Robert Janusz

Czy siła grawitacji działa na odległość?

Zagadnienia Filozoficzne w Nauce nr 37, 15-31

2005

Zagadnienia Filozoficzne
w Nauce
XXXVII (2005), 15–31

Robert Janusz
WSF–P „Ignatianum”
Kraków

CZY SIŁA GRAWITACJI DZIAŁA NA ODLEGŁOŚĆ?

Jak wiadomo, Izaak Newton (1642–1727), jeden z największych fizyków w dziejach, jest twórcą mechaniki klasycznej. W ramach tej teorii udało mu się opisać prawo powszechnego ciążenia i rozwiązać niektóre problemy stawiane od stuleci przez obserwatorów nieboskłonu. Newton mógł tego dokonać, posługując się sformułowanym przez siebie rachunkiem różniczkowo–całkowym. Dzieła Newtona, z teorią grawitacji na czele, rozpoczęły tym samym nową epokę w rozwoju fizyki, gdyż właśnie on, jako pierwszy, konsekwentnie określił zasady dynamiki i zastosował nową metodę badania świata, tworząc matematyczne przyrodoznawstwo[1].

W ogólnej kulturze społecznej, która mimo wszystko cechuje się pewnym rozwojem, zagadnienie siły grawitacji „po Newtonie” wydawać się może trywialnie proste. Jako dzieci uczymy się w szkole, że Słońce (tam) przyciąga Ziemię (tu), Ziemia przyciąga Księżyc, ludzi i jabłka, i wydaje się, że nie może być inaczej jak tylko, że siła grawitacji działa „na odległość”. Zatem, z perspektywy newtonowskiej, odpowiedź na tytułowe pytanie wyglądałaby raczej na trywialną, gdyż już dawno temu nasi przodkowie uznali, że grawitacja przenosi się przez pustą przestrzeń, a planety nie potrzebują specjalnych „sfer”, po których mogłyby się toczyć, ani

[1] Pomijamy tu doniosłość badań poprzedników Newtona, którzy — choć dokonali wielu fundamentalnych odkryć — jednak nie stworzyli mechaniki.

„lin”, które by je w ruchu krzywoliniowym utrzymywały. Jednakże, wbrew tej prostocie, w tytule naszego artykułu zawartych jest kilka ważnych pytań, na które będziemy się starać odpowiedzieć: co to znaczy, że grawitacja działa?, co znaczy, że działa na odległość? i czy w ogóle grawitacja jest siłą? Zanim zaczniemy odpowiadać na pytania dotyczące powszechnego ciążenia, skupimy uwagę na pojęciu siły, wprowadzonym do fizyki przez Newtona. Następnie spróbujemy — w ramach jego teorii — sprawdzić, czy rzeczywiście grawitacja nie przejawia, jako siła, jakichś trudności. W końcu zobaczymy, co nowego wprowadził do teorii grawitacji A. Einstein.

1. POJĘCIE SIŁY W MECHANICE KLASYCZNEJ

Mechanika klasyczna Newtona jest teorią ruchu punktów materialnych. Zagadnienie ruchu stanowiło od zarania dziejów jeden z głównych problemów, także filozoficznych. Do czasów Newtona zrozumienie ruchu (zmiany) związane było z potocznymi intuicjami lub pojęciami jakościowymi. Chociaż już przed Newtonem wyrażano odległości przestrzenne i przedziały czasowe w formie liczbowej, to jednak nie umiano trafnie określić, czym jest zmiana położenia w czasie. Dopiero dzięki matematycznemu pojęciu pochodnej funkcji można było wypracować pojęcie zmiany w taki sposób, że wyjaśniło ono dotychczasowe nieścisłości oraz zapoczątkowało samodzielny rozwój zmatematyzowanego pojęcia ruchu. Pochodna opisuje bowiem, co dzieje się lokalnie, w małym otoczeniu poruszającego się punktu — jest styczną do jego toru. Właśnie poprzez pochodną funkcji Newton opisał prędkość (jako zmianę położenia: $v = s'$)[2] i przyspieszenie (jako zmianę prędkości: $a = v' = s''$) punktowego ciała, którego jedyną wewnętrzną charakterystyką fizyczną — wymaganą przez teorię — była masa.

[2]Pochodną względem czasu, na potrzeby naszego artykułu, oznaczamy primem ($'$), pochodną pochodnej — $''$. Pomijamy tu techniczny problem, że położenie, prędkość itd. są wielkościami wektorowymi.

W ten sposób Newton rozpoczął budowę swojej dynamiki, która wyjaśniła ruchy ciał poruszających się pod wpływem działania na nie różnych sił. Jeśli tylko będzie nam znana matematyczna formuła na działającą siłę, to — dzięki zasadom dynamiki — będzie można obliczyć tor ruchu (położenie w czasie) interesującego nas punktu materialnego. Jednak pojęcie siły, jakie występuje w teorii Newtona, ma swoje specyficzne, niespotykane dotychczas, znaczenie.

