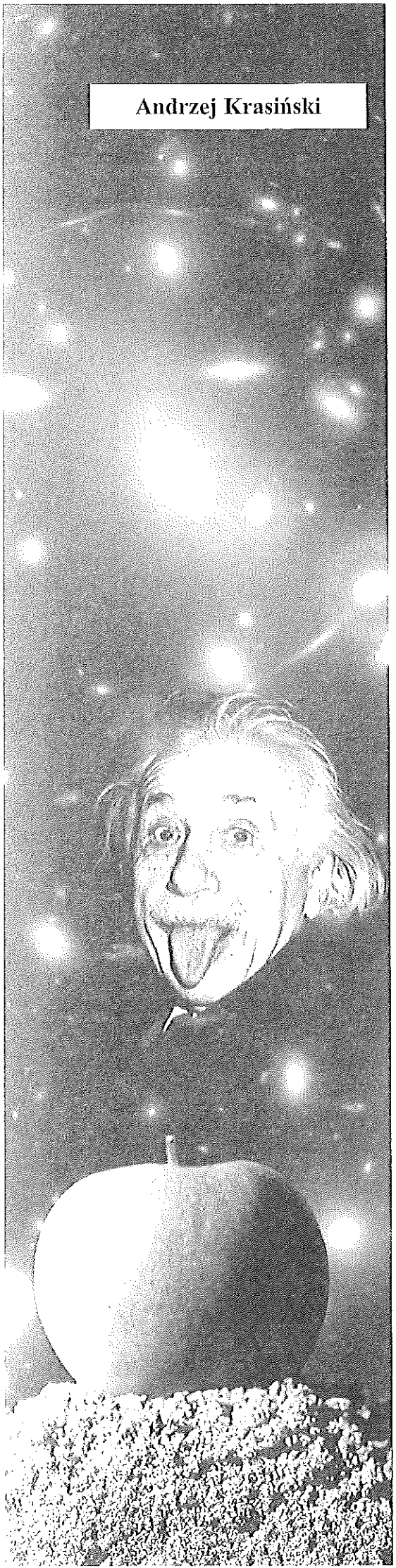


Andrzej Krasiński

Teoria względności — o czym to jest i do czego służy?

O czym to jest?

Pod nazwą „teoria względności" kryją się dwie teorie fizyczne. Starsza z nich, nazywana „szczególną teorią względności", opublikowana przez Einsteina w roku 1905, opisuje zjawiska mechaniczne i elektromagnetyczne zachodzące w układach poruszających się z dużymi prędkościami względem obserwatora. „Duża prędkość" znaczy tu: będąca znacznym ułamkiem prędkości światła. Słowu „znaczny" można nadać wartość liczbową przy opisie każdej konkretnej sytuacji: „znaczna" prędkość to taka, przy której odstępstwa od mechaniki Newtona są możliwe do zmierzenia za pomocą przyrządów, jakie mamy do dyspozycji. Teoria ta przewiduje różne, dobrze dziś znane, ale kiedyś nowe i zaskakujące zjawiska, takie jak:

1. Niezależność prędkości światła w próżni od prędkości obserwatora, który ją mierzy.
2. Niemożność przekroczenia prędkości światła w próżni przez przyspieszanie obiektu: zwiększanie prędkości powoduje wzrost masy, zgodnie ze wzorem

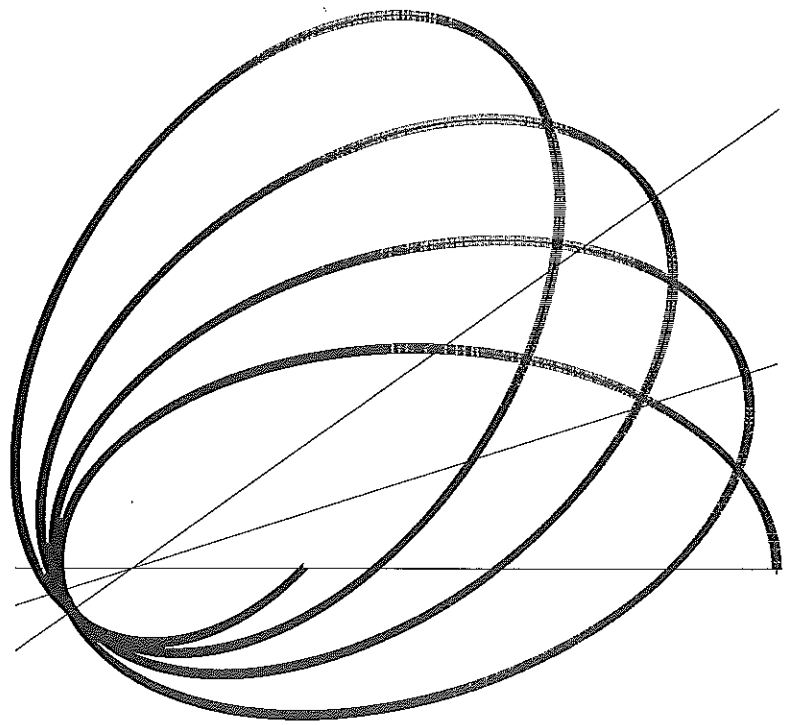
$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}\,.$$

   Przy małych prędkościach v zmiana masy jest niezauważalna i ciała zachowują się zgodnie z mechaniką Newtona. Przy rosnącej prędkości działanie siły przyspieszającej w coraz większym stopniu zwiększa masę, a w coraz mniejszym prędkość. Efekt ten jest obserwowany w akceleratorach cząstek.
3. Względność równoczesności: dwa zdarzenia równoczesne dla jednego obserwatora A, na ogół nie są równoczesne dla obserwatora B, poruszającego się względem A.
4. Niejednakowy upływ czasu w różnych układach: każdy z dwu obserwatorów, poruszających się względem siebie, mierzy spowolniony upływ czasu u tego drugiego. Efekt ten też jest obserwowany. Na powierzchni Ziemi obserwuje się cząstki powstające w górnych warstwach atmosfery w zderzeniach z promieniami kosmicznymi. Niektóre z nich mają tak krótki czas życia, że nie zdążyłyby dolecieć do Ziemi, gdyby nie wspomniany efekt, nazywany „paradoksem bliźniąt".
5. Równoważność masy i energii: energia wydzielona podczas powstawania układów związanych, takich jak jądra atomowe, powoduje, że masa powstałego układu jest mniejsza niż suma mas składników. Defekt masy, m, jest związany z wydzieloną energią, E, wzorem, który jest do znudzenia, choć najczęściej bez zrozumienia powtarzany na okładkach książek i w artykułach prasowych: $E = mc^2$. Ten

efekt obserwuje się na Ziemi w reakcjach między cząstkami elementarnymi, jest on odpowiedzialny za produkcję energii w gwiazdach.

