

promieniowanie przychodzące do nas z głębin Wszechświata, które obdiera atomy z elektronów, a mówiąc bardziej fachowym językiem, jonizuje atomy. Promieniowanie to nazwano promieniowaniem kosmicznym. Dziś wiemy, że w pobliżu Ziemi ponad atmosferą promieniowanie to składa się w 86% z protonów, czyli jąder wodoru, a w 13% z jąder helu, pozostały 1% to elektrony i jądra cięższych pierwiastków. Jest to tak zwane promieniowanie pierwotne. Strumienie bardzo szybkich cząstek nadlatujące z głębin kosmosu wpadają w atmosferę ziemską i zderzają się z jej atomami. Każde zderzenie to mikrowybuch, w którym powstają różne cząstki, z których część ma stosunkowo bardzo krótki żywot. Strumienie powstałych cząstek, czyli tzw. wtórne promieniowanie kosmiczne, dociera do powierzchni Ziemi, a nawet wnika dość głęboko pod powierzchnię. Tak, tak, w każdej sekundzie przez nasze ciało przenikają niewidzialne cząstki powstałe w górnych warstwach atmosfery.

Bohaterem naszego opowiadania będzie cząstka około dwustu razy cięższa od elektronu, która może być naładowana albo dodatnio, albo ujemnie. Nosi ona nazwę mionu dodatniego lub mionu ujemnego. Odznacza się dużą nietrwałością, bo – jak wykazały badania – żyje w spoczynku tylko dwie milionowe części sekundy. Zauważyli Państwo, że powiedziałem, iż żyje w spoczynku dwie milionowe części sekundy. Wiemy już bowiem, że w szybkim ruchu może żyć dłużej. Chwaliłem się poprzednim razem, że ja w układzie odległego kwazara, od którego Ziemia oddala się z ogromną prędkością, liczę sobie prawie sto pięćdziesiąt lat. Otóż przesłędźmy dzieje mionu od powstania do rozpadu z dwóch punktów widzenia: raz patrząc na mion z pozycji eksperymentatora na Ziemi, a drugi raz, i to jest trudniejsze do zrealizowania, z pozycji obserwatora lecącego razem z mionem w kierunku Ziemi.

Najpierw rozważmy pierwszy punkt widzenia. To, co opowiadam, jest wynikiem szeregu doświadczeń. Stwierdzono ponad wszelką wątpliwość, że miony powstają w górnych warstwach atmosfery, gdzieś na wysokości 15 km. Mogą one mieć bardzo dużą energię i w pierwszym przybliżeniu możemy przyjąć, że poruszają się z prędkością bliską prędkości światła. Czas życia każdej cząstki ma sens tylko statystyczny. Nie umiemy przewidzieć, że ten konkretny mion będzie żył właśnie dwie milionowe części sekundy. Może właśnie rozpadnie się po milionowej części sekundy, a może będzie żył dwa razy dłużej. Jedyne,

Pierwsza podróż Kolumba „do Ameryki” w 1492 roku uważana jest za wydarzenie zamykające średniowiecze. Po tej dacie nastąpiła epoka nowożytna. Data jest, oczywiście, przyjęta dosyć umownie, trudno jednak nie zauważyć, że w wieku XVI i następnym dokonuje się bardzo dynamiczny rozwój cywilizacji – pojawiają się nowe idee, całkowicie odmienne od przekonań powszechnie przyjmowanych przez całe poprzednie tysiąclecie, a z nimi i nowożytna nauka.

Fizycy tradycyjnie przyjmują, że w ich dziedzinie przełom nastąpił dzięki działalności Galileusza. Zdecydowały o tym nie tyle jego liczne szczegółowe odkrycia, ile zastosowana metoda. Galileusz odwołuje się w swoich pracach do wyników doświadczeń, a swoje obserwacje i wnioski wyraża stosując pojęcia matematyczne. Matematyka nie jest jednak dla niego jedynie językiem zapisywania wyników, ale przede wszystkim metodą analizy doświadczeń. Galileusz jako pierwszy zdał sobie sprawę, że nie ma sensu teoria fizyczna nie odwołująca się do doświadczenia, a także, że praca doświadczalna nie poddawana analizie teoretycznej jest całkowicie bezwartościowa – tak, jak najdokładniejsze tablice wartości funkcji nie zastąpią twierdzeń analizy matematycznej.

Dobrym przykładem jest tu sformułowanie praw spadku swobodnego. Wielu historyków zarzuca Galileuszowi, że zapewne nie wykonał doświadczeń, na które się powołuje, gdy twierdzi, że wszystkie ciała spadają jednakowo. Istotnie, w czasach Galileusza każde bezpośrednie doświadczenie musiało dać wynik sprzeczny z tym twierdzeniem – nie było przecież wówczas wystarczająco wydajnych pomp próżniowych.