Newton przejął od Galileusza (1564–1642) zasadę bezwładności, która mówi, co dzieje się z ciałem fizycznym, gdy nie działa na nie żadna siła: ciało takie pozostaje w spoczynku lub porusza się jednostajnie prostoliniowo w układzie inercjalnym[3]. Trzeba było następnie odkryć, co dzieje się w tym układzie z takim ciałem fizycznym, gdy działa na nie jakaś siła[4]. Właśnie druga zasada, odkryta przez Newtona, odpowiada na to pytanie, tłumacząc jednocześnie zasadę bezwładności Galileusza (gdy $F = 0$). W myśl drugiego prawa Newtona, siła działająca na ciało powoduje zmianę jego pędu: $F = p'$, gdzie pęd jest określony jako iloczyn masy i prędkości: $p = mv$. W ten sposób, po dodaniu trzeciej zasady: $akcja = -reakcja$, ogólne zasady dynamiki zostały sformułowane tak, że znając działającą siłę, można rozwiązać układ równań różniczkowych (są to równania zawierające pochodne) opisujący ruch.

Zauważmy, że zasady mechaniki obowiązują jedynie w układach inercjalnych, określonych przez niedziałanie nań żadnej siły; aby wskazać układ inercjalny, musimy wiedzieć, co to jest siła — gdy chcemy ją zmierzyć, potrzebujemy układu inercjalnego. Widzimy zatem, że kłopoty z koncepcją siły, będące jednocześnie kłopotami z koncepcją inercjalnego układu odniesienia (i na od-

[3] W gruncie rzeczy, zasada ta *definiuje* układy inercjalne: są to układy odniesienia, na które nie działa żadna siła. Dzięki określeniu praw ruchu w układach inercjalnych można opisać ruch w układzie, na który działa jakaś znana siła.

[4] Por. R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *Feynmana wykłady z fizyki*, t. I, cz. 1, rozdz. 7, 9.

wrót), będą dotyczyć samych fundamentów mechaniki Newtona. Ponadto, wszystkie pojęcia, zdefiniowane przez Newtona, mają charakter matematyczny, ale tylko przemieszczenia i odstępy czasowe oraz masa są wielkościami bezpośrednio mierzonymi. Czy zatem nasza siła grawitacji jest tylko symbolem matematycznym, czystym pojęciem teoretycznym, czy może jest także jakoś „gdzieś osobno" mierzalna? Czy równanie na drugą zasadę, które ma postać: $(mv)' = F$, czyli (pochodna iloczynu wielkości obserwowalnych) = (formuła matematyczna), mogłoby opisywać równość między „fizyką" a „matematyczną" definicją? Przyjrzyjmy się zatem bliżej Newtonowskiej sile.

2. SIŁA GRAWITACJI W DYNAMICE NEWTONA

Newton odkrył prawo powszechnego ciążenia i sformułował je matematycznie: $g = GmM/r^2$. Odległość pomiędzy punktowymi masami m oraz M oznaczona jest przez r, a G stanowi stałą grawitacyjną. Dzięki tej formule, po wstawieniu siły grawitacji g do drugiej zasady, można rozwiązać zagadnienie ruchu planet, i właśnie tego dokonał Newton.

Rozważmy teraz słuszność punktowej idealizacji przyciągających się mas. Biorąc pod uwagę niewielkie rozmiary planet, w stosunku do odległości od Słońca, można uważać planety jako „punkty" materialne, ale także — dzięki tej samej formule na g — można obliczyć, że ciało jednorodne kuliste zachowuje się tak, pod względem grawitacyjnych oddziaływań, jakby jego masa była skupiona w środku kuli. Zatem daje to jeszcze lepsze przybliżenie punktowych mas oddalonych od siebie o odległość r. Zapytajmy następnie: Jakie jest to, „zdefiniowane" przez Newtona, oddziaływanie — szczególnie jeśli chodzi o promień r? Matematyczna formuła zdaje się sugerować odpowiedź: jest to oddziaływanie „na odległość", które przenosi się przez pustą przestrzeń i dotyczy dowolnych, punktowych mas — jednej „tu", drugiej „tam". Jednak obecność mas w równaniu na g sugerowałaby, że nie jest ono jednak „definicją”, ale wywodzi się z doświadczenia, natomiast trudno to powiedzieć o wykładniku kwadratowym, który mógłby się różnić od „2” o jakąś niewielką wartość i jedynie kwestią matematycznej definicji został przyjęty jako „2”. Powstaje tu dodatkowo jeszcze jeden problem związany ze „wstawieniem” siły grawitacji do równań ruchu: wydaje się to początkowo dość błahe, ale czy masa grawitacyjna m w równaniu na siłę grawitacji g jest tą samą masą m, która występuje w drugiej zasadzie po stronie wielkości obserwowalnych? Jeśli przyjmiemy za Newtonem, że masa grawitacyjna jest proporcjonalna do bezwładnej, to jedyną „wolną” wielkością mierzalną w równaniu na siłę grawitacji pozostanie odległość (pomijając G, która „jest stała” i zależy od jednostek). Cóż to jednak za siła, którą mierzyłaby jedynie geometryczna odległość przestrzenna? Może w innej przestrzeni nie dałoby się jej w ogóle mierzyć?

