

Grawitacja to jedno z czterech oddziaływań fundamentalnych. Przedmiotem tej książki jest klasyczna teoria grawitacji, czyli ogólna teoria względności Einsteina. Ogólna teoria względności ma podstawowe znaczenie dla zrozumienia wielu badanych współcześnie zjawisk astronomicznych, takich jak czarne dziury, pulsary, kwazary, końcowe stadia ewolucji gwiazd, Wielki Wybuch – cały Wszechświat. Teoria ta wyjaśnia również drobne rozbieżności między rzeczywistymi orbitami planet i przewidywaniami wynikającymi z praw Newtona; bez uwzględniania takich relatywistycznych poprawek nie mógłby działać powszechnie używany Globalny System Wyznaczania Pozycji (GPS *Global Positioning System*). Jako jedno z oddziaływań fundamentalnych, grawitacja ma zasadnicze znaczenie dla poszukiwań jednolitej teorii wszystkich oddziaływań; wiele koncepcji takich „teorii ostatecznych” wywodzi się z teorii względności.

Fizyka zjawisk grawitacyjnych jest zatem nauką mającą dwa obszary – odgrywa ważną rolę zarówno w zakresie największych, jak i najmniejszych odległości rozważanych we współczesnej fizyce. W największej skali teoria grawitacji wiąże się z astrofizyką i kosmologią, natomiast w najmniejszej – z kwantową fizyką cząstek elementarnych. Te dwa fronty łączyły się w chwili Wielkiego Wybuchu, gdy cały obserwowalny Wszechświat był ściśnięty w minimalnej możliwej objętości. W tym elementarnym podręczniku zajmujemy się tylko *klasyczną* (niekwantową) teorią grawitacji, której bezpośrednie zastosowania dotyczą przede wszystkim dużych skal odległości, ale pojęcia i metody wypracowane w tej dziedzinie pojawiają się ponownie w innym przebraniu, gdy rozpatrujemy zjawiska zachodzące na bardzo małych odległościach. W tym rozdziale, mającym charakter wstępu, rozważymy pokrótce zjawiska, których opis wymaga zastosowania klasycznej ogólnej teorii względności.

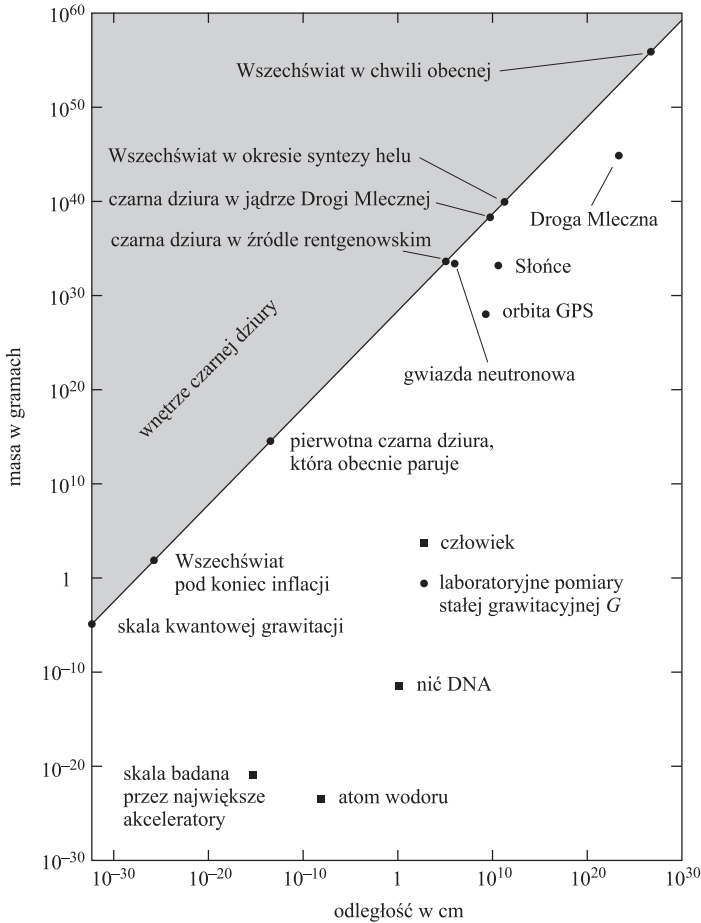
Ogólna teoria względności wywodzi się z pojęciowej rewolucji, jaka nastąpiła w fizyce po sformułowaniu przez Einsteina szczególnej teorii względności. Znane od ponad trzech wieków prawo powszechnego ciążenia Newtona jest niezgodne ze szczególną teorią względności. Zgodnie z prawem Newtona dwa ciała o masach m_1 i m_2 przyciągają się z siłą o wartości wynoszącej:

$$F_{\text{graw}} = \frac{Gm_1m_2}{r_{12}^2}, \quad (1.1)$$

gdzie r_{12} jest odległością między nimi, a G to stała grawitacyjna, mająca wartość $6,67 \times 10^{-8}$ dyn cm²/g². Zgodnie z prawem Newtona siła grawitacyjna działa natychmiast na odległość. Siła, wywierana na jedno ciało, zależy od położenia drugiego ciała w tej samej chwili. Tymczasem szczególnie teoria względności nie dopuszcza natychmiastowych oddziaływań na odległość, gdyż żaden sygnał nie może rozchodzić się szybciej, niż wynosi prędkość światła. Wobec tego prawo powszechnego ciążenia Newtona może być tylko pewnym przybliżeniem bardziej fundamentalnej teorii.

W 1915 roku prowadzone przez Einsteina poszukiwania nowej, relatywistycznej teorii grawitacji nie przyniosły po prostu nowego wzoru, określającego siłę grawitacji, czy też teorii relatywistycznego pola grawitacyjnego, lecz doprowadziły do głębokiej rewolucji w naszych poglądach na naturę czasu i przestrzeni. Einstein zauważył, że skoro z doświadczenia wiadomo, iż w polu grawitacyjnym wszystkie ciała spadają z takim samym przyspieszeniem, to grawitację można w naturalny sposób wyjaśnić, odwołując się do pojęcia krzywizny czterowymiarowego połączenia czasu i przestrzeni – *czasoprzestrzeni*. Masa zakrzywia czasoprzestrzeń w swoim otoczeniu, a trajektorie, po których spadają swobodnie wszystkie ciała, są liniami prostymi w tej zakrzywionej czasoprzestrzeni. W teorii newtonowskiej Słońce przyciąga Ziemię i pod działaniem tej siły krąży ona wokół Słońca. W ogólnej teorii względności masa Słońca zakrzywia otaczającą ją czasoprzestrzeń, a Ziemia porusza się w tej zakrzywionej czasoprzestrzeni po trajektorii prostej. Grawitacja to geometria. W dalszej części tego rozdziału krótko przedstawiam różne zjawiska, których zrozumienie wymaga ogólnej teorii względności. Pewne cechy oddziaływań grawitacyjnych, które pomagają wyjaśnić, kiedy grawitacja jest istotna, wynikają już z prawa powszechnego ciążenia Newtona (1.1):

- Zgodnie z teorią Newtona wszystkie masy przyciągają się grawitacyjnie, a skoro $E = mc^2$, to w teorii relatywistycznej wszelkie formy energii oddziałują grawitacyjnie.
- Grawitacji nie można ekranować. Nie istnieją ujemne ładunki grawitacyjne, które mogłyby zrównoważyć działanie ładunków dodatnich, a zatem ekranowanie oddziaływań grawitacyjnych jest niemożliwe. Grawitacja zawsze jest siłą przyciągającą.
- Grawitacja to oddziaływanie o dalekim zasięgu. Zgodnie z prawem powszechnego ciążenia siła grawitacyjna maleje jak $1/r^2$. Nie istnieje żadna skala odległości, charakteryzująca oddziaływania grawitacyjne, tak jak w przypadku silnych i słabych oddziaływań jądrowych.
- Grawitacja jest najsłabszym z czterech oddziaływań fundamentalnych występujących między cząstkami w dostępnym nam zakresie energii. Stosunek przyciągania grawitacyjnego do elektromagnetycznego odpychania między dwoma protonami położonymi



