

Mgr Bronisław RUDAK

... można dyskutować, czy jakiegokolwiek procesy fizyczne są odpowiedzialne za czasową kierunkowość Wszechświata.

Jednak w świetle współczesnej nauki nie ulega wątpliwości, że Wszechświat posiada cechę czasowej orientowalności.... Cechę tę określa się ściśle, bez odwoływania się do właściwości ludzkiego umysłu.

Michał Heller

Nim rozpoczniemy dyskusję zagadnień kosmologicznej strzałki czasu oraz konsekwencji jej istnienia, zatrzymajmy się przez chwilę na pojęciu samego czasu. Musimy przede wszystkim zdać sobie sprawę, że błędnym byłoby bezkrytyczne transformowanie własności czasu ze sfery makrokosmosu (w której to sferze przyszło nam żyć) do sfery o randze globalnej — kosmologicznej. Podobnie nie jest wskazane, choć z fizycznie innych powodów, rozprawianie o czasie potocznie rozumianym na poziomie kwantowym — mikrokosmicznym.

Zacznijmy od rzeczy elementarnej: czy jest w ogóle zasadne mówienie o wyróżnionym czasie odpowiadającym zjawiskom zachodzącym w skali kosmologicznej? Żyjemy przecież we Wszechświecie wypełnionym materią, która determinuje jego strukturę czasoprzestrzenną. W takiej przestrzeni naturalnym niezmiennikiem przy transformacjach do różnych inercjalnych układów odniesienia jest interwał czasoprzestrzenny, a nie interwał czasowy i interwał przestrzenny. W ogólności zatem nie jest możliwe wyluskanie ze struktury Wszechświata niezależnej składowej czasowej — czasu uniwersalnego. Taka operacja udaje się jedynie w przypadku, gdy rozkład przestrzenny materii jest izotropowy (dopuszczalne obroty przestrzennego układu odniesienia) i jednocześnie jednorodny (dopuszczalne translacje tego układu). Bezpośrednie obserwacje wskazują, że rozkład taki jest prawdopodobnie faktem, ale na bardzo dużych skalach odległości, obejmujących gromady gromad galaktyk (ok. 300 mln lat świetlnych). Jeżeli jesteśmy wygodni i chcemy operować pojęciem czasu uniwersalnego, który z racji swych własności jest dla nas czymś „namacalnym”, powinniśmy pamiętać, że pojęcie to jest sensowne z taką dokładnością, z jaką jednorodny i izotropowy rozkład materii oddaje to, co widać na niebie przez teleskop.

Musimy również zdać sobie sprawę, że pojęcie czasu uniwersalnego (kosmicznego) nie zawiera w sobie przepisu, jak go mierzyć. Zatrzymajmy się na chwilę przy tym problemie.

W ogólnej teorii względności przyjmuje się, że każdy zegar — niezależnie od tego, czy oparty na zjawiskach atomowych, dynamicznych, czy jeszcze innych — jest dobry w tym sensie, iż stosunki interwałów odmierzanych przez te zegary pozostają zawsze stałe. Jednak takie założenie nie jest a priori oczywiste. Równie dobrze można przyjąć, że te stosunki zmieniają się w sposób monotoniczny. Tak właśnie postąpił E. Milne konstruując swoją kinematyczną teorię względności — jedną z nielicznych do tej pory teorii o charakterze dedukcyjnym. Tę rzącą na pozór hipotezę łatwiej uznamy za dopuszczalną, gdy rozpatrzmy samą koncepcję Milne'a upływu czasu. Istotą tej koncepcji jest żądanie, aby obserwator był w stanie stworzyć z zachodzących w pobliżu niego zjawisk uporządkowany ciąg, taki że zjawisko późniejsze jest poprzedzone zjawiskiem

