

Fale grawitacyjne i ich detekcja

Arkadiusz Błaut¹

Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Wrocławskiego

1. Wstęp

Ogólna Teoria Względności (OTW) sformułowana w 1915 przez Alberta Einsteina po 100 latach doczekała się nowego, spektakularnego potwierdzenia. 11 lutego 2016 roku na konferencji prasowej zorganizowanej przez amerykańską Narodową Fundację Nauki ogłoszono pierwszą bezpośrednią detekcję fali grawitacyjnej. Odkrycia dokonał międzynarodowy zespół LIGO (Laser Interferometer Gravitational Observatory) Scientific Collaboration zrzeszający ponad tysiąc naukowców z kilkunastu państw. Fala grawitacyjna, oznaczona symbolem GW150914, została zarejestrowana 14 września 2015 roku niezależnie przez dwa detektory znajdujące się w Stanach Zjednoczonych w pobliżu miast Livingston w stanie Luizjana i Hanford w stanie Waszyngton. Odkrycie to zapowiada początek tzw. astronomii fal grawitacyjnych, nowej metody obserwacji wszechświata, dzięki której będzie można dotrzeć do jego najdalszych zakątków oraz badać zjawiska niedostrzegalne w żaden inny sposób.

Fale grawitacyjne wypełniają cały wszechświat, lecz ich wykrycie wymaga niezwykle czułych przyrządów. Pod wieloma względami przypominają fale elektromagnetyczne, które są podstawowym nośnikiem informacji o otaczającej nas rzeczywistości. Istnieją jednak niezwykle gwałtowne procesy rozgrywające się w odległym kosmosie, które przebiegają w całkowitej „ciemności”, bez udziału promieniowania elektromagnetycznego. Jediną informację o nich mogą nieść wyemitowane fale grawitacyjne. Obraz wszechświata, który wyłoni się, gdy astronomia fal grawitacyjnych stanie się dojrzałą dyscypliną nauki, a powszechną rutyną będzie prowadzenie ciągłego i szerokopasmowego nasłuchu fal, dziś stanowi jeszcze w dużym stopniu zagadkę. Rola nowego nośnika informacji w badaniu kosmosu może być nieoceniona. Specyfika nowego medium polega jeszcze na tym, że z jednej strony może być ono traktowane w sposób typowy, jako pole dynamiczne przenoszące oddziaływania, w tym przypadku oddziaływania grawitacyjne, a z drugiej strony jest fragmentem pewnej struktury leżącej u podstaw wszystkich rozgrywających się zjawisk i procesów. Zgodnie bowiem z OTW teoria grawitacji jest teorią czasu i przestrzeni. Dlatego poniższe wprowadzenie do fal grawitacyjnych jest poprzedzone wstępem, w którym przedstawiona została droga prowadząca od teorii grawitacji Newtona do teorii Einsteina oraz rozwój koncepcji dotyczących czasu i przestrzeni.

2. Czas i przestrzeń w teorii Newtona

Zgodnie z ideą Newtona grawitacja, to siła działająca między masywnymi ciałami. Jest jedną z wielu sił istniejących w przyrodzie i nie odgrywa odrębnej roli

¹ arkadiusz.blaut@ift.uni.wroc.pl

w kształtowaniu pojęć czasu i przestrzeni, a koncepcje dotyczące ich natury zostały wprowadzone przez Newtona przed zasadami dynamiki. W szczególności postulował on istnienie absolutnej przestrzeni i absolutnego czasu płynącego jednostajnie i wszędzie jednakowo, niezależnie od materialnej zawartości wszechświata. Absolutność oznaczała również brak dynamiki: czas i przestrzeń trwają niezmiennie bez względu na rozgrywające się procesy fizyczne. Pozostając niezmienną struktura ta „przenika” zjawiska fizyczne, kształtuje własności ciał i ich dynamikę, stając się w ten sposób dostrzegalna dla obserwatora przeprowadzającego doświadczenia. Wobec schematu przyjętego przez Newtona można powiedzieć, że to prawa dynamiki i własności ciał pozwalają rozpoznać struktury czasu i przestrzeni.

Struktura czasowo-przestrzenna wyróżnia również klasę tzw. ruchów „naturalnych”: są nimi ruchy jednostajne i prostoliniowe określone względem absolutnego czasu i absolutnej przestrzeni. Pierwsza zasada dynamiki identyfikuje ruchy naturalne z ruchami swobodnymi, tzn. z ruchami ciał, na które nie działają żadne siły. Zgodnie z tym założeniem nawet we wszechświecie zawierającym jeden obiekt odstępstwo od ruchu naturalnego wywołałoby pojawienie się sił bezwładności. Zatem bezwładność ciała jest cechą, która odnosi się do jego ruchu względem absolutnej przestrzeni i czasu, a nie, na przykład, jest skutkiem relacji z pozostałą materialną zawartością wszechświata. Ruchy naturalne wyróżniają też klasę inercjalnych układów odniesienia, w których prawa mechaniki przyjmują tę samą postać – jest to zasada względności Galileusza.

Ważną rolę w rozwoju omawianych tu koncepcji odgrywa pojęcie równoczesności zdarzeń: o dowolnych dwóch zdarzeniach można orzec w sposób jednoznaczny, czy zaszły jednocześnie czy w różnych chwilach. Absolutny charakter równoczesności wynika wprost z postulatów odnoszących się do czasu i przestrzeni. Wskazują na niego także zasady dynamiki. Symetrie równań Newtona określone przez grupę transformacji Galileusza między obserwatorami inercjalnymi pozostawiają niezmienną współrzędną czasową. Każdy obserwator inercjalny na podstawie obserwacji zjawisk fizycznych dokona identycznej klasyfikacji zdarzeń jednoczesnych. Jest to też zgodne z tym, że teoria nie nakłada ograniczeń na prędkości ciał, co potencjalnie umożliwia bezzwłoczne przekazywanie informacji. Same oddziaływania grawitacyjne, które w teorii grawitacji Newtona są przykładem natychmiastowego działania na odległość, dostarczają prostego narzędzia pozwalającego na stwierdzenie, czy dane dwa zdarzenia zaszły jednocześnie.

Czas i przestrzeń razem tworzą czasoprzestrzeń. Czasoprzestrzeń nie jest jednak iloczynem Kartezjańskim czasu i przestrzeni, gdyż w przeciwnym razie istniałby stan absolutnego spoczynku. Równania dynamiki nie wskazują na żaden taki stan, lecz wyróżniają całą klasę ruchów inercjalnych. Każdy obserwator inercjalny może określić swój układ odniesienia jako spoczywający i nadać w ten sposób czasoprzestrzeni formę iloczynu Kartezjańskiego czasu i przestrzeni, ale podział ten dla różnych obserwatorów może być inny, a żaden z nich nie jest uprzywilejowany. Zatem różni obserwatorzy inercjalni zgadzając się na wspólne powierzchnie zdarzeń równoczesnych, „dzielą” czasoprzestrzeń na przestrzeń i czas w odmienny sposób.

