

## Wleczeni w czasoprzestrzeni

Zgodnie z obecnym stanem wiedzy (czyli ogólną teorią względności) otaczająca nas przestrzeń, ale także tempo wpływu czasu zmieniają się zależnie od obecności i ruchu znajdujących się w pobliżu mas. Czasoprzestrzeń rzeczywiście istnieje jako autonomiczny „obiekt”, który marszczy się i wygina (co wiemy z obserwacji fal grawitacyjnych), a także jest „ciągnięta” bądź „wleczone” zgodnie z ruchem obrotowym masywnego ciała.

Ideę, że wirujące masywne ciało wywiera na otoczenie nie tylko statyczną (newtonowską) siłę grawitacji, ale dodatkowo może, podobnie jak wir w wodzie, wlec otaczające je cząstki testowe (w technicznym żargonie – układy inercjalne), sformułował w 1872 roku Ernst Mach. Koncepcja powstała w kontekście pochodzenia zjawiska bezwładności, czyli eksperymentu Izaaka Newtona z rotującym wiadrzem pełnym wody, i jej odkształcającą się powierzchnią. Czy ruch jest w swojej istocie *absolutny*, czy też zawsze jest zdefiniowany *względem czegoś*? Według Macha fakt, że ciało zachowuje stałą prędkość w przestrzeni, jest stwierdzeniem jego oddziaływania z całym Wszechświatem. Rozważania Macha były bezpośrednią inspiracją dla następnych pokoleń fizyków, w tym także Alberta Einsteina. Przed nim, pod koniec XIX wieku, Benedict i Immanuel Friedlaenderowie przeprowadzili (nieudany) eksperyment z rotującym masywnym walcem, badając wpływ rotacji na zawieszony ponad nim wahadło. Natomiast w 1904 roku August Föppl badał zachowanie się masywnego żyroskopu, wirującego z częstotliwością podobną do bębna pralki na najwyższych obrotach (2300 rpm) – źródłem wleczenia była w tym przypadku cała Ziemia. Föppl otrzymał, że efekt jest mniejszy niż 2% prędkości kątowej Ziemi. Z ogólnej teorii względności (formuła (\*)) wiemy, że wymagana dokładność eksperymentalna powinna być lepsza niż  $10^{-9}$  (odpowiadając stosunkowi promienia Schwarzschilda Ziemi,  $2GM_{\oplus}/c^2 \approx 9$  mm, do jej promienia  $R_{\oplus} \approx 6370$  km), co było (i jest) całkowicie poza zasięgiem tego typu naziemnej aparatury.

Sytuacja zmieniła się dzięki Albertowi Einsteinowi, gdy wraz z Michele Besso i Marcelem Grossmannem zaczął uzgadniać mechanikę newtonowską ze szczególną teorią względności. Podczas różnych prób z protoplastami relatywistycznej teorii grawitacji odkryli oni m.in. zjawisko liniowego wleczenia układów inercyjnych wewnątrz liniowo przyspieszonej masywnej skorupy, a także poprawki do przyspieszenia Coriolisa w obracającej się kulistej masywnej skorupie (siłę o wartości połowy poprawnej wartości w ogólnej teorii).

W dzisiejszej literaturze wleczenie układów inercjalnych nosi nazwę efektu Lensego–Thirringa, jednak istotne prace zostały wykonane przez Einsteina. W 1917 roku Hans Thirring podczas swoich badań wpływu rotacji masy w ogólnej teorii względności kluczowe wskazówki dotyczące przyspieszenia Coriolisa zdobył dzięki wymianie listów z Einsteinem. W odległości  $r$  od

obracającego się z częstością  $\omega$  masywnego ciała o promieniu  $R$  i masie  $M$ , dla  $r/R \gg 1$  i prędkości  $\vec{v}$  układu inercjalnego przyspieszenie to ma dodatkową składową

$$(*) \quad \vec{v} \times \left( \vec{\omega} - 3 \frac{(\vec{\omega} \vec{r}) \vec{r}}{r^2} \right) \frac{4MGR^2}{5c^2 r^3}.$$

Opracowanie astronomicznego zastosowania tych wyników zawdzięczamy Josefowi Lensemu.

Na przełomie lat 50. i 60. XX wieku George Pugh i Leonard Schiff niezależnie zaproponowali eksperyment z żyroskopem umieszczonym w satelicie okrążającym Ziemię po orbicie polarnej. Realizacją pomysłu była sonda Gravity Probe B wysłana w 2004 roku – udało się jej zmierzyć dużo większy od efektu Lensego–Thirringa efekt geodetyczny (efekt de Sittera, związany z krzywizną czasoprzestrzeni), natomiast wyniki dotyczące wleczenia czasoprzestrzeni okazały się z przyczyn technicznych za mało dokładne, a przez to niekonkluzywne.

To oczywiście nie zraża astronomów, którzy dalej poszukują w Kosmosie efektu Lensego–Thirringa. Niedawna publikacja międzynarodowego zespołu astrofizyków, m.in. z OzGrav w Australii i Instytutu Radioastronomii Maksa Plancka w Niemczech, dostarcza nowych, ekscytujących dowodów na istnienie tego subtelnego zjawiska. Wyniki zostały zdobyte dzięki wieloletniemu monitorowaniu ewolucji orbity układu podwójnego o nazwie PSR J1141-6545, składającego się z białego karła i pulsara. Układ zmienia się inaczej, niż to przewidują prawa mechaniki Newtona, wykazuje za to wiele klasycznych efektów przewidywanych przez teorię Einsteina. Można to stwierdzić z wielką dokładnością, ponieważ w układzie znajduje się bardzo dokładny zegar, czyli emitująca niezwykle regularne pulsy radiowe gwiazda neutronowa z silnym polem magnetycznym. Właśnie dzięki analizie momentów nadchodzenia pulsów, zbieranych przez wiele lat, można precyzyjnie zbadać niewielkie efekty post-newtonowskie. Zjawiskiem, które świadczy o wleczeniu czasoprzestrzeni wywoływanym przez rotację białego karła jest stopniowa zmiana nachylenia płaszczyzny orbity (precesja) względem kierunku obserwacji. Autorzy argumentują, że dzięki rotacji karła sumują się wpływy newtonowskiego momentu kwadrupolowego i efektu Lensego–Thirringa właśnie. Są obserwowalne, ponieważ biały karzeł rotuje wokół swojej osi wyjątkowo szybko: przed wybuchem towarzyszącej mu gwiazdy, której jądro stało się później pulsarem-gwiazdą neutronową (około milion lat temu), otaczająca ją materia spadała przez pewien czas na białego karła, zwiększając jego tempo rotacji do obecnego okresu mniejszego od 200 sekund.

Michał BEJGER

H. Pfister, 2007, „On the history of the so-called Lense-Thirring effect”, *General Relativity and Gravitation*, 39, 1735.

V. V. Krishnan, M. Bailes, W. van Straten et al. 2020, „Lense-Thirring frame dragging induced by a fast-rotating white dwarf in a binary pulsar system”, *Science*, 367, 577.