

■ GŁADKI WSZECHŚWIAT

We Wszechświecie bez zaburzeń gęstości i fal grawitacyjnych promieniowanie mikrofalowe tła (MPT) będzie idealnie jednorodne.

Badania niewielkich zmarszczek w czasoprzestrzeni spowodowanych falami grawitacyjnymi pozwolą naukowcom wejrzeć w początki Wszechświata

Echa Wielkiego Wybuchu

Robert R. Caldwell i Marc Kamionkowski

Kosmolodzy wciąż zadają te same pytania, co pierwsi obserwatorzy gwiazd wpatrujący się w nocne niebo. Skąd wziął się Wszechświat? Co było wcześniej? Jak osiągnął on stan obecny i co go czeka? Wprawdzie teoretycy już od dawna zastanawiają się nad początkiem Wszechświata, to jednak dopiero obecnie mogą bezpośrednio badać najwcześniejsze etapy jego ewolucji i sprawdzać swoje hipotezy. Zaledwie kilka lat temu znaleziono sposób na obserwowanie początkowych momentów ewolucji Wszechświata, tuż po Wielkim Wybuchu. Polega on na poszukiwaniu śladów fal grawitacyjnych w mikrofalowym promieniowaniu tła MPT, tzw. promieniowaniu reliktowym, które od około 15 mld lat przenika cały Wszechświat.

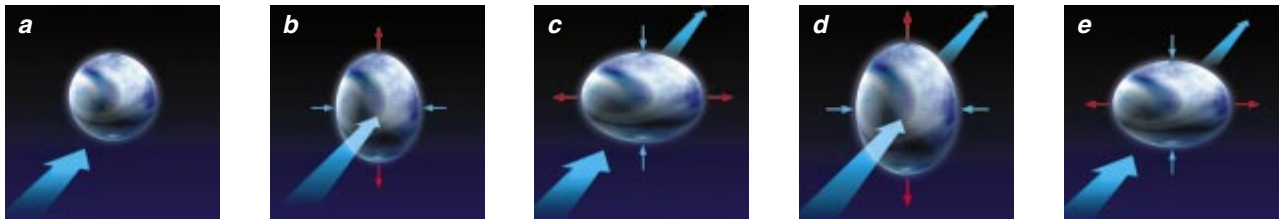
To promieniowanie zostało wyemitowane około 500 tys. lat po Wielkim Wybuchu, gdy pierwotna plazma złożona głównie z elektronów i protonów – gorąca mieszanina subatomowych cząstek wypełniających wczesny Wszechświat – tak się oziębiła, że mogły powstać atomy wodoru. Ponieważ niesie ono informację o Wszechświecie z tego właśnie okresu, uważa się je za kosmologiczny kamień z Rosetty. Po odkryciu MPT w 1965 roku radioastronomowie stwierdzili, że jego temperatura – miara natę-

żenia promieniowania ciała doskonale czarnego – wynosi 2.7 K niezależnie od tego, na jaki obszar nieba patrzyli. Innymi słowy, MPT okazało się izotropowe, co świadczy o tym, że wczesny Wszechświat był niezwykle jednorodny. Na początku lat dziewięćdziesiątych satelita COBE (Cosmic Background Explorer – Badacz Kosmicznego Tła) odkrył jednak niewielkie różnice temperatury tego promieniowania rzędu jednej stutysięcznej. Świadczą one o tym, że w pierwotnym plazmie istniały niewielkie zagęszczenia i rozrzedzenia. Te pierwotne niejednorodności w rozkładzie materii doprowadziły później do powstania wielkoskalowej struktury Wszechświata przejawiającej się w przestrzennym rozkładzie galaktyk i gromad galaktyk.

Pod koniec lat dziewięćdziesiątych kilka detektorów naziemnych oraz umieszczonych w gondolach balonów stratosferycznych obserwowało MPT ze znacznie lepszą zdolnością rozdzielczą niż COBE. Dzięki nim odkryto, że pierwotna plazma była niejednorodna w skali kątowej mniejszej od jednego stopnia. (Dla porównania: średnica kąta wa Księżyca w pełni wynosi około pół stopnia.) Wielkość tych pierwotnych struktur świadczy o tym, że geometria Wszechświata jest płaska [patrz: RAPORT SPECJALNY „Rewolucja w kosmologii”; *Świat Nauki*, marzec 1999]. Obserwacje te są zgodne z teorią inflacji,

która zakłada, że przez pewien czas, niemal natychmiast po Wielkim Wybuchu, Wszechświat rozszerzał się niezwykle szybko. W tym roku NASA planuje wystrzelenie satelity MAP (Microwave Anisotropy Probe – sondy do obserwacji anizotropii promieniowania mikrofalowego), która bardzo dokładnie zmierzy temperaturę MPT na całym niebie [patrz: „Kosmiczny kartograf”, strona 28]. Przygotowywany przez Europejską Agencję Kosmiczną satelita Planck, który zostanie wystrzelony w 2007 roku, pozwoli określić własności tego promieniowania jeszcze dokładniej. Kosmolodzy spodziewają się, że obserwacje te dostarczą niezwykle cennych informacji o wczesnym Wszechświecie.

