

# Strzałka czasu

Piotr SZYMCZAK\*

\*Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

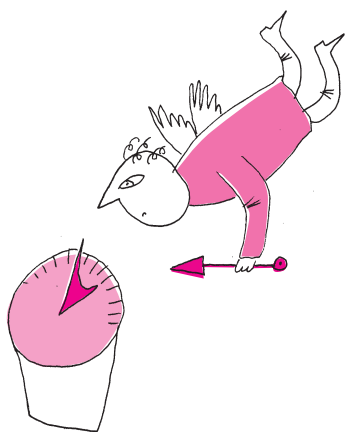
Przestrzeń i czas to dwa pojęcia, z którymi stykamy się najwcześniej, dwa ograniczenia narzucone nam przez Stwórcę, który – jak twierdzą święte księgi – jednocześnie stoi ponad nimi (jest wszechobecny i ponadczasowy). A o tym, że nas dotyczą, przekonujemy się, nierzadko w bolesny sposób – spędzając godziny w pociągu do Piły czy niemilosiernie nudząc się w kolejce do dentysty. Z czasem jest zresztą gorzej niż z przestrzenią, bo chociaż z Piły można wrócić, to oczekiwanie przebiega zawsze w jednym tylko kierunku – przesuwał nas z przeszłości w kierunku chwil przyszłych. Pod prąd rzeki czasu przemieścić się nie da, chwile przelatują i odchodzą w przeszłość, zostając tylko w naszej pamięci. Przemijanie, ulotność i nietrwałość czasu są więc nieodłączną cechą naszego codziennego życia – źródłem zarówno rozpacz, jak i piękna, bo przecież to ulotność chwili czyni ją niepowtarzalną. Fakt, że pamiętamy przeszłość, a nie pamiętamy przyszłości, czyli wyróżnienie kierunku upływu czasu przez nasz umysł nazywamy psychologiczną strzałką czasu. Jak Biała Królowa mówiła Alicji: „To bardzo nędzny rodzaj pamięci, taki, który działa tylko w przeszłość”.

Biała Królowa pamięta, że za chwilę ukłuje się szpilką od broszki, my jednak tego nie potrafimy – czas biegnie dla nas zdecydowanie w jednym kierunku. I dlatego tym większe jest nasze zaskoczenie, gdy uświadamiamy sobie, że tej asymetrii między przyszłością a przeszłością nie znajdziemy w większości teorii fizycznych. Równania mechaniki klasycznej są nieczułe na zmianę kierunku czasu, mogą równie dobrze opisywać procesy zachodzące w przód, jak i wstecz w czasie, nie wyróżniając żadnego z nich. Gdybyśmy więc stworzyli demona, który – jak pisał Laplace – „w danej chwili znałby wszystkie siły ożywiające przyrodę i wzajemne położenie rzeczy”, to dla takiej istoty „nic nie byłoby niepewnym i przyszłość byłaby jej przytomna, podobnie jak przeszłość”. Ta wizja świata, gdzie przyszłość jest tak samo określona jak przeszłość, zaostrza się jeszcze bardziej w świecie relatywistycznym, w którym czas staje się jednym z czterech wymiarów statycznego, geometrycznego tworzywa zwanego czasoprzestrzenią.