Tą starszą teorią względności nie będziemy się zajmowali w tym artykule. Jest ona dziś uważana za teorię zamkniętą, tzn. zbadaną tak dokładnie, że nie oczekuje się od niej nowych wyników. Jest częścią każdego kompletnego kursu fizyki i można się jej nauczyć w kilka tygodni, pod warunkiem wcześniejszego opanowania mechaniki i podstaw elektrodynamiki.

Przedmiotem naszych rozważań będzie teoria grawitacji, nazywana też ogólną teorią względności. Jest ona rozszerzeniem teorii szczególnej na zjawiska zachodzące w polu grawitacyjnym. W odróżnieniu od poprzedniej, nie jest ona teorią zamkniętą. Bogactwo przewidywanych przez nią zjawisk i skomplikowany, trudny do opanowania aparat matematyczny, sprawiają, że ciągle jeszcze kryją się w niej nierozwiązane zagadki.



Rys. 1. Obserwowany kształt orbity planety. Kąt obrotu peryhelium (18° na obieg) i mimośród orbity (0,8) są znacznie przesadzone. Dla prawdziwych planet orbity są prawie kołowe (mimośród orbity Merkurego wynosi 0,21), zaś największa prędkość obrotu peryhelium (dla Merkurego) wynosi ok. 1,5° na 100 lat, czyli 0,0037° na jeden obieg

Jak powstała ogólna teoria względności

Powstanie szczególnej teorii względności, śledzone po upływie wielu lat za pomocą starych prac, nie wydaje się zaskakujące. Droga prowadząca do niej została zapoczątkowana już w latach 1870. przez J.C. Maxwella. Jego równania pola elektromagnetycznego wyróżniają prędkość światła *c* jako stałą uniwersalną, co sugerowało, wbrew podstawowej zasadzie mechaniki Newtona, że istnieje w przyrodzie wyróżniony układ inercjalny (układ ten próbowano powiązać z hipotetycznym ośrodkiem, który nawet miał nazwę — eter, mimo że nigdy nie został wykryty). Próby zrozumienia tej wyróżnionej roli *c* doprowadziły w końcu, po przeszło 20 latach, do sformułowania szczególnej teorii względności. Istniało na nią wyraźne zapotrzebowanie ze strony fizyki doświadczalnej, zaś Einstein dokonał w tym przypadku podsumowania ciągu prac napisanych przez innych autorów, wśród których trzeba wymienić na pierwszych miejscach Hendrika Lorentza i Henri Poincarégo. Można sobie łatwo wyobrazić, że prędzej czy później ktoś inny sformułowałby tę teorię, nawet gdyby zabrakło Einsteina.

Sytuacja z teorią grawitacji była zupełnie inna. Teoria grawitacji Newtona była zgodna ze wszystkimi testami doświadczalnymi (z wyjątkiem jednego...) i nikt oprócz Einsteina i małej garstki fizyków nie dostrzegał w niej luk. Ogólna teoria względności spowodowała zasadniczą rewolucję w fizyce nie dzięki objaśnieniu zagadkowych faktów, ale dzięki wprowadzeniu zupełnie nowego sposobu myślenia i zastosowaniu nowego (wtedy) działu matematyki. Od tej pory geometria przestrzeni stała się obiektem badań fizyki doświadczalnej i astronomii.

Tą jedyną trudnością, z którą teoria Newtona nie umiała sobie poradzić, były anomalie orbitalne Merkurego. Z równań ruchu Newtona wynika, że gdyby Słońce było dokładnie kuliste i gdyby krążyła wokół niego tylko jedna planeta, to orbita tej planety byłaby elipsą, której ognisko pokrywałoby się ze środkiem Słońca. Ponieważ planet jest więcej, zaburzają one nawzajem swoje orbity. Główna część zaburzenia ujawnia się w ten sposób, że elipsa, po której planeta krąży, obraca się powoli w tym samym kierunku, w którym planeta ją obiega (rys. 1). Prędkość obrotu elipsy jest odwrotnie proporcjonalna do promienia orbity.

Efekt ten został zaobserwowany i zinterpretowany już w pierwszej połowie XIX w. Według dzisiejszych pomiarów prędkość obrotu peryhelium Merkurego wynosi 5599,74 ± 0,41 sekund łuku (ok. 1,5°) na 100 lat. Ale w połowie XIX w. U. J. Leverrier postanowił dokładnie uzgodnić wyniki obserwacji z wynikami teorii. Zsumował on zaburzenia orbity Merkurego wywołane przez inne planety i porównał tę liczbę z zaburzeniem obserwowanym. Różnica była tak duża, że nie dała się wyjaśnić błędami obserwacji — według dzisiejszych pomiarów wynosi ona 43,11 ± 0,45 sekundy łuku na 100 lat.