W szczególności badacze mają nadzieję na znalezienie bezpośredniego śladu po epoce inflacyjnej. Najważniejszym dowodem – przysłowiową dymiącą strzelbą – byłoby zaobserwowanie inflacyjnych fal grawitacyjnych. W 1918 roku Albert Einstein przewidział istnienie fal grawitacyjnych jako konsekwencji swojej ogólnej teorii względności. Fale grawitacyjne przypominają fale elektromagnetyczne, takie jak promienie X, fale radiowe czy światło, które są rozchodzącymi się zaburzeniami pola elektromagnetycznego. Tak jak światło lub fale radiowe mogą one przenosić informację i energię od źródła, które je wytwarza. Co wię-



FALE GRAWITACYJNE

Wprawdzie fal grawitacyjnych nie zaobserwowano dotąd bezpośrednio, teoria przewiduje jednak, że mogą one zostać odkryte, gdyż powodują rozciąganie i kurczenie się przestrzeni, w której się rozchodzą. Fala grawitacyjna padająca na kulistą masę (a) rozciągnie ją w jedną stronę i skurczy w kierunku prostopadłym (b). Następnie obszar ściśnięty zostanie rozciągnięty (c) i takie odkształcenia będą się powtarzały z częstością padającej fali (d i e). Odkształcenia pokazano tu w sposób mocno przesadzony; fale grawitacyjne są na ogół niezwykle słabe i nie wywołują mierzalnych efektów.



ZABURZONY WSZECHŚWIAT

Niezwykle szybkie rozszerzanie się Wszechświata zaraz po Wielkim Wybuchu spowodowało powstanie fal grawitacyjnych. Fale te rozrzedzały i kurczyły pierwotną plazmę, wprawiając ją w ruch na sferycznej powierzchni, z której zostało wyemitowane promieniowanie MPT. Ruchy te z kolei spowodowały przesunięcie w stronę czerwonej lub niebieskiej części widma fotonów promieniowania MPT i jego polaryzację. Na rysunku pokazano zaburzenie spowodowane przez falę grawitacyjną poruszającą się między biegunami, jej długość wynosi jedną czwartą promienia sfery.

cej, fale grawitacyjne mogą się rozchodzić w ośrodku, który pochłania wszystkie postacie promieniowania elektromagnetycznego. Podobnie jak promieniowanie rentgenowskie pozwala lekarzowi zajrzeć do wnętrza ciała pacjenta przez tkanki, które nie przepuszczają światła, tak fale grawitacyjne powinny umożliwić badaczom obserwację zjawisk astrofizycznych nie dających się zobaczyć w żaden inny sposób. Fal grawitacyjnych nie zarejestrowano dotąd bezpośrednio, niemniej obserwacje astronomiczne potwierdzają, że fale takie generowane są przez pary hipergęstych obiektów, jak gwiazdy neutronowe i czarne dziury, które poruszając się po spiralnej trajektorii, wzajemnie na siebie spadają.

Plazma, która wypełniała Wszechświat w ciągu pierwszych 500 tys. lat jego istnienia, była nieprzezroczysta dla promieniowania elektromagnetycznego, gdyż morze subatomowych cząstek natychmiast rozpraszało emitowane wówczas fotony. To dlatego astronomowie nie mogą zaobserwować sygnału elektromagnetycznego wysłanego wcześniej niż MPT. Natomiast fale grawitacyjne mogły przemieszczać się w plazmie. Co więcej, teoria inflacji przewiduje, że w okresie bardzo szybkiego rozszerzania się Wszechświata, w 10^{-38} s po Wielkim Wybuchu, powinny powstać fale grawitacyjne. Jeżeli teoria ta jest prawdziwa, to te pierwotne fale grawitacyjne rozchodziły się po całym Wszechświecie i 500 tys. lat póź-

niej pozostawiły ślad w postaci drobnych niejednorodności w MPT, który da się obecnie obserwować.

