

Teoria względności na Uniwersytecie Warszawskim

Stanisław L. BAŻAŃSKI

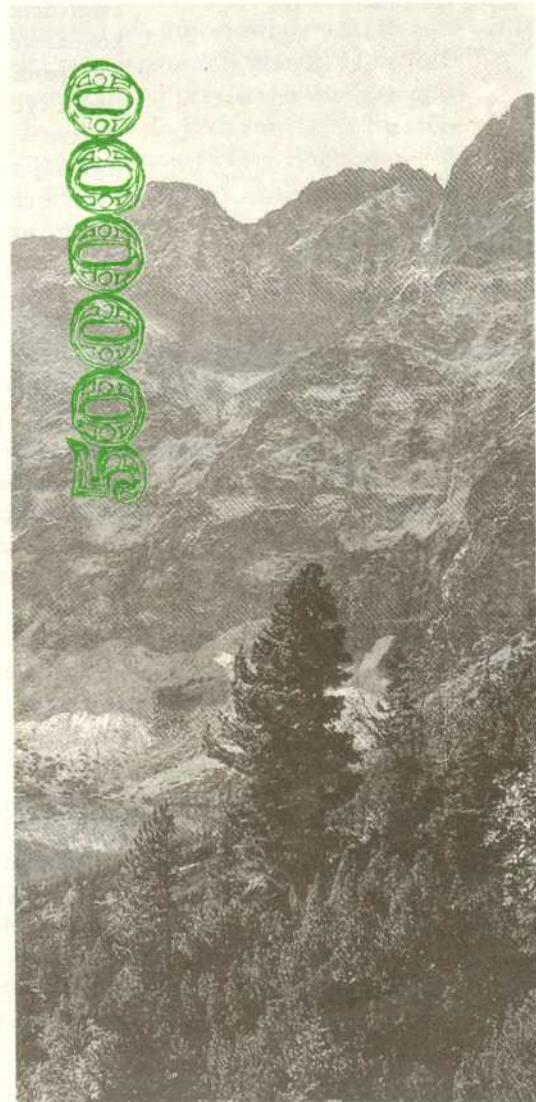
Powojenna historia badań nad teorią względności i pokrewnymi jej dziedzinami fizyki teoretycznej w Warszawie zaczęła się, w zasadzie, w roku 1950 z chwilą powrotu do Polski prof. Leopolda Infelda, wsławionego przez prace nad zagadnieniem ruchu w ogólnej teorii względności, opublikowane wspólnie z Einsteinem. W pierwszym roku po swym powrocie prof. Infeld zorganizował przy ówczesnym Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu Warszawskiego Instytut Fizyki Teoretycznej (IFT), w którym zaczęły się tworzyć grupy badawcze specjalizujące się w podstawowych gałęziach fizyki, w tym także grupa szczególnie interesująca się badaniami samego Infelda. W grupie tej najpierw kontynuowane były prace nad tematyką wniesioną przez prof. Infelda. W miarę upływu czasu i dojrzwania naukowego poszczególnych badaczy tematyka ta ulegała ewolucji i obejmować zaczęła nowe dziedziny, które wyrosły z teorii względności bądź były z nią związane, a często obejmowane są wspólną nazwą klasycznej teorii pola. W dalszej części tego artykułu postaram się przybliżyć Czytelnikowi niektóre z zagadnień, które stanowiły lub stanowią przedmiot badań w tej dziedzinie w IFT. W ciągu czterdziestu lat, jakie upłynęły od chwili założenia Instytutu, zagadnienia te były przedmiotem badań uprawianych przez okazałą liczbę osób, które wniosły liczący się wkład do tej dziedziny nauki, uzyskując przy tym stopnie i tytuły naukowe. Trudno by było wszystkich ich tu wymienić. Samodzielnymi pracownikami naukowymi, zatrudnionymi obecnie w IFT UW i prowadzącymi między innymi badania nad ogólną teorią względności i klasyczną teorią pola, są profesorowie Andrzej Trautman, Jerzy Plebański, Marek Demiański, Wojciech Kopczyński, dr. hab. Jacek Tafel oraz autor niniejszego artykułu.

