

Fale grawitacyjne od Newtona do Einsteina

Michał BEJGER

W listach do teologa Richarda Bentleya Newton pisze, że oddziaływanie ciał bez jakiegokolwiek pośrednictwa jest niedorzecznością, co prowadzi do wniosku, że musi istnieć dodatkowy czynnik przekazujący oddziaływania: „Jest czymś nie do pomyślenia, by prosta materia mogła, bez pośrednictwa czegoś więcej, co jest niematerialne, działać na cokolwiek i wpływać na inną materię bez wzajemnego kontaktu [...] Grawitacja musi być efektem Czynnika działającego stale według pewnych praw, ale czy ten czynnik jest materialny, czy niematerialny, należy już do rozstrzygnięcia przez moich czytelników.” (przekład Janusz Sytnik-Czetwertyński, Kwartalnik Filozoficzny T. XLII, Z. 2, 2014).

W *Teorii dynamiki pola elektromagnetycznego* z 1865 roku Maxwell pisze też o grawitacji: „... w naturalny sposób dochodzimy do pytania, czy przyciąganie grawitacyjne, które podobnie zależy od odległości, nie jest również powiązane z działaniem otaczającego ośrodka”. Czy można więc myśleć o grawitacji jako o efekcie propagacji pola?

Popkulturowa opowieść o **Albercie Einsteinie** i ogólnej teorii względności jest bardzo romantyczna: samotny geniusz rozwiązuje wielką zagadkę swoich czasów. Droga do sformułowania nowoczesnej teorii grawitacji i, w szczególności, przewidywań dotyczących fal grawitacyjnych (obecnie rejestrowanych rutynowo przez laserowe interferometry LIGO i Virgo) jest jednak bardziej skomplikowana... Wymagała pracy wielu pokoleń fizyków i rozwoju innej wielkiej teorii – elektromagnetyzmu.

Zacznijmy jednak od początku. W 1687 roku **Izaak Newton** przedstawił swój przepis na siłę grawitacji, zależną od iloczynu mas i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości, czyli $F = Gm_1m_2/r^2$, gdzie G to stała wartość. Newtonowska siła grawitacji działa *natychmiastowo*, nawet między *bardzo odległymi* obiektami. W wielu zastosowaniach mechaniki takie przybliżenie jest zupełnie wystarczające, szczególnie do niewielkich, wolno poruszających się obiektów. Problemem natomiast okazało się zrozumienie tego, jak siła może w ogóle „działać na odległość”. Temu zagadnieniu poświęcono wiele czasu oraz dyskusji filozoficznych. Pierwsza próba rozwiązania tej zagadki i sformułowania newtonowskiego prawa grawitacji o skończonej prędkości została podjęta przez **Pierre’a Simona Laplace’a** pod koniec XVIII wieku. Pole grawitacyjne jest w tym modelu rodzajem promieniowania lub płynu, w którym rozchodzą się fale, podobnie jak fale na powierzchni wody. Dopasowując swoją teorię do parametrów Układu Słonecznego, Laplace otrzymał ogromną prędkość grawitacji, miliony razy większą od prędkości światła. Samo w sobie nie jest to jeszcze katastrofą; niestety, urządzony w ten sposób Układ Słoneczny jest niestabilny w dłuższej skali czasowej. Ostateczna teoria okazała się niekompatybilna z rzeczywistością.