Do atrybutów przestrzeni i czasu należą także ich własności metryczne, dzięki którym możemy mówić o odległościach przestrzennych i czasowych między dowolnymi zdarzeniami. Trójwymiarowa przestrzeń jest wyposażona w metrykę Euklidesową, a czas upływa względem ustalonej, absolutnej miary. Struktura metryczna również jest rozpoznawalna przez eksperymentatora: wskazują na nią pomiary odległości dokonywane przy użyciu np. sztywnych prętów (linijek) oraz pomiary upływu czasu względem stabilnych układów okresowych (zegarków). Oczywiście w praktyce mamy do czynienia z nieidealnymi ciałami sztywnymi i nieidealnymi zegarkami, które jednak w odpowiednio przygotowanych układach pomiarowych mogą służyć jako wystarczająco dokładne wzorce długości i czasu. Ponadto struktura metryczna pozostaje w następujący sposób uzgodniona z ruchami naturalnymi i dynamiką: idealne linijki i zegarki to te, względem których równania ruchu przyjmują w układach inercjalnych dokładną postać równań Newtona, a w szczególności ruch swobodny ciał jest jednostajny i prostoliniowy.

3. Szczególna Teoria Względności

Teoria grawitacji Newtona z jej natychmiastowym oddziaływaniem na odległość okazała się niezwykle skuteczna w opisie całego szeregu zjawisk, od ruchu ciał masywnych w polu ciężkości Ziemi do ruchu planet w Układzie Słonecznym. W konsekwencji tego sukcesu również koncepcje dotyczące czasu i przestrzeni wydawały się mieć mocną podstawę. Jednakowoż w roku 1865 J.C. Maxwell przedstawił teorię pola elektromagnetycznego unifikującą oddziaływania elektryczne i magnetyczne. Zgodnie z teorią Maxwella nośnikiem sił elektrycznych i magnetycznych między ciałami jest rozchodzące z prędkości światła c pole elektromagnetyczne. Rozumiano wówczas, że pole elektromagnetyczne opisuje drgania pewnego medium, eteru, i to jego wzbudzenia przenoszą się z prędkością światła. Wydawało się więc, że teoria wyróżnia układ odniesienia względem którego eter spoczywa; w układach poruszających się względem eteru prędkość fal elektromagnetycznych powinna różnić się od stałej występującej w równaniach Maxwella.

W roku 1887 A.A. Michelson i E. W. Morley przeprowadzili jeden z najświetniejszych eksperymentów w fizyce. Posługując się skonstruowanym przez siebie interferometrem wykazali, że prędkość światła jest wielkością stałą, niezależną od prędkości układu pomiarowego względem hipotetycznego eteru. Pojawienie się stałej o wymiarze prędkości na poziomie praw fizyki stanowiło zagadkę, tym bardziej że, jak stwierdzono, w przeciwieństwie do transformacji Galileusza, transformacje zachowujące postać równań elektrodynamiki, czyli transformacje Lorentza, nie zachowują jednoczesności zdarzeń. Tworząc Szczególną Teorię Względności (STW) w 1905 A. Einstein przyjął wynik doświadczenia Michelsona-Morley'a ze wszystkimi jego konsekwencjami: założywszy słuszność teorii Maxwella i niezmienną postać jej równań w dowolnym układzie inercjalnym uznał, że należy zmodyfikować strukturę czasoprzestrzeni. W STW obserwatorzy inercjalni definiują różne powierzchnie stałego czasu. Ich definicja równoczesności opiera się na pewnej naturalnej procedurze synchronizacji zegarów przy pomocy

sygnałów świetlnych, która respektuje równania Maxwella i równoważność układów inercjalnych. Transformacje Lorentza między różnymi układami inercjalnymi wiążą ze sobą czas i przestrzeń; w tym sensie czas i przestrzeń stają się ze sobą „splcione” w czterowymiarowe kontinuum – czasoprzestrzeń. Dotychczasowa zasada względności otrzymuje nową postać i odtąd obowiązuje jako zasada względności Einsteina.

Zwróćmy uwagę, że w czasoprzestrzeni STW gubi się pojęcie absolutnej równoczesności zdarzeń, jednak czasoprzestrzeń zachowuje swój absolutny charakter wyrażający się w jej autonomicznym istnieniu niezależnie od zawartości materialnej; podobnie jak w teorii Newtona zachowana jest również jej niedynamiczna natura. W dalszym ciągu wyróżnione pozostają ruchy naturalne, jednostajne i prostoliniowe, i związane z nimi pojęcie bezwładności. Własności metryczne czasoprzestrzeni ulegają jednak zmianie. W miejsce oddzielnych struktur metrycznych przestrzeni i czasu pojawia się jedna czasoprzestrzenna metryka, która w układach inercjalnych przyjmuje postać

$$\eta = \begin{pmatrix} -c^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Podobnie jak w teorii Newtona współrzędną czasową t w układzie inercjalnym wyznaczają idealne zegarki, a współrzędne przestrzenne x , y , z są określone względem sztywnych prętów o jednakowej długości tworzących ortonormalny układ odniesienia. Metryka określa czasoprzestrzenną odległość między dwoma zdarzeniami, których współrzędne różnią się o Δt , Δx , Δy , Δz :

$$(\Delta s)^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2.$$

Ta sama wartość Δs zostanie wyznaczona przez dowolnego innego obserwatora inercjalnego, choć w ogólności przypisze on inne wartości $\Delta t'$, $\Delta x'$, $\Delta y'$, $\Delta z'$ tym samym dwóm zdarzeniom.

W tym sensie jest obiektem geometrycznym czterowymiarowej czasoprzestrzeni. Jeśli ponadto dwa rozpatrywane zdarzenia można połączyć trajektorią pewnego obserwatora inercjalnego, to

niezmiennicza wielkość $-\Delta s/c$ będzie jednocześnie czasem wskazywanym przez jego zegar, tzw. czasem własnym. Podobnie jak metryka Euklidesowa w przestrzeni trójwymiarowej, tak i metryka pozwala mierzyć długości dowolnych krzywych w czasoprzestrzeni, a w szczególności wyznaczać czasy własne wzdłuż dowolnych trajektorii. Zakłada się przy tym, że obliczone w ten sposób czasy własne są w dalszym ciągu mierzone przez fizyczne, prawie idealne zegary, np. zegary atomowe, laserowe wzorce częstotliwości, itd.

