



Doświadczenie Michelsona–Morleya (1887) miało stwierdzić obecność ośrodka, w którym rozchodzi się światło, tzn. zmierzyć różnicę w prędkości światła w interferometrze w zależności od ruchu układu doświadczalnego względem eteru.



Jak pamiętamy, szczególna teoria zrównuje w pewnym sensie rolę czasu i przestrzeni, które do tej pory były uważane za niezależne, a ruch ciał odbywał się w euklidesowej (w żargonie fizyków: płaskiej) przestrzeni.

Czy Einstein miał rację?

Michał BEJGER

Odpowiedź na tytułowe pytanie nurtuje do dziś nie tylko profesjonalnych fizyków, ale również amatorskich miłośników nauki, o czym świadczy znacznie większa niż w przypadku innych dziedzin liczba alternatywnych teorii i dyskusji na wykładach popularnych. Historia teorii względności zaczęła się w XIX wieku od problemu niezgodności równań Maxwella z klasyczną mechaniką Newtona. Prawa rządzące elektromagnetyzmem wydawały się zależne od prędkości i położenia badającego je obserwatora. Uważano wówczas także, że fale elektromagnetyczne, podobnie do fal mechanicznych, rozchodzą się w ośrodku (substancji, którą nazwano eterem). Próby wykrycia eteru konsekwentnie dawały jednak paradoksalny wynik: prędkość światła nie zależy od prędkości obserwatora względem hipotetycznego ośrodka.

Przyjęcie tego wyniku jako aksjomatu wraz z założeniem, że prawa fizyki we wszystkich układach poruszających się ze stałą prędkością powinny być identyczne (wymaganie zgodności z teorią Maxwella) były punktem wyjściowym teoretycznych rozważań Alberta Einsteina. Wymagało to jednak fundamentalnej zmiany sposobu porównywania pomiarów z różnych układów odniesienia. Bezpośrednią konsekwencją stałej prędkości światła jest *względność* zdarzeń – ich kolejność może zależeć od położenia i prędkości danego obserwatora. Fizycy musieli zrezygnować z wyobrażenia sobie świata fizycznego jako sceny z absolutnym, niezależnym od przestrzeni czasem, w której różne układy odniesienia zależą od siebie poprzez transformację Galileusza. Musieli za to zaakceptować obraz, w którym czas i przestrzeń są intymnie powiązane (*kolejność* zdarzeń zależy od położenia i prędkości obserwatora, a związek pomiędzy układami odniesienia definiuje transformacja Lorentza, która „miesza” czas i przestrzeń). Jak łatwo się domyślić, zupełnie nieintuicyjna względność świata na tak podstawowym poziomie została na początku XX wieku przyjęta z szokiem i niedowierzaniem.

Wkrótce po ogłoszeniu w 1905 roku szczególnej teorii względności pojawiło się naturalne pytanie o uwzględnienie jej reguł w przypadku wzajemnego oddziaływania masywnych ciał: ruchu z przyśpieszeniem wywołanym grawitacją. Odpowiedź na to pytanie zajęła Einsteinowi kolejne 10 lat. Do swojego odkrycia dochodził stopniowo, publikując w 1907 i 1911 roku prace przedstawiające opis ruchu z przyśpieszeniem ciał w szczególnej teorii względności, i definiując m.in. zasadę równoważności: równości masy *bezwładnej*, występującej w zasadach dynamiki Newtona, i masy *grawitacyjnej* występującej w prawie powszechnego ciężenia Newtona. W listopadzie 1915 roku Einstein przedstawił przed Pruską Akademią Nauk nowy opis grawitacji – zbiór równań nazywany obecnie jego nazwiskiem. W przeciwieństwie do klasycznej mechaniki Newtona, w której masywne ciała działają na siebie *siłą grawitacyjną*, proporcjonalną do iloczynu mas, odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości, opis Einsteina nie wymaga istnienia siły. Jak to możliwe? W tym nowym obrazie zjawiska przypisywane działaniu siły grawitacji, np. spadek swobodny w polu grawitacyjnym czy ruch orbitalny są przejawem ruchu inercjalnego w zakrzywionej *czasoprzestrzeni*.

