

Wszystkie układy fizyczne pozostawione same sobie dążą do stanu równowagi. To zdanie wypowiedzieliśmy przez ostatnie kilka miesięcy wielokrotnie i do znudzenia. Ta niby banalna obserwacja była jednak na tyle ciekawa, że wciąż szukaliśmy odpowiedzi, co jest jej źródłem. Omawialiśmy nie tylko układy fizyczne, które się do tej zasady stosują, ale również modele czysto matematyczne, które symulowane na komputerze, też się tak zachowywały. Cały czas jednak gdzieś w powietrzu wisiał niedosyt, brakowało ostatecznego wytłumaczenia, jakoś to było nie do końca jasne. Wszystko dlatego, że ciągle krążyliśmy wokół jednej z najbardziej tajemniczych idei, jakie kiedykolwiek pojawiły się w fizyce. Idei, która w historii doprowadzała do obłędu wielu wielkich fizyków, a do dziś tym mniej doświadczonego sprawiała wiele trudności. Być może już się domyślasz, Czytelniku, że dziś będziemy mówili o **ENTROPII**.



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.

Porządek

kontra bałagan

Tomasz Sowiński

JAK FIZYK PATRZY NA PUZZLE?

Pojęcie entropii jest bardzo skomplikowane, dlatego zaczniemy powolutku – od najprostszego przykładu, z którego nabierzemy pierwszej intuicji, czym ona jest. Choć może wydać się to troszkę dziwne, zaczniemy od układanki powszechnie znanej jako puzzle. Idea tej gry logicznej jest prosta – jakiś rysunek, najczęściej bardzo ładny, podzielony jest na wiele drobnych elementów, które są ze sobą wymieszane. Zadaniem układającego jest oczywiście ułożyć wszystkie elementy (nazywane właśnie puzzlami) na swoje miejsca. Mało kto wie, że puzzle zostały wymyślone w osiemnastowiecznej Anglii jako gra edukacyjna do nauki geografii. Każdy natomiast wie, że poziom trudności tej gry zależy głównie od liczby elementów, na które został podzielony obrazek. Najprostsze są te dla malutkich dzieci – podzielone jedynie na kilka elementów. Najtrudniejsze mają nawet kilkadziesiąt tysięcy części.

Dlaczego od puzzli warto rozpocząć naukę o entropii? Już tłumaczę. Wyobraźmy sobie, że mamy do dyspozycji wielkie puzzle i po wielu godzinach wyłożonej pracy udało nam się w końcu ułożyć z nich zadany obrazek. Teraz wykonujemy czynność, która zwykłemu graczowi nie przychodzi nigdy do głowy i wpaść na nią może tylko fizyk. Otóż, delikatnie zaczynamy trząść podstawą, na której układaliśmy ukła-

danek. Puzzle delikatnie podskakują i zaczynają się rozłączać. Na samym początku obrazek, który ułożyliśmy był bardzo wyraźny. Widzieliśmy każdy jego szczegół. Możemy powiedzieć, że mieliśmy całą dostępną informację o obrazku. Wraz z upływem czasu puzzle zaczynają się rozłączać i powolutku przemieszczać. Wciąż widzimy, co jest na obrazku, ale jakby mniej wyraźnie. Jeśli odpowiednio długo poczekamy, elementy całkowicie się ze sobą wymieszają, niektóre

się podwracają na drugą stronę i co było na obrazku, już nikt się nie domyśli. No dobrze – to było proste. A co dalej? Otóż... układamy puzzle jeszcze raz. Znowu kilka godzin roboty. Gdy w końcu nam się to uda, nie oglądamy obrazka zbyt długo, tylko powtarzamy nasz eksperyment. Puzzle znowu podskakują, rozczepiają



Jeśli ktoś nie wierzy – zapraszam, aby zobaczyć moje biurko. Bałagan robi się całkowicie sam.