Ogólna teoria względności jest fizyczną teorią przestrzeni i czasu. Posługuje się ona dość złożonym aparatem matematycznym i uchodzi za teorię trudną. Jej istotę można pokusić się przedstawić bez odwoływania się do zbyt skomplikowanych pojęć, a więc dość niedokładnie, w sposób następujący. Przestrzeń i czas, które stanowią swego rodzaju jedność zwaną czasoprzestrzenią, pod wpływem materii zmieniają swe własności, zmieniają swą geometrię. Geometrią pustej czasoprzestrzeni, bez materii, jest geometria znaleziona w 1907 r. przez H. Minkowskiego. Geometrią zwykłej trójwymiarowej przestrzeni związanej z czasoprzestrzenną geometrią Minkowskiego jest znana ze szkoły geometria Euklidesa. Geometria rzeczywistej czasoprzestrzeni wykazuje pewne odstępstwo od geometrii Minkowskiego, zwane krzywizną czasoprzestrzeni. To odstępstwo, czyli krzywizna czasoprzestrzeni, jest zmienne w czasie i przestrzeni. Teoria pozwala wyznaczyć krzywiznę czasoprzestrzeni w zależności od pewnych własności materii za pomocą równań znalezionych w 1915 r. przez Einsteina. Krótko mówiąc, *materia określa geometrię świata*. Jednak w warunkach spotykanych np. na Ziemi odstępstwo geometrii zwykłej przestrzeni spowodowane krzywizną czasoprzestrzeni jest tak małe, że geodeci z powodzeniem mogą posługiwać się geometrią Euklidesa.

Zatem pojęcia układ inercjalny i promień światła mogą być jedynymi pojęciami czasoprzestrzeni. Cała fizyka w szczególnej teorii względności okazała się geometrią, a cała geometria czasoprzestrzeni – fizyką.

Fakt opisany wyżej nie był znany Einsteinowi. Tym większym podziwem napawają jego dalsze prace, które już bezpośrednio zmierzały do utożsamienia geometrii świata z jego fizyką, a które są znane jako ogólna teoria względności.

Ale to już inna historia.





Rozwiązanie zadania F 312. Niech n oznacza współczynnik załamania płytki. Z prawa relatywistycznego składania prędkości mamy

$$\frac{c/n + v}{1 + \frac{c/n \cdot v}{c^2}} = u,$$

gdzie c/n oznacza prędkość światła w płycie, w układzie płytki. Przekształcając powyższy wzór otrzymujemy:

$$n = \frac{c^2 - u \cdot v}{c(u - v)}.$$



Rozwiązanie zadania F 318. Niech v oznacza prędkość rakiety względem planety. Przejdźmy do układu związanego z powierzchnią planety. Długość fali światła padającego λ_2 możemy obliczyć ze wzoru na relatywistyczny efekt Dopplera.

$$\lambda_2 = \lambda_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}.$$

Przy odbiciu, oczywiście, długość fali nie ulegnie zmianie. Przechodzimy z powrotem do układu odniesienia związanego z rakieta i obliczamy długość fali rejestrowaną w rakiecie:

$$\lambda_1 = \lambda_2 \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} = \lambda_0 \frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}.$$

Przekształcając powyższy wzór i oznaczając $k = \frac{\lambda_1}{\lambda_0}$ otrzymujemy

$$v = \frac{1 - k}{1 + k} \cdot c = \frac{1}{3}c.$$



Rozwiązanie zadania F 314. Energia E wypromieniowana przez Słońce równa się Mc^2 , gdzie M oznacza ubytek masy Słońca. Z drugiej strony, znając powierzchnię Słońca $S = 4\pi R^2$ oraz czas t , przez jaki świeciło, wypromieniowaną energię możemy obliczyć zakładając, że Słońce jest ciałem doskonale czarnym. Stosując prawo Stefana-Boltzsmanna mamy

$$Mc^2 = \sigma T^4 4\pi R^2 t,$$

gdzie $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Stąd

$$k = \frac{M}{m} = \frac{\sigma T^4 4\pi R^2 t}{mc^2}.$$

Podstawiając wielkości liczbowe otrzymujemy $k \approx 150$.

Jednak geometria geodetów to tylko geometria przestrzeni, a nie czasoprzestrzeni. Istnienie krzywizny czasoprzestrzeni, nawet w warunkach spotykanych na Ziemi, przejawia się natomiast poprzez ruch ciał. Z równań Einsteina wynikają równania ruchu ciał, przy czym w zakrzywionej czasoprzestrzeni ciała swobodne nie poruszają się ruchem jednostajnym po liniach prostych. Czyli nie tylko *materia określa geometrię świata*, lecz także *geometria świata dyktuje materii, jak ma się poruszać*. W pewnym sensie jest to intuicyjnie oczywiste; ruchem jednostajnym po linii prostej toczyć się może kulka po gładkiej poziomej powierzchni płaskiej, ale już nie po gładkiej powierzchni pofalowanej. Jednak z przyczyn, których tu nie będziemy rozwijać, analogia ta jest bardzo niedokładna. Natomiast w ogólnej teorii względności nie odwołując się do żadnych intuicji można pokazać, że np. nasza Ziemia tak zmienia geometrię otaczającej ją czasoprzestrzeni, iż ciała swobodne, a więc takie, na które nie działają żadne siły, wypuszczone w pobliżu Ziemi z pewną prędkością, spada na nią po krzywej balistycznej. I podobnie, w czasoprzestrzeni otaczającej Słońce ciała swobodne poruszają się będą po torach planet. Czyli to, co kiedyś Newton uważał za przejaw działania na odległość tajemniczej siły grawitacji, jest po prostu przejawem geometrycznych własności czasoprzestrzeni określonych lokalnie w otoczeniu poruszających się ciał. W ogólnej teorii względności nie ma siły ciężenia, jedynie lokalna geometria czasoprzestrzeni określa taki, a nie inny ruch ciał.