Kłopoty z siłą w dynamice Newtona, która uchodzi za doskonałą matematycznie teorię, rozpoczynają się dość nieoczekiwanie, gdy pytamy o „fizykę” tej siły. Czy możemy jakoś poznać analityczną postać fizycznych sił; w jaki sposób można poznać „dokładną” postać siły grawitacji? Jak zauważa Feynman [s. 184–186], zachowanie się ciał nie zależy przecież od matematycznej definicji: „Prawdziwą treścią praw Newtona jest to, że siła, poza tym że spełnia zależność $F = ma$, ma jeszcze inne *niezależne cechy*, których jednak nie opisał ani Newton, ani nikt inny i dlatego prawo fizyczne $F = ma$ nie jest pełne”. Druga zasada wyznacza jedynie pewien „dobry program badania przyrody”, który sugeruje, że badając iloczyn masy i przyspieszenia, otrzymamy proste formuły matematyczne, które można nazwać „siłą”. Kolejną złożoną kwestią jest źródło pochodzenia sił. Również to, że siły są związane z punktem materialnym — czy też to, że działają na odległość — nie jest przecież kwestią matematycznej definicji. Dzisiaj wiadomo, że określenie $F = ma$ nie jest ścisłe, a trzecia zasada nie jest absolutna. „Jeśli upieracie się, by dać wam ścisłą definicję siły, pragniecie rzeczy niemożliwej, której nigdy nie otrzymacie”, zauważa Feynman. Problem zaczyna się już np. z określeniem samego przedmiotu oddziaływania, jego masy (np. czy krzesło z kurzem, to jeszcze krzesło, czy już inny przedmiot). Idealizacje i przybliżenia opisu przyrody wchodzą zatem także w pojęcie „siły działającej na ciało”. Tak więc, zdaniem Feynmana, nie można uważać równania $F = ma$ za definicję, która czyniłaby z mechaniki — teorię matematyczną, gdyż „nie można stworzyć matematyki realnego świata [...] musimy sprawdzić, czy nasze aksjomaty pasują do rzeczywistych obiektów w przyrodzie”. Fizyka musi mierzyć.

Spróbujmy się zastanowić, co Feynman ma na myśli, mówiąc o tym, że „nie można stworzyć matematyki realnego świata”? Wydaje się, że Feynmanowi chodzi o to, że konkretna siła F może zależeć od wielu empirycznych czynników, np. charakteryzujących materię. Jednak, czy rzeczywiście fizyka zdaje sprawę z *wszystkich* matematycznych „aksjomatów” przez ich konfrontację z doświadczeniem, przez które matematyka zakotwiczałaby swe odniesienie do rzeczywistości? Ostre wymaganie oznaczałoby, że wszystkie siły, aby je uznać za „rzeczywiste”, powinny być obserwowalne i mierzone. Jednak siła grawitacji Newtona może o sobie dawać znać jedynie przez pomiary mas i pomiary przestrzenne — podkreślamy to wyraźnie — w układzie inercjalnym. Trzeba zatem „mieć” ten układ inercjalny, układ na który nie działa żadna siła. Czy fizyka Newtona potrafi wskazać taki układ, czy potrafi powiedzieć, kiedy na ciało nie działa żadna siła? Musimy przyznać, że idea układu inercjalnego jest matematyczną definicją przemyconą niepostrzeżenie do teorii. Próbą rozwiązania kłopotów z układem inercjalnym było w mechanice klasycznej wprowadzenie tzw. „sił pozornych”, którym poświęcimy teraz nieco uwagi.

3. SIŁY POZORNE

Galileusz zauważył, że w każdym układzie poruszającym się ze stałą prędkością (układ inercjalny), zjawiska fizyczne wyglądają w ten sam sposób[5]. Oznacza to, że pojęcie „spoczynku” nie ma fizycznego znaczenia, nie ma więc spoczynku absolutnego. Zatem, jak zauważa Penrose, nie ma również znaczenia pojęcie „punktu w różnych chwilach”. Nie można bowiem ustalić „który punkt fizycznej, trójwymiarowej przestrzeni Euklidesa w jednej chwili jest tym ’samym’ punktem przestrzeni w innej chwili? [...] Wydaje się, że dla każdej chwili musimy mówić o zupełnie *nowej* przestrzeni euklidesowej!” [s. 190]. Ruch w takim układzie polega na przechodzeniu punktu materialnego, w kolejnych chwilach, od jednej do następnej przestrzeni euklidesowej położeń, a te ze sobą żadnego związku nie mają: nie ma sensu utożsamiać ich punktów ze sobą.