Fale z inflacji

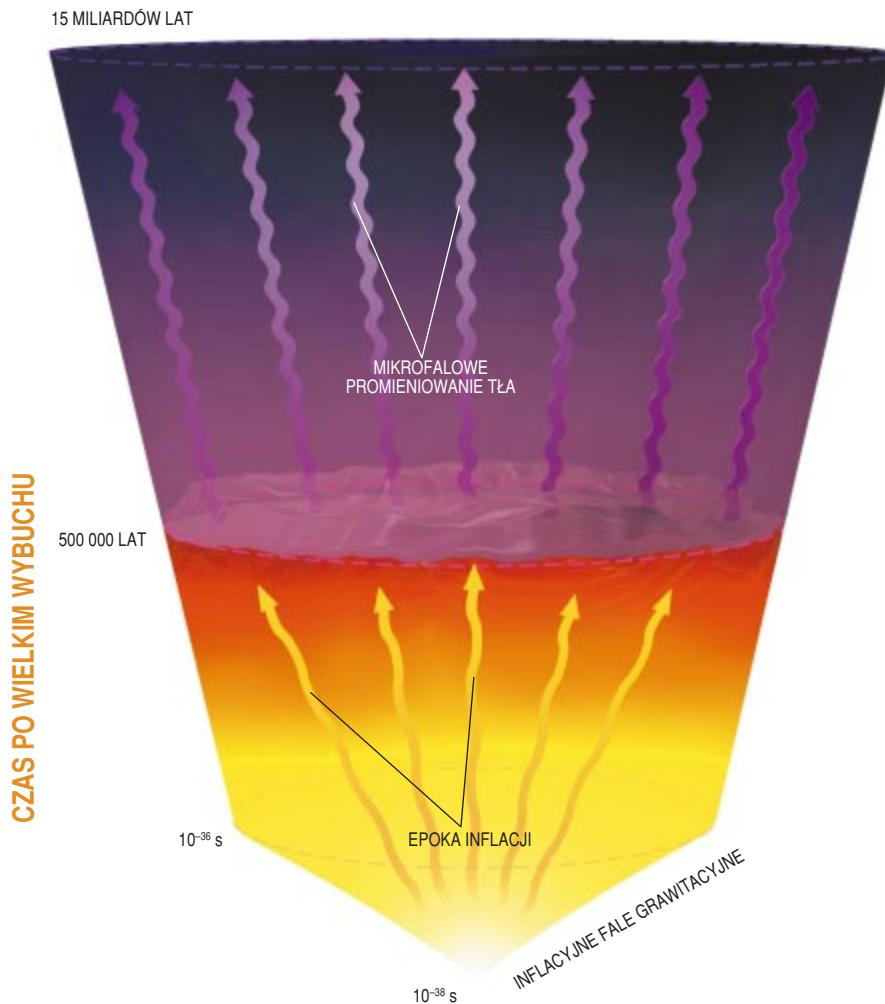
Aby zrozumieć, w jaki sposób inflacja mogła wytworzyć fale grawitacyjne, rozważmy fascynującą konsekwencję mechaniki kwantowej: pusta przestrzeń wcale nie jest taka pusta. Przez cały czas spontanicznie kreowane i unicestwiane są w niej wirtualne pary cząstek. Zasada nieoznaczoności Heisenberga stwierdza, że para cząstek o energii ΔE może się nagle pojawić i istnieć przez czas Δt , zanim się one wzajemnie nie unicestwią, jeżeli $\Delta E \Delta t < \hbar/2$, gdzie \hbar jest zredukowaną stałą Plancka (1.055×10^{-34} J/s). I nie ma co się martwić o wirtualne jabłka lub banany pojawiające się nagle w pustej przestrzeni, bowiem spontanicznie mogą powstawać jedynie cząstki elementarne, a nie skomplikowane układy atomów.