Są jednak teorie fizyczne, w których asymetria zdaje się odgrywać większą rolę. Jedną z nich jest termodynamika, opisująca procesy, w których uczestniczy wiele cząstek. Wśród nich łatwo znaleźć zjawiska nieodwracalne: mleko wlane do filiżanki miesza się z kawą i zmienia jej czerń w brąz, gaz wypuszczony ze słoika rozlatuje się po całym pokoju, a drwa wrzucone do kominka płoną. Procesów odwrrotnych – w których jednorodny płyn dzieliłby się na mleko i kawę, a gaz sam zbierał się w słoiku – nie obserwujemy. Termodynamika radzi sobie z opisem tych procesów, zauważając, że układ przechodzi od stanów mniej do bardziej prawdopodobnych. W skali mikro konfiguracji atomów wypełniających cały pokój jest więcej niż tych, w których wszystkie cząstki mieszczą się w słoiku. Przyjęcie, że wszystkie te konfiguracje są równoprawdopodobne, prowadzi do konkluzji, że w makroskali dużo bardziej prawdopodobny będzie stan „cząstki równomiernie wypełniają pokój” niż stan „wszystkie cząstki są w słoju”. Liczbę stanów mikroskopowych mogących urzeczywistnić dany stan makroskopowy mierzy entropia, stąd też dostajemy słynną drugą zasadę termodynamiki mówiącą o tym, że w procesach spontanicznych entropia rośnie.

Jak to jednak możliwe, że termodynamika – opisująca ewolucję układów w skali makro – ma strzałkę czasu, podczas gdy ruch poszczególnych cząstek, opisywany prawami Newtona, tej strzałki nie wykazuje? Obiekcja taka została podniesiona przez Josefa Loschmidta w 1876 r. (i nosi czasem nazwę paradoksu Loschmidta). Boltzmann, odpowiadając Loschmidtowi, zauważył, że nie tylko nie ma sprzeczności między nieodwracalnością w skali makro i odwracalnością w mikroskali, lecz wręcz ta pierwsza wydaje się wynikać z tej drugiej. Wracając do przykładu z gazem, który w chwili  $t = 0$  znajduje się wewnątrz słoika, a w chwili  $t_1$  w wyniku rozprężenia wypełnia równomiernie cały pokój, Boltzmann wskazuje, że gdyby obserwować ewolucję wstecz w czasie

O demonie Laplace'a pisaliśmy w  $\Delta_{15}^7$ .





Polecamy drugą Studencką Konferencję Zastosowań Matematyki DwuMian. Wydarzenie przygotowywane jest przez koła naukowe i organizacje studenckie z Politechniki Warszawskiej oraz Uniwersytetu Warszawskiego. Jego celem jest integracja studentów i doktorantów zainteresowanych zastosowaniami metod matematycznych w naukach technicznych i przyrodniczych czy też statystyce i inżynierii danych. Na konferencji będzie można wysłuchać prezentacji innych studentów bądź wygłosić własny referat. Odbędzie się także sesja plakatowa, ciekawe warsztaty (prowadzone przez firmy wspierające i organizatorów) oraz wieczory integracyjne. Poza wystąpieniami studenckimi będzie możliwość wysłuchania zaproszonych gości, którzy matematykę stosują zawodowo.

Pierwszy DwuMian przyciągnął ponad 200 uczestników, wśród których zyskał dużą aprobatę.

Konferencja odbędzie się w dniach 22–24 marca 2019 roku na Wydziale Matematyki, Informatyki i Mechaniki UW. Zapisy oraz więcej informacji można znaleźć na stronie [dwumian.mini.pw.edu.pl](http://dwumian.mini.pw.edu.pl) i [fb.com/DwuMianWarszawa](https://fb.com/DwuMianWarszawa)



(znów startując z gazu wypełniającego słoik dla  $t = 0$ ), to gaz ten również się rozpręży, by w chwili  $-t_1$  w przeszłości wypełnić pokój. Ewolucja jest więc w pełni odwracalna, również na poziomie makroskopowym, a wrażenie nieodwracalności bierze się stąd, że warunki początkowe (gaz w słoiku, drwa przed kominkiem) odpowiadają stanom o bardzo niskiej entropii. Co więcej, można pokazać, że wszelkie naruszenia odwracalności na poziomie mikroskopowym będą skutkowały łamaniem drugiej zasady termodynamiki. A więc – paradoksalnie – nieodwracalność w skali makro jest ściśle związana z odwracalnością w mikroskali, a termodynamiczna strzałka czasu okazuje się złudzeniem.

