

Andrzej WOSZCZYNA

Obserwatorium Astronomiczne UJ
Kraków

KONFOREMNY CZAS WSZECHŚWIATA

Czas jest aspektem ruchu¹. Miarowy ruch wahadła dzieli go na sekundy, podobnie jak czyni to regularne cykanie zegarka kieszonkowego lub drganie kryształu kwarcu w zegarku elektronicznym. Ruch wahadła jest *miarowy* ponieważ zgadza się z rytmem uderzeń mojego serca — funkcjonującym we mnie zegarem biologicznym. Rytm uderzeń serca pozostaje w harmonii z ruchem dziennym słońca, kalendarzem, ruchem planet. Czas jest uniwersalny, bowiem znane mi naturalne ruchy cykliczne mierzą go w ten sam sposób.

Uniwersalny czas nie przetrwa próby względności ruchu. Transformacja Lorentza powoduje, że rytm czasu w poruszających się względem siebie układach inercjalnych jest różny. Oscylacje kwarcu transformują się według znanych reguł, a w ślad za nimi procesy biologiczne zmieniają tempo. Rytm zegara wahadłowego w ogóle ustaje (układy inercjalne są wolne od pola ciężenia).

Uniwersalność czasu jest złudna. Jest „oczywista” dla układów zbliżonych do laboratoryjnego i szybko znika gdy przechodzimy do relatywistycznych prędkości, do wyraźnie różnych pól grawitacyjnych (przyspieszeń), skal subatomowych lub kosmologicznych. Przestaje być obojętne, jakim zegarem mierzymy czas (jaki ruch odmierza sekundy), a wskazania różnych zegarów mogą być odmienne.

*UWAGA: Tekst został zrekonstruowany przy pomocy środków automatycznych; możliwe są więc pewne błędy, których sygnalizacja jest mile widziana (obi@opoka.org). Tekst elektroniczny posiada odrębną numerację stron.

¹Referat wygłoszony na VI Krakowskiej Konferencji Metodologicznej „Czas”, 11-12 maja 2000 r.

Pozorna mnogość technik pomiaru czasu sprowadza się do dwóch: *grawitacyjnej* i *elektrycznej*. Obydwa prototypy znajdujemy wśród wynalazków Huyghensa — fizyka i matematyka siedemnastego stulecia., znanego dziś jako współautora zasady Huyghensa-Fresnela. Owe dwa prototypy to zegar wahadłowy i tzw. mechanizm balansowy (serce zegarka kieszonkowego). Pierwszy wykorzystuje grawitację ziemską (i bezwładność wahadła), drugi — sprężystość włosa (i bezwładność pierścienia balansowego). Pierwszy z nich zaprzęga do pomiaru te same siły przyrody, które odpowiedzialne są za ruch planet. Natomiast sprężystość wykorzystana w drugim jest mechanicznym przejawem sił elektrycznych. (Sprężystość jest własnością sieci krystalicznej złożonej z cząstek o przeciwnych ładunkach i ma tę samą naturę co wiązania chemiczne.) Czas mierzony włosem sprężystym ma więc ten sam rytm co czas zegarka elektrycznego i czas procesów biologicznych.

Właściwy pomiar czasu nie jest obojętny dla obrazu świata, w którym żyjemy. Szerokość geograficzną wyznacza wysokość Gwiazdy Polarnej nad horyzontem. Aby wyznaczyć szerokość geograficzną wystarczy zmierzyć kąt. Aby zmierzyć długość geograficzną trzeba mieć wzorzec czasu — zegar pokładowy wskazujący czas Greenwich. Fallowanie morza złożone z ruchem wahadła wywołuje chaotyczne zachowanie zegara, a każdy zgubiony kwadrans to 400 km na równiku. Kształty lądów na XVI-wiecznych mapach zdeformowane są „poziomo” podczas gdy „pionowa” współrzędna niektórych kontynentów nie odbiega istotnie od prawdy. Pomiar czasu przekłada się tu na pomiar odległości. W rezultacie obraz świata zależy od właściwego wyboru zegara. Zegar wahadłowy zawodzi. Chronometr Harrisona — udoskonalona wersja mechanizmu balansowego Huyghensa — dał precyzyjny obraz linii brzegowej lądów oraz ekonomiczną i polityczną przewagę tym, którzy umieli go użyć.

Pomiar czasu przekłada się na pomiar odległości we wszechświecie — lata świetlne mierzą dystans do odległych obiektów. Czy „mapa” naszego wszechświata zależy od pomiaru czasu, podobnie jak mapa globu ziemskiego? Czy istnieje zegar adekwatny do kosmologicznej

skali procesów fizycznych? Czy jest nim zegar wahadłowy Huyghensa, chronometr Harrisona, czy może elektryczny zegar kwarcowy?

Uprościmy zegar *elektryczny*. Bierzemy metrowy pręt z równoległymi lusterkami na końcach. Wpuszczamy pomiędzy lusterka pojedynczy foton (krótki impuls światła) który będzie się odbijał pomiędzy nimi. Elektro-magnetyka pracuje w naszym zegarze w dwójaki sposób: 1) równania Maxwella gwarantują stałą prędkość fali świetlnej, 2) siły elektromagnetyczne w sieci krystalicznej pręta ustalają jego długość (sztywność). Odcinek czasu pomiędzy kolejnymi odbiciami fotonu uważamy więc za identyczny i możemy mierzyć upływ czasu zliczając kolejne odbicia. Jeśli zegar spoczywa względem obserwatora, mierzy czas, który w teorii względności nazywamy czasem własnym obserwatora.