A jednak wniosek Galileusza był wnioskiem „doświadczalnym”. Rozumowanie jego przebiegało mniej więcej tak (podaję „wersję współczesną”; proszę więc wybaczyć, jeśli zdarzy mi się użyć pojęć, które pojawiły się o wiele później). Najpierw wykazuje wewnętrzną sprzeczność poglądu głoszonego za Arystotelesem przez ówczesnych filozofów, że ciało większe spada szybciej niż ciało mniejsze. Zaczyna od ciał z tego samego materiału. Założmy, że, istotnie, duży kamień spada szybciej niż mały. Jeśli tak, to po ich połączeniu powinny spadać z prędkością pośrednią, mniejszą niż prędkość dużego i większą niż małego – wszak ciało szybsze „pociągałoby” wolniejsze, a wolniejsze „hamowało” szybsze. Połączone kamienie są jednak razem większe niż większy z nich, a więc zgodnie z założeniem spadają szybciej niż każdy oddzielnie. Otrzymujemy sprzeczność, a więc twierdzenie Arystotelesa jest błędne. Obserwowane różnice w szybkości spadania różnych ciał nie mogą wynikać z „natury” spadania, a spowodowane są innymi przyczynami – np. oporem powietrza. Porównanie spadania ciał z różnych materiałów wymaga „wylimitowania” oporu powietrza.

Dodatkowo, ponieważ obserwowane różnice czasów mogą być bardzo małe, Galileusz proponuje używanie równi pochyłej dla „rozciągnięcia” doświadczeń w czasie. Równia wprowadza jednak dodatkowe opory: tarcie o deskę. Jako dalsze ulepszenie Galileusz proponuje zastosowanie wahadła, w którym „spadające ciało” zawieszono jest na długiej nici. Teraz rozumowanie jest już proste: porównujemy ruch wahadeł o identycznej długości z „ciężarkami” wykonanymi z różnych materiałów. Opór powietrza będzie powodował różne tempo zanikania amplitudy, natomiast „czas spadania” będziemy obserwowali jako okres wahań. Uruchamiając jednocześnie dwa takie wahadła możemy bardzo precyzyjnie porównać ich okresy obserwując różnice faz po kilkudziesięciu lub nawet kilkuset wahaniciach – by, jak stwierdza Galileusz, nie

zaobserwować najmniejszej między nimi różnicy. Jak bowiem zauważył Galileusz, okres drgań wahadła zależy jedynie od jego długości (nie jest to stwierdzenie całkiem ścisłe).

Wniosek: po wyeliminowaniu oporów ruchu wszystkie ciała spadają z jednakową szybkością.

Sformułowane przez Galileusza twierdzenie dotyczące spadania ciał było tym samym jednym z pierwszych przewidywań teoretycznych w pełni później potwierdzonym w niezliczonych doświadczeniach wykonywanych na tysiącach lekcji fizyki.

Sens przełomu dokonanego przez Galileusza polegał na dostrzeżeniu głębokiego związku między poznaniem „bezpośrednim”, tj. doświadczalnym a teoretycznym, dodatkową zaś korzyścią było wynalezienie zegara wahadłowego (skonstruowanego nieco później przez Christiana Huygensa) – do początków XX wieku najprecyzyjniejszego przyrządu do pomiaru czasu. Wróćmy jednak do problemu spadku swobodnego. Czy rzeczywiście „różne ciała spadają jednakowo”? Wiele lat po śmierci Galileusza, po sformułowaniu przez Newtona praw dynamiki i prawa powszechnego ciążenia i tym samym ogromnym udoskonaleniu „aparatury pojęciowej” zdano sobie sprawę, że w rozumowaniu Galileusza, w części dotyczącej „ciał z różnych materiałów” ukryte jest założenie (przyjęte również przez Newtona i jego następców), iż „masa bezwładna” i „masa grawitacyjna” ciała są równe. Jeśli jednak dokładniej przeanalizować te pojęcia i „przepisy” na mierzenie obu mas, to okazuje się, że w zasadzie mogłyby to być wielkości zupełnie niezależne. „Masę bezwładną” moglibyśmy wyznaczać badając stosunek prędkości po zderzeniu z pewnym ciałem wzorcowym; „masa grawitacyjna” natomiast jest proporcjonalna do siły, z jaką Ziemia przyciąga dane ciało – są to więc wielkości istotnie różne. Zdawał sobie z tego sprawę już Newton i próbował wykazać, że bezwładność jest wynikiem przyciągania grawitacyjnego przez „resztę Wszechświata”. Albert Einstein natomiast przyjął, że równość obu mas jest ogólnie prawdziwym prawem Przyrody i zbadał dokładnie konsekwencje takiego założenia. Posłużył się przy tym metodą identyczną, jak Galileusz niemal trzysta lat wcześniej: dokonał szczegółowej analizy możliwych wyników doświadczeń przeprowadzonych w „spadającej windzie”. Doszedł przy tym do wniosku, że żadne doświadczenia w „zamkniętej windzie” nie pozwoliłyby odróżnić, czy nieruchoma winda znajduje się w zewnętrznym, jednorodnym polu grawitacyjnym, czy też porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym. Twierdzenie to stoi u podstaw ogólnej teorii względności, a z nią i całej współczesnej kosmologii. Nic dziwnego, że równość masy bezwładnej i grawitacyjnej jest też coraz dokładniej sprawdzana doświadczalnie – jak dotąd nie ma wystarczających podstaw, aby w nią wątpić. Badania rozpoczęte przez Galileusza nie są zakończone: ogólna teoria względności ma zupełnie inną postać niż teorie pozostałych oddziaływań elementarnych. Wiadomo, że uwzględnienie zjawisk kwantowych wymaga daleko idącej zmiany teorii – jak jednak ma ona wyglądać – nie udaje się ustalić już od lat kilkadziesiąt.