Ta rozbieżność, opublikowana w roku 1859, stała się główną zagadką astronomii XIX w. Próbowano ją wyjaśnić na różne proste sposoby w ramach mechaniki Newtona, np. obecnością dodatkowej planety w Układzie Słonecznym, działaniem grawitacyjnym materii międzyplanetarnej, spłaszczeniem Słońca spowodowanym siłą odśrodkową ruchu obrotowego. Wszystko zawodziło. Aby wywołać obserwowany efekt, dodatkowa planeta musiałaby krążyć po orbicie

bliższej Słońca niż orbita Merkurego i mieć tak dużą masę, że jej przeoczenie byłoby niemożliwe. Materii międzyplanetarnej musiałoby być tak dużo, że ujawniłaby się o wiele wyraźniej w innych obserwacjach. Odpowiednio duże spłaszczenie Słońca powodowałoby dodatkowy efekt: kołysanie się płaszczyzn orbit planet, czego nie zaobserwowano. (Tu ciekawostka historyczno-edukacyjna: hipoteza o spłaszczeniu Słońca została ogłoszona przez S. Newcomba w roku 1895 i obalona w kilka lat potem. Wrócono do niej pomiędzy rokiem 1965 i 1974, gdy R. Dicke twierdził, że spłaszczenie Słońca powinno wyjaśnić tylko małą część tych 43 sekund — niecałe 4 sekundy — po to, aby prawdziwa okazała się jego teoria grawitacji, tzw. teoria Bransa-Dickego. Tak małe spłaszczenie Słońca nie było sprzeczne ze znanymi wtedy wynikami obserwacji, ale nawet tego nie potwierdziły obserwacje późniejsze. Niestety, nie wszyscy astronomowie byli pilnymi studentami. W latach 1980. ktoś — nazwiska lepiej nie przypominajmy — z całą powagą zaczął głosić hipotezę Newcomba jako swoją własną, w celu „prostszego" objaśnienia ruchu Merkurego i wywołał żywe zainteresowanie. Próby „powrotu do prostoty" przez zastąpienie teorii względności założeniami dodawanymi ad hoc do teorii Newtona pojawiają się od czasu do czasu w literaturze astronomicznej. Bo też niektórzy astronomowie szczerze nie lubią fizyki teoretycznej — krępującej jakoby fantazję przyrodnika).

Wyjaśnienie anomalii orbitalnych Merkurego było pierwszym, zupełnie zresztą niespodziewanym sukcesem teorii grawitacji Einsteina. Wrócimy do niego w dalszym ciągu tekstu. Punkt początkowy rozumowania Einsteina był czysto spekulacyjny i niezwiązany z problemami obserwacyjnymi.

Pierwsze prawo dynamiki Newtona mówi, że w przestrzeni wolnej od wszelkich oddziaływań fizycznych każde ciało poruszałoby się ruchem jednostajnym prostoliniowym. Prawa tego nie da się jednak sprawdzić w skali astronomicznej, bo nie da się uciec z zasięgu pól grawitacyjnych obiektów astronomicznych. Pierwsze prawo dynamiki Newtona jest abstrakcją, niemożliwą do ścisłego zrealizowania. Teoria Newtona radziła sobie z tą trudnością za pomocą II prawa dynamiki: ciała materialne doznają przyspieszeń pod wpływem działających sił. Wskutek obecności pól grawitacyjnych rzeczywiste tory ruchu ciał ulegają zakrzywieniu. W tym wyjaśnieniu kryje się jednak nowa trudność: aby zmierzyć zakrzywienie, musimy mieć wzorzec linii prostej.

Einstein zadał sobie następne pytanie: czy istnieje wzorzec linii prostej możliwy do zastosowania w skali astronomicznej? Jedyna wyobrażalna możliwość była następująca: linią prostą jest przedłużenie osi teleskopu. Jeżeli obserwator patrzący przez teleskop stwierdza, że dalszy obiekt jest ukryty za bliższym, to obiekty te muszą leżeć na jednej prostej z obserwatorem. Przełożona na język fizyki definicja ta mówi: promienie świetlne rozchodzą się po liniach prostych. Czy to fakt, czy tylko fałszywa intuicja?

Aby odpowiedzieć na to pytanie, przeprowadźmy eksperyment myślowy. Przypuśćmy, że dokładne wyznaczenie linii prostej w przestrzeni międzygwiezdnej jest możliwe i że po tej prostej porusza się, ze stałą prędkością v, pewien pojazd załogowy. Przypuśćmy, że przelatuje on w sąsiedztwie gwiazdy o masie M, ale że nie ma w nim okien, przez które można by tę gwiazdę po prostu zobaczyć. Wtedy jedyną możliwość wykrycia gwiazdy daje jej pole grawitacyjne. Niech odległość gwiazdy od prostoliniowego toru pojazdu wynosi d i niech ten najbliższy gwiazdy punkt toru będzie osiągany w chwili $t = t_0$. Wtedy natężenie pola grawitacyjnego, zmierzone we wnętrzu pojazdu w dowolnej chwili t, będzie wynosiło (patrz rys. 2):

$$g = \frac{GM}{d^2 + [v(t - t_0)]^2} \qquad (1)$$

Okazuje się, że to pole grawitacyjne można zasymulować za pomocą odpowiednio dobranych przyspieszeń. Wyobraźmy sobie, że w przestrzeni wolnej od pola grawitacyjnego (taka przestrzeń istnieje *tylko* w naszej wyobraźni) porusza się inny pojazd załogowy. Niech porusza się po linii krzywej ze zmiennym przyspieszeniem równym:

$$\mathbf{a} = -\frac{GM}{d^2 + [v(t - t_0)]^2}\,\frac{\mathbf{r}}{r}, \qquad (2)$$

tzn. wektor przyspieszenia jest skierowany stale *od* tego samego punktu przestrzeni, o współrzędnych $\mathbf{r} = (x, y, z) = (0, 0, 0)$. Tym razem nie ma w sąsiedztwie żadnej gwiazdy, a wielkości M, d i v są stałymi parametrami toru o wymiarach, odpowiednio, masy, odległości i prędkości. (uwaga: tym razem stały parametr v nie jest równy chwilowej prędkości pojazdu, która jest oczywiście zmienna). Siła bezwładności $-m\mathbf{a}$, związana z przyspieszeniem (2), będzie skierowana stale do tego samego punktu przestrzeni (0, 0, 0) i będzie zależała od czasu w ten sam sposób, jak siła grawitacyjna w pierwszym przykładzie (rys. 2). Będzie więc, wzdłuż toru pojazdu, imitowała siłę grawitacyjną i żadne eksperymenty mechaniczne nie wykryją różnicy.

