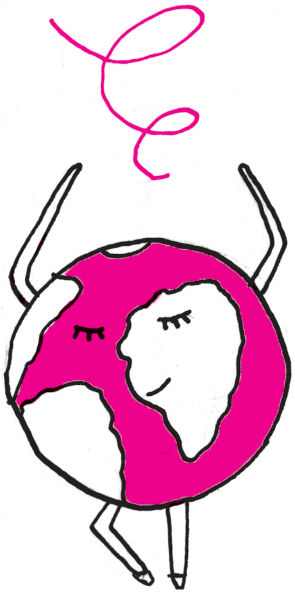
Eksplodujące smartfony i utracony czas absolutny

Jerzy LEWANDOWSKI[*], *Krzysztof TURZYŃSKI*

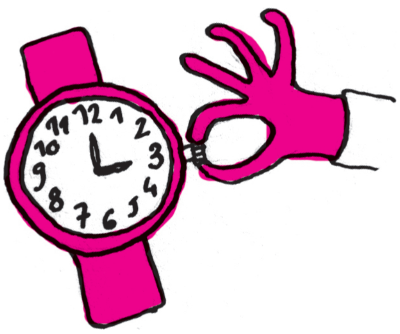
W dawnych powieściach przygodowych, pisanych przed czasami powszechnego zasięgu sieci komórkowych, zanim bohaterowie udali się na spotkanie przygód, musieli zsynchronizować zegarki. Łatwo to zrobić, jeśli wszyscy zainteresowani znajdują się choć przez chwilę w jednym miejscu. Jeżeli nie – sytuacja jest niemal beznadziejna.



Jak to? – zapyta ktoś. Chcąc zsynchronizować wszystkie miejsca na równiku, można przecież poruszać się wzdłuż niego ze stałą prędkością. Jeśli wyruszyło się, powiedzmy, w południe i podróżowało z prędkością 10 km/h, to po godzinie podróży dociera się w miejsce oddalone od punktu początkowego o 10 km. Wiadomo przy tym, że w punkcie początkowym jest wówczas godzina pierwsza po południu, nie ma zatem wątpliwości, jak nastawić zegar u celu podróży. Powtarzając opisane czynności odpowiednią liczbę razy, możemy zapewnić, że wszystkie zegary wzdłuż równika będą wskazywały tę samą godzinę.

Jeśli synchronizację taką wykonać odpowiednio dokładnie, po przebyciu całej długości równika i powrocie do punktu początkowego okaże się, że ostatni ustawiany zegar różni się od zegara będącego dla pozostałych punktem odniesienia o piątą część mikrosekundy. Niby nie jest to dużo, ale taki czas pozwala światłu na przebiegnięcie kilkudziesięciu metrów, prowadząc do niecelnych strzałów z działa laserowego lub niedokładnego określania położenia obiektów. Różnica ta wynika wprost z teorii względności i nie da się jej usunąć nawet największą precyzją i starannością synchronizacji zegarów.

Dlaczego tak jest? Pierwszą przyczyną jest to, że pojęcie zdarzeń jednoczesnych jest w istocie bardziej subtelne, niż podpowiada nam codzienne doświadczenie. Szczególną teorię względności można wyprowadzić (opierając się o wyniki doświadczeń) z postulatu stałości prędkości światła w próżni niezależnie od ruchu źródła światła oraz z zasady względności, czyli wymagania, by prawa fizyki miały tę samą postać we wszystkich układach odniesienia. Wyobraźmy sobie teraz następującą sytuację. Jeden obserwator generuje błysk światła, który porusza się po linii prostej, oczywiście z prędkością światła. Drugi obserwator porusza się względem pierwszego ze stałą prędkością w tę samą stronę co błysk; będąc obserwatorem inercjalnym powinien on widzieć błysk poruszający się z tą samą prędkością co pierwszy obserwator. Jest to możliwe tylko wówczas, gdy porzuci się założenie o absolutności czasu – gdyby bowiem płynął on dla obu obserwatorów tak samo, to obserwator goniący błysk widziałby go w ustalonej chwili bliżej siebie niż pierwszy obserwator, co nie byłoby zgodne z pierwszym postulatem. Oznacza to w szczególności, że relacja jednoczesności zdarzeń (lub następowania po sobie w ustalonym odstępie czasu) dla pierwszego obserwatora może różnić się od analogicznej relacji dla drugiego.