4. Ogólna Teoria Względności

Newtonowska koncepcja oddziaływań grawitacyjnych rozchodzących się z nieskończoną prędkością jest niezgodna ze strukturą czasoprzestrzeni STW. Jednak dość wcześnie uniwersalność spadku swobodnego nasunęła Einsteinowi myśl, że prawdziwą naturą grawitacji jest geometria. Jej podstawę stanowiła następująca obserwacja: jednostajny i prostoliniowy ruch ciał swobodnych jest obserwowany nie tylko względem wyidealizowanych układów inercjalnych, lecz także względem realnych, swobodnie spadających układów odniesienia, choć w tym drugim przypadku tylko lokalnie. Warunek lokalności oznacza konieczność ograniczenia układu odniesienia do pewnego obszaru przestrzeni i do pewnego przedziału czasu, tak by zminimalizowane zostały efekty wynikające z niejednorodności pola grawitacyjnego. Zgodnie z postulatem Einsteina w takich układach, zwanych lokalnie Lorentzowskimi układami odniesienia (LLUO), obowiązywać mają prawa fizyki STW. Kluczowym okazuje się następujący wniosek: jeśli chcemy utrzymać zasadę mówiącą, że prawa dynamiki odzwierciedlają strukturę czasoprzestrzeni, to wielość i zróżnicowanie swobodnie orbitujących układów odniesienia wskazuje na lokalny charakter tej struktury. Oznacza to, że może się ona zmieniać od jednego punktu czasoprzestrzeni do drugiego. W konsekwencji ruchy swobodne pozostają jednostajne i prostoliniowe tylko względem LLUO, a widziane „globalnie” nie są liniami prostymi, lecz tzw. liniami geodezyjnymi w zakrzywionej czterowymiarowej czasoprzestrzeni. Jej geometria jest określona przez metrykę g , tensor o szesnastu współrzędnych $g_{\mu\nu}$, które w LLUO przyjmują wartości bliskie współrzędnym $\eta_{\mu\nu}$ płaskiej metryki η . Czasoprzestrzeń jest więc zakrzywiona, ale lokalnie przypomina płaską czasoprzestrzeń STW. Dobrą analogię stanowi dwuwymiarowa sfera, np. powierzchnia Ziemi, która w otoczeniu dowolnego punktu wygląda jak płaska powierzchnia, a metryka definiująca odległość między dwoma bliskimi punktami na sferze jest dobrze przybliżona przez dwuwymiarową metrykę euklidesową.

W zakrzywionej czasoprzestrzeni w dalszym ciągu obowiązuje hipoteza, zgodnie z którą czasy własne wzdłuż trajektorii są wyznaczone przez idealne zegary; w pewnym zakresie można również mówić wzorcach długości: ciałach sztywnych i linijkach. Należy podkreślić, że omawiane tu rzeczywiste wzorce długości i czasu nie ulegają odkształceniom i pozostają stabilne również w słabych *niejednorodnych* lub *zmiennych* polach grawitacyjnych, np. takich jakie występują w Układzie Słonecznym lub jakie towarzyszą falom grawitacyjnym w pobliżu Ziemi. Jako całkiem realny przykład rozważmy spadek swobodny ciał do centrum Ziemi. W układzie swobodnie spadającym (LLUO) ciała początkowo spoczywające zaczną powoli zbliżać się do siebie. Do pomiaru zmieniającej się odległości między nimi można użyć spadającego, praktycznie nieodkształconego wzorca długości, np. w postaci zwykłej linki. Oczywiście na linkę działają siły pływowe dążące do jej zgniecenia, lecz reakcja sił wewnątrz linki nie pozwala na zmianę jej długości.

Zbliżanie się do siebie sąsiednich linii geodezyjnych w zakrzywionej czasoprzestrzeni jest interpretowane jako pojawienie się sił pływowych w niejednorodnym polu grawitacyjnym. Są to te same siły, które powodują przypiływy i

odpływy ziemskich mórz i oceanów. Jednak na Ziemi odczuwamy również, i przede wszystkim, zwykłą siłę ciężkości Ziemi. W tym przypadku siła przyciągania ziemskiego jest, z punktu widzenia nowej teorii, pozorną siłą bezwładności, która, tak jak w teorii Newtona, pojawia się wówczas, gdy ciało zostaje wytracone ze swojego ruchu naturalnego. W tym jednak przypadku ruchem naturalnym jest spadek swobodny. Całkiem poprawne byłoby więc stwierdzenie, że spadek swobodny, to stan spoczynku, a utrzymywanie się przy powierzchni Ziemi wymaga przejścia od tego stanu do ruchu przyspieszonego ku górze, co wywołuje siłę pozorną, interpretowaną jako siła ciężkości.

Masy zmieniają zatem geometrię czasoprzestrzeni, która nie pozostaje już niezmienną areną zdarzeń, jak w teorii Newtona lub w STW, lecz jej konkretna postać zależy od zawartości materialnej wszechświata i rozgrywających się w nim procesów. W roku 1915 Einstein (w tym samym czasie co Hilbert) ostatecznie sformułował równania nowej teorii, Ogólnej Teorii Względności (OTW), które precyzowały wzajemne relacje między oddziaływaniami grawitacyjnymi, czyli geometrią czasoprzestrzeni reprezentowaną przez metrykę i jej źródłami określonymi przez energie, pędy i naprężenia materii.

5. Testy Ogólnej Teorii Względności

Teoria Einsteina doczekała się wielu eksperymentów, które potwierdziły jej poprawność. Wymieńmy kilka klasycznych testów.

- Testy zasady równoważności. W doświadczeniach tych sprawdza się fundamentalną zasadę teorii, która decyduje o geometrycznym charakterze oddziaływań grawitacyjnych: czy trajektorie ciał swobodnie spadających bądź swobodnie orbitujących rzeczywiście są niezależne od ich masy i struktury wewnętrznej. Wszystkie testy, począwszy od doświadczenia Eötvösa do pomiarów odległości pomiędzy Ziemią a Księżycem przy pomocy transmisji laserowej, zasadę tę potwierdzają.
- Anomalny ruch peryhelium Merkurego wynoszący 43" na stulecie był pierwszym doświadczalnym potwierdzeniem OTW; znacznie wyraźniejszy efekt widoczny jest dla masywnych, zwartych układów podwójnych, np. w przypadku układu podwójnego gwiazd neutronowych PSR1913+16 zmierzone przesunięcie peryastrum, zgodne z OTW, wynosi 4.2° na rok.
- Zakrzywienie toru promieni świetlnych przy przejściu w pobliżu Słońca zostało zaobserwowane przez A. Eddingtona w 1919 roku; tę samą naturę ma zjawisko soczewkowania grawitacyjnego obrazów odległych galaktyk przez bliższe masywne obiekty; obecnie zjawisko to jest użytecznym narzędziem w astrofizyce i kosmologii.
- Grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni, to efekt zmiany częstości światła dla układów, w których emiter i detektor są ułożone w miejscach o różnym potencjale grawitacyjnym; po raz pierwszy zostało zmierzone w eksperymencie R. Pounda i G. A. Rebki w roku 1959.
- Dylatacja czasu, czyli zmiana tempa chodu zegarków, w polu grawitacyjnym. Efekt jest na tyle znaczący, że wymaga uwzględnienia poprawek wynikających z OTW w urządzeniach wchodzących w skład systemu nawigacji satelitarnej GPS.