Rysunek 1.1. Teoria grawitacji zajmuje się zjawiskami zachodzącymi we wszystkich skalach, od mikroskopowej do kosmologicznej – największej, jaka jest rozpatrywana we współczesnej fizyce. W całym tym zakresie odległości i mas znane są zjawiska, w których grawitacja odgrywa ważną rolę. Rysunek przedstawia charakterystyczne masy M i odległości R dla różnych układów. Kropki oznaczają zjawiska, w których grawitacja jest istotna. Natomiast kwadracikami oznaczono zjawiska, w których grawitacja nie odgrywa większej roli. Zjawiska, którym odpowiadają punkty powyżej linii diagonalnej, są nieobserwowalne, gdyż zachodzą wewnątrz czarnych dziur. W zjawiskach, którym odpowiadają punkty położone blisko linii $2GM = c^2R$, mają znaczenie relatywistyczne efekty grawitacyjne. Największe skale stanowią obszar badań astrofizyki i kosmologii; najmniejsze – związane są z fizyką cząstek elementarnych. Najmniejsza zaznaczona odległość ($\sim 10^{-33}$ cm) to długość Plancka, stanowiąca granicę między klasyczną i kwantową grawitacją. Skale dotyczące Wszechświata w różnych fazach jego historii to średnice kuli, jaką światło mogłoby przebyć od Wielkiego Wybuchu, oraz masa zawarta w takiej kuli, gdyby Wszechświat zawsze rozszerzał się w takim tempie jak obecnie.

w odległości r wynosi:

$$\frac{F_{\text{graw}}}{F_{\text{elek}}} = \frac{Gm_p^2/r^2}{e^2/(4\pi\epsilon_0r^2)} = \frac{Gm_p^2}{(e^2/4\pi\epsilon_0)} \sim 10^{-36}, \quad (1.2)$$

gdzie m_p jest masą protonu, a e to jego ładunek.

Te cztery fakty w znacznej mierze wyjaśniają rolę grawitacji w zjawiskach fizycznych. Tłumaczą na przykład, dlaczego grawitacja, choć jest najsłabszą siłą, decyduje o strukturze Wszechświata w astrofizycznej i kosmologicznej skali odległości. Takie odległości są bez porównania większe niż zasięg słabych i silnych oddziaływań. Oddziaływania elektromagnetyczne *mogłyby* przejawiać się w dużej odległości, gdyby istniały wielkie ciała, mające niezerowy ładunek elektryczny. Wszechświat jest jednak elektrycznie obojętny, a siły elektromagnetyczne o wiele rzędów wielkości przewyższają siły grawitacyjne, więc wszelkie ładunki występujące w dużej skali są bardzo szybko neutralizowane. Pozostaje tylko grawitacja – jedyna siła determinująca strukturę Wszechświata w dużej skali.

W tej książce nie interesujemy się wszystkimi zjawiskami, w których grawitacja jest istotna, lecz tylko takimi, w których ważną rolę odgrywają relatywistyczne efekty grawitacyjne. Jeśli chcemy zrozumieć wewnętrzną budowę Słońca, wystarcza do tego newtonowska teoria grawitacji. Efekty relatywistyczne stają się istotne dla obiektów o masie M i wielkości R tylko wtedy, gdy charakterystyczna bezwymiarowa wielkość, utworzona z użyciem stałej grawitacyjnej G i prędkości światła c ,