Spośród wszystkich możliwych konfiguracji jest tylko jedna taka, która jest najcenniejsza – idealny porządek

się, mieszają ze sobą. I choć teraz zrobiły to zupełnie inaczej, wymieszały się zupełnie innym sposobem i ich konfiguracja końcowa jest zupełnie inna, to znów efekt końcowy jest taki sam – cała informacja o obrazku została zatarta.

Opisany wyżej eksperyment można powtarzać wielokrotnie i nie muszą nikogo przekonywać, że zawsze będzie tak samo. Każdy wie, że zburzenie czegośkolwiek (a puzzli przede wszystkim) jest dużo łatwiejsze niż tego zbudowanie. Osiągnięcie porządku wymaga dużo więcej pracy niż doprowadzenie do nieporządku. Można powiedzieć, że nieporządek właściwie robi się sam – wystarczy mu minimalnie pomóc. Jeśli ktoś nie wierzy – zapraszam, aby zobaczyć moje biurko. Ja naprawdę nie robię nic szczególnego, a raz w miesiącu muszę poświęcić przynajmniej godzinę, aby je uporządkować. Bałagan robi się całkowicie sam. W przypadku puzzli widzimy, że wraz ze wzrostem nieporządku maleje również nasza wiedza o szczegółach obrazka. Mówię o tym, bo za chwilę będzie to dla nas bardzo ważne.

No dobrze. Ale co z tą entropią? Pierwsza intuicyjna definicja entropii jest właśnie związana z nieporządkiem. Entropia to miara nieporządku w naszym układzie. Im większy bałagan, tym większa entropia. I jak było widać z naszego prostego eksperymentu z puzzlami, podczas potrząsania nimi entropia ROŚNIE wraz z upływem czasu. Warto zdawać sobie sprawę, że to ostatnie zdanie jest bardzo silnym stwierdzeniem, bo przecież można sobie wyobrazić

sytuację zupełnie inną. Startujemy z całkowicie nieuporządkowanej układanki i gdy nią potrząsamy, to jakimś dziwnym trafem puzzle mieszają się tak, że trafiają na swoje miejsca i *suma summarum* rysunek się układa. Oczywiście nie możemy wykluczyć takiej ewentualności (pamiętacie? odwracalność w czasie procesów fizycznych). Jednak czy komuś się to kiedyś udało? Wątpię. To ciekawe, prawda? Choć prawa fizyki dopuszczają taką możliwość, to w praktyce nigdy ona nie zachodzi.

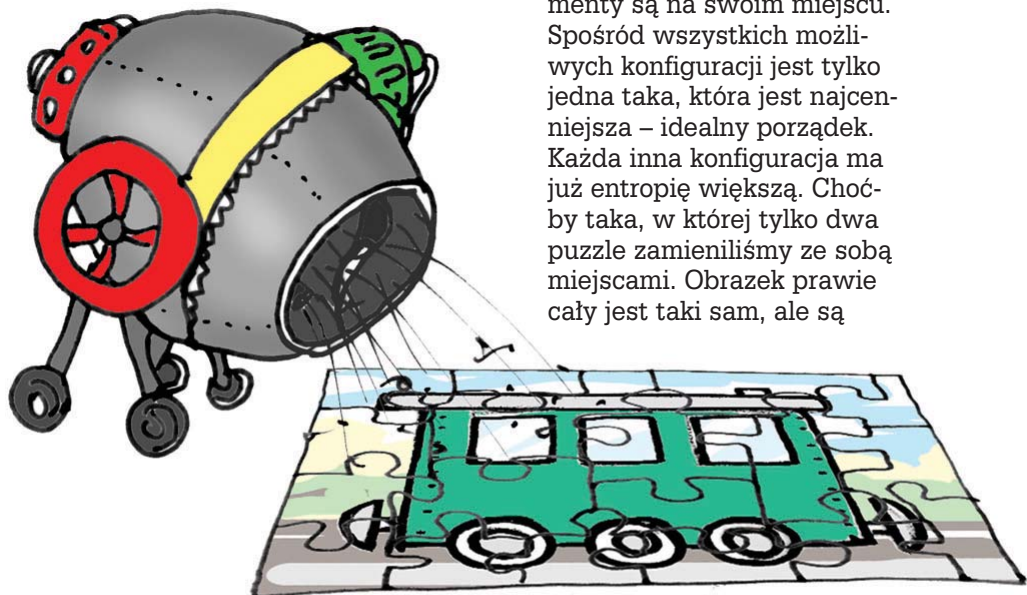
Zanim zgłębiemy ten problem, chciałbym jeszcze powiedzieć, że entropię (szczególnie w kontekście teorii informacji) bardzo często definiuje się również jako bezużyteczną informację zawartą w danym zbiorze danych. W naszym przykładzie z puzzlami widać to dokładnie. Im większy nieporządek, tym mniej informacji o obrazku. Choć liczba elementów układanki jest taka sama, to jednak różne ich konfiguracje dają nam różną informację o obrazku – mają zatem różną entropię.