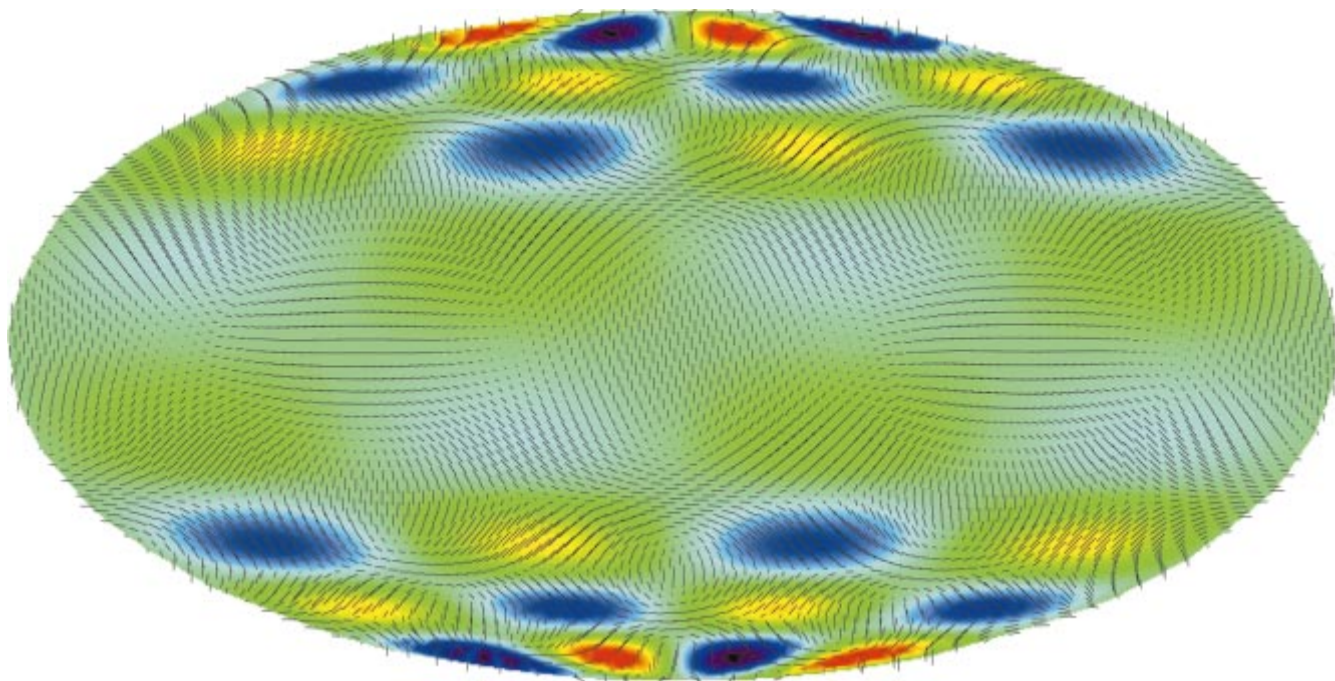
Jedną z cząstek elementarnych podlegających temu procesowi kreacji jest grawiton – kwant pola grawitacyjnego (analogiczny do fotonu pola elektromagnetycznego). Pary wirtualnych grawitonów stale powstają i znikają. Jednak podczas inflacji wirtualne grawitony mogły zostać rozdzielone znacznie szybciej, niż ulec anihilacji. Dzięki temu wirtualne cząstki staną się cząstkami rzeczywistymi. Co więcej, niezwykle szybkie rozszerzanie się Wszechświata rozciągnie mikroskopową długość fali grawitonu do rozmiarów makroskopowych. W ten sposób inflacja mogła wykorzystać energię na produkcję grawitonów, generując jednocześnie widmo fal grawitacyjnych odzwierciedlające warunki panujące we Wszechświecie w pierwszych chwilach po Wielkim Wybuchu. Jeżeli inflacyjne fale grawitacyjne faktycznie istnieją, to są one najstarszymi relikami we Wszechświecie, powstałymi 500 tys. lat przed wyemitowaniem MPT.

Mikrofalowe promieniowanie tła składa się głównie z fal o długości od jednego do 5 mm (z maksimum natężenia przy długości fali 2 mm), natomiast długości inflacyjnych fal grawitacyjnych mogą być zawarte w znacznie szerszym przedziale od 1 cm do 10^{23} km, czyli do rozmiarów obecnie obserwowanego Wszechświata. Teoria inflacyjna przewiduje, że najdłuższe fale grawitacyjne powinny mieć największe natężenie, które zależy od tempa rozszerzania się Wszechświata w epoce inflacyjnej. Tempo to jest proporcjonalne do skali energii, przy której następuje inflacja, a tę określa temperatura Wszechświata w momencie rozpoczęcia inflacyjnego rozszerzania. Ponieważ zaś temperatura Wszech-

HISTORIA WSZECHŚWIATA

Podczas inflacji – okresu niezwykle szybkiego rozszerzania się Wszechświata tuż po Wielkim Wybuchu – dzięki procesom kwantowym powstawały fale grawitacyjne. Fale te rozchodziły się w pierwotnej plazmie i zaburzały MPT, które zostało wyemitowane około 500 tys. lat później. Obserwując dziś odpowiednio precyzyjnie MPT, kosmolodzy mogą odkryć ruch plazmy spowodowany przez inflacyjne fale grawitacyjne.





■ ŚLADY ODCIŚNIĘTE W PROMIENIOWANIU

Inflacyjne fale grawitacyjne powinny pozostawić wyraźny ślad w mikrofalowym promieniowaniu tła. Oto jak wygląda symulacja wahań temperatury i rozkładu polaryzacji, które mogły powstać w wyniku zaburzeń przedstawionych na dolnej ilustracji na stronie 23. Czerwone i niebieskie plamy to zimniejsze i cieplejsze obszary MPT, a krótkie odcinki obrazują rozkład kąta polaryzacji promieniowania MPT na całej sferze niebieskiej.

