



Jak powstała Ogólna Teoria Względności

Edward Malec
Instytut Fizyki UJ

Listopad 2015 r. to miesiąc szczególnie, jubileuszowy – konstrukcja Ogólnej Teorii Względności (OTW) została zakończona dokładnie 100 lat wcześniej. OTW wyjaśnia teorię grawitacji stworzoną przez Izaaka Newtona w sposób geometryczny, który prowadzi do jej uogólnienia i do przewidywań efektów obcych grawitacji newtonowskiej. Już teraz odkrycie Einsteina jest ważne dla astronomów; ba, wpływa na naszą codzienną rzeczywistość. Wydarzenia ostatnich dni pozwalają oczekiwać na prawdziwy przełom w astronomii, która być może otrzyma nowy (obok fal elektromagnetycznych) nośnik informacji o Wszechświecie – fale grawitacyjne.

Pragnę uprzedzić Czytelnika, że nie powinien liczyć na wygładzony tekst, w którym wyjaśniam i interpretuję myśli i czyny twórcy Ogólnej Teorii Względności, Alberta Einsteina. Przedstawię jedynie krótki szkic najważniejszych wydarzeń, które miały miejsce przed 25 listopada 1915 roku.

Dawid Hilbert, jeden z najwybitniejszych matematyków tamtych lat, za największe osiągnięcie Einsteina uważał zrozumienie roli „potencjałów grawitacyjnych” – wprowadzenie metryki, pojęcia geometrycznego, do opisu pola grawitacyjnego. Jak do tego doszło?

Einstein stworzył Szczególną Teorię Względności w 1905 roku, po czym przez kilka lat zachowywał się tak, jak gdyby nie zauważał niezgodności swojej teorii z grawitacją Newtona. To inni podnosili tę kwestię, modyfikując równanie opisujące potencjał grawitacyjny. Trzeba jednak odnotować jego artykuł przeglądowy z 1907 roku, w którym wyraził pogląd, że swobodnie spadająca winda w stałym polu grawitacyjnym jest równie dobrym układem odniesienia, jak układy inercjalne. Przy tej okazji wyprowadził wzór na tzw. przesunięcie grawitacyjne linii widmowych – zmianę koloru światła pod wpływem grawitacji – sprawdzony empirycznie, dodajmy, dopiero w 1961 roku.

W tymże 1907 roku Hermann Minkowski sformułował Szczególną Teorię Względności w sposób geometryczny. Podobnie jak w geometrii Euklidesa, wprowadził pojęcie odległości między punktami. W czasoprzestrzeni Minkowskiego odległość dwóch punktów może być równa zero, wyrażać się liczbą dodatnią lub ujemną; zatem inaczej niż w geometrii Euklidesa, w której odległość jest nieujemna. Jeśli wybrać dwa bliskie punkty („zdarzenia”), to w geometrii Minkowskiego mamy odległość (tzw. interwał) $ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$ w szczególnie prostym (kartezjańskim) układzie współrzędnych. Dodajmy, że czasy obu zdarzeń różnią się o element dt , a ich współrzędne przestrzenne o dx ,

dy, dz. Możemy też powiedzieć, że metryka tutaj używana jest szczególnie prosta – jedyne różne od zera składowe są równe $-c^2, 1, 1, 1$. Studenci pierwszego roku fizyki dowiadują się, że można wybierać metrykę – powtarzam, narzędzie do wyznaczania odległości – w sposób bardziej skomplikowany. Nawet jako zespół 10 funkcji składających się na tzw. macierz metryki.

Einstein przyjął bez entuzjazmu pracę Hermanna Minkowskiego. Rok akademicki 1911/12 spędził w Pradze, i to wtedy nawiązał do ujęcia metrycznego Minkowskiego, próbując wyprowadzić w jakiś sposób równania grawitacji Newtona. Jiri Bicak, czeski relatywista, poinformował mnie niedawno, że wedle jego wiedzy Einstein dyskutował z jednym z praskich profesorów matematyki, i ten udzielił mu rady: potrzebujesz geometrii różniczkowej i prac Ricciego. Wydaje się, że właśnie w Pradze doszło do największego, zdaniem Hilberta, odkrycia: do zrozumienia roli metryki. Latem 1912 roku Einstein powrócił do Zurichu, by ponownie podjąć pracę profesora na słynnej Politechnice – ETH. Kollros (kolega ze studenckich lat) wspomina słynną scenę, w której Albert Einstein zwraca się do Marcelego Grossmana: „Grossmann, musisz mi pomóc, bo zwariuję!” Grossmann istotnie pomógł. Późną jesienią równania Ogólnej Teorii Względności były prawie kompletne. Strauman, współczesny zurychski relatywista, twierdzi nawet (na podstawie analizy tzw. Notatnika z Zurichu), że w wersji tzw. „zlinearyzowanej” równania były kompletne, ale z niewiadomych powodów autorzy nie dopasowali pełnej teorii do równań zlinearyzowanych.

