



Ekstremalne czasy

Doc. dr Michał ŚWIĘCKI

Mówiąc o czasie wyobrażamy sobie zwykle pewną sekwencję zjawisk wcześniejszych i późniejszych. Pojawienie się jednak przedziałów czasowych o długości 10^{80} czy też 10^{-30} lat powoduje, że nasza wyobraźnia staje się zupełnie bezradna. Dlatego zanim opiszemy „zachowanie się” czasu w świecie cząstek elementarnych, musimy spróbować odpowiedzieć na pytanie, co to jest czas w ogóle. Nasuwają się tu dwie możliwe koncepcje.

1. Czas prymitywny, czyli redukcjonizm

Obserwacja świata, a nawet bardzo dokładne pomiary przekonują nas o tym, że wszystkie ruchy i zmiany w Przyrodzie mogą być opisane przy pomocy pojedynczego, czyli uniwersalnego parametru i to tak, że zawsze przyczyna odpowiada mniejszym jego wartościom niż skutek. Dodatkowo ten parametr czasu ma własność odwracalności — każdy ruch ma realizowalną w Przyrodzie, dokładną, tyle że antychronologiczną, kopię (patrz *Delta* 3/1981). Nasuwa się więc koncepcja jednorodnego czasu uniwersalnego, w którym zegary działające według różnych praw fizyki umieszczone w jednym miejscu są ze sobą synchroniczne i którego upływ jest zgodny zarówno z naszymi odczuciami, jak i ze wskazaniami naszych przyrządów. Istnienie takiego kontinuum czasowego jest podstawowym postulatem fizyki od czasów Galileusza i zawiera w sobie nie tylko możliwości mierzenia dowolnie krótkich i dowolnie długich odstępów czasowych (przez ekstrapolację, przynajmniej w wyobraźni), ale także możliwości na tyle dokładnego ustalenia warunków każdego ruchu, by po skończonym, choć poza tym dowolnym czasie, ruch ten doprowadził do zadanego stanu końcowego.

Wyobraźmy sobie gaz wypełniający połowę naczynia, którego ścianki utrzymujemy w stałej temperaturze z dokładnością powiedzmy do 10^{-100} K. Otwieramy przegrodę przedzielającą naczynie. Wtedy zgodnie z prawami fizyki (patrz także artykuł A. Kuszla), po ogromnym czasie, wielokrotnie przewyższającym wszelkie skale kosmologiczne, gaz zgromadzi się ponownie w tej samej połowie naczynia. Otrzymamy zegar termodynamiczny o niesłychanie długim okresie. Podobnie moglibyśmy wyobrazić sobie zegar wewnątrzprotonowy o nadzwyczaj krótkim okresie drgań. Wszystkie zegary musiałyby być synchroniczne z dowolną dokładnością. Oczywiście ustalenie temperatury naczynia z tak wielką precyzją nie może być fizycznie zrealizowane. Plamy, nie tylko na Słońcu, ale także na Syriuszu, mają znacznie większy wpływ na gaz w naczyniu niż zmiany temperatury o 10^{-100} K. Dlatego warunki w naczyniu zawsze

są nieco nieokreślone i to *nieco* jest wystarczająco duże na to, by właściwą idealizacją stanu gazu było pojęcie zespołu statystycznego.

Innym powodem wprowadzania zespołów statystycznych jest niedokładna, „gruboziarnista” (patrz artykuł A. Kuszla), obserwacja gazu.

Koncepcja idealnego czasu uniwersalnego daje się jednak utrzymać, jeśli zauważymy, że układem izolowanym z natury rzeczy jest cały Wszechświat, który w całości może tworzyć jakiś zegar (termodynamiczno-grawitacyjny) o ogromnym okresie drgań. Wewnątrz takiego całkowicie zdeterminowanego Wszechświata mogą pojawiać się lokalne strzałki czasowe: lokalne przestrzennie np. obrót planet dookoła Słońca w jednym tylko kierunku, czy też lokalne czasowo np. prawo wzrostu entropii, które może obowiązywać nawet w całym Wszechświecie przez powiedzmy 10^{20} lat. Może występować także strzałka globalna np. prawo nieograniczonego rozszerzania się Wszechświata (gdymy Wszechświat był otwarty). Zwróćmy jednak uwagę, że lokalne strzałki czasowe, a więc i zjawiska określające je, mogą być całkowicie niezauważalne dla obserwatora wszechkosmicznego, którego „sekunda” (charakterystyczna skala czasowa) trwa np. 10^{80} lat. Układ Słoneczny będzie dla niego niezmienną w czasie chmurą. Badając ją, obserwator będzie od czasu do czasu wydobywał z niej różne dziwne obiekty w rodzaju np. Saturna i to w zupełnie przypadkowych z punktu widzenia samego Saturna chwilach czasu. Nie ulega wątpliwości, że opisze on nasz układ jako obiekt stacjonarny. A wyniki pomiarów przeprowadzonych na nim będą miały charakter statystyczny. Wedle koncepcji czasu uniwersalnego będzie to jedynie prymitywna idealizacja. Podobnie jak statystyczny charakter naszych praw termodynamiki.