- Włeczenie przestrzeni. OTW przewiduje, że rotujące masy prowadzą do wirowania samej przestrzeni; efekt włeczenia przestrzeni przez rotującą Ziemię został potwierdzony w eksperymencie Gravity Probe B zakończonym w 2007 roku.

Wszystkie wymienione eksperymenty wskazują na poprawność teorii w przypadku słabych pól grawitacyjnych, gdzie pojawiają się jedynie niewielkie odstępstwa od teorii Newtona.

Najbardziej interesujący jej obszar odnoszący się do źródeł o wielkich masach i energiach lub poruszających się z ogromnymi prędkościami, tzw. reżim nieliniowy, do niedawna był eksperymentalnie nieosiągalny. Właśnie tu pojawiają się tak egzotyczne obiekty jak czarne dziury, które mogą dostarczyć kluczowych rozstrzygnięć dotyczących poprawności teorii. Wreszcie tzw. reżim relatywistyczny teorii, obejmujący efekty dynamiki samego pola grawitacyjnego, do niedawna pozostawał poza zasięgiem bezpośredniej obserwacji. Detekcja fal grawitacyjnych oraz analiza sygnałów pochodzących od bardzo masywnych źródeł dałyby unikalną możliwość dogłębnego badania obu tych niezbadanych obszarów teorii.

6. Fale grawitacyjne

Geometria czasoprzestrzeni zmienia się, gdyż jest zdeterminowana przez poruszające się masy i przepływające energie we wszechświecie, czy jednak posiada ona własną dynamikę i własne „stopnie swobody”? Czy przypomina elektrostatykę i magnetostatykę czy raczej teorię pola elektromagnetycznego z niezależnymi falami elektromagnetycznymi? Już w pracach Einsteina z lat 1916-1918 pojawiły się rozwiązania sugerujące, że pole metryki rzeczywiście posiada własne stopnie swobody, które w postaci fal poruszających się z prędkością światła, przenoszą oddziaływania grawitacyjne. Te małe odstępstwa, $h_{\mu\nu} \ll 1$, tensora metrycznego od płaskiej metryki,

$$g_{\mu\nu}(t, x) \approx \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}(t, x),$$

których dynamikę określa równanie falowe, to fale grawitacyjne. Ponieważ małe deformacje płaskiej geometrii mogą kojarzyć się ze zmarszczkami na płaskiej tafli wody obrazowo mówi się, że fale grawitacyjne, to poruszające się z prędkością światła zmarszczki czasoprzestrzeni.

Przy omawianiu fal grawitacyjnych wygodnie jest posługiwać się nie obiektem matematycznym opisującym geometrię, lecz badać naturę tych fal przez obserwacje efektów, które wywołują przy przejściu przez materię. Podstawowym doświadczeniem pozwalającym wykryć przechodzącą falę grawitacyjną jest obserwacja zmiany odległości między dwoma swobodnie unoszącymi się w próżni ciałami. Każde z nich porusza się wzdłuż swojej linii geodezyjnej, a zakrzywienie czasoprzestrzeni sprawia, że linie te na przemian zbliżają i oddalają się od siebie. Efekt jest w pełni analogiczny do omawianego wcześniej efektu pływowego polegającego na zbliżaniu się do siebie ciał podczas spadku ku centrum Ziemi. Tak jak w tamtym przykładzie tak i w przypadku fal grawitacyjnych mamy prostą

możliwość obserwacji i pomiaru tych zmian za pomocą sztywnego wzorca długości, np. linijki. Dlatego w dalszym ciągu przez falę grawitacyjną będziemy rozumieli wielkość, która reprezentuje względną zmianę długości między ciałami początkowo oddalonymi od siebie o L ,

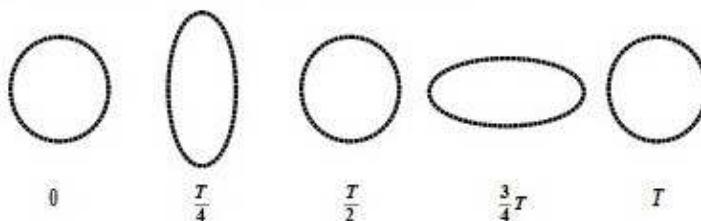
$$h(t) = \frac{\Delta L(t)}{L}.$$

W pewnym uproszczeniu można przyjąć, że przechodząca fala grawitacyjna efektywnie powoduje ściskanie i rozciąganie przestrzeni, więc amplituda zmian ΔL jest proporcjonalna do odległości między ciałami. To wyjaśnia dlaczego w powyższym wzorze falę grawitacyjną charakteryzuje względna zmiana odległości. W rzeczywistości fala grawitacyjna jest bardziej złożonym zjawiskiem, któremu towarzyszą podstawowe efekty OTW: prowadzi ona do zakrzywienia toru promieni świetlnych, powoduje przesunięcie ku czerwieni i dylatację czasu.

7. Własności fal grawitacyjnych

Z OTW wynikają następujące własności fal grawitacyjnych:

1. Zaburzenia grawitacyjne, które docierają do ziemskich detektorów są w większości wytwarzane przez rotujące układy mas. Cykliczny charakter ruchu źródeł sprawia, że zaburzenia te często przyjmują postać rozchodzących się fal i można im przypisać wszystkie własności charakteryzujące ruch falowy: mają określoną amplitudę, częstotliwość, kierunek propagacji i polaryzację. W pobliżu Ziemi z dobrym przybliżeniem możemy je traktować jak fale płaskie.
2. Fale grawitacyjne są poprzeczne. Poruszająca się fala ścisza i rozciąga przestrzeń w kierunku prostopadłym do kierunku propagacji. Najbardziej korzystne warunki detekcji występują więc wtedy, gdy dwie swobodne masy leżą w płaszczyźnie prostopadłej do wektora falowego fali grawitacyjnej
3. Fala grawitacyjna zmienia kształt ciał: jeśli w jednym kierunku ciało jest ściskane, to w kierunku prostopadłym jest rozciągane. Gdy na drodze fali umieścimy pierścień ułożony ze swobodnie orbitujących ciał, to możemy zaobserwować zmiany jego kształtu w ciągu jednego okresu takie, jak na rysunku (fala grawitacyjna w tym przykładzie pada prostopadle do płaszczyzny, w której ułożony jest pierścień z ciał):

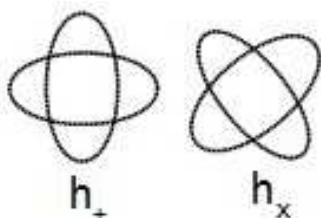


Rysunek 1: Przechodząca w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rysunku fala grawitacyjna odkształca pierścień ułożony ze swobodnie unoszących się ciał testowych.

