

## GW170814: PIERWSZA OBSERWACJA FAL GRAWITACYJNYCH Z UKŁADU PODWÓJNEGO CZARNYCH DZIUR PRZEZ TRZY DETEKTORY LIGO I VIRGO

Obserwacja sygnału GW170814 jest czwartą z kolei detekcją fal grawitacyjnych emitowanych przez zlewające się układy podwójne czarnych dziur ogłaszana przez konsorcja naukowe LIGO i Virgo, i pierwszą zarejestrowaną przez detektor Advanced Virgo. Detekcja ta ilustruje ulepszone możliwości globalnej sieci trzech detektorów (dwóch Advanced LIGO i jednego Advanced Virgo), w szczególności jeśli chodzi o lepszą niż kiedykolwiek dotychczas lokalizację źródeł fal na niebie i nowe testy ogólnej teorii względności. GW170814 oznacza początek nowego, ekscytującego rozdziału w tworzącej się na naszych oczach astronomii fal grawitacyjnych.



Widok z lotu ptaka detektora fal grawitacyjnych Advanced Virgo, położonego w Cascinie obok Pizy (Włochy). Advanced Virgo jest gigantycznym interferometrem laserowym o ramionach długości 3 km (Nicola Baldocchi / The Virgo collaboration).

### WSTĘP

Pierwszego sierpnia 2017 roku detektor [Advanced Virgo](#) dołączył do drugiej kampanii obserwacyjnej („O2”) prowadzonej do tej pory przez dwa detektory [Advanced LIGO](#), która rozpoczęła się 30 listopada 2016 roku i skończyła 25 sierpnia 2017 roku. 14 sierpnia 2017 roku o godzinie 10:30:43 UTC, przejściowy sygnał fal grawitacyjnych, oznaczony jako **GW170814**, został wykryty przez zestaw automatycznych programów analizujących dane rejestrowane przez dwa detektory Advanced LIGO. Wykryty sygnał jest zgodny z modelem sygnału fal grawitacyjnych wysyłanych podczas końcowych momentów Życia układu podwójnego czarnych dziur o masach gwiazdowych, a dalsza analiza używająca danych z trzech detektorów ujawniła obecność sygnału również w danych Advanced Virgo. Obserwacja GW170814 jest pierwszą detekcją fali grawitacyjnej przy pomocy globalnej sieci trzech detektorów.

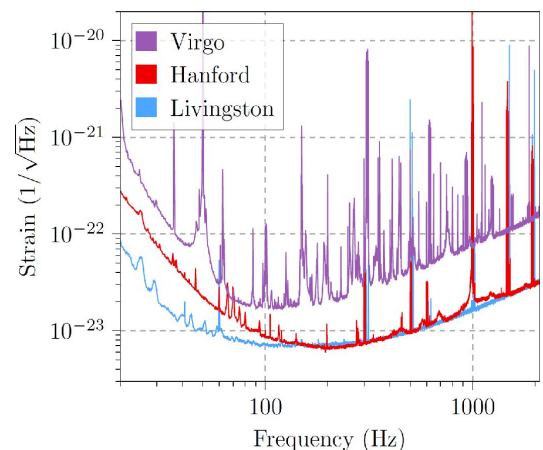
### DETEKTORY I JAKOŚĆ DANYCH

Detektory LIGO i Virgo to gigantyczne [laserowe interferometry Michelsona](#) o ramionach długości, odpowiednio, 4 km i 3 km. Detektory LIGO są zlokalizowane w USA (Hanford, stan Waszyngton i Livingston, stan Luizjana), a detektor Virgo w Cascinie, niedaleko Pizy we Włoszech. Detektory zostały zaprojektowane w latach 90tych, zbudowane na początku XX wieku i działały przez dekadę we wstępnej konfiguracji, wraz z detektorem [GEO600](#) znajdującym się w Niemczech. Wieloletni program usprawnień ma na celu poprawę ich czułości o czynnik 10 (co oznacza dostępną objętość Wszechświata większą o czynnik  $10^3 = 1,000$ ).