DLACZEGO ENTROPIA ROŚNIE?

Skoncentrujmy się teraz głębiej nad problemem wzrostu entropii lub jak ktoś woli – spontanicznym wzrostem bałaganu. Zapewne istnieje jakiś powód, dla którego puzzle poddawane przypadkowym uderzeniom zawsze mieszają się tak, aby zwiększyć nieporządek. Jest chyba jakiś powód tego, że moje biurko samo się bałagani, a jak chcę je uporządkować, to muszę zmarnować mnóstwo cennego czasu. Tak, istnieje! I jest on dużo bardziej trywialny, niż się wydaje!

Zastanówmy się, kiedy mówimy, że puzzle mają najmniejszą entropię, czyli ich konfiguracja zawiera najwięcej cennej dla nas informacji. Oczywiście mają

ją wtedy, gdy wszystkie elementy są na swoim miejscu. Spośród wszystkich możliwych konfiguracji jest tylko jedna taka, która jest najcenniejsza – idealny porządek. Każda inna konfiguracja ma już entropię większą. Choćby taka, w której tylko dwa puzzle zamieniliśmy ze sobą miejscami. Obrazek prawie cały jest taki sam, ale są



Choć prawa fizyki dopuszczają taką możliwość, że mieszane puzzle ułożą się prawidłowo, to w praktyce się to nie zdarza

dwa miejsca, gdzie informacja jest utracona. Ile jest takich konfiguracji, w których dwa puzzle są zamienione miejscami ze sobą? Chwila zastanowienia...
Jednak warto było uczyć się matematyki w szkole.
 Tym razem przydają się reguły kombinatoryki. Tych konfiguracji jest tyle, ile jest dwuelementowych kombinacji bez powtórzeń ze zbioru n -elementowego, gdzie n jest równe liczbie wszystkich puzzli w układance.

$$\text{Wzór wygląda tak: } K = \frac{n(n-1)}{2}.$$

Jeśli układanka ma 6 puzzli (to takie puzzle dla niemowlaków), to takich konfiguracji jest 15. Jeśli ma ich 10, to liczba konfiguracji wynosi 45. A jeśli 20, to jest ich już 190. Dla dużych n ich liczba rośnie jak n^2 . O cię Florek... A to tylko zamiana dwóch puzzli miejscami ze sobą. Co będzie, gdy nie dwa, a trzy puzzle będą nie na miejscu? Ile wtedy jest takich konfiguracji? Na pewno znacznie więcej. Zainteresowanemu Czytelnikowi polecam samodzielne zastanowienie się nad tym problemem i wskazanie odpowiedniego wzoru. W każdym razie dla dużej liczby n elementów jest ona rzędu n^3 . I tak dalej i tak dalej...

Teraz wydaje się oczywiste, dlaczego w procesach spontanicznych entropia rośnie. Dzieje się tak dlatego, że istnieje dużo więcej konfiguracji nieuporządkowanych niż uporządkowanych. Upraszczając, można powiedzieć, że bałagan można zrealizować



skopową. A bardziej po ludzku – jest tym większa, im więcej jest sposobów, na które można zrealizować dany stan układu.