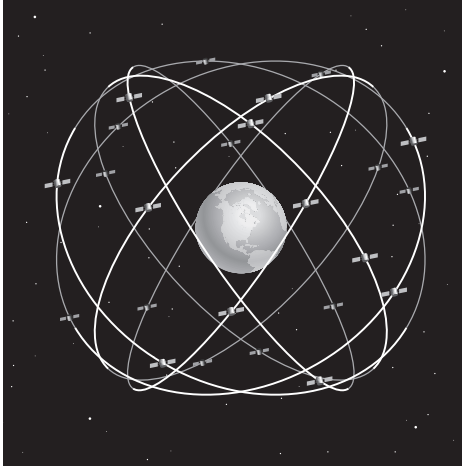
$$\frac{GM}{Rc^2}, \quad (1.3)$$

jest bliska jedności. Rysunek 1.1 przedstawia różne zjawiska zachodzące we Wszechświecie oraz ich charakterystyczne wartości M i R . Relatywistyczne efekty grawitacyjne są najważniejsze dla zjawisk, którym odpowiadają punkty na linii $2GM = c^2R$. Teraz opiszemy nieco bardziej szczegółowo niektóre takie zjawiska.

Precyzyjne pomiary grawitacyjne w Układzie Słonecznym

Jeśli weźmiemy pod uwagę parametr (1.3), Ziemia nie okaże się szczególnie relatywistycznym obiektem: $GM_{\oplus}/c^2R_{\oplus} \sim 10^{-9}$ (\oplus to stosowany w astronomii symbol Ziemi). Jednakże zegary stanowiące podstawę konstrukcji GPS (rys. 1.2) muszą działać z taką dokładnością, że gdyby efekty ogólnej teorii względności zostały pominięte, system zawiódłby już po upływie pół godziny (rozdz. 6).

Dla Słońca (\odot) $GM_{\odot}/c^2R_{\odot} \sim 10^{-6}$, a zatem poprawki wynikające z ogólnej teorii względności w przypadku orbit planet są niewielkie,



Rysunek 1.2. Satelity GPS. Prawidłowe działanie tego systemu wymaga uwzględnienia niewielkich efektów, przewidywanych przez ogólną teorię względności.



Rysunek 1.3. Mgławica Krab. Mgławica ta jest pozostałością po wybuchu supernowej, której światło dotarło do Ziemi w 1054 roku. Źródłem energii mgławicy jest wirująca, relatywistyczna gwiazda neutronowa.

ale można je wykryć, przeprowadzając dokładne pomiary. Na przykład, zmiana położenia peryhelium Merkurego (punktu na orbicie planety położonego najbliżej Słońca), zachodząca przy każdym okrążeniu orbity, jest klasycznym testem ogólnej teorii względności. Z ogólnej teorii względności wynika również, że promienie świetlne przechodzące w pobliżu Słońca ulegają ugięciu, a czas, jakiego potrzebują na pokonanie takiej drogi, jest dłuższy niż to wynika z teorii Newtona. To niewielkie efekty, ale obecnie są zawsze uwzględniane podczas dokładnych obserwacji astronomicznych (rozdz. 10).

Relatywistyczne gwiazdy

Większość gwiazd zawdzięcza równowagę ciśnieniu gazu ogrzewanego przez reakcje termojądrowe, zachodzące w ich centralnych częściach. Ciśnienie gazu równoważy wszechobecne przyciąganie grawitacyjne. Gdy kończy się zapas paliwa jądrowego, gwiazda zaczyna się zapadać pod własnym ciężarem. Jądra niektórych zapadających się gwiazd przechodzą do stanu równowagi, w którym przyciąganie grawitacyjne jest równoważone przez nietermiczne źródła ciśnienia – powstają wtedy zwarte, gęste białe karły i gwiazdy neutronowe. Gwiazdy neutronowe mają masę porównywalną z masą Słońca i promień rzędu 10 km, a zatem są obiektami relatywistycznymi, dla których $GM/c^2R \sim 0,1$. Własności takich gwiazd omawiamy w rozdz. 24. Maksymalna masa gwiazd neutronowych i białych karłów jest równa kilku masom Słońca. Dalsze zapadanie się jąder gwiazd o większej masie prowadzi do powstania czarnych dziur.