4. Fale grawitacyjne mają dwa stopnie swobody, które reprezentowane są przez dwa stany polaryzacji liniowej, h_+ , h_x . W przypadku fali poruszającej się w kierunku osi z ruchu cząstki próbnej wokół położenia początkowego (x_0, y_0) jest opisywany przez

$$\delta x = \frac{1}{2} h_+ x_0 + \frac{1}{2} h_x y_0, \quad \delta y = \frac{1}{2} h_x x_0 - \frac{1}{2} h_+ y_0.$$

Prowadzi to do odkształceń okręgu utworzonego ze swobodnych cząstek próbnych; postać tych deformacji przedstawia Rysunek 2:



Rysunek 2: Dwa stany polaryzacyjne fali grawitacyjnej.

- Każda fala grawitacyjna poruszająca się w ustalonym kierunku jest (zależną od czasu) superpozycją fal h_+ i h_x poruszających się w tym samym kierunku.
5. Fale grawitacyjne unoszą ze sobą energię; prowadzi to, między innymi, do utraty energii wiązania grawitacyjnego źródła i, w konsekwencji, wpływa na jego ewolucję.
 6. Fale grawitacyjnie niezwykle słabo oddziałują z materią i w zasadzie nie ulegają rozproszeniu przy przejściu przez jakikolwiek ośrodek; sygnał pochodzący nawet z najdalszego źródła dociera na Ziemię niezniekształcony.
 7. Podobnie jak w przypadku pola elektromagnetycznego, trajektorie fal grawitacyjnych ulegają zakrzywieniu w pobliżu dużych mas; fale grawitacyjne podlegają też efektowi Dopplera i wykazują grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni.

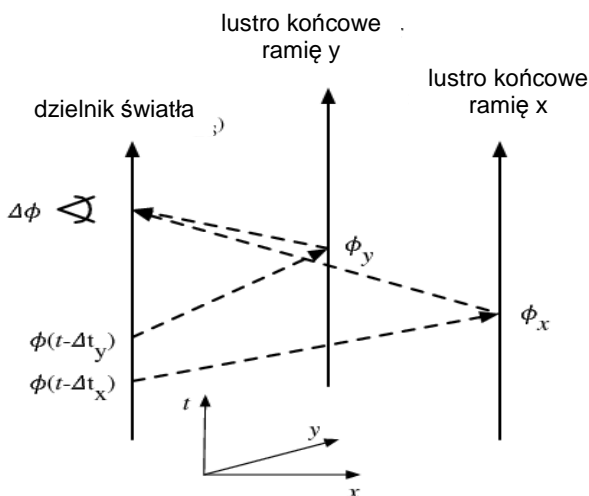
8. Detektory fal grawitacyjnych

Ze względu na swoją małą amplitudę, fale grawitacyjne są niezwykle trudne do wykrycia. Na pierwszą rejestrację fali trzeba było czekać sto lat. Fala grawitacyjna pochodząca od typowego źródła astrofizycznego w pobliżu Ziemi przyjmuje wartość $h \sim 10^{-22}$. Dla detektora o długości ramienia $L=4$ km amplituda odchylenia ΔL ma wartość ok. 4×10^{-19} m. Skalę wyzwania przed jakim należy stanąć daje przykład wymyślanego detektora, którego ramię rozciąga się na odległość jednego roku świetlnego; w tym przypadku amplituda drgań odległych od siebie

ciał, to tysięczna część milimetra. Sama idea pomiaru przechodzącej fali grawitacyjnej jest prosta i polega na rejestracji małych zmian odległości między ciałami względem odpowiedniego wzorca długości. Powyższe szacunki pokazują jednak, że przy tak niezwykle małych efektach należy uciec się do bardzo wyrafinowanych metod pomiarowych.

Pierwszy detektor fal grawitacyjnych został skonstruowany przez J. Webera w 1966 roku. Był to walec aluminiowy wzbudzany do drgań rezonansowych przez przechodzącą falę grawitacyjną. Współczesne detektory rezonansowe (ALLEGRO, AURIGA, NAUTILUS) działają w wielu ośrodkach na świecie i mają znacznie większą czułość od swojego prototypu. Pracują w paśmie kiloherców, a ich główną charakterystyką jest wąskie pasmo czułości.

Obecnie najczulszą klasę detektorów stanowią interferometry laserowe. Są to interferometry Michelsona-Morley'a, w których wykorzystywana jest wiązka światła laserowego o długości ok. $1\mu\text{m}$. Poniższy diagram czasoprzestrzenny przedstawia ideę pomiaru. Droga optyczna światła laserowego, której odpowiadają linie stałej fazy sygnału lasera, jest zaznaczona na rysunku linią przerywaną; linie światła dzielnika światła i dwóch lusterek są oznaczone liniami ciągłymi.



Rysunek 3: Linie światła dzielnika, końcowych lusterek i promieni świetlnych w interferometrze Michelsona-Morley'a.

Światło laserowe pada na dzielnik światła, w którym jest rozdzielane na dwie wiązki wędrujące do swobodnie wiszących lusterek, od których jest odbijane z powrotem do dzielnika; spotykające się w dzielniku promienie lasera interferują ze sobą, a wypadkowy sygnał jest kierowany do fotodetektora. Sygnał końcowy w

fotodetektorze zależy od różnicy dróg optycznych w obu wiązkach. W przypadku fali grawitacyjnej padającej prostopadle do płaszczyzny detektora zawsze można tak zorientować jego ramiona, by jedno z lusterek przybliżyło się do dzielnika w chwili, gdy drugie jednocześnie oddala się od niego; wynikającą z tego ruchu różnicę dróg optycznych stara się zarejestrować interferometr.

Zaznaczmy, że do rejestracji fali grawitacyjnej wystarczyłby detektor jednoramienny. Promień lasera wysyłany z emitera docierałby do detektora, który w przypadku przechodzącej przez układ fali grawitacyjnej, rejestrowałby sygnał o zmiennej częstotliwości. Ten rodzaj interferometrii laserowej, zwany śledzeniem Dopplera, jest również w użyciu. Interferometr Michelsona-Morley'a daje jednak możliwość znacznie bardziej precyzyjnego pomiaru; ponadto do detektora dociera sygnał różnicowy z dwóch ramion, co czyni instrument w dużym stopniu nieczułym na wahania częstotliwości samego źródła laserowego.

Wyjaśnijmy teraz pewną powracającą często wątpliwość. Jednym z podstawowych efektów OTW jest zmiana długości fali elektromagnetycznej w polu grawitacyjnym („grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni”). Można więc zapytać, czy padająca fala grawitacyjna nie zmieni długość fali samego światła laserowego, i to w takim samym stopniu w jakim zmienia długość ramienia? Gdyby rzeczywiście tak było, sygnał w detektorze pozostawałby nieczuły na zmianę odległości wywołaną pojawieniem się fali grawitacyjnej. Należy jednak zwrócić uwagę na to, by precyzyjnie określić obserwatora wykonującego pomiar. Zmiana częstotliwości światła zostanie zarejestrowana wówczas, gdy mierzący częstotliwość detektor będzie poruszał się wraz z końcowym lustrem, a różnica wystąpi właśnie dlatego, że oddala się on i przybliży względem emitera, w tym przypadku dzielnika światła. Dla obserwatora spoczywającego względem dzielnika promień lasera zachowuje swoją częstotliwość i stanowi dobre narzędzie do pomiaru odległości poruszającego się lustra.

