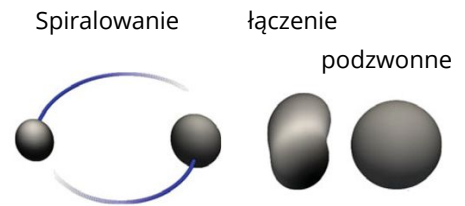


TESTY OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI ZA POMOCĄ FAL GRAWITACYJNYCH W DANYCH O3a LIGO-VIRGO

Przed pierwszą detekcją fal grawitacyjnych, przez prawie 100 lat nie było możliwości poddania ogólnej teorii względności Einsteina najbardziej rygorystycznym testom, ani w laboratorium, ani nawet w Układzie Słonecznym. Koalescencje czarnych dziur wytwarzają najsilniejsze i najbardziej dynamiczne pola grawitacyjne na jakie pozwala ogólna teoria względności. Obserwacje takich zjawisk zweryfikowały dwa przewidywania tej teorii - fale grawitacyjne mogą być bezpośrednio wykryte, a czarne dziury rzeczywiście istnieją - ale czy są to fale grawitacyjne i czarne dziury dokładnie zgodne z przewidywaniami teorii Einsteina, czy też może coś bardzo podobnego, ale jednak innego? Czego możemy się nauczyć z obserwacji fal grawitacyjnych, które niosą ślad gwałtownego kataklizmu, który je wywołał? LIGO i Virgo przeprowadziły nowatorskie testy ogólnej względności dla wszystkich poprzednich detekcji opisanych w katalogu, GWTC-1, oraz dodatkowo dla sygnałów GW190425, GW190412, GW190814 i GW190521. Jak dotąd wszystkie obserwacje nie były sprzeczne z przewidywaniami Einsteina. Obecnie mamy znacznie więcej sygnałów, dzięki nowemu katalogowi Gravitational-Wave Transient Catalog 2 (GWTC-2). Używając tych danych przeprowadziliśmy podobne testy, jak w przypadku GWTC-1, mając ponad dwa razy więcej nowych zjawisk niż było w pierwszym katalogu, oraz dodatkowo kilka nowych testów.

Testując ogólną teorię względności zakładamy pewne odchylenia od jej przewidywań, wprowadzając dodatkowe wyrazy w równaniu lub parametry, których wartości różnią się od tych wynikających z teorii względności, aby sprawdzić, czy wprowadzone modyfikacje prowadzą do lepszej zgodności modelu z danymi. Metody przetwarzania sygnału związane są z analizą statystyczną, która w efekcie dostarcza pewnej miary dopasowania danych, którą można odnieść do przewidywań teorii względności. Różnice mogą wynikać z trzech powodów: (1) Dane są zaszumione, dlatego zawsze dokonujemy pomiaru sygnału fali grawitacyjnej ukrytej w szumie detektora. (2) W większości przypadków, stosujemy pewne przybliżenia sygnału w teorii względności; te przybliżenia mogą nie być wystarczająco bliskie rzeczywistemu zachowaniu się niektórych zjawisk. (3) Ogólna teoria względności jest najprawdopodobniej niedoskonała, i może wymagać korekty dla tak ekstremalnych zjawisk, jak czarne dziury podczas koalescencji.

W praktyce oznacza to, że nie możemy w prosty sposób stwierdzić, że istnieje rozbieżność obserwacji z teorią, ponieważ szum i błędy przybliżen utrudniają interpretację. Możemy natomiast pokazać, że to, co znajdujemy, nie jest z teorią sprzeczne. Jak opisano w naszym poprzednim artykule, analizującym obiekty z katalogu GWTC-1, niektóre zjawiska nadają się lepiej, a inne gorzej do określonego typu testów. Na szczęście teraz mamy znacznie więcej obserwacji. To, czy wykryjemy sygnał z koalescencji czarnych dziur w układzie podwójnym zależy od charakterystycznej częstotliwości sygnału i tego, czy detektory są w danym zakresie dostatecznie czułe. Masywniejsze czarne dziury łączą się przy niższych częstotliwościach orbitalnych, co przekłada się na niższe częstotliwości fal grawitacyjnych. Częstotliwości te są dodatkowo zmniejszone (przesunięte ku czerwieni) podczas ich podróży na Ziemię poprzez rozszerzający się Wszechświat, dlatego też, w zależności od częstotliwości, dany sygnał może nie nadawać się idealnie do przeprowadzenia wszystkich testów.