Przebudowa LIGO rozpoczęła się w 2010 roku i zakończyła w 2015 roku, umożliwiając kampanię obserwacyjną O1 i [pierwszą bezpośrednią detekcję fal grawitacyjnych](#), oraz dwie następne detekcje w [grudniu 2015](#) i [styczniu 2017](#).

Przebudowę Virgo rozpoczęto w 2011 roku. Usprawniono cały instrument, począwszy od luster i systemu próżniowego, do sensorów systemu laserowego. Po roku testów detektor dołączył do obserwacji O2 1 sierpnia 2017 roku. Mimo, że LIGO i Virgo wykorzystują tę samą ideę detekcji fal grawitacyjnych (interferometrię) i używają wielu podobnych rozwiązań technologicznych, oba detektory były zbudowane i są zarządzane niezależnie.

Rysunek 1 porównuje typowe [krzywe czułości](#) osiągnięte przez trzy detektory w czasie detekcji sygnału GW170814. Dane zostały następnie oczyszczone korzystając z informacji o dobrze poznanych [źródłach szumu](#), które zakłócają mierzone odkształcenie czasoprzestrzeni w znany sposób<sup>1</sup>. Kompleksowe sprawdzenie ewentualnych lokalnych lub instrumentalnych źródeł sygnału nie wykazało żadnych problemów.



**Rysunek 1:** Rysunek (oznaczony w publikacji jako Figure 2) porównuje czułość (oznaczoną jako „Strain” - odkształcenie - na osi pionowej) trzech detektorów, w funkcji częstotliwości fali (w Hz, na osi poziomej). Obie osie używają skali logarytmicznej. Dla danej częstotliwości, im mniejsze odkształcenie tym słabsza fala grawitacyjna, którą można zarejestrować. Niebieska krzywa oznacza czułość detektora LIGO Livingston, czerwona LIGO Hanford, a fioletowa detektora Advanced Virgo.

1. Podobnie jak w przypadku słuchawek dynamicznie redukujących hałas, które rejestrują dźwięki otoczenia i redukują ich poziom w sygnale, który trafia do uszu, wysyłając je „w przeciwną stronę”.

## OBSERWACJA SYGNAŁU GW170814

Identyfikacja nowego przejściowego sygnału składa się z wielu etapów. Pierwszy następuje od razu po zebraniu danych i polega na szybkiej analizie używającej [metodu filtru dopasowanego](#) do poszukiwania sygnałów-kandydatów występujących w obu detektorach LIGO w tym samym momencie. Dane Virgo nie były użyte na tym etapie, jako że czułość tego detektora była w tym momencie na niższym poziomie.

Statystycznie znaczący sygnał GW170814 został zidentyfikowany w ciągu 30 sekund od momentu oddziaływania z detektorami, co wygenerowało automatyczny alert powiadamiający stowarzyszone obserwatoria elektromagnetyczne i neutrinowe. Istotność detekcji została następnie zweryfikowana za pomocą 6 dni danych LIGO w [procedurze podobnej do tych](#), których używano w poprzednich detekcjach, obliczając [prawdopodobieństwo fałszywego alarmu](#) związanego z obserwacją, tj. oszacowano czas, po którym podobnie silne zjawisko wystąpi w wyniku fluktuacji szumów w obu detektorach. W przypadku GW170814 częstość występowania fałszywego alarmu została oszacowana na mniejszą od **1 na 27000 lat**, co oznacza bardzo wiarygodną detekcję.

