rzeczywiście takie jest. Warto jeszcze dodać, że jest ono bardzo subtelne. Okazuje się bowiem, że do działania demona wcale nie potrzeba



Strzałka czasu

bardzo dużo energii. Teoretycznie można nawet pokazać, że ta energia może być dowolnie mała. Wydawać by się zatem mogło, że wzrost entropii źródła energii demona nie może być rozwiązaniem tego paradoksu, gdyż nie musi wcale równoważyć spadku entropii gazu. Okazuje się jednak, że tak wcale nie jest. Trzeba bowiem jeszcze uwzględnić prędkość działania demona. Aby mógł on sprawnie działać, musi wykonywać swoje pomiary na tyle szybko, aby zdążyć z odpowiednim ustawieniem drzwiczek i na tyle dokładnie, aby móc odróżniać cząsteczki szybkie od wolnych. Aby mieć takie możliwości, musi marnować swoją energię odpowiednio szybko, a to niestety kosztuje entropię. A okazuje się, że jedynie procesy nieskończenie wolne nie powodują wzrostu entropii. Im proces przebiega szybciej, tym większy jest wzrost entropii. Dokładna analiza pokazuje, że aby demon mógł skutecznie przeprowadzić segregację cząsteczek i doprowadzić tym samym do zmniejszenia entropii gazu o jakąś wartość, musi zużyć energię na tyle szybko, że wzrost jej entropii jest nie mniejszy niż ta wartość. Sumarycznie entropia nie może w takim procesie zmaleć.

STRZAŁKA CZASU

Prawo wzrostu entropii lub jak ktoś woli druga zasada termodynamiki jest fundamentalnym prawem przyrody. Działa ono w dowolnej skali, jeśli tylko rozważany układ jest izolowany i makroskopowy. W tym sensie dotyczy ono również Wszechświata jako całości.



to samo prawo wyznacza kierunek ewolucji Wszechświata,
jednocześnie mówi, że kostka lodu się stopi

ci. Ze względu na fakt, że entropia w takich układach zawsze rośnie, wyznacza tym samym w sposób jednoznaczny kierunek upływu czasu. Jeśli ktoś dałby mi stan jakiegoś układu izolowanego w dwóch różnych chwilach czasu, to mierząc ich entropię, byłbym w stanie rozstrzygnąć, który z tych stanów był wcześniejszy, a który późniejszy. Dlatego bardzo często mówi się w tym kontekście o tzw. termodynamicznej strzałce czasu – kierunku upływu czasu wyznaczonym przez drugie prawo termodynamiki. Przyroda ma jednak poczucie humoru, prawda? To samo prawo wyznacza kierunek ewolucji Wszechświata, jednocześnie mówi, że kostka lodu się stopi i jest bezwzględne, jeśli chodzi o porządek na moim biurku (MT 12/2008). •