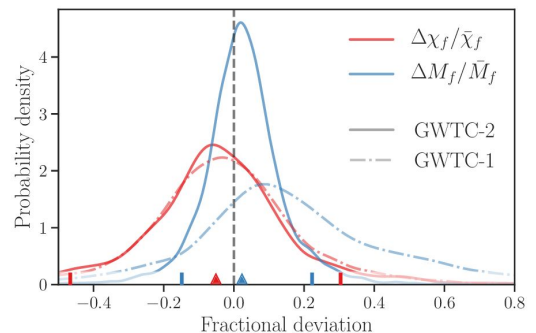


Rysunek 1: Trzy fazy koalescencji dwóch czarnych dziur: spiralowanie, połączenie i podzwonne. Zaadaptowane z Rys. 2 z pracy o odkryciu GW150914.

PORÓWNYWANIE SYGNAŁU FALI GRAWITACYJNEJ Z PRZEWIDYWANIAMI OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI

Według ogólnej teorii względności czarna dziura jest całkowicie scharakteryzowana przez masę i spin (tempo rotacji). Ewolucja układu podwójnego jest zdeterminowana przez masy i wartości spinów składników, ich orientacje względem siebie oraz wzajemną odległość.

Układ podwójny ewoluuje tracąc energię w wyniku emisji fal grawitacyjnych. Orbita zacieśnia się, a jednocześnie prędkość orbitalna czarnych dziur rośnie (fazę tę nazywamy spiralowaniem). Następnie czarne dziury łączą się tworząc jedną asymetryczną wirującą czarną dziurę o określonej masie i spinie. Zgodnie z teorią względności rotujący asymetryczny obiekt emituje fale grawitacyjne, aż do momentu, gdy stanie się osiowo-symetryczny. To przewidywanie teorii można przetestować, ponieważ czarne dziury wchodzące w skład układu podwójnego determinują własności końcowej czarnej dziury. Co więcej, szczegóły ewolucji asymetrii (podczas tzw. podzwonnego) są również opisane przez teorię Einsteina. Jeśli podczas fazy spiralowania i podzwonnego sygnały fali grawitacyjnej mają podobną siłę, można je analizować osobno - jedna z nich przewiduje drugą. Zgodnie z teorią względności, z parametrów sygnału podczas fazy spiralowania można wywnioskować jego zachowanie podczas fazy podzwonnego, i sprawdzić, czy model pasuje do danych. Podczas gdy szum detektora i stosowane przybliżenia sprawiają, że porównanie nie jest idealnie precyzyjne, można oszacować zgodność z teorią względności. Wyniki przedstawione są na Rys. 2. Asymetryczna czarna dziura powstała w wyniku połączenia dwóch mniejszych czarnych dziur zachowuje się jak uderzony dzwon. Drgający dzwon emituje kombinację czystych tonów, częstotliwości rezonansowych, które są jednak tłumione w sposób charakterystyczny dla dzwonu.



Rysunek 2: Różnica masy końcowej czarnej dziury M_f (niebieska) i spinu χ_f (czerwona) wynikająca z pomiaru tych wartości przed połączeniem się dwóch czarnych dziur w porównaniu z pomiarem wartości po połączeniu. Linie ciągłe pokazują porównanie w katalogu GWTC-2, a linie kropkowane z GWTC-1. Linia pionowa, przerywana jest wartością oczekiwaną z ogólnej teorii względności. Zauważamy, że nowsze porównanie masy znacznie poprawiło swoją bliskość do przewidywań OTW, natomiast porównanie spinów nie zmieniło się wiele. (Rys. 4 naszej pracy).

W podobny sposób, ogólna względność przewiduje, by czarna dziura „dzwoniła” w określonych częstotliwościach i z określonym charakterystycznym czasem tłumienia. Następnie możemy porównać zaobserwowane właściwości tej dzwoniącej, zniekształconej czarnej dziury z tymi, które przewidujemy na podstawie sygnału z dwóch czarnych dziur zmierzonych w fazie spiralowania. Chociaż dokładność nie jest jeszcze bardzo dobra (mamy nadzieję, że będzie lepsza przy przyszłych pomiarach), wyniki są zgodne z ogólną teorią względności.