Detektor Virgo również zarejestrował sygnał, co zostało potwierdzone przez dwie niezależne analizy. Pierwsza używająca metody filtru dopasowanego porównuje dwa modele: jeden, w którym GW170814 występuje w trzech detektorach (LIGO i Virgo), oraz drugi, w którym sygnał jest tylko w detektorach LIGO, natomiast Virgo rejestruje wyłącznie szum. Nasze obliczenia wykazują, że pierwszy model jest 1600 razy bardziej prawdopodobny niż drugi. Druga metoda polega na poszukiwaniu ogólnego typu sygnałów, w których częstotliwość rośnie z czasem jak sygnał [ćwierku](#) emitowany podczas

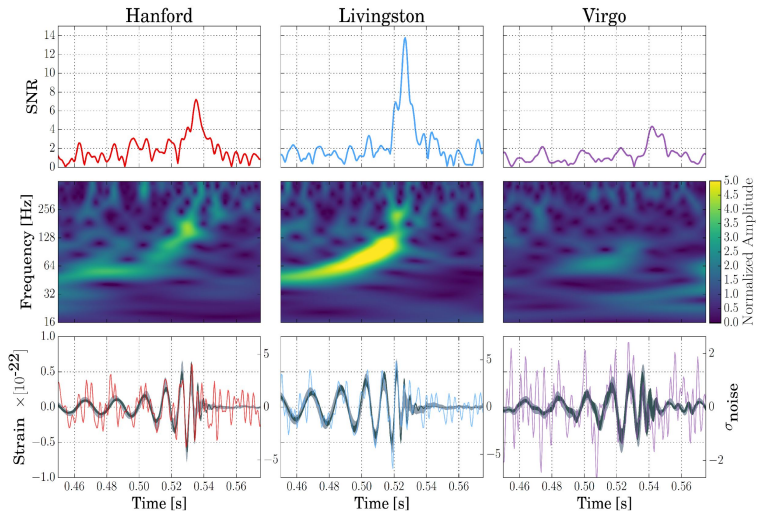
zacieśniania orbity składników układu podwójnego obiektów zwartych, ale bez zakładania konkretnego modelu emisji sygnału. Ta metoda analizy nie jest zoptymalizowana do poszukiwania fal emitowanych ze zlewających się układów podwójnych czarnych dziur, ale jest w stanie znaleźć różne typy sygnałów, i zrekonstruować kształt fali grawitacyjnej biorąc pod uwagę dane z wielu detektorów na raz. Ponadto, dla poprzednio zarejestrowanych sygnałów, zrekonstruowany model pasował bardzo dobrze do modeli układów podwójnych czarnych dziur.

Dwie takie koherentne analizy zostały porównane w przypadku GW170814 używając tylko danych LIGO, oraz danych z trzech detektorów. Moc zrekonstruowanego sygnału może być interpretowana jako częstotliwość fałszywego alarmu oznaczająca prawdopodobieństwo wystąpienia sygnału w wyniku niezależnych fluktuacji szumu. Częstotliwość fałszywego alarmu dla dwóch detektorów LIGO oszacowano na 1 na 300 lat; dla sieci trzech detektorów liczba ta zmniejsza się do 1 na 5700 lat, co oznacza, że detekcja trzech detektorów jest bardziej wiarygodna niż dwóch. Rysunek 2 ilustruje trzy różne sposoby, na jakie można przedstawiać dane zarejestrowane w momencie nadejścia sygnału GW170814.

## LOKALIZACJA ŹRÓDŁA GW170814

Położenie źródła na niebie jest ustalane na podstawie porównania różnic czasu pojawienia się sygnału w kolejnych detektorach sieci. Różnice czasów są związane ze skończoną prędkością rozchodzenia się fal, np. do 10 ms dla dwóch detektorów LIGO, oddalonych od siebie o około 3000 km. Zakładając absolutnie dokładną znajomość momentu nadejścia fali, każda różnica czasów pomiędzy parami detektorów wyznacza okrąg na niebie, na którym położone jest źródło. Używając sieci trzech detektorów otrzymuje się trzy różnice czasów, czyli trzy przecinające się w dwóch miejscach okręgi<sup>2</sup>.