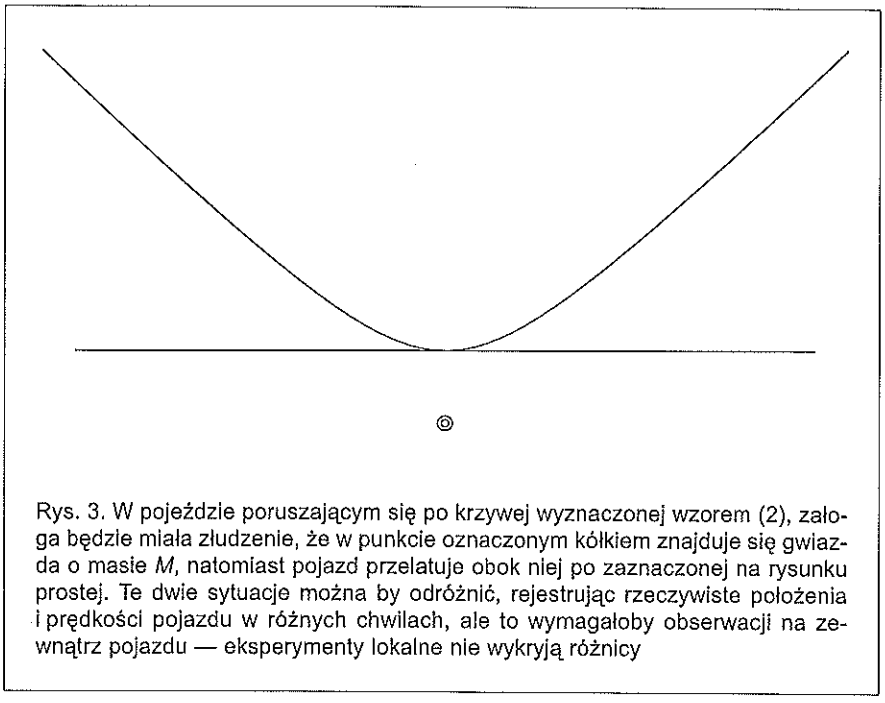
Rys. 2. Natężenie pola grawitacyjnego we wnętrzu pojazdu przelatującego w odległości d od gwiazdy o masie M, ze stałą prędkością v zmienia się z czasem według wzoru (1)

Na ile dokładna jest ta imitacja i czy załoga pojazdu miałaby szansę odróżnić te dwie sytuacje za pomocą eksperymentów optycznych wewnątrz pojazdu? Gdyby promień świetlny był naprawdę wzorcem linii prostej, to w pierwszym przypadku obserwator w pojeździe nie zaobserwowałby odchyleń promieni od prostoliniowego biegu, w drugim — tak. Einsteinowi wydało się jednak nielogiczne, że światło mogłoby rozróżniać sytuacje, które są nieodróżnialne dla zjawisk mechanicznych. Własności mechaniczne ciał są przecież tylko powierzchownym obrazem oddziaływań elektromagnetycznych, które decydują o strukturze i elastyczności materii, zaś światło jest przecież falą elektromagnetyczną. Zatem — światło powinno reagować na pole grawitacyjne tak samo, jak na przyspieszenie obserwatora.

Był to tylko domysł. W tamtym czasie (lata 1905—1915) nie istniały wskazówki obserwacyjne, które by go potwierdzały. Einstein postanowił jednak zdać się na intuicję i wyciągnął z powyższego spostrzeżenia taki wniosek: nie istnieje w przyrodzie wzorzec linii prostej dokładny w skali międzygwiezdnej. Trzeba zbudować taką teorię oddziaływań grawitacyjnych, która nie będzie posługiwała się pojęciem prostej. Co stąd wynika dla geometrii przestrzeni? Jeśli nie istnieją w niej linie proste, to nasza przestrzeń musi być zakrzywiona, zaś to, co nazywamy polem grawitacyjnym, jest obserwowalnym objawem zakrzywienia, a więc efektem geometrycznym. Silne pole grawitacyjne oznacza dużą krzywiznę, słabe pole grawitacyjne — małą krzywiznę, a więc przestrzeń prawie płaską.

W momencie, gdy Einstein wpadł na ten pomysł, istniała już od kilkudziesięciu lat teoria matematyczna, umożliwiająca badanie geometrii zakrzywionych przestrzeni o dowolnej liczbie wymiarów — geometria Riemanna. Nie należała ona jednak do zakresu podstawowego wykształcenia fizyków; Einstein dowiedział się o jej istnieniu drogą prywatnych kontaktów i nauczył się jej samodzielnie — przy asyście kolegi-matematyka, Marcela Grossmana.

Niestety, nie mamy szansy przedstawić tej teorii w krótkim tekście.



Rys. 3. W pojeździe poruszającym się po krzywej wyznaczonej wzorem (2), załoga będzie miała złudzenie, że w punkcie oznaczonym kółkiem znajduje się gwiazda o masie M, natomiast pojazd przelatuje obok niej po zaznaczonej na rysunku prostej. Te dwie sytuacje można by odróżnić, rejestrując rzeczywiste położenia i prędkości pojazdu w różnych chwilach, ale to wymagałoby obserwacji na zewnątrz pojazdu — eksperymenty lokalne nie wykryją różnicy

Podkreślmy tylko z naciskiem, że za każdym twierdzeniem podanym niżej stoi dowód wyprowadzony z podanych wyżej założeń za pomocą poprawnego logicznie i matematycznie rozumowania (fizyki nie tworzy się przy użyciu argumentów retorycznych). Będziemy musieli te wywody pominąć tylko z powodu braku miejsca i dla uniknięcia nadużycia cierpliwości Czytelników, ale są one możliwe do sprawdzenia i zostały wielokrotnie sprawdzone.