Einstein narzucił na równania pewne fizyczne warunki – prawa zachowania energii i pędu. Struktura graficzna tych skomplikowanych równań była prosta – po prawej stronie znajdowały się wyrazy odpowiedzialne za materię (tzw. tensor energii i pędu), a po lewej stronie – wyrazy geometryczne, tzw. tensor Ricciego. Okazało się, że narzucenie równań zachowania energii i pędu (czyli na prawą stronę równań Einsteina-Grossmanna) prowadziło do sprzeczności, bowiem nie znikwały wyrazy pochodzenia geometrycznego po lewej stronie. Ten fakt zniechęcił go prawie na trzy lata do pracy nad teorią grawitacji Einsteina-Grossmana.

Latem 1915 roku Einstein (wtedy już profesor w Pruskiej Akademii Nauk w Berlinie) odwiedził Dawida Hilberta w Getyndze, gdzie wygłosił parę wykładów o swojej teorii grawitacji. Zostały one entuzjastycznie przyjęte przez słuchaczy. W trakcie seminariów, które odbyły się 4 i 11 listopada, powrócił do teorii wypracowanej z Grossmanem. 18 listopada przedstawił nowe wyniki, dotyczące ruchu Merkurego oraz ugięcia światła. Na ostatnim seminarium, które odbyło się 25 listopada, zaprezentował poprawne równania, znane odtąd jako równania Einsteina. Są one złożone matematycznie, ale ich sens przybliżyła lapidarny opis Johna Wheelera: „Materia mówi czasoprzestrzeni, jak się ma zakrzywiać. Czasoprzestrzeń mówi materii, jak się ma poruszać”.

Hilbert nie bez powodu uważał zrozumienie roli „potencjałów metrycznych” za kluczowe osiągnięcie. W początkach listopada 1915 roku zabrał się, z pomo-

ca zespołu świetnych matematyków, do rozwiązania problemu relatywistycznej grawitacji. Emmy Noether, matematyczka goszcząca wtedy w Getyndze, pisała do przyjaciela „Wszyscy w Getyndze liczą dla Einsteina. Nikt nic nie rozumie, ale Hilbert ma niebawem wykład. Getyńczycy muszą sprostać zadaniu!”. Wydaje się, że Hilbert napisał równania Einsteina parę dni wcześniej niż sam Einstein. Nie ulega jednak wątpliwości, że były to równania nazywane później równaniami Einsteina.

Ogólna Teoria Względności była wielokrotnie potwierdzana eksperymentalnie. Istnieją tuziny różnych obiektów i zjawisk ogólnorelatywistycznych obserwowanych przez astronomów. Czarne dziury, różne efekty soczewkowania grawitacyjnego i ugięcie światła, gwiazdy neutronowe, ucieczka galaktyk, ciemna energia, promieniowanie grawitacyjne odkryte bezpośrednio całkiem niedawno (a pośrednio ponad 40 lat temu)... Ale jest też urządzenie, z którym zetknęli się pewnie prawie wszyscy Czytelnicy *Fotonu*. GPS, bo o nim mówię, nie działałby poprawnie dłużej niż kwadrans, bez uwzględnienia różnych efektów relatywistycznych.

Więcej informacji na ten temat można znaleźć w następujących źródłach:

- Tilman Sauer, *Marcel Grossmann and his contributions to the general theory of relativity*.
- Abraham Pais, *Pan Bóg jest wyrafinowany...*, tłum. Piotr Amsterdamski, Wydawnictwo: Prószyński i S-ka, Warszawa 2001.
- Norbert Straumann, Einstein's „Zurich Notebook” and his journey to general relativity, *Annalen der Physik*, **523**(6): 488–500, 2011.

Wszystkie cytaty w swobodnym tłumaczeniu autora.