wcześniejszym. Tak rozumiana świadomość upływu czasu dla obserwatora umożliwia mu przypisanie temu ciągowi uporządkowanego ciągu dowolnych liczb rzeczywistych. Przypuśćmy, że obserwator zarejestrował trzy zjawiska: A , B i C . Stwierdził przy tym, że najpierw zaszło zjawisko B , następnie C , a na samym końcu A . Otrzymał więc uporządkowany ciąg zjawisk: $\{B, C, A\}$. Może teraz stworzyć zegar tych zjawisk — przypisując im uporządkowany ciąg liczb rzeczywistych według dowolnej recepty, np: $\{2, 3, \sqrt{78}, 522\}$. Używając tego zegara odczytamy, iż A nastąpiło w chwili czasu $t = 522$. Można jednak skonstruować nowy zegar przeskalowując stary. W tym celu wystarczy podzielić na powyższe liczby dowolną, monotonicznie rosnącą funkcją f . Według nowego zegara A nastąpiło w chwili czasu $\tau = f(522)$. Na tym etapie nie jesteśmy w stanie powiedzieć, czy np. odstęp czasu między zjawiskiem B i C był taki sam, jak między C i A .

Możliwość przeskalowywania zegarów to bardzo ważny element teorii kinematycznej. Przede wszystkim dlatego, że od niego zależy obraz rozkładu przestrzennego obiektów we Wszechświecie Milne'a. Milne zastąpił metodę pomiaru odległości „sztywną linijką” einsteinowską przez metodę odbicia sygnałów świetlnych. Żeby zmierzyć odległość między O_1 i O_2 , wysyłamy z O_1 sygnał światła w chwili t_1 . Sygnał odbija się od O_2 i wraca do O_1 w chwili t_2 . Wtedy odległością O_2 od O_1 w chwili $t = \frac{t_1 + t_2}{2}$ jest liczba $\frac{1}{2}(t_2 - t_1) \cdot c$. Widać zatem, że przeskalowanie zegara w O_1 spowoduje przeskalowanie wszystkich odległości mierzonych z tego punktu.

Milne zwrócił uwagę na dwie szczególne skale czasowe, jakie może wybrać sobie każdy obserwator fundamentalny (obserwatorów fundamentalnych utożsamiamy z gromadami galaktyk). Pierwsza z nich (oznaczymy ją jako skalę czasu t) jest tak dobrana, że wszyscy obserwatorzy fundamentalni poruszają się ruchem jednostajnym względem siebie. Dlatego też odległość między dwoma obserwatorami jest proporcjonalna do t . Druga ze skal (oznaczymy ją jako skalę czasu τ) sprawia, że fundamentalni obserwatorzy nie poruszają się względem siebie. Jest oczywiste, że w skali czasu τ dwaj rozdzieleni obserwatorzy fundamentalni potrzebują nieskończenie wiele czasu, aby znaleźć się w jednym miejscu. Obserwowane poczerwienie promieniowania galaktyk tłumaczy się wtedy nie ich oddalaniem od nas (prawo Hubble'a), ale starzeniem się fotonów w czasie τ . Przeskalowanie zegara chodzącego w czasie t tak, aby wskazywał czas τ jest proste: $\tau \sim \ln t$. Jeżeli chcemy, aby w pewnej chwili $t = t_0$ wartość liczbowa τ też wynosiła t_0 ($[\tau]_{t=t_0} = t_0$) oraz aby w tym momencie szybkość upływu τ i t była ta sama ($[\frac{d\tau}{dt}]_{t=t_0} = \frac{d\tau}{dt} \equiv 1$), to przeskalowanie powinno mieć postać $\tau = t_0 \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) + t_0$.

Posługując się tymi dwiema skalami czasowymi Milne i inni badacze doszli do zadziwiających wyników. Wydedukowane przez nich prawo ruchu cząstki swobodnej wyrażone przy pomocy skali czasu τ okazało się być po prostu pierwszym prawem ruchu Newtona. Ale na tym nie koniec. Okazało się, że można też otrzymać w tej skali (dla pewnych ograniczających warunków) prawo ciężenia powszechnego. Te rezultaty stanowiły podstawę do postulatu, iż zjawiska dynamiczne we Wszechświecie podlegają czasowi τ .

