

JEAN-PIERRE LASOTA

# DROGA DO CZARNYCH DZIUR

Przełożył z francuskiego i zaktualizował autor



**Copernicus  
Center**  
PRESS



## Rozdział pierwszy

# Grawitacja: przyciąganie powszechne

Grawitacja działa na wszystko: na wszystkie formy materii, a więc i na wszystkie formy energii, bo Albert Einstein nauczył nas, że są one tym samym:  $E = mc^2$ . Znaczy to, że Ziemia, która przyciąga zarówno jabłko, jak i Księżyc, przyciąga również światło. W przypadku światła jest to efekt względnie słaby. Widzimy gołym okiem jabłko spadające z jabłoni i ruch Księżyca wokół Ziemi, ale do zarejestrowania skutków działania ziemskiej grawitacji, ciężenia, na promień światła potrzebne są czułe przyrządy. Napisałem „względnie” słaby, więc należałoby uściślić, co to znaczy. W końcu grawitacja ziemska jest wystarczająco silna, by „trzymać” Księżyc na orbicie, więc taka całkiem słaba nie jest. Zatem słaba w porównaniu z czym? Z grawitacją czego? Odpowiedź brzmi: słaba w porównaniu z grawitacją czarnej dziury, która jest tak silna, że może światło uwięzić na zawsze. No dobrze, ale co różni grawitację czarnej dziury od grawitacji planety takiej jak Ziemia lub gwiazdy takiej jak Słońce? Aby to zrozumieć, zacznijmy od początku: od odkrycia powszechności grawitacji. Zanim zajmiemy się czarnymi dziurami, porozmawiajmy o jabłkach.

Według legendy, „siedząc w sadzie rodzinnego dworku”, jak pisze Camille Flammarion w swojej, nigdy po polsku nie wydanej, a szkoda, *Astronomii popularnej*, Isaac Newton odkrył powszechność ciężenia, obserwując spadające jabłko. Miał wtedy zrozumieć, że to, co powoduje spadek jabłka, jest

tym samym, co powoduje spadanie Księżyca: grawitacja uniwersalna. Ale zaraz, czy Księżyc spada? Wygląda raczej na dobrane zawieszony na sferze niebieskiej. **A j e d n a k s p a d a.** Wyjaśnijmy, co fizycy rozumieją przez „spadek”.

Na ogół terminologia fizyczna ma swoje źródło w języku codziennym, ale zdarza się, że znaczenie zapożyczonych słów jest inne od oryginalnego, albo tylko bardziej precyzyjnie zdefiniowane. Czasem, z braku wyobraźni, fizycy używają słów w znaczeniu, które nie ma nic wspólnego z pierwotnym, i mówią na przykład o „kolorze” czy „powabie” cząstki elementarnej. Jednak w przypadku „spadku” lub „spadania” chodzi jednocześnie o uogólnienie i uściślenie.

### Spadanie i swoboda

Powróćmy więc do sadu Newtonów, podnieśmy z ziemi jabłko i rzućmy je najdalej, jak tylko możemy. Jeśli mamy choćby minimalne zdolności atletyczne, wyrzucone jabłko wzniesie się na pewną wysokość, po czym opadnie na ziemię. Nawet gdybyśmy do rzutu zaangażowali mistrza olimpijskiego, wynik byłby ten sam: jabłko spadłoby kilkadziesiąt metrów dalej, ale by spadło – tak jak każde ciało wyrzucone przez człowieka. Rzecz jasna, gdybyśmy mieli nadludzką siłę Supermana, moglibyśmy wyrzucić jabłko wystarczająco wysoko, by nie opadło na Ziemię, lecz znalazło się na trajektorii pozwalającej mu na jej okrążanie... jak Księżyc. Wyrzucamy przecież na orbitę różnego rodzaju satelity, zwane „sztucznymi” (naturalnym jest Księżyc), które są odpowiednikami jabłka wyrzuconego przez Supermana. Nie spadają „na ziemię”, bo są za wysoko. Ale jednak spadają, bo w fizyce „spadanie” to ruch pod wpływem grawitacji: wszystkie ciała, na które działa t y l k o przycią-

ganie grawitacyjne, „spadają”, ściślej mówiąc – „spadają swobodnie”. Jedyna różnica z jabłkiem polega na tym, że nie natykają się na powierzchnię Ziemi.