W pierwszym okresie badań nad teorią względności w IFT zajmowano się głównie problemem ruchu ciał. W okresie tym Infeld i jego uczniowie wyświetlili i uprościli cały szereg spraw związanych z tym zagadnieniem. Wyjaśniono do końca ogólną zależność logiczną między równaniami Einsteina, które mówią, jaka jest geometria czasoprzestrzeni w otoczeniu poruszających się ciał, a równaniami ruchu tych ciał. Między innymi, posługując się metodą przybliżeń sformułowaną jeszcze w roku 1938 przez Einsteina, Infelda i Hoffmana, znaleziono poprawki wynikające z teorii względności, tzw. poprawki relatywistyczne, do dynamiki układu ciał oddziałujących grawitacyjnie. Innymi słowy, chociaż ściśle rzecz biorąc, nie ma siły grawitacji, a ruch ciał np. w układzie planetarnym jest przejawem takiej a nie innej geometrii czasoprzestrzeni w otoczeniu tych ciał, to w określonych warunkach i w opisie przybliżonym teoria prowadzi do dynamiki newtonowskiej układu ciał oddziałujących klasycznymi siłami grawitacji, a w dokładniejszych przybliżeniach, siłami uzupełnionymi o odpowiednie poprawki relatywistyczne, potwierdzone przez bardziej dokładne pomiary. Ten okres badań jest w zasadzie od dawna zakończony, a wkład wniesiony do nich przez grupę badaczy w Warszawie został podsumowany w monografii napisanej przez Infelda i Plebańskiego. Wypracowane jednak wtedy metody są dość podstawowe i od czasu do czasu do nich się powraca. Powrotem takim były np. prace przeprowadzone około roku 1974 przez M. Demiańskiego poświęcone ruchowi czarnych dziur.

Z problemem ruchu wiąże się inny, bardzo ważny problem teorii względności – zagadnienie promieniowania grawitacyjnego. Już w roku 1918 Einstein zauważył, badając własności teorii będącej pewnym przybliżeniem jego ogólnej teorii względności, że układ ciał oddziałujących grawitacyjnie, a więc np. układ planetarny lub układ dość blisko siebie położonych gwiazd zachowuje się podobnie jak układ elektronów w antenie nadajnika lub w ciele świecącym. Taki układ promieniuje grawitacyjnie. Promieniowanie to wykazuje pewne podobieństwo do promieniowania elektromagnetycznego, ale istnieją też poważne różnice wynikające z zasadniczej odmienności teorii Maxwella opisującej zjawiska elektromagnetyczne i teorii Einsteina zjawisk grawitacyjnych. Przede wszystkim jednak nie ma do dnia dzisiejszego bezpośredniego doświadczalnego potwierdzenia występowania promieniowania grawitacyjnego w przyrodzie, choć istnieją poważne poszlaki, oparte na wieloletniej obserwacji pulsara podwójnego PSR 1913+16, wskazujące na istnienie tego zjawiska. W okresie kiedy Einstein teoretycznie przewidział występowanie promieniowania grawitacyjnego, nie było jednak rzeczą do końca wyjaśnioną, z powodu pewnych komplikacji

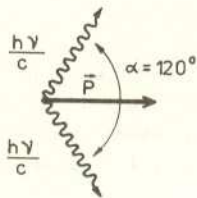


Rozwiązanie zadania F 315.
Stosując zasadę zachowania energii i pędu dla rozpadającej się cząstki mamy

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = 2h\nu,$$

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = 2 \frac{h\nu}{c} \cos \frac{\alpha}{2}.$$

gdzie m_0 , v oznaczają masę i prędkość rozpadającej się cząstki, ν – częstotliwość kwantów γ , α – kąt między nimi.