Dodać trzeba, że powyższy opis zjawiska również ma charakter przybliżony: odnosi się do przypadku, gdy długość fali grawitacyjnej jest znacznie większa od długości ramienia interferometru. W sytuacji, gdy długość ramienia jest porównywalna do długości fali grawitacyjnej należy uwzględnić efekty krzywizny czasoprzestrzeni również dla propagującej się wiązki lasera.

Interferometry laserowe są przyrządami pracującymi w pewnym pasmie częstotliwości.

W przypadku detektorów naziemnych, takich jak dwa detektory LIGO w Stanach Zjednoczonych oraz detektory VIRGO we Włoszech i GEO w Niemczech, największa czułość przypada na częstotliwości między 10 a 10^3 Hz. Wiele źródeł astrofizycznych emituje jednak fale grawitacyjne o znacznie większych okresach. Przeniesienie maksymalnej czułości interferometrów do niższego pasma częstotliwości wymaga użycia interferometrów o znacznie dłuższych ramionach. Kluczowa jest także konieczność ograniczenia szumów samego przyrządu oraz szumów wynikających z wpływu otoczenia. Z tego powodu rozważa się możliwość wyniesienia interferometrów laserowych w przestrzeń kosmiczną. Najbardziej zaawansowanym koncepcyjnie projektem jest detektor eLISA (Evolved Laser

Interferometer Space Antenna) Europejskiej Agencji Kosmicznej. Rozpoczęcie misji przewiduje się na rok 2034; pracujący w pasmie miliherców detektor ma posiadać ramiona o długości 1-5 milionów km.

W paśmie bardzo niskich częstotliwości, między 10^{-9} a 10^{-6} Hz, stosuje się technikę obserwacyjną polegającą na pomiarze drobnych nieregularności cykli milisekundowych pulsarów. Jeśli na drodze sygnału pulsara pojawi się fala grawitacyjna, to wywoła ona powolne modulacje czasu przylotów kolejnych impulsów na Ziemię. Ponieważ odległość pulsara od Ziemi nie jest dokładnie znana informacja o fali grawitacyjnej jest zawarta w korelacjach między odbieranymi sygnałami, które są emitowane przez różne, odległe od siebie pulsary. Obecnie prowadzi się regularne obserwacje radioteleskopowe kilkudziesięciu pulsarów; trzy międzynarodowe grupy badawcze działające na różnych kontynentach, EPTA w Europie, NANOGRAV w Ameryce Północnej i PPTA w Australii, połączone są w jedno konsorcjum IPTA (International Pulsar Timing Array).

9. Źródła fal grawitacyjnych

Fale grawitacyjne są generowane przez każdy układ ciał, wykazujący zmienny się w czasie (przyspieszony) moment kwadrupolowy I_{ij} . Ze względu na postać sygnału fali w detektorze i czas obserwacji źródła można podzielić na trzy kategorie: krótko trwające, periodyczne i stochastyczne.

Do każdego z nich stosuje się różne techniki detekcji i analizy danych pomiarowych.

Klasycznym przykładem układu wypromieniowującego fale grawitacyjne są tzw. układy podwójne, czyli układy dwóch ciał orbitujących wokół wspólnego środka masy. Dla obserwatora znajdującego się w odległości R od źródła, układ podwójny o orbicie kołowej i masach składników m_1 i m_2 emituje falę grawitacyjną

$$h_+(t, R) \simeq -\frac{1}{R} \frac{G^2}{c^4} \frac{2m_1 m_2}{r} [1 + \cos^2(\iota)] \cos[2\omega(t - R/c)],$$

$$h_x(t, R) \simeq -\frac{1}{R} \frac{G^2}{c^4} \frac{4m_1 m_2}{r} \cos(\iota) \sin[2\omega(t - R/c)],$$

gdzie ι jest kątem obserwacji tj. kątem między wektorem prostopadłym do płaszczyzny orbity a linią łączącą układ z obserwatorem; odległość r między krążącymi ciałami jest związana z orbitalną prędkością kątową ω prawem Keplera:

$$\omega^2 r^3 = G(m_1 + m_2).$$

Warto zaznaczyć, że częstotliwość fali grawitacyjnej jest dwa razy większa od częstotliwości orbitalnej układu. Aby fale były zauważalne musimy mieć do czynienia z kolektywnym ruchem wielkich mas i dużymi prędkościami. Do najbardziej wydajnych źródeł należą zwarte układy podwójne, których składnikami

są białe karły, gwiazdy neutronowe lub czarne dziury. Każdy układ podwójny emitujący fale grawitacyjne zmniejsza energię wiązania grawitacyjnego w wyniku czego następuje zbliżenie się ciał i zmniejszenie ich okresu orbitalnego. Tempo zmiany promienia orbity kołowej jest określone przez

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{64 G^3 m_1 m_2 (m_1 + m_2)}{5 c^5 r^3},$$

a odpowiadającą mu zmianę okresu orbitalnego można odczytać z podanego wcześniej prawa Keplera. Masy układu podwójnego poruszają się więc ruchem spiralnym o zwiększającej się częstotliwości; w konsekwencji zmieniają się także parametry sygnału fali grawitacyjnej: wzrasta jej amplituda i częstotliwość.

Z ostatnich wzorów widać, że ewolucja układów orbitujących w dużych odległościach od siebie przebiega powoli, natomiast dla układów ciasnych tempo zmian parametrów orbity ma charakter bardzo dynamiczny: ewolucja kończy się najczęściej zderzeniem ciał i ich połączeniem w procesie zwanym koalescencją. Uwolniona wówczas energia prowadzi do emisji silnej fali grawitacyjnej, która może być zarejestrowana przez detektor. Wyłaniający się z szumu sygnał w detektorze trwa bardzo krótko, jego typowa długość w przypadku detektorów naziemnych może wynieść od ułamka do kilku sekund. Ostatni etap ewolucji zależy silnie od rodzaju składników układu podwójnego. W przypadku, gdy jednym z nich jest biały karzeł lub gwiazda neutronowa może dojść (jeszcze przed zderzeniem) do przepływu materii między składnikami lub rozdarcia struktury gwiazdowej. Na przykład, podczas koalescencji dwóch gwiazd neutronowych emitowana jest ogromna energia elektromagnetyczna (układy podwójne tego rodzaju mogą być odpowiedzialne za powstawanie tzw. krótkich rozbłysków gamma). Jeśli natomiast układ składa się z dwóch czarnych dziur, to po zbliżeniu się gwiazd następuje dynamiczne połączenie ich horyzontów zdarzeń. Ostatnia faza ewolucji dwóch czarnych dziur to tzw. wydzwanianie, czyli etap bardzo szybkiego przejścia do jednej rotującej i wykazującej doskonałą symetrię osiową czarnej dziury. Od tego momentu ustaje emisja fal grawitacyjnych.