W ogólnej teorii masywne ciała poruszają się po liniach „najprostszych”, zwanych geodezyjnymi, które niekoniecznie są liniami rzeczywiście prostymi znanymi z geometrii euklidesowej. Wypadkowy ruch „po prostej” wygląda jak wywołany siłą przyciągającą, ponieważ zakrzywienie czasoprzestrzeni jest proporcjonalne do znajdującej się w niej masy. Tę główną zasadę ogólnej teorii względności można, za J. A. Wheelerem, opisać następująco: geometria czasoprzestrzeni dyktuje masom, jak mają się poruszać, podczas gdy masy zakrzywiają geometrię. Otrzymujemy w ten sposób elegancki opis oddziaływania (z czasoprzestrzenią w roli przekaźnika), w którym problematyczne pojęcie działającej natychmiastowo na dowolną odległość siły grawitacyjnej jest po prostu niepotrzebne. Ograniczenie prędkości rozchodzenia się sygnałów skutkuje za to zależną od obserwatora kolejnością następowania zdarzeń. W reżymie dnia codziennego, w którym prędkości są znacznie mniejsze od prędkości światła, opis grawitacji Einsteina sprowadza się do mechaniki Newtona.



Dla porównania, precesja orbity Ziemi wynosi $3,8''$ /stulecie.

Więcej o problemie dwóch i więcej ciał w teoriach grawitacji Newtona i Einsteina pisze Szymon Charzyński na str. 6.

Dużo wcześniej, bo na początku XIX wieku J. G. von Soldner obliczył, jak duży będzie kąt, o który według teorii Newtona światło gwiazdy zmieni kierunek w pobliżu Słońca: $0,9''$. Efekt w ogólnej teorii względności jest dokładnie dwa razy większy.

Rozwiązanie równań Einsteina, które opisuje statyczną, nierotującą czarną dziurę znalazł K. Schwarzschild już w 1916 roku.

Fale grawitacyjne to zmienna w czasie krzywizna czasoprzestrzeni, propagująca się w niej z prędkością światła i unosząca energię oraz pęd układu.



Rozwiązanie zadania M 1479. Załóżmy, że graf ma n wierzchołków, $n \geq 2$. Zauważmy, że stopień każdego wierzchołka może wynosić $0, 1, \dots, n-1$. Gdyby stopnie wszystkich wierzchołków były różne, to w szczególności istniałby wierzchołek o stopniu $n-1$, połączony krawędzią z każdym z pozostałych wierzchołków. Wtedy jednak nie mógłby istnieć wierzchołek o stopniu 0.

Nowa teoria okazała się bardziej skomplikowana matematycznie i, jak to zwykle bywa, była początkowo traktowana z podejrzliwością przez świat naukowy. Było tak do czasu pierwszych spektakularnych weryfikacji, które okazały się zgodne z przewidywaniami teorii. Sam Einstein zaproponował trzy klasyczne testy ogólnej teorii względności: wyjaśnienie ruchu peryhelium Merkurego, zakrzywienie toru światła gwiazd w polu grawitacyjnym Słońca oraz grawitacyjne przesunięcie koloru światła ku czerwieni.

Historia niezgodności precesji orbity Merkurego z obliczeniami mechaniki klasycznej sięga połowy XIX wieku. Na podstawie ówczesnych obserwacji wiadomo było, że punkt peryhelium obraca się względem sfery gwiazd stałych z prędkością 574 sekund łuku na stulecie. Efekt ten jest zdominowany przez klasyczny wpływ grawitacji innych planet ($531''$ /stulecie). Różnica – $43''$ /stulecie – spędzała sen z powiek astronomów XIX i początku XX wieku. Jednym z proponowanych wyjaśnień była np. niesferyczność Słońca (spłaszczenie, czyli niezerowy moment kwadrupolowy Słońca). Dopiero Einstein pokazał, że przewidziane przez teorię zakrzywienie przestrzeni wywołane masą Słońca sprawia, że tor Merkurego przypomina rozetę (orbita nie jest zamknięta), oraz doskonale odpowiada brakującej różnicy.

Kolejny sukces przyniósł pierwszy pomiar ugięcia toru światła odległych gwiazd przez masywny obiekt: Słońce. Przeprowadzone przez Arthura Eddingtona obserwacje pozycji gwiazd podczas całkowitego zaćmienia w 1919 roku potwierdziły przewidywania nowej teorii, a teoria Einsteina trafiła na pierwsze strony gazet. Pomiaru tego typu trapienie były początkowo znacznymi błędami systematycznymi; solidne wyniki zaczęto otrzymywać dopiero w latach 60., obserwując odległe obiekty w widmie radiowym przy użyciu radioteleskopów połączonych w sieć interferometryczną. Zakrzywienie toru światła przez masywne obiekty – soczewkowanie grawitacyjne – jest w dzisiejszych czasach standardowym narzędziem poszukiwania obiektów słabo świecących w różnych skalach, np. planet w układach podwójnych lub ciemnej materii w gromadach galaktyk.