W rzeczywistości, czas nadejścia sygnału jest mierzony z pewnym błędem, co oznacza, że okręgi mają pewną skończoną grubość na niebie, a ich przecięcie pewien skończony rozmiar. By poprawić lokalizację, amplituda i faza sygnału rejestrowana przez detektory jest również brana pod uwagę. Interferometryczne detektory fal grawitacyjnych są bardziej podobne do mikrofonów niż teleskopów: są czułe na sygnały nadchodzące z różnych kierunków, w szczególności najbardziej na te emitowane w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ramion detektora, natomiast dość nieczułe na sygnały rozchodzące się w płaszczyźnie detektora. Charakterystyczna czułość anteny każdego z detektorów ma cztery „ślepe” punkty na niebie, zlokalizowane w płaszczyźnie ramion. Jeśli fala nie jest wykryta przez detektor, który formalnie posiada dostateczną czułość do jej wykrycia, oznacza to, że sygnał może znajdować się w okolicy jednego z tych „ślepych” punktów.



Rysunek 2: (Rysunek 1 w naszej publikacji)

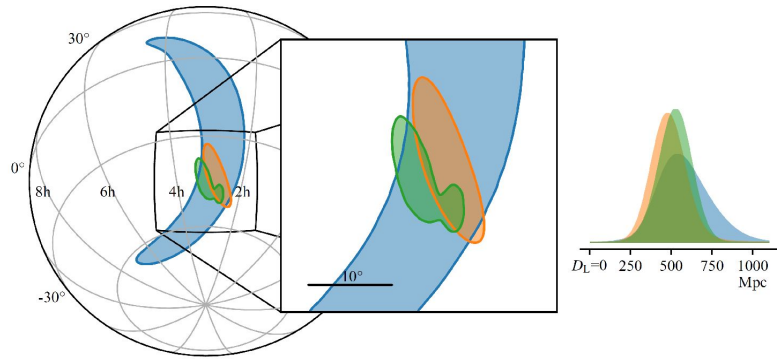
**Górny rząd:** Stosunek sygnał-szum jako funkcja czasu; maksima są przesunięte względem siebie z powodu skończonej prędkości propagacji sygnału fali grawitacyjnej. Sygnał nie dociera do wszystkich detektorów w tym samym momencie. GW170814 był obserwowany najpierw przez LIGO-Livingston, 8ms później przez LIGO-Hanford i 6ms później przez Virgo.

**Środkowy rząd:** Spektrogram (zależność czasowo-częstotliwościowa) danych: jaśniejsze miejsca odpowiadają częściom sygnału o większej mocy.

**Ostatni rząd:** szereg czasowy rejestrowany przez detektory z modelem sygnału wylonionym przez metody analizy danych wykorzystujące filtr dopasowany (czarne krzywe) oraz metody niezakładające modelu sygnału (szare obszary).

2. Dla czterech lub więcej detektorów, okręgi przecinają się w najwyższym punkcie. Z tego powodu dodanie czwartego detektora (interferometru KAGRA budowanego aktualnie w Japonii) oraz planowanego piątego detektora (LIGO-India) rozwinię jeszcze bardziej możliwości pozycjonowania sygnałów globalnej sieci detektorów interferometrycznych.

Rysunek 3 podsumowuje dokładność lokalizacji Źródła GW170814 na niebie przy pomocy kolejnych, coraz dokładniejszych metod analizy: wczesnej szybkiej lokalizacji z użyciem danych z dwóch detektorów LIGO (kolor niebieski), z dodatkowymi danymi Virgo (kolor pomarańczowy), pełna estymacja parametrów (kolor zielony, patrz poniżej). Sieć detektorów pozwala też na określenie odległości do Źródła (prawy panel Rys. 3). Lokalizacja Źródła odbywa się w trzech wymiarach.