Wnioski z teorii względności i ich potwierdzenia obserwacyjne

Podstawą ogólnej teorii względności są równania Einsteina, wiążące własności geometryczne przestrzeni z rozkładem materii. W jaki sposób geometria może być opisana za pomocą równań? Podamy prosty przykład. Jeśli używamy na płaszczyźnie współrzędnych kartezjańskich prostokątnych i na każdej osi używamy tej samej jednostki odległości, to odległość Δs między punktem o współrzędnych (x, y) i pobliskim punktem o współrzędnych $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ wyraża się wzorem

$$(\Delta s)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2, \qquad (3)$$

czyli znanym twierdzeniem Pitagorasa. Jeśli obliczymy odległość dwu bliskich punktów na powierzchni kuli o promieniu a, z których jeden ma współrzędne sferyczne (θ, ϕ), a drugi $(\theta + \Delta\theta, \phi + \Delta\phi)$, to otrzymamy wynik

$$(\Delta s)^2 = a^2[(\Delta\theta)^2 + \sin^2(\theta)(\Delta\phi)^2]. \qquad (4)$$

Jeśli obliczymy odległość dwu bliskich punktów leżących na dowolnej 2-wymiarowej powierzchni, przy czym ich współrzędnymi są (x, y) i $(x + \Delta x, y + \Delta y)$, to wynikiem będzie

$$(\Delta s)^2 = f(x, y)(\Delta x)^2 + 2g(x, y)\Delta x\Delta y + h(x, y)(\Delta y)^2, \qquad (5)$$

gdzie funkcje (f, g, h) są wyznaczone przez równania, opisujące położenie punktów powierzchni w przestrzeni trójwymiarowej. Na przykład dla płaszczyzny (3) są to równania

$$z = \text{const}, \qquad (x, y) \text{ — dowolne},$$

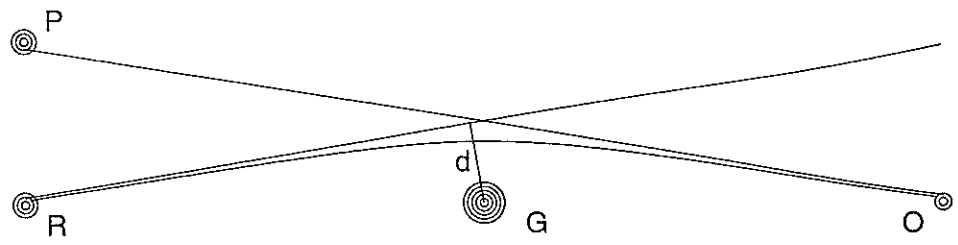
zaś dla kuli (4) są to równania

$$x = a \sin\theta \cos\phi,$$
$$y = a \sin\theta \sin\phi,$$
$$z = a \cos\theta$$

Zespół funkcji (f, g, h), wspólnie z definicją układu współrzędnych, opisuje wszystkie własności geometryczne powierzchni. Dla 4-wymiarowej czasoprzestrzeni używanej w teorii względności funkcji tych jest 10 i one właśnie występują w równaniach Einsteina. (W zastosowaniu do realnych sytuacji fizycznych zakłada się różne uproszczenia i niektóre z tych funkcji są od początku równe zeru albo mają zadane wartości, tak jak w twierdzeniu Pitagorasa, gdzie $f = h = 1$, $g = 0$. Na przykład przy obliczaniu niektó-

rych opisanych dalej efektów zakłada się, że zachodzą one w próżni w otoczeniu masywnego ciała o symetrii kulistej).

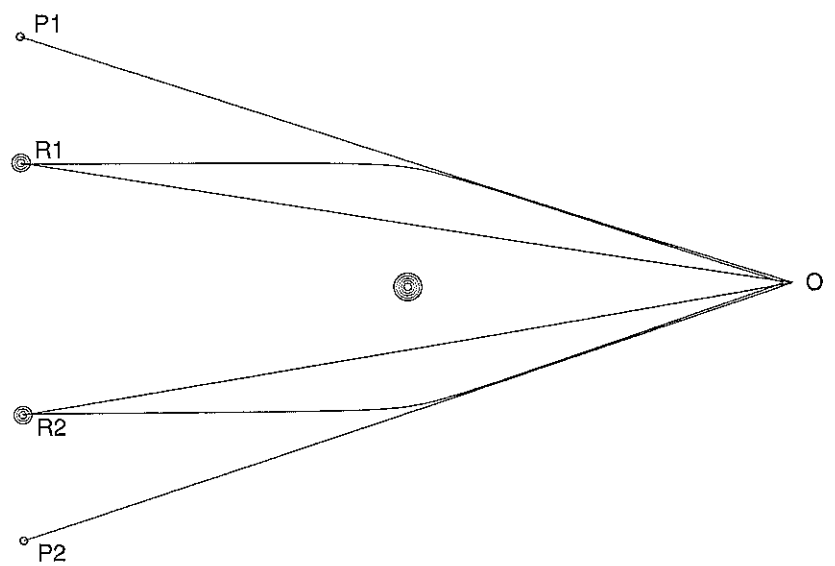
O pierwszym efekcie teorii względności już wspomnieliśmy — został on zmierzony 56 lat przed jej sformułowaniem. Według tej teorii, nawet gdyby Słońce było dokładnie kuliste i miało tylko jedną planetę, jej orbita byłaby nie elipsą, lecz obracającą się elipsą, przy czym prędkość obrotu osi elipsy powinna wynosić 43,03 sekundy łuku na 100 lat — co bardzo dobrze zgadza się ze zmierzoną wartością 43,11 ± 0,45. W latach 1970. odkryto pulsar w układzie podwójnym, PSR 1913 + 16, dla którego ta sama prędkość wynosi 4,2° na rok — 35 000 razy więcej, niż dla Merkurego.