Po paru dekadach, podczas których zajmowanie się relatywistyczną grawitacją było traktowane przez część fizyków (i prawie wszystkich astronomów) jak niegroźne dziwactwo, nastąpiły lata 60., które były tak obfite w sukcesy teorii względności, że nazwano je Złotą Erą Teorii Względności. Pojawiły się m.in. niezwykle ciekawe wyniki teoretyczne, takie jak rozwiązanie równań Einsteina opisujące obracającą się czarną dziurę (R. Kerr, 1963) oraz związane z tym pojęcie osobliwości. Dowiedziano także, że zmieniający się w czasie układ mas może emitować *fale grawitacyjne*.

W roku 1960 przeprowadzono także trzeci klasyczny test teorii. Eksperyment Pounda i Rebki był pomiarem przesunięcia ku czerwieni fotonów poruszających się w polu grawitacyjnym („uciekających” ze studni potencjału). Do zademonstrowania efektu wystarczył 22-metrowej wysokości budynek laboratorium Jeffersona w Uniwersytecie Harvarda. Eksperyment ten jest uważany za początek ery *precyzyjnych* testów ogólnej teorii względności.

Okolice Układu Słonecznego oraz obserwacje Kosmosu w wielkich skalach dostarczają wielu cennych informacji na temat zachowania się grawitacji w przybliżeniu *słabego pola*: małych prędkości i niewielkich krzywizn. Wspomniane wcześniej soczewkowanie grawitacyjne obserwuje się na całym niebie, jako zaburzenia pozycji gwiazd przez masę Słońca, podczas misji astrometrycznych (Hipparcos i Gaia), lub jako wielokrotne obrazy gromad galaktyk na zdjęciach teleskopu Hubble’a. By badać *silne pole* (duże krzywizny i prędkości), potrzebne są obiekty innego rodzaju: małe i masywne.

Ciekawym zbiegiem okoliczności w tym samym 1967 roku, w którym James Hartle zaproponował pierwsze numeryczne rozwiązanie równań Einsteina dla rotujących relatywistycznych gwiazd (perturbację sferycznego rozwiązania Tolmana, Oppenheimera i Volkoffa z 1939 roku), Jocelyn Bell odkryła pierwszy pulsar – zwartą, rotującą gwiazdę neutronową, „makroskopowe jądro atomowe” o masie Słońca, składające się z 10^{57} nukleonów, i dodatkowo obdarzone niezwykle silnym polem magnetycznym. Gwiazdy neutronowe są najbardziej ekstremalnymi, obok czarnych dziur, znanymi obecnie obiektami astrofizycznymi. Niektóre z nich są składnikami ciasnych, relatywistycznych układów podwójnych, w których dwa

Obecnie znamy 10 relatywistycznych układów podwójnych.

Masy składników układu PSR B1913+16 to, odpowiednio, $1,441 M_{\odot}$ oraz $1,387 M_{\odot}$; masy gwiazd w takich układach są najdokładniej mierzonymi masami obiektów astronomicznych.

Ogromna precesja peryastronu PSR J0737-3039, 17° /rok, oraz inne efekty, takie jak *efekt de Sittera* (zmiana kierunku momentu pędu obiektu poruszającego się w zakrzywionej przestrzeni) sprawiły, że jeden z pulsarów jest niewidoczny.

WITAM,
A CZY
MOGĘ POMÓC?



Wartości efektu de Sittera i Lense'a-Thirringa to odpowiednio $-6601 \pm 18,3$ mas/rok (milisekund łuku/rok) oraz $-37,2 \pm 7,2$ mas/rok. Przewidywania teorii to $-6606,1$ i $-39,2$ mas/rok.



masywne obiekty poruszają się bardzo szybko i bardzo blisko siebie. Pulsar, jako precyzyjnie tykający zegar okrążający inną masywną gwiazdę, jest niezwykle cennym (i na razie jedynym tego typu) laboratorium, w którym można testować teorię Einsteina poza przybliżeniem słabego pola. Historycznie pierwszy taki układ, PSR B1913+16, został odkryty w 1974 roku przez Hulse'a i Taylora. Składa się on z pulsara i niewidocznego towarzysza, przypuszczalnie także gwiazdy neutronowej. Okres orbitalny układu to 7 godzin i 45 minut, a pól wielka orbity wynosi nieco ponad 2,5 promienia Słońca! Pole grawitacyjne obu gwiazd jest tak silne, że przewidywane przez teoretyków poprawki do wyników newtonowskich (nazywane poprawkami postnewtonowskimi, a w przypadku elementów orbitalnych układu podwójnego postkeplerowskimi) są widoczne w danych praktycznie gołym okiem. Z powodu emisji przez układ fal grawitacyjnych ($7 \cdot 10^{24}$ W, czyli około 2% całkowitej mocy wyświecanej w falach elektromagnetycznych przez Słońce), okres orbitalny zmniejsza się o 76 μ s na rok, orbita maleje w tym czasie o około 3,5 m, a ruch peryastronu wynosi $4,2^{\circ}$ /rok! Gwiazdy spadną na siebie za około 300 mln lat.