STAN RÓWNOWAGI

Wszystko już jest prawie zrozumiałe, ale przecież w procesach fizycznych układy nie dążą do żadnego bałaganu, ale do stanu równowagi. Analogia z puzzlami nie wydaje się zatem całkiem trafiona. A jednak! Aby to zrozumieć, wróćmy na chwilę do innego naszego modelu dochodzenia układów do stanu równowagi – modelu Ehrenfesta „Psy i pchły” (MT 10/2008). W modelu tym pchły przeskakiwały z jednego psa na drugiego w sposób całkowicie losowy. Ostatecznie dochodziło jednak do tego, że niezależnie od jakiej konfiguracji się startowało, to liczba pcheł na każdym z psów była mniej więcej taka sama. Mówiliśmy wtedy, że układ pcheł na dwóch psach doszedł do stanu równowagi. Zauważmy, że stan równowagi pcheł na psach to taka ich konfiguracja, która jest najbardziej prawdopodobna. Rzeczywiście jeśli mamy do dyspozycji 10 pcheł, to istnieje tylko jedna konfiguracja, w której wszystkie pchły są na jednym z psów, ale aż 252 konfiguracje, w których 5 pcheł siedzi na każdym z nich. I jest to najczęściej występująca możliwość. Sytuacja, w której na pierwszym psie jest 6, a na drugim 4 pchły, występuje 210 razy, a taka, że na pierwszym jest 7, a na drugim 3, tylko 120. Gdy pcheł jest 100, liczby te dramatycznie wzrastają. Dla przykładu rozłożenie równomierne pcheł (50 na każdym psie) można zrealizować na ok. 10^{29} (jedynek i 29 zer!) sposobów, a rozłożenie, w którym na jednym jest 30, a na drugim 70, jest możliwe do zrealizowania na dziesięć tysięcy razy mniej (czyli ok. 10^{25}). Płyń stąd prosta lekcja, że **stan równowagi to po prostu idealny bałagan**. Stan równowagi to taka konfiguracja, która jest najbardziej prawdopodobna. I nic dziwnego zatem, że wszystkie procesy spontaniczne do tej równowagi prowadzą. Prowadzą one po prostu do najbardziej typowej sytuacji, jaka może się zdarzyć. **Stan równowagi jest więc stanem o najwyższej entropii.**



Im większy bałagan, tym większa entropia

na dużo więcej sposobów niż porządek. Procesy spontaniczne, których ewolucja, jak to było widać na przykładzie naszych puzzli, przebiega zazwyczaj przypadkowo, mają znacznie większą szansę trafić na konfigurację nieuporządkowaną niż na uporządkowaną. Przypomnijmy sobie, że podczas wielokrotnego wykonywania naszego eksperymentu zawsze dochodziliśmy do bałaganu. Jednak nie zawsze był to ten sam bałagan. Za każdym razem konfiguracja była inna (puzzle były inaczej porzucane), ale zawsze nazywaliśmy to bałaganem. Krótko i naukowo mówiąc, entropia jest tym większa, im więcej jest konfiguracji mikroskopowych, które realizują daną sytuację makro-

Teraz staje się też oczywiste dlaczego układ, który dojdzie już do stanu równowagi, w tym stanie pozostaje. Podczas spontanicznej ewolucji, którą rządzi prawa przypadku, bardzo trudno jest trafić akurat w taką konfigurację, która będzie miała mniejszą entropię. A nawet jeśli się to zdarzy, to już w następnym kroku znów prawdopodobieństwo trafienia w konfigurację realizującą stan równowagi lub do niego zbliżającą będzie największe. Najczęściej będzie jednak tak, że trafimy znów w konfigurację, która realizuje stan równowagi i dlatego w nim pozostaniemy. I choć będzie to już inna konfiguracja, to nadal będzie ona realizowała ten sam stan makroskopowy układu.