Druga przyczyna trudności w synchronizacji zegarów na ziemskim równiku to ruch obrotowy Ziemi. Relacja jednoczesności zdarzeń względem różnych obserwatorów nie jest przechodnia: jeśli jeden obserwator uznaje zdarzenia A i B za jednoczesne, a drugi uważa, że jednoczesne są zdarzenia B i C, to zdarzenia A i C nie muszą być jednoczesne dla żadnego z tych obserwatorów (i na ogół nie są). Tymczasem każdy z punktów równika porusza się ruchem jednostajnym po okręgu; prędkości różnych punktów mają tę samą wartość, ale różne kierunki i zwroty, a więc punkty te poruszają się względem siebie ruchem różnym od jednostajnego i prostoliniowego. Nic dziwnego, że jeśli w punktach tych umieścimy mierzących czas obserwatorów, to nie da się określić pary zdarzeń zachodzących jednocześnie dla nich wszystkich (wyłączając trywialny przykład zdarzeń zachodzących w tym samym miejscu) lub zachodzących w ustalonym odstępie czasu.

Prędkość dowolnego przedmiotu leżącego na równiku Ziemi nieustannie zmienia swój kierunek i zwrot. Tymczasem zgodnym z doświadczeniem postulatem leżącym u podstaw ogólnej teorii względności jest równoważność skutków sił bezwładności związanych ze zmianami prędkości oraz sił grawitacyjnych. Oznacza to, że siła

[*]Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Rozwiązanie zadania F 894.
Wprowadźmy układ współrzędnych o początku w jednym z wierzchołków podstawy akwarium, na przecięciu poziomej osi x równoległej do L oraz osi y skierowanej pionowo w górę. Środek ciężkości wody przez cały czas ruchu pozostaje w jednakowej odległości od pionowych ścian akwarium równoległych do płaszczyzny xy, a okres badanych drgań nie zależy od szerokości naczynia. Podczas drgań, gdy na bocznej ściance o współrzędnej $x = L$ woda podnosi się na wysokość $y(L) = H + h$, to na ściance $x = 0$ opada do $y(0) = H - h$. Środek ciężkości wody przesuwa się wówczas z położenia równowagi $(x_0, y_0) = (L/2, H/2)$ w położenie:

$$x = \frac{L}{2} + \frac{Lh}{6H}, \qquad y = \frac{H}{2} + \frac{h^2}{6H}.$$

Dla małych drgań przyjmujemy, że $|h| \ll H$ oraz $|h| \ll L$. Wyprowadzając powyższe wyrażenia, skorzystaliśmy z faktu, że dla każdego h rozkład wody w naczyniu możemy otrzymać, dodając do rozkładu równowagowego wodę wypełniającą prostopadłościan o podstawie trójkąta prostokątnego z poziomą przyprostokątną $L/2$ i pionową h – po stronie $h > 0$ i odejmując taki sam prostopadłościan po stronie $h < 0$. Pamiętamy też, że środek ciężkości jednorodnego trójkąta leży na przecięciu środkowych jego boków – dla trójkąta prostokątnego rzuty prostokątne środka ciężkości wypadają w 1/3 odpowiednich przyprostokątnych, licząc od wierzchołka kąta prostego. Kwadrat prędkości ruchu środka masy wynosi więc:

$$v^2 = \left(\frac{L\dot{h}}{6H}\right)^2 + \left(\frac{h\dot{h}}{3H}\right)^2 \approx \left(\frac{L\dot{h}}{6H}\right)^2,$$

gdzie $\dot{h}$ oznacza pochodną h względem czasu. Jako kolejne przybliżenie przyjmijmy, że cała masa M wody porusza się z tą sama prędkością v. Wówczas zmiany całkowitej energii mechanicznej E podczas ruchu możemy zapisać jako:

$$E = \frac{1}{2}M\left(\frac{L}{6H}\right)^2 (\dot{h})^2 + \frac{1}{2}\frac{Mg}{3H}h^2.$$

Wyrażenie to „przypomina" nam wzór na energię drgań masy m zawieszonej na sprężynie o stałej sprężystości k, jeśli przyjmiemy:

$$m = M\left(\frac{L}{6H}\right)^2, \qquad k = \frac{Mg}{3H}.$$

Poszukiwany okres drgań wynosi więc:

$$T = 2\pi\sqrt{\left(\frac{L^2}{12Hg}\right)} = \frac{\pi L}{\sqrt{(3Hg)}}.$$

W akwarium o $L = 1$ m i $H = 0{,}5$ m $T \approx 0{,}82$ s, natomiast, na przykład, dla Jeziora Genewskiego, dla którego można przyjąć $L = 73$ km i średnią głębokość $H = 154{,}4$ m, obliczone $T \approx 57$ minut (obserwowano fale o $h = 0{,}3$ m i $T = 73$ minuty).

przyciągania grawitacyjnego powinna wpływać na tempo biegu czasu. Tak jest istotnie. Na orbicie geostacjonarnej, znajdującej się w odległości około 42 tysięcy kilometrów od środka Ziemi, czas płynie szybciej niż na powierzchni naszej planety: różnica wynosi około 50 mikrosekund na dobę, a spowolnienie biegu czasu przy powierzchni Ziemi bierze się właśnie z silniejszych efektów grawitacyjnych.