Położenia w różnych chwilach nie są więc mierzone w „jednym naczyniu” przestrzennym. Patrząc zatem z Feynmanem na mierzalną przestrzeń, i konfrontując ją z poglądami Penrose’a, musimy uznać, że pomiar położeń ciała w różnych chwilach dokonuje się w różnych przestrzeniach euklidesowych. Chcąc uzasadniać siłę pomiarami (jak tego chce Feynman), mamy poważny kłopot z samym mierzeniem: nie dysponujemy *jedną* uniwersalną przestrzenią położeń dla dowolnych chwil czasowych. Wynika stąd, że oddziaływanie „na odległość” jest uwikłane w pewien paradoks. Odległość r ma bowiem sens „w tej samej chwili”, ale nikt takich pomiarów nie umie wykonać jednocześnie w dwóch punktach. Zaś dla samej siły, działającej „na odległość” r w tej samej chwili czasu, oznacza to nieskończenie szybkie, niefizyczne (niemierzalne) oddziaływanie. Tak więc względność ruchów jednostajnych w mechanice Newtona — sama w sobie — kwestionuje fizyczne (skończone) oddziaływanie na odległość. Inny kłopot z „oddziaływaniem na odległość” polega na tym, że dla punktów materialnych, które zbliżyć się mogą do siebie dowolnie blisko, postać siły grawitacji może osiągnąć dowolną wielkość, co — oczywiście — nie jest rozwiązaniem fizycznym.

[5] Por. R. Penrose, *Nowy umysł cesarza. O komputerach, umyśle i prawach fizyki*, PWN, Warszawa 1996, s. 189n.

Powróćmy teraz do wspomnianego wyżej założenia, że drugie prawo dynamiki obowiązuje w układzie inercjalnym. Jeśli układ nie jest inercjalny, lecz porusza się z przyspieszeniem względem jakiegoś układu inercjalnego, to w układzie nieinercjalnym możemy zaobserwować „siłę pozorną”, czyli taką siłę, która pochodzi z ruchu przyspieszonego samego układu; np. w wirującym układzie pojawia się siła odśrodkowa. Siły pozorne są zatem zawsze proporcjonalne do masy, bo związane są z wyborem układu ruchomego, bardziej złożonego niż prostoliniowy ruch jednostajny w układzie inercjalnym. Ale siła grawitacji g też jest proporcjonalna do masy ciała. Czyżby zatem grawitacja była siłą pozorną, ale w jakim szczególnym układzie odniesienia? Czy pozwala to na usunięcie kłopotów z układem odniesienia? Otóż nie, gdyż siła pozorna *implicite* zakłada jednak pewien układ inercjalny.

Jak podkreśla Infeld[6], fizyka Newtona ma swój słaby punkt już w punkcie wyjścia: „znamy prawa, ale nie znamy układu, do którego się one odnoszą”, nie potrafimy powiedzieć, „że ’ten albo tamten układ jest układem inercjalnym’. Wiemy, jedynie teoretycznie, co to jest układ inercjalny” [s. 74]. Nie wiemy nic o istnieniu takiego układu, choć umiemy go określić, bo obowiązuje w nim mechanika Newtona. Czasem dobrym jego przybliżeniem jest Ziemia, a czasem coś innego — zależnie od dokładności doświadczenia. Zatem mierzenie sił newtonowskich — czy w układzie inercjalnym, czy nie — ma poważny kłopot: „program badawczy” Feynmana natrafia na zasadniczą trudność, bo nie ma układu, w którym można by mierzyć siły. Jak zatem wybrnąć z tej niezręcznej sytuacji? O czym zapomnieli uczniowie Newtona?

Już Galileusz zauważył, że gdy zmniejszymy opory w swobodnym spadku ciał, to wszystkie ciała spadają w ten sam sposób — ze stałym przyspieszeniem, niezależnie od ich masy; nie można więc zmierzyć ich grawitacyjnego ciężaru. Skoro zatem dowolne masy spadają jednakowo oraz nie ma sensu mówić o odle-

[6] L. Infeld, *Albert Einstein*, PWN, Warszawa 1984.

głościach między ciałami w różnych chwilach[7] (z tej racji, że są w różnych przestrzeniach euklidesowych położeń) i mamy kłopot z układem inercjalnym, to czy nie pozostaje nam uznać, że siła jest jednak pewną „definicją" matematyczną? A jeśli tak, to może w ogóle dałoby się ją wyeliminować przez odpowiednie „przedefiniowanie" ruchu, przestrzeni i czasu? Jednak, gdy zgodzimy się na takie postępowanie z konieczności — jak na to zwraca uwagę Feynman — wchodzimy na drogę hipotezy matematycznej, której aksjomaty będzie musiało potwierdzić doświadczenie. Właśnie taką drogę wybrał A. Einstein: całkowite wyeliminowanie siły grawitacji za cenę przebudowy czasoprzestrzeni.