Natomiast czas t okazał się być odpowiedni dla opisu zjawisk elektromagnetycznych. Dlatego też został nazwany czasem atomowym. Bliższa dyskusja — dlaczego tak jest — wykracza jednak poza ramy tego artykułu i nie będziemy jej prowadzić. I tak dygresja o związku między czasem atomowym i dynamicznym obowiązującym w kinetycznej teorii względności stała się nieco zbyt długa.

Jeżeli zatem rozumiemy upływ czasu tak, jak rozumiał to Milne, to na pytanie — czy od Wielkiego Wybuchu miał skończony czas? — odpowiemy: to zależy od tego, czym tę ilość mierzymy. Używając w tym celu oscylacji fotonu stwierdzimy, że od Wielkiego Wybuchu foton zaoscylował skończoną ilość razy. W czasie atomowym wiek naszego Wszechświata jest skończony. Natomiast w czasie dynamicznym, odmierzającym np. przez oscylacje zwykłego wahadła, wiek ten jest nieskończony. Od momentu Wielkiego Wybuchu wahadło dynamiczne zaoscyloowało nieskończenie wiele razy.

W ogólnej teorii względności, nie dopuszczającej przeskalowania czasu, odpowiedź na powyższe pytanie będzie zawsze twierdząca.

Pozostawmy jeszcze chwilę przy obserwacjach. Mają one wartość bezcenną w sytuacji, gdy ilość modeli kosmologicznych (w tym pokaźna część nieprawdopodobnie egzotycznych) będących ścisłymi rozwiązaniami równań Einsteina rośnie ponad miarę i wypadałoby jakoś interweniować.

Oto dwa fakty najwyższej wagi:

- *Wszechświat znajduje się w stanie ekspansji,*
- *przestrzeń wypełniona jest izotropowym promieniowaniem o temperaturze 2,7 K.*

W tym miejscu można by wturcić, że ten pierwszy to właśnie to, o czym mówi tytuł. Wróćmy do tego, ale na razie przedstawimy w telegraficznym skrócie konsekwencje obu faktów. Pozwoli to na pobieżne wejrzenie we właściwości uniwersalnego czasu.

W przeszłości Wszechświat musiał znajdować się w stanie osobliwości.

Twierdzenie to zostało sformułowane (w innej formie) i udowodnione przez S. W. Hawkinga i R. Penrose'a.

Często mówimy, że w stanie osobliwym podstawowe parametry fizyczne (gęstość, temperatura, ...) osiągają wartości nieskończone. Prawdę mówiąc, zdanie to jest raczej eleganckim sposobem stwierdzenia, że nie mamy pojęcia, co dzieje się w środku. Już przy skończonych, ale patologicznie dużych wartościach gęstości materii załamuje się nasza wiedza. Nie wiedząc, czy jeszcze „wcześniej” obowiązują jakieś prawa fizyczne, czy w ogóle ma sens pojęcie prawa fizycznego, pozostaje nam uznać, że stan osobliwości jest z natury swej aczasowy. Jest to zatem stan wyróżniający zakres tolerancji pojęcia czasu. Mówiąc więc, że w pewnym momencie nastąpił Wielki Wybuch, dajemy świadectwo bezradności naszego języka. Zwykle dodajemy wtedy: „tego nie da się opisać”. Możemy jednak bezpiecznie mówić o wylaniu się czasu z Wszechświata. W większości modeli kosmologicznych punktem startowym rachunków ewolucyjnych jest stan, w którym horyzont zdarzeń osiąga rozmiar fali de Broglie'a dla średniej cząstki. Gdy taki stan zaistnieje, czas jest od biedy dobrze określony.