Powiedzieliśmy, że ciała spadające swobodnie podlegają działaniu tylko siły ciężenia. Spadek jabłka z drzewa nie jest więc naprawdę swobodny: podlega ono również sile tarcia wywieranej przez powietrze. Na dłuższą metę sztuczne satelity też opadną na Ziemię z powodu tego samego efektu: mimo że są bardzo wysoko, nie krążą w próżni, lecz znajdują się nadal wewnątrz ziemskiej atmosfery (która rozprzestrzenia się nawet do tych wysokości), co powoduje wyhamowywanie ich ruchu przez tarcie. Gdyby nie to, na zawsze spadałyby swobodnie.

Pojęcie „spadku swobodnego” odnosi się zatem do procesu idealnego. Jest to normalne w fizyce, która stara się odkryć i opisać podstawowe prawa rządzące naszym Wszechświatem. (Niektórzy fizycy odważają się nawet na opis wszechświatów innych od naszego! Powrócimy do tego, gdy mowa będzie o wnętrzach czarnych dziur.) By odkryć te prawa, idealizuje się rzeczywistość, „zaniedbując” efekty, o których sądzimy, że nie są częścią badanego procesu. Tak więc spadek swobodny zachodzi w próżni. Czasem to pojęcie znakomicie stosuje się do badanego ruchu, czasem nie, wszystko zależy od precyzji pomiaru. Nie wolno bowiem zapominać, że fizyka jest nauką doświadczalną. Pojęcia mogą być idealne, teorie mogą się wydawać abstrakcyjne, ale do swej rangi, teorii, a nie hipotezy, awansują dopiero po ścisłej weryfikacji przez doświadczenie.

W wyobrażonej przeze mnie „satelizacji” jabłek Superman był tylko supersportowcem; nie przynosił ich, jak mu się to zdarza robić z bombami jądrowymi albo z młodymi kobietami, bezpośrednio na orbitę, ale stojąc na ziemi, nadawał im odpowiednie początkowe przyspieszenie, tak że następnie wyrzucony owoc poddany był wyłącznie sile ciężenia.

Natomiast rakiety, takie jak Ariane czy SpaceX, wznoszą się siłą swoich silników i dopiero po osiągnięciu wyznaczonej orbity umieszczają na niej transportowany ładunek. W przypadku jabłka wyrzuczonego przez Supermana czy też armaty Juliusza Verne'a wystrzeliwującej pocisk na Księżyc przyspieszenie nadawane jest tylko na początku ruchu, podczas gdy w przypadku rakiety trwa to dłużej. Ale w końcu wynik jest ten sam: po opuszczeniu ręki Supermana, lufy armatniej czy ostatniego stopnia Ariane obiekt porusza się tylko pod wpływem ziemskiej grawitacji. Tak jak Księżyc. Kształt trajektorii, po której porusza się ciało podlegające sile ciężenia, ich orbity, wyznaczone są przez tzw. w matematyce *w a r u n k i p o c z ą t k o w e*, takie jak położenie i prędkość w chwili, gdy rozpoczyna się spadek swobodny.

Jabłko spadające z drzewa rozpoczyna swój ruch „w spoczynku”: jego prędkość początkowa jest równa zeru. Dlatego spada niedaleko od jabłoni, a nie znajduje się na orbicie, choć i tak kierunek ruchu by temu nie sprzyjał. No właśnie: jaka jest prędkość początkowa potrzebna do wyzwolenia się z ziemskiego przyciągania i wyjścia w przestrzeń kosmiczną (zakładając, że wyrusza się w dobrym kierunku)? Odpowiedź brzmi: 40 284 kilometry na godzinę (km/h). Dla Słońca ta „prędkość ucieczki” wynosi 2 223 720 km/h; dla białych karłów – małych martwych gwiazd będących końcowym etapem ewolucji gwiazd małowasywnych, do których wrócimy później – ta prędkość równa się około 26 280 000 km/h. W przypadku gwiazd neutronowych, małych pozostałości ewolucji gwiazd nieco bardziej masywnych od tych, po których pozostają białe karły, trzeba poruszać się z prędkością równą mniej więcej połowie prędkości światła, by wyzwolić się z ich przyciągania grawitacyjnego. W końcu opuszczenie powierzchni czarnej dziury wymaga prędkości nadświatlnych... ale jest to

niemożliwe, jak się o tym niedługo przekonamy. Inaczej mówiąc, nie można wyjść z czarnej dziury. Nawet światło nie może jej opuścić, dlatego jest czarna. Naprawdę czarna, to nie jest metafora. Zanim jednak będziemy o niej mówić, powróćmy jeszcze do prędkości ucieczki, co pomoże nam później zrozumieć jej właściwości.