Rys. 4. Promień świetlny, przebiegający w odległości d od środka kulistej gwiazdy G o masie M ugina się o kąt $\Delta\phi = (4GM/c^2)d$. Uwaga: ten wzór jest przybliżony i stosuje się tylko w sytuacji, gdy d jest dużo większe niż tzw. promień grawitacyjny gwiazdy, równy $2GM/c^2$. R — rzeczywiste położenie źródła światła, P — położenie pozorne

Drugim wnioskiem z teorii względności, o którym też była już mowa, jest ugięcie promieni świetlnych w polu grawitacyjnym. Promień świetlny, przebiegający w odległości d od środka kulistej masy M ugina się o kąt (mierzony w radianach) $\Delta\phi = (4GM/c^2)d$ (rys. 4). Dla promienia stycznego do powierzchni Słońca daje to 1,75 sekundy łuku. Aby zmierzyć to ugięcie, trzeba było wyznaczyć pozorne położenia gwiazd na niebie, gdy są one widoczne blisko tarczy słonecznej i porównać je z położeniami na niebie kilka miesięcy później, gdy Słońce jest widoczne w całkiem innym kierunku (rys. 5). W latach 1915—1920 jedyną szansę zaobserwowania i zmierzenia tego efektu dawało całkowite zaćmienie Słońca. Okazja zdarzyła się w roku 1919; obserwacje wykonała ekspedycja Arthura Eddingtona na Wyspach Książęcych w Zatoce Gwinejskiej i w Sobral w Brazylii. Uzyskano tam wyniki 1,61 ± 0,40" i 1,98 ± 0,16". Teoria względności uzyskała w ten sposób drugie potwierdzenie, przy czym, w odróżnieniu od anomalii orbitalnych Merkurego, był to efekt przedtem nie znany.

Dzisiaj pomiar ten wykonuje się metodą prostszą i dokładniejszą. Obserwuje się mianowicie trzy radioźródła, oznaczane symbolami 0111+02, 0116+08 i 0119+11, które leżą w przybliżeniu na jednej prostej. Każdego roku na przełomie marca i kwietnia, przez okres ok. 4 tygodni, Słońce w swojej rocznej wędrówce po niebie zbliża się do środkowego obiektu i na pewien czas zasłania go (rys. 6). Samo Słońce jest bardzo słabym źródłem fal radiowych i nie zakłóca obserwacji. Gdy obraz środkowego radioźródła jest widoczny na niebie w pobliżu tarczy Słońca, jego obserwowane położenie odchyla się od rzeczywistego; położenie rzeczywiste można łatwo obliczyć ze współrzędnych dwu pozostałych obiektów, których obrazy nie są odchylane. Pomiar taki wykonali w latach 1974 i 1975 E. Fomalont i R. Sramek uzyskali wynik 1,761 ± 0,016".



Rys. 5. Gwiazdy znajdujące się w punktach R_1 i R_2 są widoczne w odległości kątowej α_1, gdy Słońce jest daleko od kierunku obserwacji. Gdy Słońce jest widoczne pomiędzy kierunkami OR_1 i OR_2, promienie biegną do obserwatora O po torach zakrzywionych. Obserwator widzi obrazy gwiazd w kierunkach OP_1 i OP_2, stycznych do rzeczywistego toru promienia w punkcie O i tworzących ze sobą kąt α_2

Trzeci test teorii względności wykonano dopiero 46 lat później. Światło, wydobywając się z pola grawitacyjnego obiektu astronomicznego, wykonuje pracę, a więc traci energię. Zgodnie z mechaniką kwantową energia fali elektromagnetycznej jest proporcjonalna do częstotliwości. Dla promienia świetlnego, wznoszącego się w polu grawitacyjnym, powinna więc maleć częstotliwość fali, co obrazowo określa się jako poczerwienienie. W polu jednorodnym impuls promieniowania, który przebył różnicę wysokości h, powinien zmienić swoją częstotliwość o wielkość:

$$\Delta\nu = \frac{gh}{c^2}\nu$$

Pierwsze pomiary wykonali R. Pound i G. Rebka w 1960 r. oraz R. Pound i J. L. Snider w 1965 r. w polu grawitacyjnym Ziemi. Wykorzystany przez nich efekt Mössbauera (rezonansowa emisja/absorpcja promieni gamma przez jądra atomów żelaza ^{57}Fe) za-

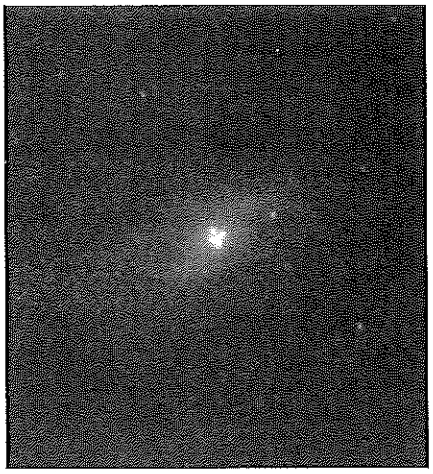
pewnił tak dużą dokładność, że do przeprowadzenia pomiaru wystarczyła wieża uniwersytetu Harvard o wysokości zaledwie 22,6 m. Przewidywany przez teorię wynik $\Delta\nu/\nu = 2{,}46\times10^{-15}$ został potwierdzony z dokładnością 1%.

Czwarty ważny test wykonał po raz pierwszy Irwin Shapiro w 1968 r. Jeśli fala elektromagnetyczna biegnąca od punktu A do punktu B musi po drodze przejść przez pole grawitacyjne, to czas potrzebny na pokonanie tej drogi jest dłuższy niż wtedy, gdy fala biegnie po drodze tej samej długości, ale nie napotyka pola grawitacyjnego. W praktyce pomiar wykonuje się dla sytuacji, gdy źródło i odbiornik fal znajdują się na orbitach wokół Słońca. Ich położenia są w każdej chwili dokładnie znane, prędkość światła w próżni też jest znana, można więc obliczyć, ile czasu powinno upłynąć od momentu emisji sygnału do momentu jego odbioru, gdyby przestrzeń na całej drodze była płaska. Jeśli odległość między źródłem i odbiornikiem wynosi l, odległości źródła i odbiornika od Słońca wynoszą r_1 i r_2 i sygnał porusza się między źródłem i odbiornikiem po linii prostej, to teoria względności przewiduje, że opóźnienie momentu odbioru sygnału wyniesie

$$\Delta t = \frac{2GM}{c^3}\ln\left(\frac{r_1+r_2+l}{r_1+r_2-l}\right)$$

Efekt jest więc największy, gdy źródło i odbiornik znajdują się po przeciwnych stronach Słońca, a droga sygnału przebiega w pobliżu powierzchni Słońca; wtedy $(r_1 + r_2 - l)$ przyjmuje najmniejszą możliwą wartość. Występowanie tego efektu przewidział sam Shapiro w 1964 r. Najwcześniejsze pomiary, wykonane za pomocą sygnałów radarowych odbitych od powierzchni Merkurego i Wenus były mało dokładne. Pierwszy precyzyjny pomiar wykonał zespół J.D. Andersona w roku 1975 za pomocą sztucznych satelitów Słońca Mariner 6 i Mariner 7. Przewidywane maksymalne opóźnienie wynoszące ok. 200 μs zostało potwierdzone z dokładnością 0,1% przez zespół D. Reasenberga i I. Shapiro w 1979 r.