Zajmijmy się teraz strzałką czasu. Naturalnie, jej najważniejszym atrybutem jest grot, ale na razie popatrzymy na drzewce i jego

właściwości. Czy to drzewce jest w każdym miejscu takie same, czy brak w nim sęków? Innymi słowy, czy można mówić o jednorodności czasu kosmicznego, rozumiejąc to jako równouprawnienie kolejnych chwil względem obowiązujących praw fizyki. Odpowiedź jest negatywna, właśnie z uwagi na konieczność zaistnienia w historii Wszechświata przynajmniej jednego stanu osobliwego. Takim sękiem — wyróżnionym momentem będzie chwila, w której zaczynają obowiązywać prawa fizyki (tuż po osobliwości początkowej), lub chwila, w której przestają te prawa obowiązywać (tuż przed osobliwością, która może kiedyś nastąpić). Natomiast kres drzewca strzałki wyznaczony jest przez samo zaistnienie tychże osobliwości. Czas ma swój względny początek, bo Wielki Wybuch nastąpił z osobliwości. Jeśli po obecnym etapie ekspansji nastąpi kontrakcja do następnej osobliwości, czas osiągnie swój względny koniec. I to jest długość drzewca. A jeśli ekspansja będzie trwała wiecznie, drzewce strzałki upodobni się do półprostej.

Jeżeli nowo powstała osobliwość będzie raczyła wybuchnąć ponownie, dając początek następnemu Wszechświatowi, to jego strzałka czasowa nie będzie miała z naszą nic wspólnego — będą od siebie odseparowane. Ścisłej mówiąc, czas rozumiany jako zbiór czasowych historii (strzałek) kolejnych Wszechświatów jest niespójny.

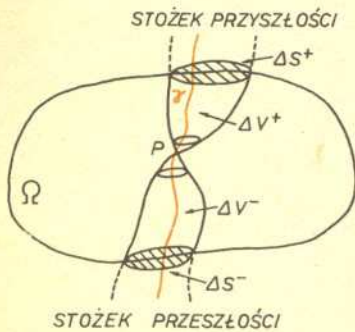
Spójrzmy teraz na sam czubek strzały. Od tego momentu zaczniemy utożsamiać strzałkę czasu z jej grotem.

Zmiermy średnią gęstość ρ materii we Wszechświecie w dwóch różnych momentach czasowych: t_A i t_B . Jeżeli $\rho(t_A) > \rho(t_B)$, chwilę t_A nazwiemy wcześniejszą, a chwilę t_B późniejszą. Ekspansja Wszechświata wytworzyła w sposób nieoczekiwany prosty kosmologiczny strzałkę czasu. Czas został zorientowany.

Czy tak banalna rzecz jak ciągłe malenie gęstości jest jedynym rodzajem manifestacji istnienia strzałki czasu? Wielu kosmologów odpowie, że niestety — tak, że cały problem jest pozorny i nie wnosi nic nowego do zagadnienia nieodwracalności zjawisk fizycznych. Jednak istnieją przesłanki do stwierdzenia, że sprawa ta nie jest oczywista. Można mianowicie skonstruować modele kosmologiczne, w których ta niepozorna strzałka czasu jest bezpośrednią przyczyną występowania strzałki termodynamicznej, elektromagnetycznej, grawitacyjnej etc. Rachunki prowadzące do takich wniosków są niesłychanie skomplikowane. Dlatego też nie ma mowy, aby sprawdzić, czy dla modelu najlepiej opisującego nasz Wszechświat wynik będzie właśnie taki.

Żeby zobaczyć, jak można pogodzić symetrię czasową fundamentalnych praw fizyki z obserwowaną przewagą zjawisk nieodwracalnych, przy istnieniu ekspansji Wszechświata, posłużymy się jako przykładem procesami promieniowania. Rozważmy w tym celu pewną ograniczoną czasoprzestrzeń Ω , w której rozmieszczone są źródła promieniowania elektromagnetycznego. Będziemy badać potencjał A wytworzony przez te źródła w punkcie $P \in \Omega$. $A(P)$ jako formalne rozwiązanie równań opisujących zachowanie i propagację fal elektromagnetycznych w czasoprzestrzeni (równań Maxwella) jest sumą dwu członów. Pierwszy z nich zawiera przyczynki do potencjału od źródeł leżących w stożku przeszłości P . W sensie jednokierunkowego czasu istnienie tych przyczynków jest logiczne: najpierw przyczyna — emisja promieniowania z odległych źródeł w kierunku P , a potem skutek — dotarcie