Skąd biorą się stany początkowe o niskiej entropii? Kiedy prześledzimy procesy, w wyniku których powstały te stany i ich warunki początkowe, to tak cofając się w czasie, dojdziemy do wniosku, że Wszechświat jako całość na początku swojego istnienia musiał mieć bardzo niską entropię. To rozumowanie jest najeżone trudnościami, trudno bowiem zdefiniować globalną entropię Wszechświata, nie jest też łatwo dołączyć do rozważań o entropii oddziaływania grawitacyjne ze względu na ich długi zasięg. Nie ulega jednak wątpliwości, że termodynamiczna strzałka czasu splata się w intrygujący sposób ze strzałką kosmologiczną, wskazującą na kierunek ekspansji Wszechświata.

A co z czasem w mechanice kwantowej? Tu sytuacja jest dość dziwaczna (tak jak i sama teoria kwantów). Podstawowym obiektem w mechanice kwantowej jest funkcja falowa, powiązana z prawdopodobieństwem znalezienia układu w różnych stanach fizycznych. Wielkość ta ewoluuje w sposób deterministyczny, zgodnie z równaniem Schrödingera, które opisuje, jak fale prawdopodobieństwa propagują się i interferują, podobnie jak fale na wodzie. Tak jak równanie Newtona, równanie Schrödingera jest nieczułe na zmianę kierunku upływu czasu. Wydawałoby się więc, że świat kwantowy jest w skali mikro odwracalny, podobnie jak świat klasyczny. Byłaby to jednak konkluzja przedwczesna, bo wszystko komplikuje się w momencie pomiaru stanu układu kwantowego – układ wybiera stan odpowiadający danemu wynikowi pomiaru, a funkcja falowa nagle, w sposób nieciągły, zmienia swoją postać. Ten element ewolucji kwantowej jest nieodwracalny i choć ostatnio pojawiają się prace wskazujące na związek takiej kwantowej strzałki czasu ze strzałką termodynamiczną, zdecydowanie więcej tu pytań i wątpliwości niż odpowiedzi.

I wreszcie – czy te wszystkie strzałki (kosmologiczna, termodynamiczna, kwantowa) mają coś wspólnego z psychologiczną strzałką czasu? Czy postrzeganie przez nas czasu jako jednokierunkowy jest rzeczywiście związane z takim, a nie innym stanem początkowym Wszechświata? A może upływ czasu jest tylko złudzeniem, jak sądził m.in. Albert Einstein, który w listach do swojego przyjaciela Michele Besso poruszał ten temat wielokrotnie? W liście z roku 1953 r. Einstein krytykował pracę przyjaciela o nieodwracalności w teorii względności, pisząc „Wchodzisz na grząski grunt. Nie ma nieodwracalności w podstawowych prawach fizyki, to tylko iluzja, którą stwarzają szczególne warunki początkowe”. Kiedy zaś Besso umarł, Einstein napisał do jego siostry: „Michele opuścił ten dziwny świat tuż przede mną. Nie ma to żadnego znaczenia. Dla nas, fizyków z przekonania, różnica między przeszłością, teraźniejszością i przyszłością jest złudzeniem, choć przyznać trzeba, że złudzeniem uporczywym”.

Problem istnienia związku między termodynamiczną a psychologiczną strzałką czasu to tylko jedna z wielu zagadek dotyczących natury czasu, które pozostają nierozwikłane. Łatwo dorzucić kolejne: Dlaczego Wszechświat na początku istnienia miał tak niską entropię, co spowodowało nakręcenie termodynamicznego zegara? Co dzieje się ze strzałką czasu w skali Plancka, w której kwantowe efekty grawitacji stają się istotne, a czas i przestrzeń tracą swoją ciągłą naturę? Jak wygląda strzałka czasu we Wszechświecie z zamkniętymi pętlami czasowymi, w których możliwa jest podróż wstecz w czasie? Czy znajdziemy kiedyś odpowiedzi na te wszystkie pytania? Czas pokaże.