Zupełnie tak samo ziemskie przyrządy pomiarowe o działaniu opartym na wahadłowej sekundzie i zwykłej termodynamicznej strzałce czasu (wyrównywanie się ciśnień i temperatur w układach „izolowanych”) „obserwują” świat wewnątrz atomu, jądra atomowego czy też protonu. Nic więc dziwnego, że opisujemy atom jako obiekt zupełnie statyczny, a wyniki pomiarów przeprowadzonych na nim — za pomocą statystycznej mechaniki kwantowej. Bez względu na to, jak różnorodne zjawiska zachodzą wewnątrz atomu we właściwej dla nich niesłychanie krótkiej skali czasowej. Z punktu widzenia „prawdziwego” czasu jest to niedopuszczalna, choć być może konieczna idealizacja. Wydedukowane w ten sposób z doświadczeń własności czasowe cząstek elementarnych wydają się często wręcz absurdalne. Podobnie jak własności Saturna dla kogoś przyzwyczajonego do gromad galaktyk.

2. Czas fizyczny, czyli subiektywny

Koncepcja czasu uniwersalnego wymaga stopniowego i nieograniczonego ulepszenia definicji czasu w miarę rozwoju naszej wiedzy. Wydaje się więc w pełni naturalna. Koncepcja ta zawiera jednak pewną istotną niedogodność. Wszechświat jest tu nie tylko całkowicie zdeterminowany (gdzie w nim miejsce na życie i świadomość nie bardzo poddające się nie tylko prawom, ale i metodologii fizyki), ale i istniejący na jeden tylko możliwy sposób.

Prócz tego współczesna teoria grawitacji oraz fizyka cząstek elementarnych zmuszają nas do operowania różnymi czasami lokalnymi, których skala może zmieniać się w zależności od

miejsca nawet jakościowo. W praktyce wybieramy zwykle skalę najwygodniejszą. I tak, czas lotu rakiety do czarnej dziury mierzony w skali synchronicznej z naszymi ziemskimi zegarami jest nieskończony, podczas gdy czas mierzony przez takie same zegary umieszczone w rakiecie okazuje się skończony. Podobnie najwygodniejszy z punktu widzenia naszych przyrządów opis czasu przelotu fotonu przez proton daje wartość 10^{-24} s, podczas gdy dla uwięzionych wewnątrz protonu kwarków czas ten może wydawać się nieskończonością (czas przelotu przez cały wszechświat kwarkowy).

Pojawia się w ten sposób koncepcja czasu jako najwygodniejszej parametryzacji zmian i ruchów obserwowanych przez nasze przyrządy pomiarowe. A ponieważ przyrządów kwarkowych ani kosmicznych nie mamy i mieć nie będziemy, więc mówienie na przykład o historii Wszechświata jest jedynie wygodną ekstrapolacją dzisiejszego wyglądu nieba, a z rzeczywistą historią (o ile wolno o niej w ogóle mówić) może nie mieć żadnego związku. W tej koncepcji czasu wyznaczanym przez ziemskie zegary jedyną rzeczywistą strzałką czasu jest strzałka termodynamiczna, zaś własności czasowe cząstek elementarnych, podobnie jak i Wszechświata, nie bez powodu okazują się raczej dziwne.

Istnieje prosty związek między wspomnianymi dwiema koncepcjami czasu: tego dzisiejszego i tutaj oraz tego zawsze i wszędzie. Związek ten pojawia się przez zapostulowanie *zasady kosmologicznej* (zawsze i wszędzie jest tak samo), która pozwala na zajmowanie się niesprawdzalną doświadczalnie kosmologią oraz *mechaniki kwantowej* (wszystko, czego możemy się dowiedzieć, to zbiór prawdopodobieństw), która każe twierdzić, że tam gdzie badania doświadczalne wykluczone są przez zasadę nieoznaczoności, nic ciekawego po prostu nie ma.