Takie i podobne rozważania były częścią dynamicznego rozwoju pojęcia *pola*, czyli wypełniającego przestrzeń medium przekazującego oddziaływanie, wymyślonego w celu eliminacji kluczowego problemu „działania na odległość”. Obiekty oddziałują z polem, reagując na jego potencjał ϕ (zmieniając swoją energię potencjalną), a siła działająca między obiektami jest funkcją tego potencjału. W przypadku newtonowskiej grawitacji siła jest gradientem potencjału, co można zapisać jako $F = -\nabla\phi$. Dziś wiemy, że pojęcie pola nie jest wymyślonym medium – możemy je nawet obserwować, np. w zachowaniu się opiłków żelaza w pobliżu magnesu. W przeszłości koncept pól był używany w różnych kontekstach, m.in. dziewiętnastowiecznej teorii hydrodynamiki (siłę wyporności można uważać za gradient „pola” ciśnienia). Pomysły te okazały się bardzo użyteczne – stały się podstawą elektromagnetyzmu **Jamesa Clerka Maxwella**. Traktując elektryczność i magnetyzm jako przejaw obecności pól, Maxwell wykazał, że są one ze sobą ściśle powiązane oraz że oddziaływanie elektromagnetyczne może propagować się jak fala o prędkości światła (to znaczy, istnieją rozwiązania równania falowego typu $\ddot{u} = c^2\nabla^2u$, gdzie dwie kropki oznaczają drugą pochodną czasową). Wniosek narzuca się sam: światło jest falą elektromagnetyczną. Udowodnił to Heinrich Hertz w pracach prowadzonych w latach 1886–1888.

Pomysł rozwinął w 1893 roku **Oliver Heaviside** w grawitacyjnym odpowiedniku równań Maxwella, który nazywa się obecnie *grawitomagnetyzmem*. W tych równaniach energia pola grawitacyjnego zastępuje pole elektryczne. Pole grawitomagnetyczne jest związane z ruchem mas, podobnie jak pole magnetyczne jest związane z ruchem ładunków. Tak zmodyfikowane równania dostarczają np. rozwiązań dla fal poruszających się ze skończoną prędkością. Praca Heaviside’a jest pierwszą „nowoczesną” publikacją dotyczącą fal grawitacyjnych. Heaviside zbadał, jak zmienia się przyciąganie poruszających się ciał, gdy pole grawitacyjne przekazuje oddziaływanie ze skończoną prędkością. Zmiany w polu powodują niewielkie zakłócenia w ruchu Ziemi i Słońca. Niewykrycie takich zaburzeń wyznacza ograniczenie na prędkość grawitacji, która według Heaviside’a może być nawet tak wielka jak prędkość światła.

Do końca XIX wieku podejmowano wiele (nieskutecznych) prób prostego połączenia mechaniki Newtona z elektrodynamiką Maxwella, wprowadzając

dotatkowe ulepszenia modeli stabilizujące ruch planet. Dzięki postępom technik astronomicznych próby te były konfrontowane z nowymi obserwacjami, niezwykle trudnymi do wytłumaczenia w ramach ówczesnych teorii. Chodzi oczywiście o pomiar precesji peryhelium orbity Merkurego, anomalii w ruchu planety stwierdzonej w 1859 roku przez **Urbaina Le Verriera**. Obserwacje Merkurego stały się ostatecznie jednym z klasycznych testów ogólnej teorii względności.

Publikacja szczególnej teorii względności Einsteina w 1905 roku łączy na stałe elektryczność i magnetyzm w jedno pole, w oparciu o dwie zasady: *zasadę względności* oraz *zasadę stałości prędkości światła*. W konsekwencji żadna informacja, również dotycząca grawitacji, nie może podróżować szybciej niż światło, co oczywiście stoi w sprzeczności z mechaniką Newtona. W tym samym czasie, niezależnie od Einsteina, **Henri Poincaré** w pracy *O dynamice elektronu* opisuje praktycznie to samo co szczególna teoria względności, ale bez wyróżnienia zasad względności i stałości prędkości światła. Poincaré opisuje poprawny sposób modyfikacji mechaniki Newtona poprzez zamianę transformacji czasu i przestrzeni Galileusza na transformację czasoprzestrzeni **Hendrika Lorentza**. Zakładając skończoną prędkość grawitacji, ze szczególną uwagą omawia znaczenie opóźnienia (retardacji) pomiędzy zmianą pola grawitacyjnego a skutkiem tej zmiany w innym miejscu, wprost nazywając ten efekt falami grawitacyjnymi (franc. *ondes gravifiques*). W istocie rzeczy opóźnienie jest kluczowym conceptualnym elementem potrzebnym do powstania fal.