**Rysunek 3:** Lokalizacja źródła GW170814 na niebie. Lewa część rysunku porównuje obszary na niebie wyznaczone przez różne stopnie analizy jako regiony największego prawdopodobieństwa zawierania pozycji sygnału – 90% obszary wiarygodności, definiowane w taki sposób, by prawdopodobieństwo znalezienia w nich Źródła wynosiło 90%. Obszar niebieski odpowiada wczesnej szybkiej lokalizacji z użyciem danych dwóch detektorów LIGO, obszar pomarańczowy wyznaczeniu obszaru z użyciem dodatkowych danych Virgo (mniejszy o rząd wielkości od poprzedniego: 100 stopni kwadratowych w porównaniu do 1160 stopni kwadratowych). Zielony region jest wynikiem kompletnej analizy wyznaczenia parametrów, 80 stopni kwadratowych przy użyciu trzech detektorów, co można porównać do obszaru 700 stopni kwadratowych otrzymanych podczas tej samej analizy ale z użyciem tylko danych LIGO. Prawa strona rysunku przedstawia rozkłady prawdopodobieństwa odległości jasnościowej źródła. Udział Virgo zawęży rozkład i zmniejsza jego część odpowiadającą dużym odległościom.

W sprzyjających przypadkach najbardziej wiarygodna objętość wyznaczona przez detekcję może zawierać tak niewiele galaktyk, że poszukiwanie sygnału EM zwykłymi teleskopami jest możliwe. 25 obserwatoriów przeprowadziło poszukiwania takich sygnałów, ale niczego nie znaleziono (w przypadku czarnych dziur jedyną emisją mogą być fale grawitacyjne).

## POMIAR PARAMETRÓW GW170814

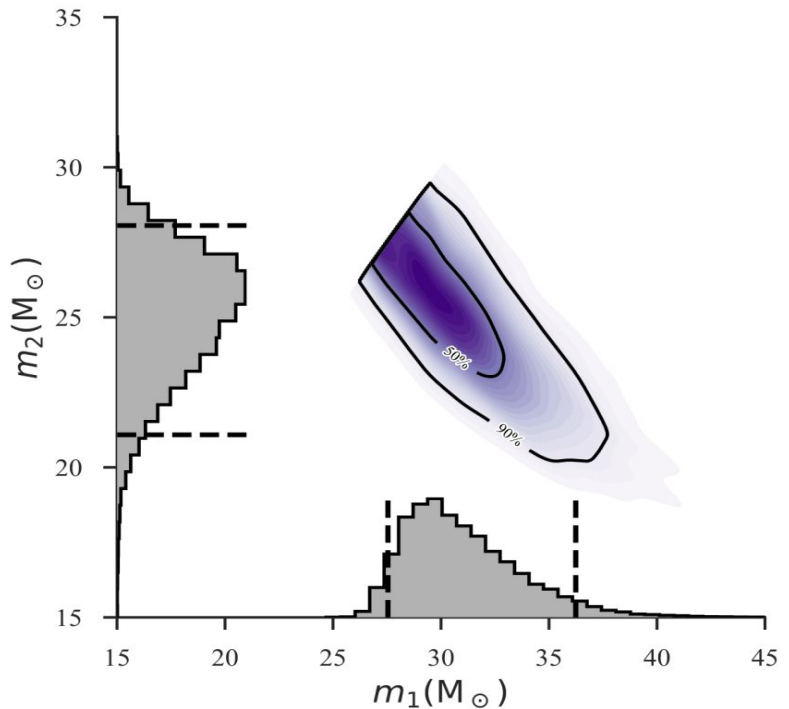
Dokładną estymację parametrów GW170814 przeprowadzono używając tych samych metod jak przy poprzednich detekcjach, tzn. porównując wykryty sygnał z dwoma niezależnymi rodzinami wzorców sygnału, których parametry zamierza się określić. Im lepiej modele pasują do danych, tym lepiej ich parametry odpowiadają prawdziwym wartościom sygnału.

Szczegóły zmierzonych parametrów GW170814 można odnaleźć w publikacji. Rysunek 4 pokazuje ograniczenia na masy składników układu, czarnych dziur.

## TESTOWANIE TEORII WZGLĘDNOŚCI Z GW170814

Testy ogólnej teorii względności podobne do przeprowadzonych wcześniej dla innych detekcji potwierdziły zgodność obserwacji z przewidywaniami teorii Einsteina. Szczegółowa analiza obserwacji GW170814 będzie przedstawiona w przygotowywanych publikacjach.