Twierdzenie Galileusza, że okres drgań wahadła nie zależy od amplitudy ruchu, nie jest ścisłe. Okres wahań rośnie wraz z amplitudą. Dla małych wychyleń poprawki do „szkolnego wzoru” $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ są jednak bardzo małe i przy stosowaniu wahadła o długości kilku metrów i niewielkich wychyleń byłyby (w czasach Galileusza) całkowicie pomijalne (okres wydłuża się o mniej niż 0,2%, gdy amplituda wynosi 10°). Ścisłe biorąc, stosując wahadło Galileusz nie wyeliminowałby również całkiem wpływu oporu powietrza. Występowanie siły oporu (np. proporcjonalnej do prędkości) zmienia bowiem okres drgań w stosunku do ruchu bez oporu. Poprawki te, w przypadku ruchu w powietrzu są tak małe, że można je pominąć w porównaniu z poprawkami związanymi z zależnością od amplitudy drgań.

co możemy twierdzić, to to, że średnio miony żyją dwie milionowe części sekundy. Dla uproszczenia rozważajmy więc taki średni mion. Patrząc z Ziemi i rozumując zgodnie z fizyką Newtona, czyli zgodnie ze zdrowym rozsądkiem, możemy przeprowadzić następujące obliczenie. Mion, ten nasz średni, przez czas swego życia przeleci, nawet z prędkością światła, dwie milionowe części sekundy razy trzysta tysięcy kilometrów na sekundę, czyli sześćset metrów. Nasuwa się nieodparcie wniosek: miony powstające piętnaście kilometrów nad powierzchnią Ziemi nie mają żadnej szansy na dotarcie do poziomu morza, bo przedtem rozpadną się. Przeprowadzamy doświadczenie z licznikami umieszczonymi na poziomie morza i stwierdzamy, że mnóstwo mionów jednak dociera do powierzchni Ziemi. Wynik zaskakujący, czyżby znowu sprzeczny ze zdrowym rozsądkiem? Dla nas już nie – wiemy bowiem, że czas w szybkim ruchu płynie wolniej. Zakładając dość rozsądną wartość prędkości mionu równą 0,99876 prędkości światła okaże się, że przy tej prędkości mion żyje dwadzieścia osiem razy dłużej niż mion w spoczynku, a więc będzie mógł przebyć nawet 18 km. Nie ma więc żadnego problemu? Czy aby na pewno?

Popatrzmy teraz na ten sam proces powstania, lotu i rozpadu mionu z punktu widzenia obserwatora, który leci razem z mionem. Względem obserwatora mion jest teraz w spoczynku. Żyje więc tylko dwie milionowe części sekundy. Może więc przebyć w czasie swego życia co najwyżej 600 metrów. Czyli nie może dotrzeć do naszej aparatury badawczej na powierzchni morza, do której, jak przypominam, ma 15 km. A jednak dociera do aparatury, bo na to wskazuje doświadczenie. Co więcej, dopiero co zrozumieliśmy, że powinien tam dotrzeć z punktu widzenia obserwatora na Ziemi. Obserwator pędzący razem z mionem zdaje się twierdzić co innego. Znowu sprzeczność ze zdrowym rozsądkiem. Tak, ale tylko dopóty, dopóki nie wyjawimy jeszcze jednego przewidywania szczególnej teorii względności. Twierdzi ona mianowicie, że długość poruszającego się przedmiotu ulega skróceniu w kierunku ruchu. Obserwator związany z mionem widzi pędzącą naprzeciw Ziemi. Odległość do Ziemi będzie więc mniejsza, bo Ziemia jest w ruchu. Dokładne obliczenia w naszym przypadku mówią, że ta odległość wynosi tylko 528 metrów zamiast 15 kilometrów. Mion tę odległość przebędzie bez trudu. Sprzeczność jest usunięta. Zdrowy rozsądek uratowany, ale za cenę przyjęcia szczególnej teorii względności.