PSR B1913+16 nie jest rekordzistą. Odkryty w 2003 roku PSR J0737-3039 o okresie orbitalnym zaledwie 2,4 h (układ przestanie istnieć za 85 mln lat, ponieważ odległość między gwiazdami zmniejsza się o 7 mm/dzień) jest podwójnie niezwykle – w momencie odkrycia oba składniki były obserwowane jako pulsary. Płazyczna orbity układu znajduje się prawie dokładnie wzdłuż linii widzenia, co pozwala na pomiar *efektu Shapiro*, czyli opóźnienia pulsu jednego pulsara w polu grawitacyjnym drugiego. W sumie obserwacje PSR J0737-3039 pozwalają na pięć niezależnych testów teorii: tempo kurczenia się orbity, ruch peryastronu, poczerwienienie grawitacyjne, dwa parametry efektu Shapiro oraz sprzężenie momentów pędu gwiazd i orbitalnego (sprzężenie spin-orbita). Jak dotąd, ogólna teoria względności zgadza się świetnie z obserwacjami, które są tak dokładne, że największym źródłem błędów są obecnie efekty nierelatywistyczne, np. słabo znany rozkład masy w naszej Galaktyce. Tak dobra zgodność pomiarów z teorią jest uważana za *pośredni*, ale mocny argument przemawiający za istnieniem fal grawitacyjnych, a w szczególności za tym, że prędkość rozchodzenia się fal jest równa prędkości światła.

Postęp w weryfikacji teorii grawitacji w ciągu ostatnich paru dekad jest mocno związany z badaniem gęstej materii. Niedawne znaleziska radioastronomów to dwie masywne ($\approx 2 M_{\odot}$) gwiazdy neutronowe w układach podwójnych z białymi karłami (PSR J1614-2230 i J0348+0432) oraz milisekundowy pulsar w hierarchicznym układzie *potrójnym* PSR J0337+1715, którego dalsze obserwacje pozwolą na przetestowanie silnej zasady równoważności, tzn. zbadania, czy skład obiektu ma wpływ na jego zachowanie się w polu grawitacyjnym: masywny pulsar i orbitujący blisko niego lekki biały karzeł znajdują się w polu przyciągania trzeciego obiektu, również białego karła.

Doświadczalnicy także mają pełne ręce roboty. Parę lat temu misję zakończyła sonda orbitalna Gravity Probe B, która zmierzyła efekt precesji de Sittera oraz drugi, o wiele subtelniejszy *efekt Lense'a-Thirringa*, polegający na zmianie kierunku momentu pędu żyroskopu „wleczonego” wraz z rotacją masywnego ciała (w tym przypadku Ziemi), wokół którego orbituje satelita. Oba wyniki są zgodne z ogólną teorią względności.

Ostatnim poważnym testem, który czeka teorię Einsteina w najbliższej przyszłości, jest bezpośrednia detekcja fal grawitacyjnych. Właśnie rozpoczęła się kampania obserwacyjna dwóch laserowych detektorów interferometrycznych amerykańskiej grupy Advanced LIGO, do których wkrótce dołączy europejska Advanced Virgo. Poprawiona czułość i zasięg detektorów daje pierwszy raz w historii realną szansę na rejestrację fal emitowanych przez odległe kosmiczne katastrofy, takie jak zlewające się układy podwójne gwiazd neutronowych lub czarnych dziur, bądź wybuchy supernowych. Być może już wkrótce będziemy świadkami powstania nowej dziedziny obserwacyjnej – astronomii fal grawitacyjnych.

Ogólna teoria względności nie jest, oczywiście, jedyną teorią grawitacji – przez 100 lat od jej sformułowania powstało wiele alternatyw – jest jednak obecnie najprostszą zgodną z wszystkimi dostępnymi danymi eksperymentalnymi. Czy teoria Einsteina wyjdzie zwycięsko z nadchodzących testów? Obie możliwości są równie ciekawe.