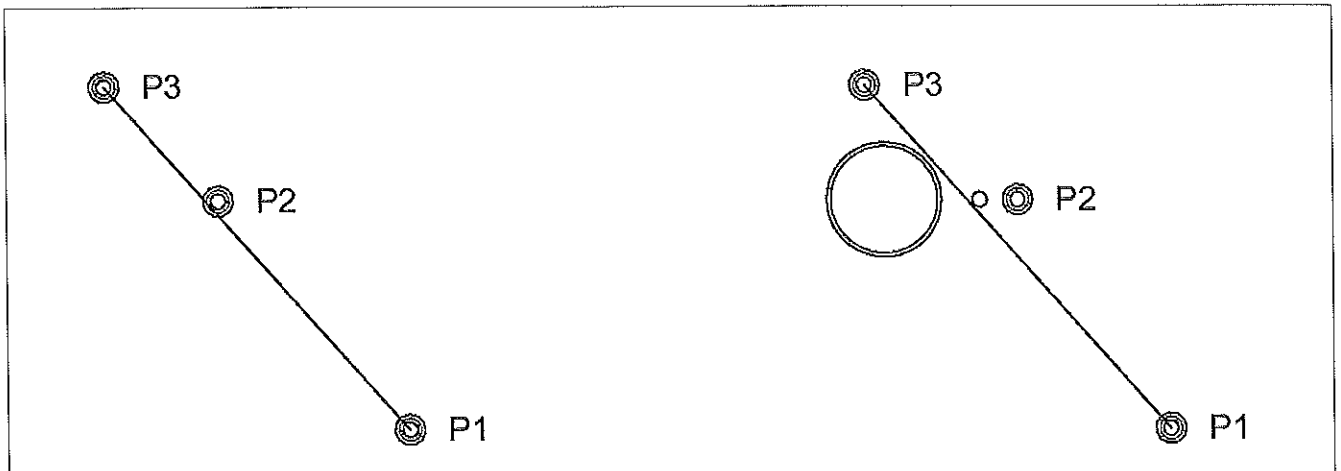
Wszystkie opisane wyżej efekty były wielokrotnie potwierdzone w późniejszych eksperymentach. Dalsze eksperymenty, mające na celu zmierzenie następnych efektów, są w przygotowaniu. Wśród nich należy wymienić trwające od ponad 30 lat przygotowania do umieszczenia na orbicie ziemskiej żyroskopu. Obliczenia wykonane przez L. Schiffa w 1960 r. pokazały, że oś obrotu żyroskopu krążącego po orbicie wokół Ziemi powinna wykonywać precesję o dwu składowych, z których jedna jest skutkiem ruchu po orbicie, druga jest spowodowana ruchem obrotowym Ziemi. Dla orbity o promieniu a przebiegającej nad biegunami Ziemi prędkość pierwszej precesji wynosi ok. 8,1 $(R/a)^{5/2}$ sekund łuku na rok (R — promień Ziemi), prędkość drugiej precesji wynosi 0,05 $(R/a)^3 \sin\phi$ sekund na rok (ϕ — kąt między osiami obrotu Ziemi i żyroskopu). Trudności eksperymentu wynikają z konieczności zapewnienia stałej prędkości wirowania żyroskopu przez przynajmniej szereg miesięcy, co wymaga ochłodzenia całego układu do temperatury ciekłego helu, a następnie bardzo dokładnej izolacji cieplnej, elektrycznej i mechanicznej.



Krzyż Einsteina — obserwacyjny efekt zakrzywienia biegu światła odległego kwazara w polu grawitacyjnym jądra galaktyki

Innym przygotowywanym eksperymentem jest poszukiwanie fal grawitacyjnych, które według teorii Newtona nie istnieją. Tu z kolei trudność polega na wykryciu bardzo słabych oscylacji pola, powodujących zmiany odległości próbnych mas wynoszące $\Delta l/l = 10^{-21}$. Oscylacje te są tak małe, że zakłócają je nawet ruchy termiczne atomów w detektorze. Ich eliminacja znów wymaga ochłodzenia do jak najniższej temperatury i zawieszenia detektora w próżni.

Na tym zakończymy naszą przybliżoną odpowiedź na pytanie „co to jest teoria względności" i przejdziemy do jeszcze krótszej odpowiedzi na drugie pytanie:



Rys. 6. Schemat ilustrujący zasadę pomiaru kąta ugięcia promieni świetlnych (w tym przypadku fal radiowych) za pomocą radioźródeł (proporcje odległości nie odpowiadają rzeczywistym — w szczególności kąt ugięcia promienia jest znacznie przesadzony). Gdy Słońce jest widoczne w pobliżu rzeczywistego położenia radioźródła P_2, jego obraz odchyla się od linii P_1P_3

Do czego to służy?