W niezwykle pracowitych latach pomiędzy 1907 a 1915 rokiem wielu badaczy podejmowało próby stworzenia nowej teorii grawitacji, wychodząc od różnych, często sprzecznych i błędnych postulatów. Umożliwiało to wyciąganie wniosków z nieudanych prób i ewolucję w kierunku coraz lepszego opisu rzeczywistości. Jako że szczególna teoria względności opisuje ruch układów inercjalnych (w których ciała poruszają się ze stałą prędkością), grawitacja nie może być tak po prostu włączona do szczególnej teorii – potrzebne jest ulepszenie opisu o ruch przyspieszony w polu grawitacyjnym. W 1907 roku Einstein sformułował „najszcześniejszą myśl życia”, czyli *zasadę równoważności*. Głosi ona, że nie jest możliwe lokalne eksperymentalne odróżnienie braku grawitacji od sytuacji, gdy znajdujemy się w układzie spadającym swobodnie w polu grawitacyjnym. Oznacza to też, że swobodnie spadające ciało nie odczuwa działania żadnych sił.

Cztery lata później, w 1911 roku, Einstein wykazał, używając zasady równoważności, że fotony muszą zyskiwać energię, „spadając” w kierunku masy, i tracić energię, oddalając się od niej. Oddalające się fotony są grawitacyjnie „przesuwane ku czerwieni” (częstotliwość ν się zmniejsza, zatem energia $E = h\nu$ maleje), a zegary w różnych odległościach od masy tykają w różnym tempie. Oczywiście nie da się tego pogodzić z pozbawioną grawitacji szczególną teorią względności. Czy zatem prędkość światła zmienia się w polu grawitacyjnym, zależąc w odpowiedni sposób od skalarnego potencjału grawitacyjnego?

Brawurowy, z dzisiejszego punktu widzenia, pomysł skalarnej grawitacji ze zmienną prędkością światła stał się inspiracją dla **Maksa Abrahama**, który w 1912 roku zaproponował własną modyfikację szczególnej teorii względności (nie była ona relatywistyczna ani zgodna z zasadą równoważności, więc została skrytykowana przez Einsteina). Mimo że teoria ta jest błędna, jej ciekawym elementem jest analiza emisji fal. Fale w teorii Abrahama są podłużne – pole oscyluje wzdłuż kierunku rozchodzenia się fali – a nie poprzeczne, jak fale elektromagnetyczne, gdzie drgania są prostopadłe do kierunku propagacji. Można przypuszczać, że jeśli masa przyspiesza, to w sposób analogiczny do fali elektromagnetycznej emitowałaby ona grawitacyjne promieniowanie dipolowe. Abraham stwierdził jednak, że prawo zachowania pędu zabrania przyspieszania masy bez równoczesnego przyspieszania drugiej masy w przeciwnym kierunku (lub innymi słowy, proces jest niemożliwy z powodu nieistnienia ujemnych mas). To poprawna konkluzja, która uniemożliwia istnienie grawitacyjnego promieniowania dipolowego. Konsekwentne podążanie za teorią doprowadziło Abrahama do wniosku, że nadzieje na wykrycie fal grawitacyjnych są nikłe.

Zasada względności: dowolny eksperyment w dowolnym inercjalnym układzie odniesienia obserwatora (bez względu na to, jak szybko poruszają się względem innego obserwatora) daje zawsze ten sam wynik. Zasada stałości prędkości światła w próżni: dla każdego obserwatora mierzona wartość prędkości światła jest taka sama, niezależnie od jego własnej prędkości.

Transformacja współrzędnych, czasu i przestrzeni, z układu O do O' , dla obiektu poruszającego się wzdłuż osi x z prędkością v . Galileusz:

$$\begin{aligned}x' &= x - vt, \\t' &= t.\end{aligned}$$

Lorentz:

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt), \\t' &= \gamma(t - vx/c^2),\end{aligned}$$

gdzie $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$.