To, co przed chwilą powiedzieliśmy, jest bardzo ważne. Warto sobie uświadomić, że choć układ znajduje się w równowadze i tym samym jego makroskopowy stan się nie zmienia, to wciąż zmienia się jego stan mikroskopowy – konfiguracja, która go realizuje. Najlepiej widać to chyba na przykładzie naszych puzzli. Gdy są one całkowicie pomieszane, tzn. entropia jest największa z możliwych albo inaczej mówiąc, informacja o szczegółach rysunku jest praktycznie zerowa, albo jeszcze inaczej mówiąc, puzzle znajdują się w stanie równowagi (tak, tak... z naszego punktu widzenia stan równowagi puzzli to stan największego nieporządku), to dalsze ich potrząsanie sprawia jedynie, że zmienia się konfiguracja, która realizuje ten sam stan makroskopowy, który umownie nazwaliśmy BAŁAGANEM. Bałagan można zrealizować na tyle różnych sposobów, że jeśli na swoim całkowicie pogmatwanym biurku zamienię miejscami dwie przypadkowe kartki papieru albo jedną z nich lekko przesunę, to nikogo nie uda mi się przekonać, że teraz moje biurko jest bardziej uporządkowane. Fizyk powie, że zmieniła się jedynie konfiguracja, która realizuje ten sam stan makroskopowy mojego biurka – stan bałaganu.

PRAWO WZROSTU ENTROPII

Z całego przytoczonego powyżej rozumowania jasno wynika źródło tego, że układy dążą do stanu równowagi. Odpowiedzialne jest za to prawo wzrostu entropii, które ni mniej, ni więcej można rozumieć jako prawo mówiące o tym, że w procesach spontanicznych nieporządek rośnie, bo jest bardziej prawdopodobny. Prawo wzrostu entropii zakorzeniło się w fizyce jako druga zasada termodynamiki. Ma ona wiele różnych sformułowań, ale wszystkie można zawsze sprowadzić do tego prostego zdania „**w procesach spontanicznych entropia rośnie**”.

Wszystkie nasze dotychczasowe rozważania dowodzą, że pojęcie entropii jest nierozdzielnie związane ze swoistym paradoksem polegającym na tym, że choć prawa fizyki na poziomie mikroskopowym są odwracalne w czasie, to procesy makroskopowe zachodzą tak, aby doprowadzić do równowagi. W pierwszym odruchu wydaje się, że te dwa spojrze-



Stan równowagi jest stanem o najwyższej entropii



Grób Ludwiga Boltzmana na cmentarzu centralnym w Wiedniu z wypisanym wzorem na entropię.
Źródło: en.wikipedia.org

nia – mikroskopowe i makroskopowe – nie są do pogodzenia ze sobą bez naruszenia zasad logiki. Jest to jednak możliwe, jeśli uświadomimy sobie, że wszystkie pomiary fizyczne, jakie możemy wykonywać, to pomiary wielkości makroskopowych, nigdy mikroskopowych. Nieodłączną cechą pomiarów wielkości makroskopowych jest natomiast skończony czas pomiaru, który jest na

tyle duży, że wiele konfiguracji mikroskopowych naszego układu w tym czasie się zrealizuje. Pomiar makroskopowy jest zatem pewnego rodzaju wypadkową wyidealizowanych pomiarów mikroskopowych, które w tym czasie na każdej z realizowanych konfiguracji byśmy wykonywali (gdybyśmy tylko umieli). Pojęcie entropii to właśnie swoisty łącznik pomiędzy idealnymi i niedostępnymi pomiarami mikroskopowymi a rzeczywistymi i dostępnymi pomiarami makroskopowymi. Bo entropia to nic innego jak pewna miara liczby mikrostanów, które realizują konkretny makrostan naszego układu.

Jeśli ostatni akapit jest dla Ciebie, drogi Czytelniku, niezrozumiały, to się nie przejmuj. Gdy pierwszy raz takie rzeczy opowiadał austriacki fizyk Ludwig Boltzmann pod koniec XIX wieku, nikt mu nie wierzył, jego prace były powszechnie ignorowane, a środowisko naukowe uważało go za wariata. To wszystko sprawiło, że w 1906 roku przeżył on wielkie psychiczne załamanie i podczas wakacji we Włoszech odebrał sobie życie. ●