tych sygnałów do P . Z tego powodu nazywamy ten człon składową opóźnioną potencjału w $A(P)$. Czy jest sens traktować jako fizyczny drugi człon — przyczynki od źródeł umieszczonych w stożku przyszłości P ? Naturalnie — tak, i wcale nie kłóci się to z naszym pojęciem determinizmu. Ta wątpliwość jest jedynie skutkiem niefortunnej terminologii. W istocie, skoro podstawowe prawa fizyki są odwracalne względem czasu, promieniowanie wysyłane w kierunku źródeł zawartych w stożku przyszłości punktu P powinno w nich znaleźć swój ściek (foton wysyłany przez gwiazdę powinien zgodnie z powyższym zostać zaabsorbowany przez inną gwiazdę).



Taki właśnie ściek jest reprezentowany przez drugi człon, potocznie nazywany potencjałem przyspieszonym (najpierw „skutek”, a potem „przyczyna”).

$$A(P) = \{pot. opóźniony\} + \{pot. przyspieszony\}.$$

Ponieważ w naszym Wszechświecie wartość potencjału opóźnionego dominuje nad potencjałem przyspieszonym, stajemy przed faktem istnienia promienistej strzałki czasu. Jednym z powodów tego stanu rzeczy może być ekspansja Wszechświata.

Każdy z wyrazów prawej strony równania można rozbić na dwie części. Dla ustalenia uwagi zrobmy to dla wyrazu pierwszego mając do pomocy rysunek.

Wkład do potencjału opóźnionego w P mają źródła rozmieszczone wewnątrz objętości stożka przeszłości ΔV^- . Zsumujmy te przyczynki i sumę zapiszmy symbolicznie jako $\sum_{\Delta V^-} [\ominus]$. Znak $[\]$ ma oszczędzić nam widoku jawnej postaci funkcji, którą należałoby tu operować. Znak \ominus wskazuje, że rozważamy źródła ze stożka przeszłości. Ale to jeszcze nie cały potencjał opóźniony. Przecież Ω jest tylko podzbiorem całej różnorodności czasoprzestrzennej. Źródła leżące poza Ω powodują, że podstawa ΔS^- stożka przeszłości również „oświetla” punkt P . Sumę przyczynków do potencjału opóźnionego od wszystkich elementów podstawy ΔS^- zapiszemy jako $\sum_{\Delta S^-} \langle \ominus \rangle$. Nowy znak $\langle \rangle$ ma wskazywać, że postać funkcji, którą reprezentuje, jest inna niż $[\]$.

Zatem

$$\{pot. opóźniony\} = \sum_{\Delta V^-} [\ominus] + \sum_{\Delta S^-} \langle \ominus \rangle.$$

Podobnie postępujemy ze stożkiem przyszłości. W rezultacie otrzymamy relację

$$A(P) = \left\{ \sum_{\Delta V^-} [\ominus] + \sum_{\Delta S^-} \langle \ominus \rangle \right\} + \left\{ \sum_{\Delta V^+} [\oplus] + \sum_{\Delta S^+} \langle \oplus \rangle \right\}.$$

Ponieważ okazuje się, że funkcja $[\]$ jest symetryczna względem czasu, obie sumy objętościowe są jednakowo uprzywilejowane. W takim razie nasuwa się myśl, że istota występowania

promienistej strzałki czasu leży w różnym zachowaniu się sum powierzchniowych w obu stożkach świetlnych. Do tej pory nie zakładaliśmy niczego wyjątkowego o Ω . Nie ma więc powodu, by ta przestrzeń grała zasadniczą rolę w rozróżnianiu obu sum powierzchniowych. Jedyną wyróżnioną przestrzenią jest cała możliwa różnorodność czasoprzestrzenna. Dopiero gdy Ω zaczyna dążyć do tej granicznej przestrzeni, sumy powierzchniowe nie powinny zachowywać się tak samo. Najprostszym byłby taki przypadek, gdzie w granicy obie sumy $\sum_{\Delta S^+} \langle \oplus \rangle$ i $\sum_{\Delta V^+} [\oplus]$

