

CZARNE DZIURY

J. Richard Gott

Ten rozdział jest o najbardziej tajemniczych obiektach we Wszechświecie — czarnych dziurach. Jedno z pierwszych dokładnych rozwiązań równań ogólnej teorii względności Einsteina dotyczyło czarnych dziur. Dokładne rozwiązanie równań Einsteina opisuje pewną geometrię czasoprzestrzeni, której zakrzywienie w każdym punkcie (lokalne zakrzywienie) spełnia te równania. Szczególnie interesujące jest rozwiązanie dla geometrii pustej przestrzeni wokół punktowej masy. (...) Tego typu równania próbował rozwiązać Einstein, gdy zajmował się orbitą Merkurego lub ugięciem promieni światła w przestrzeni wokół Słońca. Dokładne rozwiązanie było bardzo trudnym zadaniem, ponieważ niełatwo było z góry odgadnąć geometrię rozwiązania, więc Einstein zdecydował się na przybliżone rozwiązanie, w którym założył, że przestrzeń jest w przybliżeniu płaska, tak jak w szczególnej teorii względności, natomiast zakrzywienie stanowiło małe zaburzenie (niewielkie odchylenie od całkowicie płaskiej czasoprzestrzeni). (...)

Pierwszą osobą, która znalazła dokładne rozwiązanie równań Einsteina w pustej przestrzeni wokół punktowej masy, był niemiecki astronom, Karl Schwarzschild. Znalazł on rozwiązanie przedstawiające grawitację na zewnątrz nieruchomej kulistej gwiazdy. (...) Schwarzschild już w 1900 roku opublikował artykuł o krzywiznie przestrzeni — pięć lat przed opublikowaniem przez Einsteina szczególnej teorii względności. Schwarzschild sugerował, że przestrzeń może być dodatnio zakrzywiona jak powierzchnia sfery lub ujemnie zakrzywiona jak powierzchnia końskiego siodła. Próbował także oszacować, jak duży jest promień krzywizny przestrzeni, biorąc pod uwagę dostępne wówczas wyniki obserwacji astronomicznych. Gdy ukazał się artykuł Einsteina, Schwarzschild był mentalnie przygotowany do rozważania krzywizny czasoprzestrzeni, natychmiast więc zrozumiał teorię Einsteina, i — co najważniejsze — znał i rozumiał rachunek tensorów krzywizny Riemanna. Dysponował wszystkimi matematycznymi narzędziami, których potrzebował, aby zrobić coś nowego i oryginalnego. Zdołał znaleźć rozwiązanie przedstawiające grawitację na zewnątrz nieruchomej kulistej gwiazdy, ponieważ w pomysłowy sposób wykorzystał fakt, że układ miał symetrię sferyczną oraz nie zależał od czasu, mógł więc użyć odpowiednio dobranego układu współrzędnych. Okazało się, że dokładne rozwiązanie równań Einsteina dla pustej przestrzeni wokół nieruchomej kulistej gwiazdy stanowi opis (przestrzeni na zewnątrz) czarnej dziury*.

Wyprowadzenie dokładnego rozwiązania próżniowych równań pola przypomina szycie patchworkowego płaszcza z małych kawałków materiału. W każdym punkcie czasoprzestrzeni musisz zszyć kawałki w taki sposób, że lokalnie różne człony opisujące krzywiznę sumują się do zera. Równania określają reguły, w jaki sposób należy dodawać i zszywać kolejne kawałki, lecz na końcu musisz uzyskać globalne rozwiązanie — kompletny płaszcz — który spełnia reguły w każdym punkcie. To bardzo trudne. Karl Schwarzschild pierwszy znalazł dokładne rozwiązanie dla zakrzywionej przestrzeni wokół czarnej dziury.

Gdybyś zamierzał wybrać się do wnętrza sfery Schwarzschilda, musisz się liczyć z tym, że nigdy nie wydostaniesz się na zewnątrz. Musiałbyś się poruszać szybciej od światła, a Einstein pokazał, że jest to niemożliwe. (...)

Zostałem kiedyś zaproszony do udziału w programie McNeil/Lehrer Newshour, ponieważ astronomowie używający Kosmicznego Teleskopu Hubble'a odkryli dowody, że w galaktyce M87 istnieje duża czarna dziura. Autorzy programu zaprosili mnie oraz Kipa Thorne'a, żebyśmy wyjaśnili widzom znaczenie tego odkrycia. Przygotowałem mały pokaz. (...)