Wartość prędkości ucieczki zależy tylko od masy i rozmiarów ciała będącego źródłem przyciągania grawitacyjnego. Słońce, biały karzeł i gwiazda neutronowa mają mniej więcej tę samą masę: około  $2 \times 10^{30}$  kilogramów (jedynka z trzydziestoma zerami – trzeba pomnożyć miliard przez miliard i jeszcze przez 10 tysięcy, by otrzymać  $10^{30}$ ), ale bardzo różnią się rozmiarami. Promień Słońca to 700 000 km, dla białego karła to 5000 km, a promień gwiazdy neutronowej wynosi zaledwie 10 km. Można sprawdzić, że dla danej masy prędkość ucieczki zależy od odwrotności pierwiastka kwadratowego promienia obiektu przyciągającego. Inaczej mówiąc, by otrzymać na przykład prędkość ucieczki gwiazdy neutronowej, znając jej wartość dla Słońca, wystarczy pomnożyć tę ostatnią przez pierwiastek kwadratowy stosunku promieni tych ciał niebieskich (ten stosunek wynosi 70 000: Słońce jest siedemdziesiąt tysięcy większe od gwiazdy neutronowej), tzn. przez około 300. Tak więc kwadrat prędkości ucieczki rośnie, gdy promień ciała grawitującego maleje. Ściślej: kwadrat prędkości ucieczki jest odwrotnie proporcjonalny do promienia. Z drugiej strony można sprawdzić, że jest on proporcjonalny do masy ciała będącego źródłem ciężenia.

Piszę o tym tak dokładnie, bo wspomniany związek między kwadratem prędkości i masą ciała podzieloną przez jego promień odzwierciedla jedno z podstawowych praw fizyki: zasadę zachowania energii. Słowo „energia” jest często używane w języku codziennym i zajmuje szczególne miejsce w mediach.

Mówi się i pisze o „oszczędności energii”, o energiach „odnawialnych”, „zielonych” lub „czystych”, a opakowania żywności podają jej „wartość energetyczną”. Ta ostatnia zawiera też informację na temat jednostek, w których energię się mierzy. Tu pojawia się pewna trudność, gdyż opakowania podają wartość energii w kilodżulach (jest to jednostka oficjalna), podczas gdy Apple Watch i inne Fitbity używają kilokalorii, co zmusza użytkowników do nieprostycho rachunków\*, kiedy chcą sprawdzić, czy udało im się „spalić” zjedzone tłuszcze. Ale czym jest energia?

Dla fizyka energia jest wielkością, która pozostaje stała bez względu na okoliczności – liczbą, którą przypisuje się układowi fizycznemu – jest to wielkość „zachowana”. Liczba ta może być wyrażona na różne sposoby, bo energia może przybierać różne formy.

Mamy zatem energię cieplną (energię przypadkowego ruchu cząstek gazu, na przykład powietrza); każda cząsteczka gazu posiada energię ruchu (energię „kinetyczną”); energia cieplna jest więc energią kinetyczną i sumą energii ruchu poszczególnych cząsteczek gazu. Energia cieplna może być wyświecana, dlatego można by przypuszczać, że jest „tracona”; ale odnajdujemy ją w promieniowaniu, czyli nie ma tu mowy o żadnej stracie.

Istnieją też energie wiązania wynikające z działania sił – chemicznych dla cząsteczek, jądrowych dla jąder atomowych, grawitacyjnej dla ciał masywnych, które wiążą ich składniki. Energia zwana „słoneczną” jest energią promieniowania, mającego swoje pierwotne źródło w reakcjach termojądrowych zachodzących w centrum Słońca, które wyzwalają energie wiązania jąder atomowych. Energia słoneczna jest więc w istocie energią jądrową.

---

\* 1 kJ = 0,2388 kcal.