4. TEORIA POLA GRAWITACYJNEGO EINSTEINA

Albert Einstein (1879–1955) potraktował bardzo poważnie podobieństwo między siłą pozorną, związaną z newtonowskim ruchem nieinercjalnym, a siłą grawitacji. Przyjął, że skoro obie te siły są lokalnie nieodróżnialne, to można je traktować w ten sam sposób. To przypuszczenie zaowocowało przebudową całej geometrii świata i naszych poglądów na grawitację. Okazało się, że grawitacja to nic innego jak geometria naszego świata. Przyjrzyjmy się zatem rewolucji, którą zapoczątkował Einstein.

Einstein uchwycił związek między intuicją Galileusza, dotyczącą jednakowego spadku wszystkich ciał, a modyfikacją geometrii. Przyjął, że swobodny spadek już jest ruchem „po prostej", ale niekoniecznie w euklidesowej czasoprzestrzeni. Żaden newtonowski eksperyment nie sugerował takiej relacji, dlatego podejście Einsteina wywołało niemałe zdziwienie: „Jak to możliwe, że opierając się na takiej idei, radykalnie różnej od schematu Newtona, zgodnie z którym cząstki przyspieszają pod wpływem sił grawitacyjnych, można nie tylko odtworzyć, ale nawet poprawić niezwykle dokładne przewidywania tej teorii? Co więcej, czy rzeczywiście

[7]Siedząc przy tym samym stole w poniedziałek i we wtorek nie mierzymy we wtorek naszej odległości do „stołu w poniedziałek".

stare odkrycie Galileusza zawiera coś, co *nie* zostało uwzględnione w teorii Newtona?” [Penrose, s. 230] Einstein długo medytował nad intuicją Galileusza, wyrażoną później w prawie ciążenia Newtona, że masa bezwładna i masa grawitacyjna są sobie równe (albo proporcjonalne). „Właśnie ten fakt zapewnia, że przyśpieszenie ciał pod działaniem sił grawitacji *nie zależy* od ich masy” — komentuje Penrose[8]. Zauważmy, że — wbrew „programowi badawczemu” Feynmana — Einstein najpierw stawia nową, śmiałą, matematyczną hipotezę, a nie mierzy przyspieszenia i masy, by potem „zmatematyzować” iloczyn wyników obserwacji.

Jeśli zatem wszystkie ciała, pod wpływem grawitacji, spadają jednakowo, to dla ciał, znajdujących się np. w spadającej swobodnie (bez oporów) windzie, nie będzie można zmierzyć empirycznie żadnych względem niej przyspieszeń, spowodowanych grawitacją. Można zatem lokalnie (patrząc na windę) uważać, że nie działa na nią żadna siła grawitacji a jedynie winda jakoś przyspiesza (po newtonowsku — staje się układem nieinercjalnym). Oznacza to, że przyspieszenie grawitacyjne jest lokalnie[9] nieodróżnialne od przyśpieszenia związanego z układem odniesienia. Einstein nazywał ten fenomen *zasadą równoważności*.

Czy pozbyliśmy się jednak kłopotów, jakie mechanika klasyczna ma z układem inercjalnym? Jak zauważa Infeld [s. 74], spadająca pod wpływem grawitacji winda — to właściwy model *układu niemal inercjalnego*. W takiej windzie (w której nie ma innych sił) wszystkie ciała spadające wraz z nią albo spoczywają względem niej, albo poruszają się ruchem jednostajnym prostoliniowym, jak tego chce pierwsza zasada dynamiki Newtona, która jednak dotyczy układu wolego od działania nań jakiejkolwiek siły. Infeld podkreśla, że nawet proste rozważania pokazują, iż zapomniany przez mechanikę klasyczną fakt jednakowego spadku ciał

[8] Inne siły (np. elektrostatyczne) nie mają tej własności, gdyż zależą od innych niż masa cech ciał (ładunków).

[9] Nielokalnie można odróżnić siłę pozorną od siły grawitacji, na skutek jej przestrzennej niejednorodności.

„należycie zrozumiany — staje się faktem podstawowym, gdyż prowadzi do ogólnej teorii względności” [s. 76].

Dla filozofów, sympatyzujących z potocznym obrazem świata, ciała spoczywają w swoim naturalnym miejscu. Galileusz odkrył, że spoczynku nie można odróżnić od ruchu jednostajnego. Newton wprowadził nas w „tajemnicę” siły grawitacji: wystarczy upuścić kamień, obserwować jak spada, słyszeć jak uderza o ziemię, choć nikt nie wie, dlaczego. Tymczasem Einstein przekonał nas, że normalną rzeczą jest spadać a obiekty spoczywające zachowują się nienaturalnie. „Swobodny spadek jest synonimem braku ciężaru: brakiem jakiejkolwiek siły zmuszającej obiekt do zmiany jego normalnego toru”[10].