Czy zarejestrowane sygnały mogą pochodzić od „naśladowców” czarnych dziur ?

Koalescencja czarnych dziur wytwarza ogromną ilość promieniowania grawitacyjnego, w wielu przypadkach przyćmiewającego w tym momencie resztę Wszechświata. Czy jest możliwe, że obserwowane zjawiska zachodzą nie dla czarnych dziur opisywanych ogólną teorią względności, ale czegoś zupełnie innego, co tylko *naśladuje czarną dziurę*? Zaproponowano kilka rodzajów takich naśladowców. Podobnie jak czarne dziury są to obiekty o dużej masie w małej objętości, ale różnią się od nich w szczegółach, np. w zależności masa-tempo obrotu (spin), która jest inna niż dla czarnych dziur opisywanych w ogólnej teorii względności.

Innym przykładem jest jednokierunkowy charakter horyzontu czarnej dziury, który może wykazywać dodatkowe cechy w przypadku naśladowcy. W niektórych proponowanych modelach naśladowców, zamiast horyzontu obecna jest powierzchnia o cechach podobnych do lustra. Fale grawitacyjne, które w opisie teorii względności wpadają do środka czarnej dziury, w przypadku naśladowcy odbijają się na zewnątrz, tworząc echa oryginalnego sygnału (patrz rys. 3, gdzie pokazano, jak może on wyglądać). Podczas analizy nie znaleźliśmy przekonujących dowodów na obecność takich ech w danych.

Ogólna teoria względności może zawodzić w innych przypadkach naśladowców, w których horyzont istnieje, ale kształt czarnej dziury odbiega od tego zadanego przez ogólną teorię względności. Wiemy, że wirujące obiekty mają spłaszczony kształt. Jest to prawdziwe dla Ziemi i oczywiście dla planety Jowisz, co można sprawdzić nawet przez mały teleskop. Spłaszczenie ma związek z grawitacją, nawet jeśli wpływ ogólnej teorii względności nie jest istotny. Gdy wirującym obiektem jest czarna dziura opisywana teorią względności, spłaszczony kształt zależy dokładnie od masy czarnej dziury i jej spinu. W przypadku naśladowcy nie jest to zawsze prawda. Zbadaliśmy wiele modeli koalescencji pod kątem tej różnicy, jednak nie znaleźliśmy istotnych odstępstw od ogólnej teorii względności.

FALE GRAWITACYJNE Z DALEKICH ŹRÓDEŁ

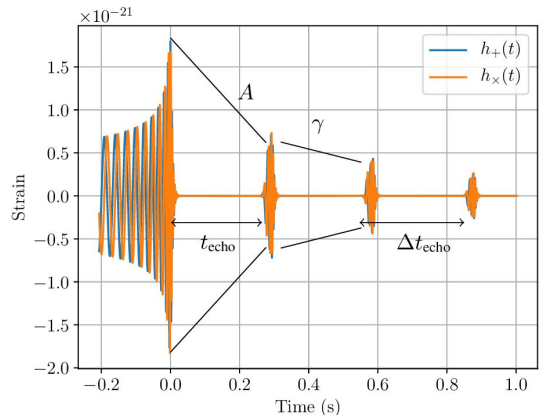
Kolory tęczy są ukryte w świetle słonecznym i ujawniają się, gdy kropła deszczu rozprasza światło. Czy czasoprzestrzeń może również ujawniać „kolory” (tj. częstotliwości) w falach grawitacyjnych? Ogólna teoria względności mówi, że nie, ale inne teorie dopuszczają dyspersję fal grawitacyjnych. Obserwujemy fale grawitacyjne wędrujące do nas od miliardów lat. Jeśli grawitony mają masę, to powinniśmy obserwować rozpraszanie fal grawitacyjnych. Oznacza to, że możemy wykryć oznakę nawet bardzo małej masy grawitonu. Możemy również spróbować wzmocnić każdy efekt związany z masą grawitonu, jeśli jest obecny w danych, łącząc informacje z wielu zjawisk. Z naszych najnowszych danych wynika, że gdyby masa grawitonu była większa niż $1,76 \times 10^{-23}$ eV/c², to efekt byłby wykrywalny. Brak tej detekcji oznacza, że masa jest mniejsza. Poprawiliśmy nasze najlepsze poprzednie oszacowanie o współczynnik 2,7. Dla porównania, masa najlżejszych neutrin to około 0,009 eV/c². Nasze nowe ograniczenie na masę grawitonu dodatkowo ograniczy swobodę alternatywnych teorii grawitacji, które przewidują masywny grawiton.