Nawiązując do tytułów prasowych z roku 1968, można by to pytanie postawić inaczej: komu to służy? Jeszcze 20 lat temu odpowiedź byłaby długa i zawiła, opierałaby się na argumentach typu „nie da się powstrzymać ciekawości badaczy, która często w dalszej perspektywie przynosi korzyści czysto praktyczne". Ta „dalsza perspektywa" właśnie nadeszła i dziś odpowiedź na to pytanie jest cudownie prosta: wojsku! Teoria względności służy (w) wojsku! W roku 1977 uruchomiono, początkowo tylko do celów nawigacji wojskowej, satelitarny system służący do dokładnego określania położeń różnych obiektów na powierzchni Ziemi. System ten, GPS (Global Positioning System[1]), został udostępniony cywilnym użytkownikom w roku 1989 i jest coraz powszechniej stosowany. Każdy z 24 satelitów wysyła impulsy fal elektromagnetycznych, w których zakodowana jest informacja o chwili wysłania sygnału i o położeniu satelity w tejże chwili. Aby odbiornik mógł spełnić swoją funkcję, musi odebrać sygnał od co najmniej czterech satelitów równocześnie. Niech współrzędnymi satelitów 1, 2, 3, 4 w momencie wysłania sygnałów będą (x_i, y_i, z_i), $i = 1, 2, 3, 4$, i niech $t = t_i$ będą odpowiednimi chwilami wysłania sygnałów. Ponieważ sygnały rozchodzą się z prędkością światła c, która jest taka sama dla wszystkich obserwatorów, współrzędne i chwila miejsca odebrania sygnału, (x, y, z, t), muszą spełniać układ 4 równań:

$$c^2 = \frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}{(t-t_i)^2}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \qquad (6)$$

Znane są wszystkie (x_i, y_i, z_i, t_i) i znane jest c, rozwiązując ten układ dostajemy więc położenie i czas odbiornika, (x, y, z, t). Jak widać, GPS ma teorię względności u samej swojej podstawy przez wykorzystanie faktu stałości prędkości światła we wszystkich układach.

Dokładna lokalizacja odbiornika wymaga dokładnej synchronizacji zegarów w satelitach i dokładnej informacji o ich położeniach. Wielkości te są wyliczane przez komputery w satelitach i systematycznie sprawdzane i korygowane przez centralną stację naziemną. Sygnały kontrolne i korygujące też są przesyłane z pomocą fal elektromagnetycznych. Wszystkie te fale i zegary poruszają się w polu grawitacyjnym Ziemi, a teoria względności, jak już wiemy, mówi nam o wpływie pola grawitacyjnego na rozchodzenie się fal elektromagnetycznych oraz, jak jeszcze nie wiemy, na wskazania zegarów.

Okazuje się, że najsilniejszy wpływ na przekazywanie informacji w systemie GPS ma efekt, o którym wcześniej nie wspomnieliśmy: zegar umieszczony w silniejszym polu grawitacyjnym systematycznie opóźnia się względem zegarów umieszczonych w słabszym polu i względem „zegarów idealnych", które byłyby umieszczone w przestrzeni płaskiej. Zegar na powierzchni Ziemi w ciągu każdej sekundy spóźnia się o $4{,}465 \times 10^{-10}$ s względem zegara na orbicie i o $6{,}95 \times 10^{-10}$ s względem zegara idealnego. Zdawałoby się, że to niewiele, ale sygnał świetlny przebiega w czasie $6{,}95 \times 10^{-10}$ s drogę prawie 21 cm. Gdybyśmy zapomnieli o tym efekcie, porównanie wskazań zegara na Ziemi z (obliczonym) wskazaniem zegara idealnego już po 1 s dawałoby błąd położenia równy 21 cm, a błąd ten kumulowałby się z czasem. W ciągu 24 godzin urósłby on do 18 km i przy tak wielkim błędzie system GPS byłby bezużyteczny nawet dla turystów pieszych, a przecież ma służyć do precyzyjnej nawigacji samolotów i rakiet.

Zjawisko	Błąd po 24 godz.
Wpływ na zegary odbiorników	
Pole grawitacyjne Ziemi	18 km
Spłaszczenie Ziemi	9,7 m
Wysokość położenia zegara (np.10 km)	28 m
Ruch obrotowy Ziemi (na równiku)	31 m
Prędkość ruchu zegara (np. 600 km/godz.)	10 m
Synchronizacja na obracającej się Ziemi	do 62 m
Wpływ na zegary w satelitach	
Pole grawitacyjne Ziemi	4,3 km
Prędkość ruchu satelity po orbicie	2,2 km
Wpływ na rozchodzenie się fal elektromagnetycznych	
Wpływ obrotu Ziemi	do 41 m

Załączona tabela z artykułu N. Ashby'ego (*Mercury* 25, nr 3, s. 23 (1966)), zawiera zestawienie błędów, jakie wystąpiłyby w systemie GPS, gdybyśmy na okres 24 godzin zapomnieli o różnych efektach teorii względności. Z tej perspektywy odkrycie teorii względności przez Einsteina nabiera nowego sensu: gdyby Einstein nie wytłumaczył nam w roku 1915, że teoria Newtona wymaga poprawienia, zauważyliby to w roku 1977 oficerowie armii amerykańskiej. (Wątpliwe jest jednak, aby umieli sami zrozumieć, co wymaga zmiany i jakiej. Niektórzy z nich nie chcieli uwierzyć, że teoria Einsteina będzie potrzebna do precyzyjnego sterowania systemem. Przekonały ich o tym dopiero błędy pierwszych pomiarów, zgodnie z wynikami teorii względności). Upewnia nas to ostatecznie, że Einstein odkrył rzeczywiste zjawisko i że nawet bez jego udziału natknęlibyśmy się na skutki tego zjawiska. Pozostaje tylko filozoficzne pytanie: czy lepiej wiedzieć zawczasu, czy dopiero wtedy, gdy życie nas do tego zmusza?

Doc. dr hab. Andrzej Krasiński jest pracownikiem Centrum Astronomicznego im. Mikołaja Kopernika w Warszawie. W swych badaniach zajmuje się teorią względności i kosmologią relatywistyczną.

[1] Jak widać, nazwa GPS oznacza cały system, złożony z 24 satelitów, wielu naziemnych stacji przekaźnikowych i stacji sterująco-kontrolnej w Colorado Springs. W Polsce nazwa ta jest dość bezsensownie używana do oznaczenia pojedynczych przenośnych aparatów lokalizacyjnych. Dla spokoju sumienia odnotowuję mój protest, pewnie bezskuteczny.