Dla Einsteina ważne było jedynie to, co dzieje się lokalnie — w granicach małej windy: ona już jest właściwym układem odniesienia, już porusza się „jednostajnie prostoliniowo”, także wtedy, gdy „działa” na nią grawitacja lub jakieś inne kinematyczne przyspieszenie. Te „detale” Einstein usunął przez zamianę geometrii w otoczeniu windy. Jak niegdyś Newton utożsamił pochodną z lokalną zmianą toru, tak teraz Einstein utożsamił pojawienie się przyspieszeń czy grawitacji z lokalną zmianą geometrii w układzie. Ogólna teoria względności dotyczy zatem dowolnego układu — nie potrzeba rozróżniać układów inercjalnych i przyspieszonych, nie potrzeba rozważać sił pozornych. Logika teorii znacznie się upraszcza i znika widmo układów inercjalnych. Te układy, które przyspieszają czy podlegają grawitacji mają zakrzywioną wewnętrzną geometrię.

Einstein wspomina, że już w 1908 roku ogarnął jakoś ideę, że w małym otoczeniu spadające ciała zachowują się tak, jakby grawitacja nie działała. Następne zaś 7 lat — to było uwalnianie się od nawyku, że współrzędne muszą mieć bezpośrednie, metryczne znaczenie [zob. Misner, s. 5]. Newtonowskie oddziaływanie na odległość jest czymś zupełnie obcym koncepcji Einsteinowskiego od-

[10] Ch.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler, *Gravitation*, W.H. Freeman and Company, New York 1973, s. 13.

działywania lokalnego. Dla Newtona: Słońce „tam" przyciąga Ziemię „tu"; dla Einsteina — lokalna geometria określa ruch. „Nie próbuj opisywać ruchu względem odległych obiektów. *Fizyka jest prosta, gdy analizuje się ją lokalnie*" — uważa Misner — należy uznać, że winda i jej zawartość przemierza czasoprzestrzeń wolną od wszystkich sił, „uznaj, że ruch przez ten region już jest linią prostą" [s. 4–5].

Jeśli zatem popatrzeć na to, co zrobił Einstein, to widać, że z „programu badawczego" Newtona w układach inercjalnych świadomie przeszedł on do fizyki matematycznej czasoprzestrzeni. Jak można wyczytać u Misnera, „nic bardziej nie stresuje, jak problem prostego pomiaru w zakrzywionej czasoprzestrzeni" [s. 5]. Czy rzeczywiście teoria Einsteina przeniesie kłopoty teoretyczne fizyki Newtona na swoją empiryczną stronę? Zanim przejdziemy do odpowiedzi na to pytanie, musimy podkreślić ważną rzecz dotyczącą ogólnej teorii względności: Einstein połączył w niej czasoprzestrzeń swej szczególnej teorii względności z nowym podejściem do grawitacji i przyspieszeń; nie było to tylko przeformułowanie czy poprawienie teorii Newtona. Zaś szczególna teoria względności nie jest zgodna z dynamiką Newtona, gdyż opisuje geometrię pola elektromagnetycznego. Trzeba zatem przedstawić główne idee dotyczące teorii tego pola.

Siły elektryczne i magnetyczne były znane już od starożytności, choć zbadane zostały dokładniej dopiero przez W. Gilberta i B. Franklina. Również one są „po newtonowsku" odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości, ale zależą nie od mas, lecz od ładunku elektrycznego i momentu magnetycznego. Przeciw newtonowskiemu traktowaniu zjawisk elektromagnetycznych wystąpił Michael Faraday (1791–1867), proponując do ich opisu *pole fizyczne*, które nie jest tylko (znanym już wcześniej) matematycznym sposobem opisu sił, ale właśnie — osobną *wielkością fizyczną* istniejącą realnie, czymś co — dla Feynmana — nie podlega definicji. Co więcej, Faraday odkrył, że pola te mogą istnieć w przestrzeni bez źródła, bez materialnego nośnika i że światło może być elektromagnetyczną falą [zob. Penrose, s. 211n]. Penrose komentuje, że „taki pogląd był sprzeczny z [...] 'newtonowską mądrością', zgodnie z którą pola to pozbawione wszelkiej realności, czysto matematyczne wielkości, pomocne w opisie 'prawdziwego' newtonowskiego świata, składającego się z cząstek oddziałujących na odległość" [s. 212]. Kierowany świetną intuicją, J.C. Maxwell (1831–1879) zaproponował nową teorię, w której wprowadził drobną zmianę do dotychczasowych równań — nie na podstawie eksperymentów (z którymi teoria pozostawała w zgodzie), ale na skutek estetycznych przesłanek teoretycznych, tak fizycznych, jak i matematycznych. Obliczenia Maxwella potwierdziły, że fale, opisywane nowymi równaniami, rozchodzą się z prędkością światła i wykazują typową dla optyki interferencję i polaryzację. Kolejne przewidywanie teorii — fale generowane przez prąd elektryczny — doświadczalnie wykrył H. Hertz w 1888 r., potwierdzając tym samym hipotezę pól fizycznych Faradaya i teorię Maxwella, w której punktowe cząstki zastąpione zostały gęstością prądu elektrycznego i gęstością ładunku elektrycznego, z wykluczeniem „ładunków magnetycznych". Jak podkreśla Penrose, równania Maxwella dotyczą pól a nie cząstek, zatem „do opisu stanu układu potrzeba *nieskończonej* liczby parametrów (wektory pól w każdym punkcie przestrzeni)" [s. 214]. Znaleźliśmy się zatem w sytuacji, którą — z punktu widzenia sprawdzianu równań — Feynman musiałby określić jako beznadziejną[11].