Mając do dyspozycji trzy detektory o różnej orientacji w przestrzeni (dwa detektory LIGO są praktycznie równoległe do siebie, ale nie do Virgo) pozwala dodatkowo, na przestudiowanie polaryzacji fal grawitacyjnych, tj. sposobu, w jaki fale odkształcają czasoprzestrzeń w trakcie propagowania się w niej.



**Rysunek 4:** (górnny panel rysunku 4 w publikacji): pomiar mas (w masach Słońca) czarnych dziur będących składnikami układu podwójnego GW170814. Masy te są wyznaczone równocześnie z danych, dlatego ich wspólne ograniczenia są przedstawione na jednym wykresie  $m_2$  vs.  $m_1$  ( $m_2 \leq m_1$ ): im ciemniejszy kolor, tym wyższe prawdopodobieństwo, że masy czarnych dziur równają się ( $m_1, m_2$ ). Czarne kontury oznaczają 50% i 90% obszary wiarygodności. Dodatkowe, jednowymiarowe rozkłady prawdopodobieństwa indywidualnych mas są zaznaczone kolorem szarym.



Według ogólnej teorii względności, fale grawitacyjne są **falami poprzecznymi**, co oznacza, że ściskanie i wydłużanie czasoprzestrzeni zachodzi pod ich wpływem w kierunku prostopadłym do kierunku propagacji. Ponadto, dozwolone są odkształcenia jedynie dwóch typów (polaryzacji) nazwanych '+' ('plus') oraz 'x' ('krzyż'). Ich oddziaływanie na okrąg testowych cząstek próbnych jest przedstawiony na Rys. 5.

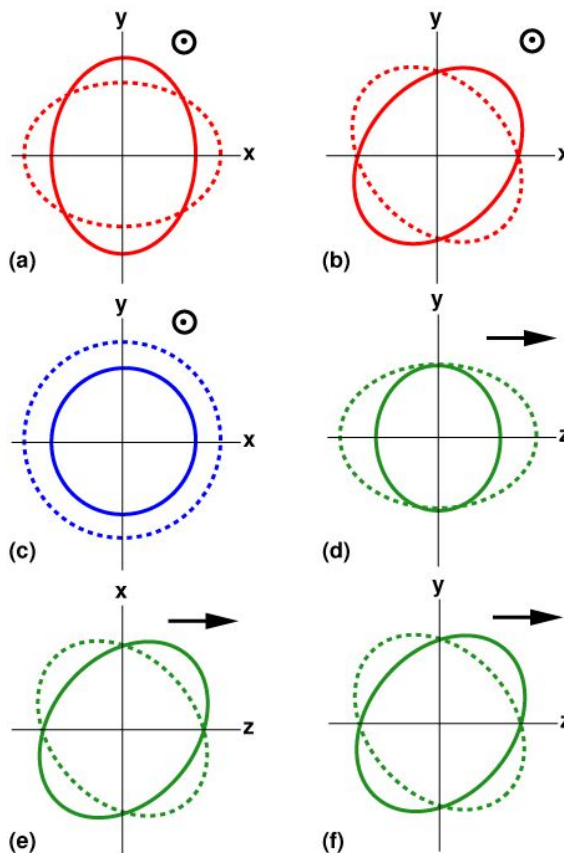
Matematycznie rzecz biorąc, w najbardziej ogólnym przypadku metryczna teoria grawitacji może mieć aż 6 niezależnych polaryzacji, włączając w to dwie przewidziane przez ogólną teorię względności. Każda dodatkowa polaryzacja odkształca czasoprzestrzeń w inny sposób i w efekcie inaczej wpływa na to, jak interferometr reaguje na sygnał. Takie zachowanie ujawniłoby się podczas porównywania sygnałów zarejestrowanych przez dwa nierównoległe do siebie detektory jako różnica, której nie da się wytłumaczyć za pomocą ogólnej teorii względności. Panele od (c) do (f) na Rys. 6 pokazują efekt tych dodatkowych polaryzacji. Panel (c) przedstawia efekt jednej fali poprzecznej (prostopadle do płaszczyzny kartki) natomiast panele od (d) do (f) przedstawiają efekty polaryzacji fali poruszającej się w  *płaszczyźnie kartki*, jak zaznaczono strzałkami.