Jeszcze dziwniejsze własności oddziaływań grawitacyjnych powinno się obserwować dla obiektów, których masa skupiona jest w bardzo małej objętości – czarnych dziur. Jak bardzo małej? Chodzi o kulę o promieniu proporcjonalnym do masy obiektu; dla Ziemi promień taki wynosiłby nieco poniżej centymetra. Szczególną własnością czarnej dziury jest to, że w pewnej odległości od jej środka czas zwalnia tak bardzo, że… w pewnym sensie przestaje płynąć w ogóle. Odpowiadające temu zjawisku miejsce nazywamy horyzontem czarnej dziury.

Takie „zatrzymanie czasu" niewątpliwie oddziałuje na wyobraźnię, należy jednak bardziej precyzyjnie wyrazić, co ono oznacza. Wyobraźmy sobie misję kosmiczną mającą na celu zbadanie otoczenia czarnej dziury. Jeden z kosmonautów, tyleż bohaterski co niedouczony, postanawia zdobyć sławę pierwszym w historii ludzkości przekroczeniem horyzontu, wykrada więc statek patrolowy z macierzystej rakiety i zmierza wprost ku czarnej dziurze. (Skoro umiemy wyobrazić sobie postęp techniczny pozwalający na misje kosmiczne w skali naszej Galaktyki, możemy posunąć się ciut dalej i przyjąć, że naszego bohatera nie rozerwą potężne siły grawitacyjne w pobliżu czarnej dziury.) Z punktu widzenia pozostających w rakiecie kolegów i koleżanek działanie naszego chwata może wydawać się nieoczywiste – zobaczą, że będzie zbliżał się coraz wolniej i wolniej w stronę horyzontu, a światła jego rakiety będą ciemniały i czerwieniały. Nigdy jednak – według pozostających w rakiecie – nie przekroczy powierzchni horyzontu czarnej dziury. Nawet po powrocie na Ziemię, jeśli tylko będą oni dysponować dostatecznie potężnym radioteleskopem, zobaczą swojego kolegę nieruchomego, gasnącego gdzieś w pobliżu czarnej dziury. Tymczasem nasz bohater po upływie skończonego – według niego – czasu przekroczy horyzont czarnej dziury. I tu czeka go wiele niespodzianek. Po pierwsze, okaże się, że sfera horyzontu zawiera w swym wnętrzu nieskończoną w jednym kierunku przestrzeń. To nieskończony czas, jaki ma do dyspozycji widziana z zewnątrz czarna dziura, zamienia się wewnątrz niej w nieskończoną głębię. Po drugie, kosmonauta szybko zauważy, że jest rozciągany w tym właśnie kierunku, a w pozostałych dwóch ściskany. Dla uniknięcia tragicznego rozwoju akcji, załóżmy, że nasz kosmonauta od początku był nieożywionym, pozbawionym inteligencji i doskonale plastycznym urządzeniem. Wiadomo, że urządzenie to niezależnie od podejmowanych przez siebie działań będzie spadało ku środkowi czarnej dziury. W skończonym czasie nastąpi praktycznie nieskończone rozciągnięcie w jednym kierunku i nieskończone ściśnięcie w dwóch pozostałych. Taki przebieg wydarzeń przewidywany jest w nieobracającej się czarnej dziurze.

Gdy czarna dziura się obraca, jej wnętrze może mieć bardzo złożoną konstrukcję i kosmonauta może uniknąć rozrywających i miażdżących go sił lub nawet przedostać się do innego świata. Jednak i w tym przypadku przekroczyć musi pewien nowego rodzaju horyzont, na którym występują nowe, niezwykłe zjawiska. Aby je lepiej zrozumieć, załóżmy, że kosmonauta ma smartfon z niezasiloną kartą i może odbierać wiadomości przekazywane, tak jak i na Ziemi, za pomocą promieniowania elektromagnetycznego. Raz na kilka dni wysyłana jest na jego numer wiadomość i dzieje się tak w nieskończoność – przynajmniej z punktu widzenia świata, w którym pozostali koledzy i koleżanki kosmonauty. Podczas próby przedostania się z wnętrza czarnej dziury do drugiego świata do smartfonu kosmonauty wszystkie te wiadomości (a będzie ich praktycznie nieskończenie wiele) dotrą w jednej chwili. Takiej ewentualności producenci chyba nie przewidują i można się obawiać, że smartfon eksploduje w kieszeni kosmonauty.

Nie możemy też mieć pewności, czy ułamek sekundy wcześniej nie ujawni się w jakiś sposób kwantowa natura czasoprzestrzeni – ciąg dalszy naszej historii wymyka się teorii względności w jej dzisiejszym kształcie… Jubilatka wciąż bywa bowiem tajemnicza i prowokuje do snucia śmiałych, a niekiedy szalonych myśli. Ale to temat na zupełnie inny artykuł.