Czarne dziury

Zgodnie z ogólną teorią względności czarna dziura powstaje wtedy, gdy dana masa jest ściśnięta w tak małej objętości, że wskutek potężnego przyciągania grawitacyjnego, panującego na jej powierzchni, nic nie może z niej uciec, nawet światło (rozdz. 12 i 15). Z zasad dynamiki i prawa powszechnego ciężenia Newtona wynika, że cząstka o masie m , położona w odległości R od środka masy M , może pokonać jej przyciąganie grawitacyjne, jeśli jej prędkość początkowa jest większa od prędkości ucieczki V_u , takiej że energia kinetyczna cząstki równoważy jej ujemną potencjalną energię grawitacyjną, czyli:

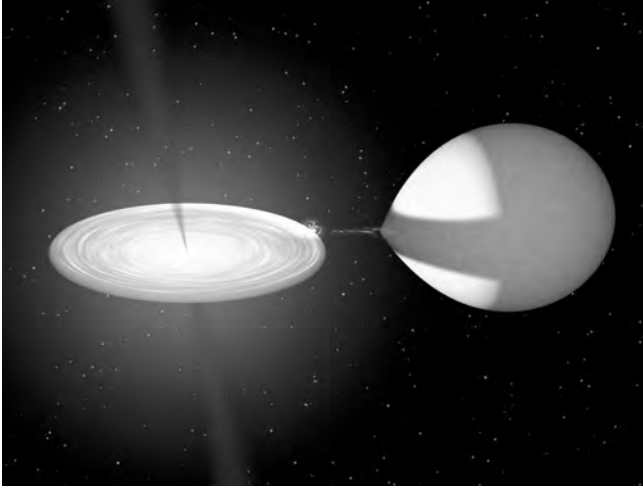
$$\frac{1}{2}mV_u^2 = \frac{GmM}{R}. \quad (1.4)$$

Prędkość ucieczki staje się większa od prędkości światła, gdy:

$$\frac{2GM}{c^2R} > 1. \quad (1.5)$$

Wprowadzając w przypadku relatywistycznym analizę newtonowską nie jest właściwa, ale warunek (1.5) stanowi poprawne, relatywistyczne kryterium powstania sferycznie symetrycznej czarnej dziury o masie M , o ile właściwie zinterpretujemy wielkość R .

Granice czarnej dziury w czasoprzestrzeni stanowi powierzchnia zwana *horyzontem zdarzeń*. Masa, informacja, obserwatorzy i wszelkie inne obiekty mogą przekroczyć horyzont zdarzeń, spadając na czarną dziurę, ale zgodnie z fizyką klasyczną nic nie może wydostać się na zewnątrz spod horyzontu. Choć czarne dziury często powstają w wyniku bardzo burzliwego procesu grawitacyjnego zapadania się gwiazdy,



Rysunek 1.4. Model rentgenowskiego układu podwójnego GRO J1655-40. Gwiazda o dużej masie krąży wokół niewidocznej czarnej dziury. Materia z masywnej gwiazdy spada na czarną dziurę i tworzy gorący dysk, który emituje promieniowanie rentgenowskie.

zgodnie z ogólną teorią względności są obiektami bardzo prostymi, które można w pełni opisać za pomocą kilku parametrów. Jak to wyraził S. Chandrasekhar: „Czarne dziury to ze swej natury najdoskonalsze makroskopowe obiekty istniejące we Wszechświecie, są zbudowane wyłącznie z czasu i przestrzeni. A ponieważ ogólna teoria względności ma tylko jedną rodzinę rozwiązań, które je opisują, są to również najprostsze istniejące obiekty” (Chandrasekhar 1983).

Zaobserwowano czarne dziury o masie kilku mas Słońca, krążące wokół zwykłych gwiazd. W jądrach galaktyk istnieją supermasywne czarne dziury o masie rzędu miliarda mas Słońca. W centrum naszej Drogi Mlecznej znajduje się czarna dziura o masie w przybliżeniu trzech milionów mas Słońca. Obecnie coraz więcej danych wskazuje na to, że czarne dziury istnieją w jądrach *wszystkich* galaktyk o dostatecznie dużej masie.