świata rośnie w miarę przybliżania się do momentu Wielkiego Wybuchu, natężenie fal grawitacyjnych zależy od czasu, w którym rozpoczęła się inflacja.

Niestety, kosmolodzy nie potrafią wyznaczyć tego momentu, gdyż nie wiedzą, co spowodowało inflację. Niektórzy fizycy uważają, że inflacja rozpoczęła się, gdy trzy fundamentalne oddziaływania – silne, słabe i elektromagnetyczne – oddzieliły się wkrótce po powstaniu Wszechświata. Zgodnie z tą teorią w momencie narodzin Wszechświata te trzy oddziaływania były nierozróżnialne, ale rozdzieliły się 10^{-38} s po Wielkim Wybuchu i ten proces w jakiś sposób spowodował gwałtowne rozszerzanie się Wszechświata. Jeśli ta teoria jest poprawna, to inflacja rozpoczęła się przy energii rzędu 10^{15} – 10^{16} GeV. (1 GeV to energia, jaką uzyska elektron po pokonaniu różnicy potencjału 10^9 V; najpotężniejsze obecnie akceleratory przyspieszają cząstki do energii 10^3 GeV.) Z kolei jeśli inflacja została spowodowana przez jakieś inne procesy fizyczne zachodzące później, pierwotne fale grawitacyjne będą miały mniejsze natężenie.

Fale grawitacyjne wytworzone w pierwszym ułamku sekundy po Wiel-

kim Wybuchu będą się rozchodziły wiecznie i nawet obecnie mogą się przemieszczać we Wszechświecie. Jak kosmolodzy mogą je zaobserwować? Rozpatrzmy najpierw, jak zwykle radio odbiera sygnały radiowe. Fale radiowe to drgające pola elektryczne i magnetyczne, powodujące przemieszczanie się elektronów w antenie odbiornika. Ruch elektronów wytwarza prąd elektryczny, który odbiornik rejestruje.

Podobnie fala grawitacyjna powoduje oscylacyjne rozciąganie i ściskanie przestrzeni, w której się rozchodzi. Te oscylacje wywołują niewielkie względne ruchy w układzie swobodnie poruszających się cząstek. Pod koniec lat pięćdziesiątych fizyk Hermann Bondi z King's College w Londynie starał się przekonać sceptyków o realności takich fal, opisując ich hipotetyczny detektor. Byłaby to para pierścieni zawieszonych swobodnie na długim, sztywnym pręcie. Padająca na taki układ fala grawitacyjna o amplitudzie h i częstotliwości f powodowałaby następujące po sobie ściskanie i rozciąganie pręta o długości L o $h \times L$, z częstotliwością f . Ciepło wydzielone dzięki tarcu pierścieni o pręt byłoby dowodem, że fale grawitacyjne niosą energię.

Naukowcy właśnie budują skomplikowane detektory fal grawitacyjnych, w których wykorzysta się lasery do śledzenia niewielkich ruchów zawieszonych mas [ranka na następnej stronie]. Odległość między próbnymi masami determinuje zakres długości fal, które to urządzenie może monitorować. W największym naziemnym detektorze masy wiszą w odległości 4 km od siebie i dlatego będzie on mógł mierzyć drgania spowodowane falami grawitacyjnymi o długości od 30 do 30 000 km; planowany detektor kosmiczny powinien rejestrować fale tysiąc razy dłuższe. Długości fal grawitacyjnych wytwarzanych przez zlewające się gwiazdy neutronowe lub zderzenia czarnych dziur mieszczą się akurat w tym zakresie, da się więc je zidentyfikować za pomocą tych nowych urządzeń. Niestety, inflacyjne fale grawitacyjne o tej długości są zbyt słabe, aby reagowały na nie te detektory.

Najsilniejsze inflacyjne fale grawitacyjne to te o długości porównywalnej ze średnicą obserwowanego dziś Wszechświata. Aby je wykryć, trzeba śledzić zbiór swobodnie poruszających się cząstek znajdujących się od siebie w podobnych odległościach. Zupełnie niespodziewanie natura stworzyła taki układ w postaci pierwotnej plazmy, będącej źródłem MPT. Podczas 500 tys. lat, które upłynęły od epoki inflacyjnej do momentu wyemitowania MPT, superdługie fale grawitacyjne rozchodziły się we Wszechświecie, na przemian sprężając i rozprężając plazmę [ilustracja na sąsiedniej stronie]. Badacze mogą obecnie obserwować te oscylacyjne ruchy, poszukując drobnych przesunięć Dopplera w MPT.