Podobny krótkotrwały charakter mają impulsy grawitacyjne powstające podczas grawitacyjnego zapadania się rdzenia masywnej gwiazdy i następującego po nim wybuchu w postaci supernowej. Dokładne modelowanie kształtu fali powstającej podczas eksplozji supernowej jest poważnym wyzwaniem teoretycznym. Optymalny sposób wykrycia fali polega w tym przypadku na szukaniu koincydencji między krótkimi i silnymi sygnałami pojawiającymi się niemal jednocześnie w kilku, niezależnych i odległych od siebie detektorach.

Układy podwójne, których składniki orbitują w dużych odległościach od siebie, pozostają stabilne i są źródłem (prawie)monochromatycznych fal grawitacyjnych. Typowym przykładem są

układy podwójne białych karłów. Ich liczbę w naszej Galaktyce szacuje się na ok. 250 milionów. Częstotliwość orbitalna tych układów nie przekracza jednak kilkudziesięciu miliherców, nie są więc one wykrywalne przez ziemskie detektory.

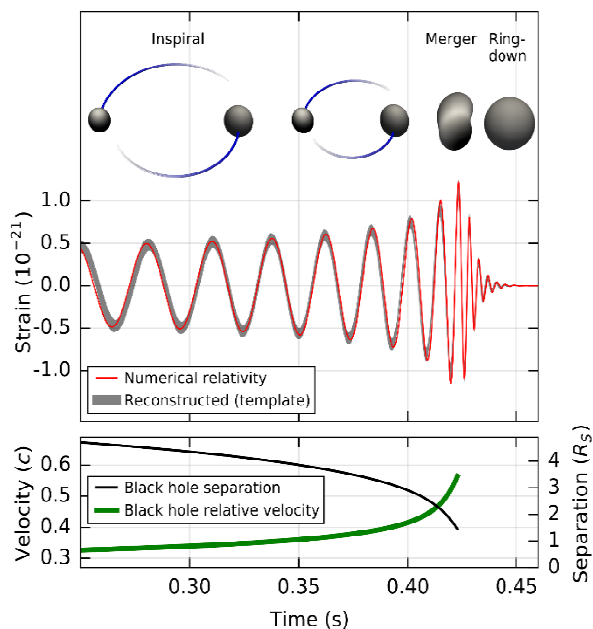
Najszybciej rotujący zarejestrowany optycznie układ podwójny białych karłów, J0651+2844, ma okres orbitalny wynoszący ok. 13 minut i jest doskonałym kandydatem do detekcji przez przyszłe interferometry pracujące w przestrzeni kosmicznej.

Ważnym przykładem źródeł periodycznych są pulsary, czyli szybko wirujące gwiazdy neutronowe. Moment kwadrupolowy rotującego osiowosymetrycznego ciała jest jednak stały, więc aby gwiazda neutronowa mogła promieniować grawitacyjnie jej kształt musi wykazywać odstępstwa od symetrii osiowej. Mogą to być np. małe (rzędu centymetrów) nierówności na jej powierzchni. Sygnały fal grawitacyjnych pochodzących od pulsarów są zazwyczaj znacznie słabsze od sygnałów generowanych przez zlewające się układy podwójne. Z drugiej strony pozostają one nieograniczenie długo w paśmie czułości detektorów naziemnych, co potencjalnie umożliwia ich detekcję.

Sygnał stochastyczny powstaje, gdy do detektora dociera jednocześnie wiele fal pochodzących z różnych źródeł, a z wypadkowego przebiegu nie można wydzielić indywidualnych składników. Taki „szum” w detektorze mogą tworzyć sygnały pochodzące od wielu punktowych źródeł astrofizycznych, np. olbrzymiej populacji układów podwójnych białych karłów w Drodze Mlecznej lub z układów podwójnych gwiazd neutronowych docierających do detektora z wielu najdalszych galaktyk. Oba te sygnały nie są jeszcze „widoczne” w dzisiejszych detektorach, lecz przyszłe misje, na Ziemi i w kosmosie, będą w stanie je wykryć i zanalizować. Charakter szumu mają również sygnały powstałe we wczesnych etapach ewolucji wszechświata. Zaliczyć do nich można fale grawitacyjne wytwarzane podczas anihilacji hipotetycznych struny kosmicznych lub sygnały generowane w procesie przejść fazowych wczesnego wszechświata. Ostatni, ale być może najciekawszy rodzaj szumu to tzw. kosmiczne promieniowanie tła fal grawitacyjnych, które może pochodzić z samych początków istnienia wszechświata, tj. z epoki inflacyjnej. Źródłem tego hipotetycznego sygnału mają być próżniowe fluktuacje kwantowego pola grawitacyjnego, czyli efekty bezpośrednio związane z kwantową naturą grawitacji. Zgodnie ze scenariuszem inflacyjnym fale grawitacyjne pochodzące z tego okresu tworzą dziś szum, którego spektrum rozciąga się między 10^{-18} a 10^6 Hz. Jego bezpośrednia detekcja byłaby prawdziwym krokiem milowym we współczesnej nauce.

10. Pierwsza bezpośrednia detekcja.

Pierwszy pośredni dowód potwierdzający istnienie fal grawitacyjnych został przedstawiony przez R.A. Hulse'a i J.H. Taylora. Obserwowali oni wspomniany wcześniej układ podwójny gwiazd neutronowych, PSR 1913+16. Zmierzony okres orbitalny układu wynoszący ok. 7 godzin malał w tempie ~ 76 milisekund na rok. Zgodnie z OTW przyczyną zmian mogła być emisja fal grawitacyjnych, która prowadziła do zmniejszania się energii wiązania grawitacyjnego układu i zbliżenia składników. Pomiar prowadzone przez ponad dwadzieścia lat wykazały, że szybkość zmian parametrów orbity dokładnie odpowiada przewidywaniom teoretycznym; za swoje odkrycie obaj naukowcy otrzymali w 1993 roku nagrodę Nobla.