W eksperymencie myślowym zwanym „windą Einsteina” opisuje się dwa przypadki: w pierwszym szczelnie zamknięta winda bez okien stoi nieruchomo na powierzchni Ziemi, w drugim porusza się z przyspieszeniem $1g$ w pustej przestrzeni kosmicznej. Obserwator wewnątrz windy nie będzie w stanie stwierdzić, w którym wariancie się znajduje. Zasada równoważności dotyczy też równości masy grawitacyjnej i masy bezwładnej: niezależnie od składu i wewnętrznej struktury wszystkie masy spadają w tym samym tempie w danym polu grawitacyjnym. Jest to bezpośrednie nawiązanie do zasady równoważności sformułowanej na początku XVII wieku przez Galileusza.

Skalar (pole skalarne) to wielkość całkowicie charakteryzowana przez liczbę w danej chwili czasu i punkcie przestrzeni. Elektrodynamika Maxwella jest teorią wektorową, ponieważ pola elektryczne i magnetyczne mają, oprócz wielkości, również kierunek i zwrot. Ogólna teoria względności jest natomiast teorią tensorową, z podstawowymi obiektami algebraicznymi opisującymi pole, będącymi uogólnieniem pojęcia wektora (np. tensor metryczny $g_{\mu\nu}$ w czterowymiarowej czasoprzestrzeni można przedstawić jako symetryczną macierz 4×4).

Innym interesującym wkładem Maksa Abrahama w rozwój teorii jest odkrycie przed Karlem Schwarzschildem „horyzontu zdarzeń”, czyli krytycznego rozmiaru określającego czarną dziurę.

Do naukowego fermentu w tym okresie przyczynił się również **Gustav Mie**, znany z teorii rozpraszania światła na kulistych cząstkach. Jego teoria zachowuje stałą prędkość światła, a wraz z nią zasady szczególnej teorii względności, ale pod wieloma względami jest bardzo podobna do propozycji Abrahama, i również błędna, z powodu nieprzestrzegania zasady równoważności.

Podobnie jak Abraham, Mie przewiduje podłużne fale grawitacyjne, nie wydaje się jednak przejmować faktem, że grawitacyjne promieniowanie dipolowe jest zabronione. Píše za to proroczno o astronomii fal grawitacyjnych: „gdyby kiedykolwiek udowodniono istnienie fal grawitacyjnych, procesy odpowiedzialne za ich powstawanie byłyby prawdopodobnie znacznie ciekawsze niż same fale”.

Równanie pola Nordströma to $R = 24\pi T$, gdzie R to skalar Ricci (śląd tensora Ricciego $R_{\mu\nu}$), a T to śląd tensora energii-napięć $T_{\mu\nu}$. Dla porównania, równanie Einsteina w ogólnej teorii względności to $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$.

W swojej korespondencji z Einsteinem Nordström nazywa metrykę Schwarzschilda rozwiązaniem Droste. Johannes Droste, student holenderskiego fizyka Hendrika Lorentza, odkrył je niezależnie od Schwarzschilda w tym samym czasie. Nordström jest niezależnym współodkrywcą, wraz z Hansem Reissnerem i Hermannem Wylem, metryki Reissnera–Nordströma, jednego z pierwszych rozwiązań równań ogólnej teorii względności. Rozwiązanie to opisuje sferycznie symetryczną, jak u Schwarzschilda, czasoprzestrzeń czarnej dziury, która dodatkowo ma ładunek elektryczny.

Praca doktorska Andrzeja Trautmana, opisująca fale grawitacyjne, była inspirowana współpracą z Jerzym Plebańskim. Promotor Trautmana, Leopold Infeld, był współpracownikiem Einsteina, i tak jak on nie wierzył w istnienie fal grawitacyjnych (jednocześnie wspierał badania swojego studenta!).

Żartobliwa odpowiedź Arthura Eddingtona na pytanie o prędkość fal grawitacyjnych w 1922 roku brzmiała: „fale grawitacyjne rozchodzą się z prędkością myśli”.