W trakcie mojego telewizyjnego wystąpienia zademonstrowałem widzom lejek w kształcie trąbki. Ustawiłem go szerokim otworem do góry, a wąskim końcem w dół. Astronomowie zaobserwowali gaz krążący z dużą prędkością wokół czarnej dziury w M87. Zilustrowałem to, wrzucając kulki wzdłuż bocznej ściany lejka i pozwalając im poruszać się po spirali wewnątrz lejka, coraz niżej, aż w końcu znikają w dziurze u dołu. Podobnie zachowuje się gaz krążący wokół czarnej dziury. Warstwy gazu znajdujące się bliżej czarnej dziury krążą szybciej (chmura gazu nie wiruje jak ciało sztywne), a różnica prędkości powoduje tarcie. Na skutek tarcia gaz się rozgrzewa i świeci. Promieniowanie tego gazu widzimy, ponieważ jest ono emitowane poza horyzontem zdarzeń. Emitujący promieniowanie gaz traci energię i krążąc spiralnym ruchem, wpada do czarnej dziury. To jest źródło mocy kwazarów: gaz krążący po spirali wokół supermasywnej czarnej dziury. Widzimy ten gaz, dopóki krąży ponad horyzontem zdarzeń, ale przestajemy go widzieć, gdy minie ten horyzont. Przygotowany przeze mnie pokaz obejmował wszystkie te kwestie. Wydawało mi się, że jest pouczający i byłem przygotowany do nagrywania programu, ale pokazałem go mojej siedmioletniej córce, która zasugerowała, żeby dodać jeszcze astronautę. Poszła do swojego pokoju i przyniosła (...) małą, dwucentymetrową figurkę astronauty z programu „Apollo” (...) Jeżeli jesteś na orbicie wokół czarnej dziury, będziesz długo krążyć po spirali jak moje kulki, zanim wpadniesz do środka, ale możesz także polecieć prosto w dół (...). Położyłem figurkę astronauty na górnej krawędzi lejka i po prostu pozwoliłem jej się ześlizgnąć z dół... i zniknąć w czarnej dziurze u dołu. Doskonale. Czarna dziura to hotel, w którym możesz się zameldować, ale nie możesz się wymeldować.

W 1974 roku Stephen Hawking dokonał zaskakującego odkrycia: czarna dziura emituje promieniowanie termiczne. Energia jednak może uciec z czarnej dziury. Jak doszło do tego odkrycia? Jakob Bekenstein, doktorant Uniwersytetu Princeton, rozmawiał ze swoim promotorem, Johnem Archibaldem Wheelerem. To właśnie Wheeler był autorem określenia „czarna dziura”. To bardzo dobra nazwa! Czarne dziury są dziurami i są czarne — nie emitują światła. (...) Wheeler zaprosił swojego doktoranta, Bekensteina, na rozmowę. Przyniósł filiżankę gorącej herbaty, wlał do niej trochę zimnej wody, i powiedział: „Właśnie popełniłem przestępstwo: zwiększyłem entropię (nieporządek) we Wszechświecie, i nie mogę zmniejszyć, ponieważ nie mogę odmieszać herbaty i wody”. Bekenstein wiedział, że entropia Wszechświata zawsze rośnie z czasem. Jeżeli rozbijesz filiżankę, nieporządek we Wszechświecie wzrasta, ponieważ nieczęsto widzimy, jak odłamki filiżanki podrywają się z podłogi, dopasowują i składają się z powrotem w filiżankę. W istocie, gdy widzisz film, na którym dzieje się coś takiego, śmiejesz się, ponieważ wiesz, że to się nie zdarza. Jest pewne prawdopodobieństwo, że coś takiego się zdarzy, ale jest ono bardzo małe. (...) Wheeler kontynuował: „Ale teraz ukryję dowody mojego przestępstwa, wlewając letnią mieszaninę gorącej herbaty i zimnej wody do czarnej dziury. Masa czarnej dziury wzrośnie: jej masa będzie taka sama jak poprzednio, plus masa herbaty i wody, ale ani trochę więcej, niż byłaby, gdybym wlał do czarnej dziury oddzielnie herbatę i wodę. Odtworzyłem rezultat, który miałbym, gdybym uprzednio nie zmieszał herbaty i wody. Wydaje się, że to jest sprzeczne z drugim prawem termodynamiki. Pomyśl o tym!”. Bekenstein potraktował poważnie ideę Wheelera. Znakomity artykuł, który był rezultatem jego przemyśleń, wywarł na mnie ogromne wrażenie.

Bekenstein zwrócił uwagę, że Hawking udowodnił twierdzenie, zgodnie z którym całkowita powierzchnia wszystkich horyzontów zdarzeń we Wszechświecie zawsze rośnie z czasem, jeżeli gęstość masy jest wszędzie nieujemna, co wydaje się rozsądne. Gdy do czarnej dziury coś wpada, jej masa rośnie, a jej promień Schwarzschilda się zwiększa. (...) Gdy Wheeler wlał swoją mieszaninę herbaty i wody do czarnej dziury, zwiększył pole powierzchni jej horyzontu oraz jej entropię. Entropia całego Wszechświata także wzrosła odpowiednio,

ponieważ czarna dziura ma entropię, która wzrosła, gdy wlała się do niej mieszanka herbaty i wody. Bekenstein doszedł do wniosku, że czarne dziury mają dużą, ale skończoną entropię. (...)