Łowcy fal

Wkrótce będą gotowe nowe detektory

Fale grawitacyjne wytworzone przez procesy kwantowe podczas inflacji z pewnością nie są jedynymi, jakie mogą rozchodzić się we Wszechświecie. Wiele układów astrofizycznych, takich jak obiegające się wzajemnie gwiazdy podwójne, zlewające się gwiazdy neutronowe czy zderzające się czarne dziury, powinno również emitować silne fale grawitacyjne. Zgodnie z przewidywaniami ogólnej teorii względności fale grawitacyjne emituje każdy układ fizyczny, którego ruchy wewnętrzne nie wykazują symetrii sferycznej. A więc dwie gwiazdy wzajemnie się obiegające będą wytwarzały fale grawitacyjne, natomiast pojedyncza gwiazda nie.

Kłopot z wykryciem fal grawitacyjnych polega na tym, że natężenie fal grawitacyjnych maleje w miarę, jak się one rozchodzą w coraz to większym obszarze. Zlewanie się gwiazd neutronowych lub zderzenia czarnych dziur to bezsprzecznie jedne z najgwałtowniejszych kataklizmów we Wszechświecie, jednak wytwarzane w tych procesach fale grawitacyjne po przebyciu setek milionów lat świetlnych w drodze do Ziemi są niezwykle słabe. Na przykład fale grawitacyjne wytworzone miliard lat świetlnych od nas przez zderzające się czarne dziury mogłyby zmienić odległość pomiędzy dwiema swobodnie poruszającymi się masami, skracając ją lub wydłużając zaledwie o 10^{-21} .

Aby zmierzyć takie niewielkie wahania, badacze przygotowują LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory – Laserowe Interferometryczne Obserwatorium Fal Grawitacyjnych). Składa się ono z dwóch stacji: jednej w Livingston w Luizjanie, a drugiej w Hanford w stanie Waszyngton (na zdjęciach). W każdej z nich znajduje się para rur o długości 4 km ułożonych w literę L. W rurach tych wiązki światła laserowego będą się odbijały tam i z powrotem od doskonale wypolerowanych zwierciadeł. Dostrajając je tak, by interferowały ze sobą, naukowcy będą mogli rejestrować niewielkie zmiany odległości między zwierciadłami i mierzyć je z dokładnością do 10^{-17} cm (około miliardowej części średnicy atomu wodoru). Wyniki pomiarów z Livingston będą następnie porównywane z wynikami z Hanford, aby wyeliminować lokalne zaburzenia, które mogłyby imitować fale grawitacyjne, na przykład fale sejsmiczne, szумы akustyczne czy niestabilności lasera.

Fizycy budują też mniejsze detektory, które będą współpracować z LIGO, co pozwoli na dokładniejsze wyznaczenie położenia źródeł fal grawitacyjnych. Są to na przykład TAMA (w pobliżu Tokio), Virgo (w okolicach Pizy we Włoszech) i GEO



ALEX DESSELLE / Skyview Technologies



G. WHITE

(pod Hanowerem w Niemczech). Aby śledzić jeszcze dłuższe fale grawitacyjne, NASA wraz z Europejską Agencją Kosmiczną zamierzają wystrzelić w 2010 roku Laser Interferometer Space Antenna (Laserową Interferometryczną Antenę Kosmiczną). Ten detektor będzie się składał z trzech identycznych satelitów, ustawionych w trójkąt równoboczny o boku 5 mln kilometrów i przesyłających między sobą sygnały laserowe. Niestety, żadne z tych urządzeń nie będzie wystarczająco czułe, by wykryć fale grawitacyjne wytworzone podczas inflacji. Ich obecność mogą ujawnić jedynie obserwacje mikrofalowego promieniowania tła.

Jeżeli w momencie wyemitowania MPT fala grawitacyjna rozciągała obszar z plazmą w naszym kierunku – tzn. w kierunku tych rejonów Wszechświata, z których następnie powstała nasza Galaktyka – promieniowanie z tego obszaru będzie przesunięte ku niebieskiej części widma, gdyż nastąpiło skrócenie długości fali (co spowodowało jednocześnie niewielki wzrost temperatury w tym obszarze). I odwrotnie, jeśli fala grawitacyjna powodowała ścisnienie obszaru plazmy wzdłuż linii widzenia podczas emitowania MPT, promieniowanie będzie się wydawało bardziej czerwone, gdyż zostało przesunięte ku dłuższemu falom (i niższej temperaturze). Badając niebieskie i czerwone pla-

my w MPT – które odpowiadają cieplejszym i chłodniejszym obszarom – badacze będą prawdopodobnie mogli zaobserwować ruchy plazmy spowodowane przez inflacyjne fale grawitacyjne. Sam Wszechświat stanie się detektorem fal grawitacyjnych.