Przy studiowaniu teorii pola elektromagnetycznego Maxwella okazało się jednak, że jest ona niezgodna z obowiązującą w fizyce newtonowskiej zasadą względności Galileusza. Problem ten rozwiązał Einstein w 1905 r. w swojej szczególnej teorii względności, zachowując względność ruchu kosztem zmiany teorii Newtona.

[11]Przestrzeń fazowa elektrodynamiki jest nieskończenie wiele wymiarowa. Sytuację pogarsza dodatkowo fakt, że równania Maxwella określają pola generowane przez już *znane* prądy. Dla cząstek naładowanych dopiero w 1895 r. H.A. Lorentz podał równanie ruchu pozwalające obliczyć w sposób zupełny tak zmiany pól, jak i ruch cząstek. Układ ten stwarza jednak pewne istotne problemy, o których tutaj jedynie wspominamy [por. Penrose, s. 215n].

Dokonało się to dzięki zrozumieniu, że prędkość światła jest maksymalną prędkością przenoszenia oddziaływań w próżni. Skoro istnieje jednak prędkość graniczna, to poglądy na czas i przestrzeń muszą ulec zmianie. H. Minkowski (1864–1909) opracował matematycznie wyniki Einsteina, wprowadzając pojęcie czterowymiarowej czasoprzestrzeni, w której czas i przestrzeń nie są czymś odrębnym, ale stanowią jedną, spójną wielkość [zob. Penrose, s. 218n]. Ta komplikacja naszkicowanego przez Newtona obrazu świata[12] pozwoliła uprościć go logicznie i uwolnić od paradoksów oddziaływań nieskończenie szybkich na odległość.

W swojej ogólnej teorii względności Einstein wykorzystał lokalny układ spadającej windy i geometrię szczególnej teorii względności. Szokująca początkowo idea zakrzywienia czasoprzestrzeni pozwoliła jednakowo traktować dowolny układ — i ten, który porusza się jednostajnie prostoliniowo, i ten, który przyspiesza — gdyż grawitacja i przyspieszenia to nic innego jak zakrzywienie płaskiej czasoprzestrzeni szczególnej teorii względności. W układzie „prawie inercjalnym" — w spadającej windzie — światło biegnie w poprzek niej po linii prostej — zaś z zewnątrz, w windzie w polu grawitacyjnym, ruch jest przyspieszony, zatem wygląda na to, że Ziemia przyciąga i windę i światło. Jeśli zaś torem światła już „jest" linia prosta, oznacza to, że czasoprzestrzeń się zakrzywia pod wpływem grawitacji [por. Infeld, s. 17n].

Przejdźmy teraz do fizyki, do eksperymentów, dokonując przy tym pewnych uwag metodologicznych. Mimo, że — jako teoria pola — ogólna teoria względności czyni o wiele śmielsze założenia teoretyczne niż teoria Newtona, i nikt nie potrafi — jak chciałby Feynman — sprawdzać empirycznie wszystkich jej aksjomatów, to właśnie ona, a nie teoria Newtona, lepiej tłumaczy zjawiska fizyczne, wobec których grawitacja Newtona pozostaje bezradna

[12] Zmieniając proste transformacje Galileusza — odnoszące się do położeń „w danej chwili" w przestrzeni euklidesowej o sygnaturze tensora metrycznego: $(1,1,1)$ — na transformacje Lorentza, przechodzimy do czterowymiarowej czasoprzestrzeni, opisującej zdarzenia czasoprzestrzenne w nieeuklidesowej, płaskiej geometrii o sygnaturze $(-1,1,1,1)$.

(zegary w polu grawitacyjnym chodzą wolniej; światło ugina się w pobliżu gwiazd, zwalniając swój bieg; orbity różnią się od newtonowskich, co widać w anomalii ruchu Merkurego, znanej już od 1859 r.). Oczywiście, ogólna teoria względności „przechodzi" w teorię Newtona dla małych prędkości i słabych pól grawitacyjnych i — jak zauważa Penrose — nie ma obserwacji, które by jej przeczyły [s. 240].