Współpracownikiem raczej niż krytykiem Einsteina był natomiast **Gunnar Nordström**, który w latach 1912–1913 stworzył dwie skalarne teorie grawitacji, zgodne z zasadami równoważności i stałości prędkości światła. W drugiej z nich po raz pierwszy pojawia się idea przyrównania geometrii czasoprzestrzeni do wpływającego na geometrię rozkładu materii-energii. Innymi słowy powstała (jeszcze niedoskonała i niekompletna) wersja równań, które obecnie nazwalibyśmy równaniami Einsteina. Teoria Nordströma jest na tyle podobna do ogólnej teorii względności Einsteina, że czasem jest używana w celach ilustracyjnych. Z tego, co wiadomo, Nordström nie badał rozwiązań falowych być może dlatego, że jego teoria okazała się niepoprawna – nie przewiduje ugięcia promieni świetlnych w pobliżu mas i błędnie przewiduje wartość precesji orbity Merkurego – jednak jego równanie pola przewiduje rozwiązanie dla poprzecznych fal grawitacyjnych, tak jak w ogólnej teorii względności.

Publikacja ogólnej teorii względności w 1916 roku nie zawiera wzmianki o falach grawitacyjnych. W liście do **Karla Schwarzschilda** Einstein pisze sceptycznie o możliwości ich istnienia, co nie przeszkadza mu w kilka miesięcy później opublikować artykułu na temat uproszczonych (z zachowaniem tylko pierwszego, liniowego rzędu przybliżenia) równań ogólnej teorii, które wtedy przyjmują formę równania falowego. Praca ta nie jest pozbawiona błędów. Einstein omawia promieniowanie monopolowe (zabronione z powodu prawa zachowania masy-energii, nieobecne również w elektromagnetyzmie) związane ze sferycznie symetrycznym ruchem masy. Opublikowana dwa lata później praca jest już poprawna (dzięki wymianie listów z Nordströmem) i zawiera prawidłowy wzór na promieniowanie grawitacyjne. Einstein nie spekuluje jednak, czy fale mogą zostać kiedykolwiek wykryte.

Przyczyną wcześniejszych oraz wielu późniejszych pomyłek w ogólnej teorii jest kwestia doboru odpowiedniego układu współrzędnych, co jak widać było problematyczne nawet dla jej twórców: w jednym układzie współrzędnych obecność fal jest oczywista, podczas gdy w innym układzie przestrzeni może wydawać się całkowicie niezaburzona i „płaska”. Einstein wrócił do tematu fal w 1936 roku z **Nathanem Rosenem**, analizując pełne (nieuproszczone) równania ogólnej teorii... I po raz drugi wpadł w pułapkę źle dobranego układu współrzędnych – stwierdzając, że teoria jednak nie przewiduje fal grawitacyjnych. Pozostał sceptyczny wobec fal grawitacyjnych aż do śmierci (w 1955 r.).

Dopiero pod koniec lat pięćdziesiątych XX wieku praca *O fizycznym znaczeniu tensora Riemanna* **Feliksa Piraniego**, opublikowana w 1957 roku w „Acta Physica Polonica”, a następnie prace **Hermann Bondiego**, **Ivora Robinsona** oraz **Andrzeja Trautmana** z Uniwersytetu Warszawskiego (Alma Mater *Delty*) ostatecznie udowadniają, że fale grawitacyjne nie są artefaktem wyboru układu współrzędnych, ale procesem przenoszącym energię, a zatem fizycznym zjawiskiem przewidywanym przez ogólną teorię względności.

Z punktu widzenia oddziaływania na materię fale grawitacyjne są zmiennymi w czasie zaburzeniami pływowymi (podobnie jak grawitacja Księżyca deformuje oceany na Ziemi), jednak z podstawowego punktu widzenia są zmianami geometrii czasoprzestrzeni. Efekt wywołany przez falę grawitacyjną docierającą do Ziemi jest niezwykle mały: najsilniejszy dotychczas zarejestrowany sygnał, GW150914, zmienił długość ramion interferometrów LIGO zaledwie o jedną dziesięciotysięczną średnicy jądra atomowego. Fale grawitacyjne rozchodzą się z tą samą prędkością co światło (zgodnie z oczekiwaniami teorii względności). Dowodzi tego niemal jednoczesna obserwacja sygnału fal grawitacyjnych GW170817 i fotonów z układu podwójnego gwiazd neutronowych, oddalonych o 130 miliardów lat świetlnych.