Dzielimy powyższe równania stronami otrzymujemy:

$$v = c \cos \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2}c.$$



Rozwiązanie zadania F 316.
Najmniejszą sumaryczną energię będą miały cząstki (e^+ , e^- , e^-) lecące w jednym kierunku z tymi samymi prędkościami. Napiszmy zasadę zachowania pędu i energii dla chwil przed i po zderzeniu:

$$\frac{h\nu}{c} = 3p,$$

$$m_0 c^2 + h\nu = 3E,$$

gdzie p , E oznaczają pęd oraz energię jednej z cząstek po zderzeniu, m_0 zaś masę spoczynkową elektronu.

Podstawiając z pierwszego równania energię fotonu $h\nu$ do drugiego otrzymujemy

$$3E = 3pc + m_0 c^2,$$

$$\left(E - \frac{m_0 c^2}{3}\right)^2 = p^2 c^2.$$

Wykorzystując relację między energią i pędem $E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4$ dostaniemy

$$E = \frac{5}{3} m_0 c^2.$$

Stąd $h\nu = 3E - m_0 c^2 = 4m_0 c^2$.

teoretycznych, czy jest ono pewną cechą teorii pojawiającą się wskutek przyjętego schematu opisu, czy też jest zjawiskiem obiektywnym, niezależnym od przyjętego sposobu obserwacji. Było to źródłem kontrowersji, która została rozstrzygnięta dopiero około roku 1960. Dziś wiemy, że teoria przewiduje, iż układ ciał poruszających się stale w ograniczonym obszarze przestrzeni powoduje powstanie na zewnątrz układu zaburzeń krzywizny czasoprzestrzeni, tzn. powoduje zmianę wielkości mierzących lokalne odstępstwo geometrii czasoprzestrzeni od geometrii Minkowskiego. Zaburzenia te rozchodzą się w przestrzeni na zewnątrz układu, oddalając się od niego z prędkością światła, a sam ruch układu zmienia się, przy czym w niektórych sytuacjach ciała tworzące układ zaczynają na siebie spadać. Ta propagacja zaburzeń krzywizny czasoprzestrzeni to właśnie promieniowanie grawitacyjne. Jedną z cech je charakteryzujących jest specyficzna struktura krzywizny w obszarach przestrzeni bardzo dalekich od układu promieniującego. Struktura ta jest opisana w tzw. twierdzeniu o odłupywaniu się krzywizny.

Powyższy obraz teoretyczny promieniowania grawitacyjnego jest ogólnym podsumowaniem wielu prac prowadzonych w licznych ośrodkach na świecie. Dla nas jest rzeczą ważną, że poważny udział w tych pracach miały badania prowadzone swego czasu w IFT Uniwersytetu Warszawskiego. Pierwsze sformułowanie twierdzenia, które z fizycznego punktu widzenia przekazywało treści podobne do twierdzenia o odłupywaniu się krzywizny, choć w jego pierwotnym sformułowaniu pojęcie krzywizny nie występowało, zostało podane w roku 1960 przez A. Trautmana. W IFT w Warszawie znaleziono też cały szereg ścisłych rozwiązań równań Einsteina, które opisywały szczególne przypadki promieniowania grawitacyjnego i nie pozostawiały wątpliwości, że zgodnie z ogólną teorią względności promieniowanie grawitacyjne jest zjawiskiem fizycznym istniejącym niezależnie od przyjętego sposobu opisu teoretycznego. Przede wszystkim zaliczają się do tych rozwiązań niektóre z należących do słynnej klasy rozwiązań znalezionej przez Robinsona i Trautmana, a ponadto niektóre z licznych rozwiązań znalezionych przez M. Demiańskiego i J. Plebańskiego. Stosunkowo niedawno A. Trautman wraz z amerykańskim fizykiem I. Robinsonem ponowili badania nad znaną przez nich w 1962 r. klasą rozwiązań i pokazali, że czasoprzestrzenie z tej klasy są reprezentacjami pewnej nowej geometrii, którą nazwali geometrią optyczną. Obecnie kilku uczniów prof. Trautmana kontynuuje badania nad różnorodnymi właściwościami tej geometrii i jej związkami z ogólną teorią względności.

Istnieje kilka sposobów, które z teoretycznego punktu widzenia nadają się do ewentualnego wykrywania promieniowania grawitacyjnego. Jednym z nich jest obserwacja ruchu bardzo bliskich sobie ciał i występujących między nimi sił przyptywowych. W mechanice ogólnej teorii względności zjawisko to jest opisywane za pomocą tzw. równań dewiacji geodezyjnej. W ostatnich kilku latach badania nad dynamiką związaną z tymi równaniami prowadził w Warszawie S. Bazański, który między innymi znalazł nową, bardziej efektywną metodę rozwiązywania równań dewiacji. Aktualnie w IFT prowadzone są też badania nad teoretycznymi podstawami niektórych optycznych metod detekcji promieniowania grawitacyjnego.