3. Czas w mikroświecie

Wspominaliśmy o tym, że trudno oczekiwać normalnego przebiegu zjawisk, których czas trwania wynosi 10^{-10} s, czy nawet 10^{-24} s. A oto niektóre anomalie czasowe świata cząstek elementarnych:

a. *Zasada nieoznaczoności czas-energia*. Głosi ona, że dla cząstki o energii określonej z dokładnością ΔE występuje istotna niemożność zaobserwowania jakichkolwiek zmian cząstki w czasie krótszym niż $\Delta t = \frac{\hbar}{\Delta E}$. W tym czasie cząstka może wyprawiać najróżniejsze brewerie — mieć niefizyczną masę, wysyłać i pochłaniać inne cząstki, a nawet pochłaniać cząstkę przed jej wysłaniem. Żadne takie dziwactwo nie może i tak być bezpośrednio zauważone. Dla cząstek nietrwałych zasada nieoznaczoności ustala związek między tzw. szerokością połówkową (nieokreślonością masy) i czasem życia cząstki: $\Gamma \cdot \tau = \hbar$. W ciągu całego swojego czasu życia cząstka swobodna jest wciąż taka sama lub, jak kto woli, nikt nie może zauważyć zachodzących w niej zmian.

b. *Antycząstki*. Według koncepcji Diraca każda cząstka występuje w dwóch stanach; o dodatniej i ujemnej (równej co do modułu) energii. Stany o energii ujemnej są przy tym

Relatywistyczny związek między energią i pędem $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ prowadzi formalnie do dwu wartości energii: albo $E = +c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$, albo $E = -c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$.

całkowicie zapełnione tak, że nie można ich obserwować. Można natomiast obserwować braki (dziury) w tym tzw. morzu diracowskim. Będą one oczywiście zachowywały się tak, jak cząstki o energii dodatniej i przeciwnym znaku ładunku elektrycznego. Można na nich rozpraszać fotony, mogą też anihilować wraz z cząstkami tworząc fotony (np. $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$, czyli elektron o dodatniej energii spada na niezajęty poziom — dziurę — o energii ujemnej). Takie dziury w morzu diracowskim to tzw. antycząstki.

Skłamałiśmy jednak mówiąc, że foton rozprasza się na antycząstkach. Antycząstki to przecież tylko dziury, a rozpraszanie zachodzi jedynie na naładowanych cząstkach o energii ujemnej. Foton wybija taką cząstkę (powstaje nowa dziura) i przenosi ją na miejsce istniejącej już dziury. Najpierw więc powstaje dziura końcowa, a potem ginie początkowa. Żeby to wszystko miało sens i antycząstki laboratoryjne (dziury) poruszały się normalnie w czasie, musimy przyjąć, że cząstki o energii ujemnej poruszają się w czasie wstecz. W kwantowej teorii pola diracowskie morze nie występuje, ale powyższa własność zostaje: antycząstki o dodatniej energii i ładunku np. $+e$ to równie dobrze cząstki o energii ujemnej i ładunku $-e$ poruszające się wstecz w czasie.

Widać teraz na czym polega odwracalność czasowa takiej teorii. Po prostu cząstki i antycząstki muszą mieć takie same własności (masy, moduły ładunków, czasy życia). Odwracalność ta wymaga również spełnienia tzw. prawa równowagi szczegółowej — prawdopodobieństwo zajścia jakiejś reakcji (np. $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$) równa się prawdopodobieństwu zajścia reakcji odwrotnej (odpowiednio $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$). Jeśli jednak w Przyrodzie obowiązuje tak idealna symetria, to gdzie podział się Antywszechświat?!

c. *Elementarna strzałka czasowa*. Okazuje się, że czasowa odwracalność oddziaływań elementarnych nie jest ścisłym prawem Przyrody. Odkryto bowiem procesy (patrz *Delta* 3/1981), które naruszają, choć bardzo słabo, tę symetrię. A naruszenie to ma aż dwie konsekwencje, obie prowadzące do pojawienia się wyróżnionej strzałki czasowej w pierwszych chwilach istnienia Wszechświata.

Po pierwsze czas życia protonu (produktem rozpadu są pozytony, $p \rightarrow e^+$) jest nieco dłuższy niż czas życia antyprotonu ($\bar{p} \rightarrow e^-$)

Przewiduje się, że czas życia protonu wynosi obecnie około 10^{30} lat, ale w pierwszych chwilach był znacznie krótszy.

i po pewnym czasie pojawia się niewielka nadwyżka protonów i elektronów nad antyprotonami i pozytonami (np. $10^9 + 1$ protonów na 10^9 antyprotonów). Systematyczny wzrost nadwyżki protonów we Wszechświecie determinuje oczywiście pewną strzałkę czasu. Wzrost ten trwał do czasu, gdy nastąpiła anihilacja protonów i antyprotonów, w wyniku której pozostała już sama tylko nadwyżka (obecnie 1 proton na 10^9 fotonów). Prócz tego naruszenie symetrii względem odwrócenia czasu prowadzi także do naruszenia prawa równowagi szczegółowej. I tak na przykład reakcja $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ zachodzi nieco częściej niż $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$, co w stanie równowagi między fotonami i elektronami prowadzi do systematycznego zwiększania się liczby fotonów i do nowej strzałki czasowej.

Oba te nieodwracalne zjawiska zdarzają się obecnie bardzo rzadko. Tak więc we współczesnym Wszechświecie słaba nieodwracalność czasowa mikroświata nie ma po prostu żadnego znaczenia.