Zróbmy to samo w skali kosmologicznej. Zamiast sztywnego pręta bierzemy parę galaktyk, zamieniamy impuls światła na falę grawitacyjną i pozwalamy jej odbijać się między galaktykami. Trudno taki zegar technicznie zrealizować, ale można go pomyśleć nawet we wszechświecie, w którym nie istnieją żadne inne oddziaływania poza grawitacją. Ten podobny z pozoru zegar do poprzedniego opisanego jest w istocie zegarem zupełnie innej natury. W oparciu o grawitację nie można skonstruować ciała sztywnego, a stąd żadnego ustalonego wzorca odległości. Galaktyki budujące „zegar” muszą „spadać” swobodnie w polu ciężkości pozostałych mas. W naszym wszechświecie owo „spadanie” realizuje jednorodna ekspansja, a więc oba końce zegara oddalają się od siebie zgodnie z prawem Hubble’a. Galaktyki oddalają się od siebie, więc droga, jaką musi pokonać fala, wzrasta, czas pomiędzy kolejnymi „tyknięciami” zegara rośnie w porównaniu z czasem wskazywanym przez zegar elektryczny.

Czas mierzony przez taki rozszerzający się zegar kosmologowie nazywają czasem konforemnym. Nazwa pochodzi stąd, że wyrażona przy jego pomocy metryka wszechświata jest konforemna do przestrzeni Minkowskiego. Odwzorowania konforemne to takie odwzorowanie, które zachowuje kąty pomiędzy przecinającymi się krzywymi i powierzchniami. Zachowuje się więc kątową rozwartość stożków

światła, a w konsekwencji utrzymane zostają relacje przyczynowe pomiędzy zdarzeniami w całej czasoprzestrzeni.

Pod wieloma względami czas konforemny η zasługuje na miano „właściwego czasu Wszechświata”. Jego upływ, jak mówiliśmy, mierzony jest przy pomocy czysto grawitacyjnego zegara zgodnego z mechanizmem powodującym ekspansję przestrzeni. Równania ewolucji wszechświata wyrażone w η przyjmują prostą analityczną postać. Fale grawitacyjne i elektromagnetyczne rozchodzące się w ekspandującym wszechświecie zachowują stałą częstość względem czasu konforemnego. Upływ czasu konforemnego jest miarą wymiany informacji pomiędzy odległymi obszarami, a zatem wyznacza skalę procesów termodynamicznych (tempo wzrostu entropii, tempo ustalania się równowagi termodynamicznej.) Analiza każdej kosmologicznej obserwacji w praktyce sprowadza się do ustalenia jej zmienności w czasie konforemnym η .

„Mapa” wszechświata sporządzona w czasie konforemnym wykazuje jednak pewne zaskakujące właściwości. Metryka wszechświata jest konforemna nie w stosunku do całej przestrzeni Minkowskiego lecz do pół-przestrzeni. Czas η w przeszłości jest skończony. Jego wartość równa zero odpowiada osobliwości początkowej — Wielkiemu Wybuchowi. W konforemnej przestrzeni Minkowskiego ta osobliwość wyznacza powierzchnię przestrzenno-podobną. W ten sposób czasoprzestrzeń Minkowskiego zostaje rozcięta na dwie połówki wzdłuż hiperpowierzchni stałego czasu i jedna z tych połówek jest odrzucona. W pozostałej, niekompletnej pół-czasoprzestrzeni mogą istnieć obszary, które nigdy w toku całej historii nie mogły wymienić ani jednego impulsu (światła czy fali grawitacyjnej). Odległości pomiędzy takimi obszarami są większe niż dystans, jaki mogłoby przebyć światło „od początku świata”. Przeszłe stożki światła zdarzeń przyczynowo rozłącznych nie mają części wspólnej (w przeszłości trafiają w osobliwość zanim zdążą się przeciąć).

Można by przypuszczać, że wszechświat, w miarę jak astronomowie posuwają się „w głąb jego historii” (wstecz czasu konforemnego), objawi się nam jako silnie niejednorodny. Jeśli bowiem odległe ob-

szary pozbawione były jakiegokolwiek kontaktu fizycznego ze sobą, nie mogły w żaden sposób „uzgodnić” temperatury, gęstości materii, tempa rozszerzania, składu chemicznego, etc. Każdy z tych obszarów stanowi wszechświat sam dla siebie — pozbawiony kontaktów z otoczeniem. *A priori* mógłby więc być odmienny od pozostałych, wykazywać sobie jedynie właściwe parametry fizyczne.

Nic takiego nie da się jednak zaobserwować. Promieniowanie reliktowe — pozostałość po erach gorących — ma ustaloną temperaturę (ok. 2,7 K) niezależną od kierunku, z którego do nas przychodzi. Obszary przyczynowo rozłączne (mieszczące się na niebie w kącie bryłowym ok. 2 stopni) nie różnią się między sobą temperaturą bardziej niż o kilka milionowych części (10^{-6}) temperatury średniej. Obserwowane niebo jest wspaniale jednorodne (Ziemia jednorodna w tym samym stopniu nie miałaby gór wyższych niż 8 metrów ponad poziom morza!). Jakże mechanizmy ustaliły tak doskonałą jednorodność i jakie siły utrzymują ją w trakcie ewolucji wszechświata, jeśli nie mogą to być mechanizmy działające przyczynowo? Jak uniknąć paradoksu kauzalnego — spowodować by konforemny wiek wszechświata był dłuższy? Żadna z udzielanych dziś odpowiedzi nie wydaje się być przekonująca.