Wprawdzie czarne dziury są ciemne, ale mocno zakrzywiona czasoprzestrzeń wokół nich stanowi arenę najgwałtowniejszych procesów, jakie zna współczesna astrofizyka. Materia spadająca na czarną dziurę wchodzi na orbitę wokół niej, po czym tworzy gorący dysk. Taki dysk emituje promieniowanie rentgenowskie (rys. 1.4). Materia spadająca na wirującą, namagnesowaną czarną dziurę jest źródłem energii kwazarów. Nie można wykluczyć, że czarne dziury są odpowiedzialne za rozbłyski gamma, wśród których zdarzają się najpotężniejsze eksplozje od czasu Wielkiego Wybuchu (metody wykrywania czarnych dziur oraz ich znaczenie w astrofizyce omawiamy w rozdz. 13).

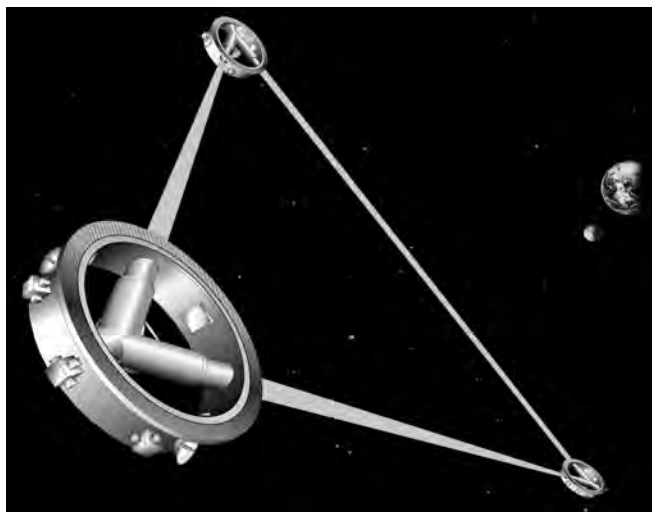
Fale grawitacyjne

Z ogólnej teorii względności wynika, że niewielkie zaburzenia krzywizny czasoprzestrzeni rozchodzą się w pustej przestrzeni z prędkością światła. Są to tak zwane *fale grawitacyjne* (rozdz. 16). Do-

wolne ciało, które w trakcie ruchu nie zachowuje symetrii sferycznej i nie porusza się ruchem prostoliniowym, emituje fale grawitacyjne (rozdz. 23). Do najsilniejszych źródeł fal grawitacyjnych należy zaliczyć zderzenia zwartych gwiazd, łączenie się masywnych czarnych dziur oraz Wielki Wybuch. We Wszechświecie jest dużo poruszających się mas, a tego grawitacyjnego odpowiednika ładunku nie można ekranować. A zatem, jeśli chodzi o promieniowanie grawitacyjne, to Wszechświat nie jest szczególnie ciemny. Zlewające się czarne dziury w jądrach łączących się galaktyk mogą stanowić najpotężniejsze źródła energii we Wszechświecie, której większość zostaje wyemitowana w postaci fal grawitacyjnych. Detekcja promieniowania grawitacyjnego dlatego wiąże się z takimi trudnościami, że jest ono słabo sprzężone z materią (1.2), ale to słabe sprzężenie sprawia również, iż rejestracja fal grawitacyjnych jest tak interesująca. Raz wyemitowane fale grawitacyjne niemal nie ulegają absorpcji. Wobec tego fale grawitacyjne mogą stać się nowym oknem na Wszechświat, które pozwoli nam zobaczyć najwcześniejsze chwile Wielkiego Wybuchu oraz obserwować przebieg procesu powstawania czarnych dziur.