Co zatem zostało z prawa ciążenia działającego na odległość? Infeld [s. 82n] wysuwa poważne, cztery krytyczne zastrzeżenia dotyczące newtonowskiego patrzenia na siłę grawitacji: (1) prawo ciążenia zakłada, że istnieje układ inercjalny, choć „mechanika klasyczna nie potrafi podać sposobu znalezienia takiego układu"; (2) newtonowska grawitacja nie mieści się w ramach szczególnej teorii względności, nie da się jej pogodzić z teorią Maxwella; (3) nie jest to teoria polowa; (4) masa bezwładna i masa grawitacyjna są tu przypadkowo równe. Polowa, ogólna teoria względności Einsteina rozwiązała wszystkie te trudności i wyjaśniła nie tylko to, że „prawa przyrody obowiązywać muszą we wszystkich układach" [s. 88], ale i dlaczego tak się dzieje. Przy tym, ogólna teoria względności stała się jeszcze bardziej prosta logicznie[13] niż teoria szczególna. Pytanie o geometrię świata stało się identycznie równoważne pytaniu o jego pole grawitacyjne [por. s. 99]. Grawitacja jest niczym innym jak geometrią teorii. Niezmienniczość równań przy przejściu między dowolnymi układami zawiera w sobie czasoprzestrzeń zakrzywioną, czyli grawitację.

Odpowiadając na postawione w tytule pytanie, można powiedzieć, że „oddziaływanie na odległość" nie jest zadowalającym programem badawczym fizycznego świata. Geometria, zakładana przez inercjalne układy nie istnieje, jest poza obserwacją: nie można powiedzieć, że kometa odchyla się od linii prostej, bo nie ma na czym takiej linii narysować. Jak podkreśla Misner, linia

[13]Ponadto, przypuszczenie Einsteina, że równania ruchu już są zawarte w równaniach pola ogólnej teorii względności, i że można je z niej wydedukować, zostało potwierdzone w roku 1949 [por. Infeld, s. 102n].

prosta to mit [s. 19]. O wiele bardziej spójne teoretycznie jest podejście polowe, które opisuje również skończony w czasie (fizyczny) schemat oddziaływań: cząstka — zmodyfikowane pole — cząstka[14]. Mimo, że nie uwalniamy się od trudności empirycznych teorii (nie możemy liczyć na to, że wszystkie pojęcia matematyczne będą wielkościami obserwowalnymi), to jednak empiryczne wnioski z teorii polowych są pełniejsze i dokładniejsze, a sama teoria — istotnie prostsza. Pozostaje nadal otwarte zagadnienie tego, co uważamy za materialne. Jednakże — zdaniem Penrose'a — „materialna rzeczywistość [...] to pojęcie znacznie bardziej mgliste, niż myśleliśmy. Zmierzenie ilości materii — a nawet samo stwierdzenie, czy w ogóle jest obecna — zależy od bardzo subtelnych kwestii. Nie można stwierdzić obecności materii za pomocą operacji czysto lokalnych! Jeśli taka nielokalność wydaje się zaskakująca, to warto przygotować się duchowo na jeszcze bardziej szokujące fakty!" [s. 250].

Tak więc siła grawitacji nie jest oddziaływaniem na odległość i jest jakimś szczęśliwym zbiegiem okoliczności, że Newton znalazł swoje przybliżenie dotyczące prawa powszechnego ciążenia. Grawitacja nie jest nawet w ogóle siłą, lecz geometrią świata, nie „działa", lecz „jest areną" — wszystkie zjawiska fizyczne do niej się odnoszą; nie potrzeba też pisać osobnych równań ruchu, gdyż zawarte są one w równaniach pola grawitacyjnego ogólnej teorii względności.

[14] „*Przestrzeń oddziałuje na materię, mówiąc jej, jak się ma poruszać. Następnie materia odreagowuje na przestrzeni, mówiąc jej, jak się ma zakrzywiać.* Innymi słowy, materia 'tu' [...] zakrzywia przestrzeń 'tu'. Zakrzywienie przestrzeni 'tu' wymusza zakrzywienie przestrzeni 'tam' [...] i tak materia 'tu' wpływa na materię 'tam'. To jest Einsteinowskie wytłumaczenie 'grawitacji'" [Misner, s. 5].

SUMMARY

DOES THE FORCE OF GRAVITY ACTS AT A DISTANCE?

The second Law of Newton's dynamics could be regarded as a research program: by investigating momentum change, one is able to obtain simple formulae for expressing the physical force. However, such a program is unrealistic because of the problem with defining the concept of inertial system. Einstein has solved this problem in his general theory of relativity. In this theory, Gravity is not a force but rather the geometry of the world. It does not act at a distance, but determines local motions of masses. Einstein's research program consisted in a bold hypothesis in the field of mathematical physics rather than in any mathematization of observational results.