Pierwsza eksperymentalna weryfikacja natury polaryzacji fal grawitacyjnych została przeprowadzona dzięki obserwacjom GW170814. W szczególności, pełna analiza estymacji parametrów opisana wcześniej została przeprowadzona przy założeniu innych niż w teorii względności (nieodzwolonych przez teorię względności) polaryzacji. Alternatywne polaryzacje są stanowczo słabiej preferowane przez dane niż polaryzacje + oraz x teorii względności, kolejny raz wykazując, że sygnał GW170814 jest konsyistentny z teorią Einsteina.

## KONKLUZJE

GW170814 jest czwartą potwierdzoną przez konsorcjum LIGO-Virgo detekcją zjawiska zlewania się układu podwójnego czarnych dziur. Czarne dziury obserwowane podczas tego zjawiska są podobne do składników układów GW150914 (pierwszej detekcji) i GW170104 (trzeciej detekcji), są także konsyistentne z oszacowaniami dotyczących populacji i częstości zlewania się otrzymanymi przy okazji poprzednich detekcji.

Unikalność tej detekcji polega na tym, że jest to pierwszy sygnał zarejestrowany przez dwa detektory Advanced LIGO oraz Advanced Virgo. Sieć trzech detektorów ma ogromny naukowy potencjał, polegający na znacznie lepszej lokalizacji sygnału (pozycji na niebie i odległości) oraz możliwości nowych testów teorii względności. Trzecia kampania obserwacyjna LIGO-Virgo, planowana za rok, niesie wielkie nadzieje dla szybko rozwijającej się astronomii fal grawitacyjnych i na pewno będzie bardzo ciekawa.



**Rysunek 5:** Wizualizacja sześciu polaryzacji dozwolonych przez „metryczne” teorie grawitacji. Panele (a) i (b) przedstawiają polaryzacje '+' i 'x' ogólnej teorii względności. W tych dwóch przypadkach odkształcenie czasoprzestrzeni zachodzi w kierunku prostopadłym do kierunku propagacji fali: początkowo kolista rozkład cząstek testowych jest rozciągnięty w jednym kierunku i zgniatany w drugim, po czym kierunki zamieniają się. Panele od (c) do (f) przedstawiają polaryzacje niedozwolone w ogólnej teorii względności. Panel (c) przedstawia poprzeczną polaryzację, podczas gdy panele od (d) do (f) ilustrują odkształcenia propagujące się w kierunku ruchu fali (Credit: Clifford Will – Living Reviews in Relativity)



Odwiedź nasze strony:  
<http://www.ligo.org>  
<http://www.virgo-gw.eu>



## SŁOWNICZEK

- **Czarna dziura:** Region czasoprzestrzeni wygiętej przez ekstremalnie zwarty obiekt, w którym grawitacja jest tak silna, że nawet światło nie jest w stanie z niego uciec.
- **Model fali grawitacyjnej:** Krzywa opisująca jak zmienne w czasie zaburzenie wywołane falą grawitacyjną zmienia się w czasie.
- **Szum:** Zaburzenie w pomiarze sygnału fali grawitacyjnej wywołane różnymi powodami (instrumentalnymi lub środowiskowymi). Czulość detektorów jest ograniczona szumem.

- **Kampania obserwacyjna:** Okres obserwacji, podczas którego detektory zbierają dane.
- **Czulość:** Opis zdolności detektora do wykrycia sygnału. Detektory o niższym poziomie szumu są w stanie wykryć słabsze sygnały, co oznacza, że mają lepszą czulość.
- **Odkształcenie:** Zmiana odległości między dwoma punktami w przestrzeni, deformacja wywołana przejściem fali grawitacyjnej.