Promieniowania grawitacyjnego nie udało się jeszcze zarejestrować bezpośrednio, w ziemskim laboratorium, ale zaobserwowano wpływ tego promieniowania na ruch jego źródeł. Fale grawitacyjne można wykryć za pomocą dokładnych pomiarów względnego ruchu ciał pod wpływem zaburzenia krzywizny czasoprzestrzeni, tyle że fale z układu podwójnego gwiazd, będącego dla obserwatorów na Ziemi najsilniejszym źródłem fal grawitacyjnych, powodują względną zmianę odległości między dwiema masami próbnymi rzędu 1 do 10^{20} . Nawet w przypadku największego detektora fal grawitacyjnych, jaki został do tej pory zaproponowany – ma on postać układu satelitów odległych od siebie

Rysunek 1.5. Szkic kosmicznego interferometru, służącego do rejestracji fal grawitacyjnych LISA. Wiązki laserowe łączą trzy detektory odległe od siebie o 5 000 000 km. Fale grawitacyjne można wykryć, mierząc niewielkie zmiany odległości między detektorami, spowodowane przejściem fali.



o 5 000 000 km – zmiana odległości byłaby mniejsza od średnicy atomu (rys. 1.5).

Choć wykrycie fal grawitacyjnych stanowi wielkie wyzwanie, obecnie są budowane detektory naziemne i trwają prace studyjne nad detektorami kosmicznymi, które sprawią, że w XXI w. astronomia fal grawitacyjnych stanie się możliwa.

Wszechświat

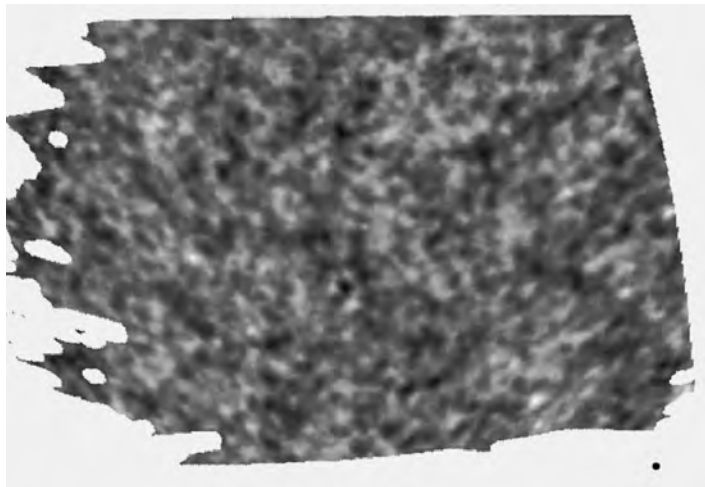
Jak już wspomnieliśmy, grawitacja decyduje o strukturze i ewolucji Wszechświata w największych skalach odległości i czasu. Takie skale są przedmiotem badań *kosmologii* (rozd. 17–19).

Obserwacje ruchu galaktyk dowodzą, że Wszechświat się rozszerza. Ich rozkład w największej skali świadczy o tym, że Wszechświat jest dziś zaskakująco regularny – średnio biorąc, taki sam wszędzie i we wszystkich kierunkach. Pomiary kosmicznego promieniowania tła, wyemitowanego tuż po Wielkim Wybuchu, wskazują, że w przeszłości Wszechświat był jeszcze bardziej jednorodny. Ogólna teoria względności pozwala przewidzieć krzywiznę czasoprzestrzeni takiego regularnego Wszechświata, a także określa jego ewolucję w czasie, dzięki czemu możemy zrozumieć jego powstanie i historię oraz przewidzieć przyszłość.

Z ogólnej teorii względności i obserwacji kosmologicznych wynika, że Wszechświat rozpoczął się od Wielkiego Wybuchu, czyli osobliwości, w której gęstość, temperatura i krzywizna były nieskończone. Choć pod tymi względami Wielki Wybuch był ekstremalny, charakteryzowała go niezwykła regularność przestrzenna. Niewykluczone, że jedyne odstępstwa od ściślej jednorodności stanowiły niewielkie kwantowe fluktuacje gęstości materii, z których pod wpływem przyciągania grawitacyjnego powstały później obserwowane dziś gwiazdy i galaktyki. Liczne właściwości Wszechświata w dużej skali są określone przez grawitację i fizykę cząstek elementarnych w najwcześniejszej fazie jego historii. Poza powstaniem zarodków obecnie obserwowanych struktur w rozkładzie materii w skali kosmicznej, w fazie tej został określony stosunek gęstości materii do antymaterii, materii do promieniowania grawitacyjnego, elektromagnetycznego i neutrinowego, a także pierwotne orbity pierwiastków chemicznych.