Ale Hawking — w odróżnieniu ode mnie — sądził, że artykuł Bekensteina jest błędny. Jeżeli zwiększysz energię czarnej dziury o pewną skończoną wartość, to zwiększysz jej entropię, a to z kolei oznacza — dzięki prostemu rozumowaniu opartemu na zasadach termodynamiki — że czarna dziura ma określoną temperaturę. Hawking uważał, że to błąd. Obiekty, które mają niezerową temperaturę, muszą świecić, a czarne dziury nie świecą. Czarne dziury są czarne — ich temperatura jest równa zeru.(...)

Hawking badał procesy kreacji i anihilacji cząstek w zakrzywionej czasoprzestrzeni Schwarzschilda — zagadnienie z pogranicza mechaniki kwantowej i teorii grawitacji — aby sprawdzić, czy stacjonarna (niewirująca) czarna dziura może rzeczywiście emitować jakiegokolwiek promieniowanie. Ku swemu zaskoczeniu odkrył, że w wyniku spontanicznej kreacji cząstek w jej sąsiedztwie czarna dziura emituje promieniowanie termiczne. Czarna dziura jednak ma skończoną, niezerową temperaturę! (...) Hawking odkrył, że czarne dziury emitują promieniowanie termiczne (obecnie zwane promieniowaniem Hawkinga), które powoduje, że czarne dziury się kurczą i w końcu wyparowują. (...) Wydaje się, że nikt nie wątpi w istnienie promieniowania Hawkinga, ale jest ono niezwykle słabe. W istocie, czarne dziury o masie Słońca lub większej absorbują więcej promieniowania (kosmicznego promieniowania tła), niż same emitują. Dopiero wtedy, gdy w bardzo odległej przyszłości kosmiczne promieniowanie tła się ochłodzi i ulegnie przesunięciu ku czerwieni, proces parowania czarnych dziur zacznie odgrywać istotną rolę. (...)

Szczegóły procesu parowania oraz jego wpływu na wnętrze czarnej dziury stanowią nadal przedmiot ożywionych debat. Niektórzy fizycy sądzą, że antycząstki (lub cząstki) wykreowane tuż poniżej horyzontu zdarzeń, odseparowane od cząstek (lub antycząstek) Hawkinga wyemitowanych poza horyzont, mogą utworzyć *firewall*, ścianę gorących fotonów tuż poniżej horyzontu zdarzeń, która zabije każdego astronautę przekraczającego horyzont. Ten efekt może się stać istotny dopiero, gdy z czarnej dziury wyparuje ponad połowa jej masy, co nastąpi w odległej przyszłości. Szczegóły zależą od stanu kwantowego, który tworzy się wokół czarnej dziury. (...)

Dobrze pamiętam, nasze podniecenie, gdy Hawking odwiedził Caltech, aby nam opowiedzieć o swoim odkryciu, że czarne dziury parują. Zebraniu przewodniczył Kip Thorne, światowy ekspert od czarnych dziur. Wśród słuchaczy był Murray Gell-Mann, laureat Nagrody Nobla. Thorne, przedstawiając Hawkinga, zapewniał nas o rewolucyjnej wadze tych badań. Całkowicie się z nim zgadzam — to jest najważniejszy rezultat w ogólnej teorii względności od czasów Einsteina. Badaniom czarnych dziur Stephen Hawking zawdzięcza swoją światową sławę. Niektóre z tych interesujących wydarzeń zostały odtworzone w filmie *Teoria wszystkiego*. Eddie Redmayne tak realistycznie i tak przekonująco zagrał głównego bohatera w tym wspaniałym filmie o Hawkingu, że rola przyniosła mu Oscara dla najlepszego aktora.

* To jest rozwiązanie dla czasoprzestrzeni, a nie przestrzeni, a czarna dziura jako etap końcowy kolapsu została wprowadzona później.

Tytuł oryginału

Welcome to the Universe: An Astrophysical Tour

Copyright © 2016 by Neil deGrasse Tyson, Michael A. Strauss, and J. Richard Gott

All rights reserved

Copyright © 2019 for the Polish translation by Zysk i S-ka Wydawnictwo s.j., Poznań

Redaktor prowadzący

Dariusz Wojtczak

Redakcja

Zofia Domańska

Konsultacja naukowa

dr Sławomir Brzezowski (UJ)

dr hab. Lech Sokołowski (UJ)