Podsumowanie

Czy więc Einstein ma rację? Czy ogólna teoria względności to właściwa teoria grawitacji? Porównaliśmy nasze pomiary z teorią dzięki nowo wykrytym koalescencjom czarnych dziur, a w przypadku nowych rodzajów testów, również za pomocą wcześniejszych obserwacji. W większości przypadków możemy połączyć wyniki z różnych zdarzeń, aby wzmocnić nasze wnioski. Najważniejsze jest to, że gdy weźmiemy pod uwagę szum detektora i ograniczoną dokładność przybliżeń, wszystko, co znaleźliśmy, jest zgodne z ogólną teorią względności. Jak pokazujemy na rysunkach, niektóre z naszych testów nie dają bardzo mocnych wyników. W przyszłości spodziewamy się wykryć dużo więcej sygnałów z układów podwójnych czarnych dziur, które umożliwią nam udzielenie bardziej definitywnej odpowiedzi.

Dowiedz się więcej:

Odwiedź nasze strony w internecie: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu
Przeczytaj artykuł naukowy o testowaniu grawitacji ([link](#)), artykuł o katalogu obserwacji fal grawitacyjnych ([link](#)), oraz artykuł o własnościach populacji czarnych dziur wynikającej z danych O1, O2 oraz O3a ([link](#)).
Zebrane dane katalogu są dostępne [Centrum Otwartych Danych Fal Grawitacyjnych](#).



Rysunek 3: Symulacja echa z obiektu naśladowczego czarnej dziury. Sygnał fali grawitacyjnej ewoluuje w czasie do momentu zderzenia się składników, po czym następuje seria ech, zniekształconych kopii sygnału, odbitych od „lustrowanej” powierzchni naśladowcy. (credit: R.K.L. Lo.)

GLOSARIUSZ

Czarna dziura: Obiekt tak zwarty, że nawet światło nie może uciec przed jego przyciąganiem grawitacyjnym.

Naśladowca: Obiekt, który jest wystarczająco podobny do czarnej dziury, aby zostać wykryty przez fale grawitacyjne z koalescencji, ale po dokładnym zbadaniu nie posiada wszystkich cech wymaganych przez ogólną teorię względności.

Szum: Wahania sygnału pomiarowego fal grawitacyjnych spowodowane różnymi efektami instrumentalnymi i środowiskowymi. Czulość detektora fal grawitacyjnych jest ograniczona przez szumy.

Spin: Tempo obrotu obiektu wokół własnej osi.

Koalescencja zwartych obiektów: proces, w którym w wyniku emisji fal grawitacyjnych dwa zwarte obiekty zbliżają się do siebie poruszając się po coraz mniejszych orbitach, zakończony zderzeniem się tych obiektów.

Echo: opisuje (czasem wielokrotną) kopię sygnału fali grawitacyjnej wywołanego odbiciem od powierzchni obiektu naśladowczego czarnej dziury.

Grawiton: cząstka przenosząca oddziaływanie grawitacyjne, analogiczna do fotonu będącego nośnikiem promieniowania elektromagnetycznego. Według ogólnej teorii względności grawitony są bezmasowe.

eV/c²: jednostka masy: Elektronowolt (eV) jest powszechnie używaną jednostką energii, np. do pomiaru, ile energii potrzeba do usunięcia elektronu z atomu. Ponieważ, według teorii Einsteina, $E = mc^2$ (gdzie E to energia, m to masa, a c to prędkość światła), podzielenie energii mierzonej w eV przez c² daje masę.



Visit our websites:
<http://www.ligo.org>
<http://www.virgo-gw.eu>