Grawitacja kwantowa

W tym podręczniku zajmujemy się klasyczną teorią grawitacji i wspominaemy o teorii kwantowej tylko w jednym miejscu (rozd. 13), ale zagadnienie kwantowej czasoprzestrzeni zasługuje na wzmiankę w każdym przeglądzie ważnych zjawisk grawitacyjnych. Wielkością charakterystyczną dla wszystkich zjawisk kwantowych jest stała



Rysunek 1.6. Obraz Wszechświata kilkaset tysięcy lat po Wielkim Wybuchu. Mapa otrzymana w eksperymencie Boomerang przedstawia fluktuacje temperatury mikrofalowego promieniowania tła, odpowiadające zaburzeniom jednorodności Wszechświata, z których następnie powstały galaktyki. Różnica temperatury między najjaśniejszymi i najciemniejszymi obszarami jest rzędu milikelwina.

Plancka \hbar . Dla kwantowych zjawisk grawitacyjnych charakterystyczne są jednoznacznie określone kombinacje stałych \hbar , G i c o wymiarze długości, czasu, energii i gęstości:

$$\begin{aligned}
 \ell_{\text{Pl}} &\equiv (G\hbar/c^3)^{1/2} = 1,62 \times 10^{-33} \text{ cm}, \\
 t_{\text{Pl}} &\equiv (G\hbar/c^5)^{1/2} = 5,39 \times 10^{-44} \text{ s}, \\
 E_{\text{Pl}} &\equiv (\hbar c^5/G)^{1/2} = 1,22 \times 10^{19} \text{ GeV}, \\
 \rho_{\text{Pl}} &\equiv c^5/\hbar G = 5,16 \times 10^{93} \text{ g/cm}^3.
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

Wielkości te nazywamy długością, czasem, energią i gęstością Plancka. Zjawisk zachodzących w takich skalach nie można opisywać za pomocą klasycznej ogólnej teorii względności Einsteina, ponieważ w takiej sytuacji istotną rolę powinny odgrywać kwantowe fluktuacje klasycznej geometrii czasoprzestrzeni. W takim wypadku należy posłużyć się kwantową teorią grawitacji, dla której ogólna teoria względności Einsteina stanowi klasyczne przybliżenie.

Wystarczy rzut oka na liczby we wzorach (1.6), by się przekonać, że domena, w której istotną rolę odgrywają kwantowe własności czasoprzestrzeni, jest bardzo odległa zarówno od codziennego doświadczenia, jak i możliwości badań laboratoryjnych. O ile wiemy, warunki scharakteryzowane przez skalę Plancka są spełnione tylko w dwóch sytuacjach: w Wielkim Wybuchu, w którym powstał Wszechświat (rozd. 17–19), oraz podczas kwantowego procesu parowania czar-

nych dziur (rozd. 13). Mimo to kwantowa grawitacja zajmuje ważne miejsce w dwóch dziedzinach badań współczesnej fizyki. Pierwszą są poszukiwania jednolitej teorii wszystkich oddziaływań fundamentalnych, w tym grawitacji, której prostota stałaby się widoczna w zakresie energii porównywalnych z energią Plancka E_{Pl} . Drugim takim obszarem są poszukiwania kwantowych warunków początkowych dla całego Wszechświata. We wczesnej fazie historii Wszechświata, podczas Wielkiego Wybuchu i chwilę później, duże i małe skale są ze sobą połączone. Największy układ fizyczny jest ściśnięty do minimalnej wielkości i osiąga maksymalną energię. W książce tej nie omawiamy kwantowej grawitacji, ale klasyczna teoria grawitacji, którą się tu zajmujemy, stanowi konieczny wstęp do zrozumienia granic współczesnej fizyki.