Znaczenie polaryzacji

Jednak zadanie to nie jest takie proste. Jak już wspomnieliśmy na początku artykułu, niejednorodności w rozkładzie materii też powodują wahania temperatury MPT. (Na przykład pole grawitacyjne w obszarach, gdzie plazma jest gęstsza, przesunie ku czerwieni długości fal fotonów wyemitowanych z tego

obszaru, powodując powstanie różnic temperatury obserwowanych przez COBE.) Gdyby kosmolodzy mierzyli jedynie temperaturę promieniowania, nie byłoby w stanie stwierdzić, jaka część tych różnic (jeśli w ogóle jakaś) została spowodowana przez fale grawitacyjne. Dzięki obserwacjom COBE i innych detektorów MPT wiadomo, że fale grawitacyjne nie mogły spowodować różnic temperatury większych niż rzędu jednej stutysięcznej. Ten fakt prowadzi do interesującego ograniczenia dotyczącego procesu fizycznego, który spowodował inflację – skala energii inflacji musi być mniejsza od około 10^{16} GeV, a zatem epoka inflacyjna nie mogła rozpocząć się wcześniej niż 10^{-38} s po Wielkim Wybuchu.

Ale jak dowiedzieć się czegoś więcej? W jaki sposób kosmolodzy mogą ominąć trudności wynikające z niepewności co do pochodzenia fluktuacji temperatury? Odpowiedź ma związek z własnościami polaryzacyjnymi MPT. Gdy światło odbija się od powierzchni w taki sposób, że wiązka odbita jest niemal prostopadła do padającej, to zostaje liniowo spolaryzowane – tzn. fale zostają zorientowane w pewnym określonym kierunku. Ten efekt wykazuje się w polaryzacyjnych okularach słonecznych: ponieważ zwykle światło odbite od powierzchni jest spolaryzowane poziomo, filtry w okularach zmniejszają natężenie światła, nie przepuszczając światła słonecznego o takiej właśnie polaryzacji. MPT też jest spolaryzowane. Tuż zanim Wszechświat stał się przezroczysty dla promieniowania, fotony MPT po raz ostatni rozproszyły się na elektronach plazmy. Niektóre z tych fotonów zderzyły się z elektronami pod dużym kątem i uległy polaryzacji.

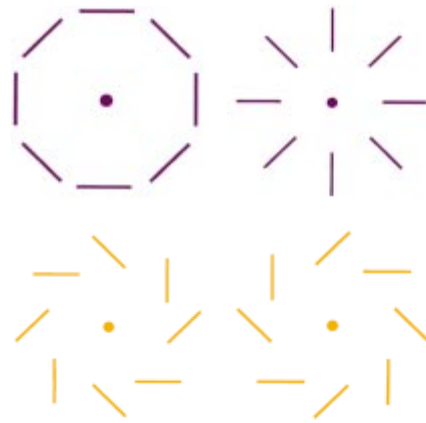
Kluczem do detekcji inflacyjnych fal grawitacyjnych jest fakt, że ruch plazmy spowodowany przez fale grawitacyjne prowadzi do powstania innego rodzaju rozkładu polaryzacji niż ten wywołany niejednorodnością materii. Pomysł jest dość prosty. Liniową polaryzację MPT można przedstawić jako krótki prosty odcinek, którego nachylenie jest wskaźnikiem kąta polaryzacji fotonów w danym obszarze nieba [ilustracja na stronie 25]. Te odcinki niekiedy układają się w pierścienie albo promieniste wzory. Mogą one również układać się w wiry lewo- lub prawoskrętne, a przez to wydają się obracać zgodnie z ruchem wskazówek zegara lub przeciwnie do niego [ilustracja powyżej].

Kierunek obrotu tych wirów mówi o tym, jak one powstały. Niejednorodności w rozkładzie masy nie mogą wytwarzać polaryzacji takiego rodzaju, gdyż gęstsze i rozrzedzone obszary plazmy nie mają lewo- lub prawoskrętnej orientacji. Fale grawitacyjne natomiast

mają wewnętrzną orientację, gdyż rozchodzą się jako zaburzenia lewo- lub prawoskrętne. Wzór utworzony w wyniku polaryzacji spowodowanej przez fale grawitacyjne będzie wyglądał jak przypadkowa superpozycja wielu wirów o różnych rozmiarach. Badacze mówią, że taki rozkład ma różną od zera rotację, natomiast pierścienie i promieniste wzory wytwarzane przez niejednorodności w rozkładzie masy mają zerową rotację.