Rysunek 4: Pierwsza bezpośrednia detekcja fali grawitacyjnej. Przebieg czasowy odległości między składnikami oraz prędkości w ruchu orbitalnym tuż przed złączeniem; **PRL** 116 061102 (2016).

jestrowanej fali niesie bowiem dokładne informacje dotyczące jego parametrów. Należą do nich masy składników, ich prędkość orbitalna, prędkość wirowania (spin), wzajemna odległość, a także orientacja orbity, odległość od obserwatora i położenie na niebie. Oczywiście z powodu zakłóceń sygnału przez szum detektora wszystkie te parametry mogą być oszacowane jedynie z pewną dokładnością. Przeprowadzona analiza danych sygnału GW150914 w obu detektorach pozwoliła stwierdzić, że jego źródłem był układ podwójny dwóch rotujących czarnych dziur o masach 29 i 36 mas Słońca; po ich połączeniu powstała szybko rotująca czarna dziura o masie 62 mas Słońca, a energia równa 3 masom Słońca została wypromieniowana w postaci fali grawitacyjnej². Końcowa prędkość orbitalna układu wynosiła niemal połowę prędkości światła, a maksymalna częstotliwość 75Hz. Szacowana odległość do układu, to 430 Mpc. W swoim maksimum jasność układu wyniosła 200 mas Słońca na sekundę i kilkaset razy przewyższyła moc wypromieniowaną w postaci fal elektromagnetycznych przez wszystkie ciała dostępnego obserwacjom wszechświata.

Pierwsza bezpośrednia detekcja nastąpiła we wrześniu 2015 roku. Falę GW150914 zarejestrowały w odstępie kilku milisekund dwa detektory LIGO. Postać fali w obu detektorach była identyczna i wskazywała typowy przebieg charakteryzujący ostatnie etapy zlewającego się zwarteo układu podwójnego. W ciągu ułamka sekundy zaobserwowano kilka oscylacji ze zwiększającą się amplitudą i częstotliwością, po których nastąpił gwałtowny wzrost amplitudy zakończony szybko gasnącymi drganiem. Sygnał okazał się nadspodziewanie silny i z bardzo dużym prawdopodobieństwem można było wykluczyć, że był on rezultatem przypadkowych fluktuacji szumu przyrządu lub bliskiego otoczenia. Oprócz samego faktu detekcji istotną okazała się również możliwość identyfikacji i dość szczegółowego opisu źródła. Postać zare-

² Druga detekcja miała miejsce 26 grudnia 2015 roku; sygnał GW151226 pochodził od zlewającego się układu podwójnego czarnych dziur o masach 14 i 7 mas Słońca.

Zaznaczyć trzeba, że układ tego typu zaobserwowano po raz pierwszy, a emisji fali grawitacyjnej prawdopodobnie nie towarzyszył żaden sygnał elektromagnetyczny – ten wyjątkowy spektakl odbył się w całkowitej „ciemności”. Jeśli dodatkowo zauważymy, że czarne dziury, to tzw. próżniowe rozwiązania równań Einsteina, które reprezentują pozbawioną materii krzywiznę samej czasoprzestrzeni, to będziemy mogli pociągnąć powyższe porównanie dalej stwierdzając, że jedynym świadkiem tego przedstawienia bez aktorów pozostały rozkołysane deski sceny teatralnej.

11. Astronomia fal grawitacyjnych

Pierwsza detekcja fali grawitacyjnej otworzyła okno na wszechświat. Jest to zaledwie początek nowej drogi poznawania jego tajemnic. Ważne znaczenie ma fakt, że spektrum fal grawitacyjnych rozciąga się prawdopodobnie przez ponad 20 dekad, od 10^{-16} Hz do 10^6 Hz i jest komplementarne do spektrum fal elektromagnetycznych dostępnych powyżej częstotliwości radiowych. Informacja, której mogą dostarczyć fale grawitacyjne jest jedyna w swoim rodzaju. Dotyczyć ona będzie zawartości materialnej wszechświata oraz samej jego struktury; wiele fal grawitacyjnych nadejdzie od obiektów, które pozostaną ukryte dla obserwacji elektromagnetycznych; odebrane sygnały będą niezniekształcone przez materię międzygalaktyczną nawet w przypadku, gdy przybędą z najdalszych zakątków wszechświata. Szczególnie interesująca jest perspektywa badania masywnych, lecz niewidocznych układów podwójnych, np. układów podwójnych supermasywnych czarnych dziur o masach 10^6 - 10^8 mas Słońca obecnych w jądrach wielu galaktyk. Jak pokazują liczne badania wielkoskalowej struktury wszechświata i symulacje dotyczące możliwości obserwacyjnych przyszłych detektorów, spodziewamy się dość regularnej rejestracji sygnałów generowanych przez supermasywne czarne dziury pochodzących z odległości prawdziwie kosmologicznych, z czasów powstawania pierwszych gwiazd i galaktyk. W wielu przypadkach możliwe będzie dokładne szacowanie parametrów źródeł, w tym ich odległości. Jeśli ponadto sam obiekt lub jego macierzysta galaktyka będzie dostrzeżona optycznie stworzy to szansę dokładnego pomiaru przesunięcia ku czerwieni, czyli określenia prędkości ucieczki źródła. Jednoczesna znajomość odległości i przesunięcia ku czerwieni dalekich obiektów jest kluczowa w kosmologii obserwacyjnej i znacznie poszerzy możliwości wyznaczania tempa ekspansji wszechświata.

Szacuje się, że interferometry pracujące w przestrzeni kosmicznej będą mogły wykryć kilka tysięcy układów podwójnych białych karłów w naszej Galaktyce i dobrze oszacować parametry wielu z nich, co niewątpliwie przyczyni się do zrozumienia budowy i ewolucji Drogi Mlecznej. Detekcja fal grawitacyjnych z układów podwójnych białych karłów lub gwiazd neutronowych, w których występuje przepływ materii między składnikami może wspomóc prace badawcze nad własnościami materii w ekstremalnych warunkach; z pewnością podobną rolę spełnią obserwacje fal grawitacyjnych z pulsarów. Dzięki detekcji fal grawitacyjnych osiągalne również będą testy OTW w reżimie silnych pól. Pierwsze z nich już miały miejsce: dynamika łączenia się horyzontów zdarzeń dwóch

masywnych i rotujących czarnych dziur odtworzona na podstawie przebiegów fal GW150914 oraz GW151226 w obu przypadkach wykazała pełną zgodność z teorią. Każde, nawet minimalne zaobserwowane odstępstwo od teorii Einsteina byłoby odkryciem na wielką skalę. Sam fakt, że pierwsza detekcja dotyczyła czarnych dziur, najbardziej enigmatycznych obiektów OTW, wzmacnia nasze oczekiwania wobec roli jaką fale grawitacyjne mogą odegrać w badaniu jednej z podstawowych teorii współczesnej fizyki.

Na końcu wymieńmy jeszcze możliwość bezpośredniej detekcji sygnałów kosmologicznych, tzn. pochodzących z wczesnego etapu kształtowania się wszechświata, takich jak struny kosmiczne czy kosmiczne promieniowanie tła fal grawitacyjnych. Perspektywa ich detekcji nie jest bliska, ale jednocześnie nie widać dziś fundamentalnych przeszkód stojących na drodze do realizacji przyszłych misji, które mogłyby ten cel osiągnąć. Potencjał obserwacyjny i naukowy, jaki oferuje bezpośrednia detekcja fal grawitacyjnych jest duży i wiele wskazuje na to, że nadchodzące lata wyłonią nową dyscyplinę, którą już dziś nazywa się astronomią fal grawitacyjnych.