kompensują się, a $\sum_{\Delta S^-} \langle \ominus \rangle$ osiąga wartość zero. To skrajnie różne zachowanie się sum $\sum_{\Delta S^+} \langle \oplus \rangle$ i $\sum_{\Delta S^-} \langle \ominus \rangle$ byłoby właśnie odbiciem faktu powszechnej ekspansji naszego Wszechświata. Jak rzeczywiście zachowują się obie sumy — nie wiadomo.

Rachunki stają się prostsze (i były wykonywane), gdy zrezygnujemy z rozwiązywania równań Maxwella i zadowolimy się przybliżeniem optyki geometrycznej. Tracimy wówczas informacje o relacjach fazowych i operujemy tylko amplitudą (a więc i energią); poprawniej jest teraz mówić o strzałce termodynamicznej. Zyskujemy to, że problem staje się strawniejszy technicznie. Rozważmy promieniowanie docierające do P ze źródeł umieszczonych wzdłuż pewnej zerowej linii geodezyjnej (linii światła fotonu) — γ . Rozważmy też sytuację czasowo symetryczną: promieniowanie emitowane w P zasila te źródła. Możemy wyrazić to inaczej: przeszłość nagrzewa P , przyszłość działa jako ściek ciepła. Tezę o naruszeniu symetrii wypowiadamy teraz następująco: ekspansja Wszechświata powoduje, że pierwszy proces staje się bardziej prawdopodobny.

Według przedstawionych wyżej idei zatrzymanie ekspansji spowodowałoby zatarcie różnic między skutkiem propagacji sygnałów elektromagnetycznych z przeszłości i w przyszłość. Nie potrzeba nawet tak drastycznych wymagań. Wystarczy, aby skala czasowa oddziaływań promieniowania z materią była na tyle krótka, iż zachodząca w międzyczasie ekspansję można zaniedbać. Ten warunek był spełniony w przeszłości naszego Wszechświata. Wszechświat przeszedł przez stadium tzw. ery promieniowania, w której promieniowanie bardzo chętnie oddziaływało z materią (w tym okresie materia nie tworzyła jeszcze struktur takich jak gwiazdy czy galaktyki) dzięki swojej dostatecznie dużej temperaturze. Innymi słowy — promieniowanie i materia były ze sobą w równowadze. W takich warunkach droga swobodna pojedynczego fotonu maleje niemal do zera, a zatem czas między jego emisją i absorpcją jest zaniedbywalnie krótki w porównaniu z dynamiczną skalą czasową Wszechświata. O dowolnie wybranym elemencie promieniowania możemy wtedy powiedzieć, że został właśnie przez jakieś źródło wyemitowany oraz że za chwilę zostanie zaabsorbowany (czyli „wyemitowany w przeszłość”). Układ staje się odwracalny. Nie ma ani elektromagnetycznej, ani termodynamicznej strzałki czasu.

Jednak ekspansja doprowadza z czasem do spadku temperatury promieniowania poniżej dziesięciu tysięcy kelwinów (obecnie 2,7 K). Elektrony i protony mogą wreszcie bez przeszkód połączyć się na stałe — powstaje neutralny wodór. Niskoenergetyczne fotony nie są już w stanie zjonizować tego wodoru. Ich średnia droga swobodna wzrasta niepomniernie. Mówimy wtedy, że materia rozpręga się z promieniowaniem. Dlatego też procesy promieniste stają się jednokierunkowe. Są przesłanki, aby sądzić, iż w analogiczny sposób reaguje na ekspansję Wszechświata promieniowanie grawitacyjne. Czy rzeczywiście występowanie tu wymienionych strzałek czasu jest zjawiskiem natury globalnej, a nie wynikiem procesów na poziomie mikroświata, pozostaje dotąd sprawą nierozstrzygniętą.