Jednak nawet najwprawniejsze oko obserwatora nie będzie w stanie stwierdzić, czy rozkład polaryzacji taki jak na stronie 25 ma zerową rotację, czy nie. Na szczęście rozszerzona analiza Fouriera – technika matematyczna pozwalająca na rozłożenie obrazu na szereg fal – umożliwi wydzielenie w danym rozkładzie polaryzacji składowej z rotacją i bez rotacji. Zatem jeśli kosmolodzy będą potrafili zmierzyć polaryzację MPT i wydzielić jej część z różną od zera rotacją, to będą mogli obliczyć amplitudę superdługich inflacyjnych fal grawitacyjnych. A ponieważ amplituda tych fal została określona przez energię inflacji, uda się ją bezpośrednio wyznaczyć. To z kolei pomoże odpowiedzieć na pytanie, czy inflacja została spowodowana przez proces unifikacji oddziaływań fundamentalnych.

Jakie są szanse na wykrycie rozkładów polaryzacji z nie znikającą rotacją? Być może dzięki detektorom satelity MAP oraz kilku innych naziemnych i balonowych eksperymentów uda się wreszcie zmierzyć polaryzację MPT, ale nie są one na tyle czułe, aby wykryć rotacyjną składową polaryzacji wytworzoną przez inflacyjne fale grawitacyjne. Sądźmy, że powiedzie się to dopiero w kolejnych eksperymentach. Jeżeli inflacja rzeczywiście została spowodowana przez unifikację wszystkich oddziaływań, to powstałe wówczas fale grawitacyjne mogą być tak silne, że zauważy je satelita Planck, choć przypuszczalnie trzeba będzie w tym celu skonstruować jeszcze czulsze detektory nowej



ROZKŁADY POLARYZACJI

Polaryzacja MPT kryje zapewne wiele ważnych informacji o bardzo wczesnych fazach ewolucji Wszechświata. Zaburzenia gęstości w pierwotnej plazmie powodują pierścieniowy i promienisty rozkład polaryzacji (na górze). Fale grawitacyjne natomiast wywołują wiry lewo- i prawoskrętne (na dole).

generacji. Jeśli jednak inflację wywołały inne procesy fizyczne, zachodzące później i przy niższej energii, sygnał fal grawitacyjnych będzie zbyt słaby, aby go wykryć w dającej się przewidzieć przyszłości.

Kosmolodzy nie są pewni, jak doszło do inflacji, nie mogą zatem przewidzieć wielkości sygnału polaryzacyjnego spowodowanego inflacyjnymi falami grawitacyjnymi. Jeśli jednak jest choćby mała szansa na zaobserwowanie tego sygnału, to należy go poszukiwać. Wykrycie go będzie nie tylko niepodważalnym dowodem na to, że inflacja faktycznie zaszła, ale również niezwykle okazją do spojrzenia wstecz, w najwcześniejszy okres istnienia Wszechświata, zaledwie 10^{-38} s po Wielkim Wybuchu. Wówczas powrócimy do rozważań nad jednym z najważniejszych pytań wszech czasów: jak powstał Wszechświat?

Tłumaczył
Marek Demiański

INFORMACJE O AUTORACH

ROBERT R. CALDWELL i **MARC KAMIONKOWSKI** ukończyli fizykę w 1987 roku w Washington University. Caldwell doktoryzował się w 1992 roku w University of Wisconsin-Milwaukee. Jest jednym z twórców teorii kwintesencji i obecnie wykłada w Dartmouth College. Kamionkowski uzyskał doktorat z fizyki w 1991 roku w University of Chicago. Jest profesorem fizyki teoretycznej w California Institute of Technology. Za osiągnięcia w dziedzinie astronomii teoretycznej otrzymał w 1998 roku Nagrodę Warnera.

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

FIRST SPACE-BASED GRAVITATIONAL-WAVE DETECTORS. Robert R. Caldwell, Marc Kamionkowski i Leven Wadley, *Physical Review D*, tom 59, s. 27101- 27300; 15 I 1999.

Najnowsze obserwacje mikrofalowego promieniowania tła są opisane na następujących stronach WWW: pupgg.princeton.edu/~cmb/; www.physics.ucsb.edu/~boomerang/; cfpa.berkeley.edu/group/cmb/

Dokładne informacje o misjach MAP i Planck są dostępne pod adresem: map.gsfc.nasa.gov/; astro.estec.esa.nl/astrogen/planck/mission_top.html

Więcej informacji o detektorach fal grawitacyjnych znajduje się na stronie: www.ligo.caltech.edu/; lisa.jpl.nasa.gov