

GWTC-4.0: AKTUALIZACJA KATALOGU O OBSERWACJE Z PIERWSZEJ CZĘŚCI CZWARTEJ KAMPANII OBSERWACYJNEJ LIGO-VIRGO-KAGRA

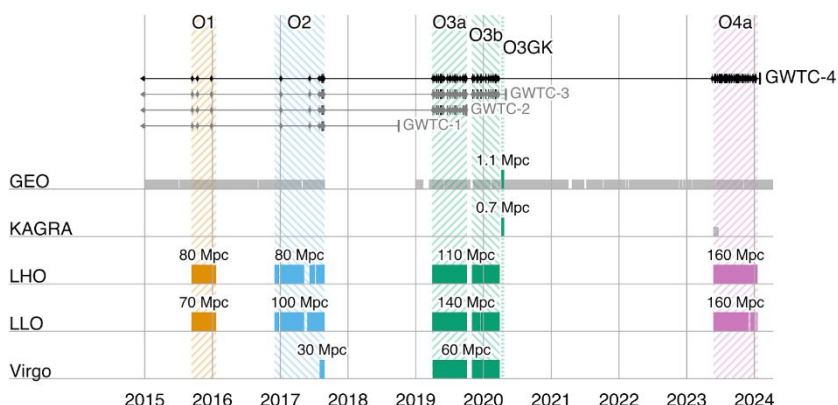
W sierpniu 2025 roku konsorcjum [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) opublikowało dane, zebrane przez [detektory interferometryczne](#) podczas pierwszej części czwartej kampanii obserwacyjnej (O4a), która trwała od maja 2023 r. do stycznia 2024 r. W danych tych odkryliśmy 128 nowych potwierdzonych sygnałów [fal grawitacyjnych](#) pochodzących z łączących się [czarnych dziur](#) i [gwiazd neutronowych](#). Wraz z publikacją danych publikujemy wersję 4.0 katalogu Gravitational Wave Transient Catalog (GWTC-4.0), który zawiera listę potencjalnych sygnałów i ich zmierzonych właściwości. Publikujemy również zestaw artykułów towarzyszących katalogowi. Wszystkie artykuły zostały wysłane do publikacji jako numer specjalny (focus issue) w czasopiśmie *Astrophysical Journal Letters*. Poniżej podsumowujemy pierwsze trzy z nich, które koncentrują się na samym opracowaniu katalogu GWTC i wynikach w nim zawartych.

WSTĘP

W artykule “GWTC-4.0: An Introduction to Version 4.0 of the Gravitational-Wave Transient Catalog” przedstawiono wprowadzenie do całego numeru specjalnego obejmujące szczegóły dotyczące innych artykułów oraz ważne informacje ułatwiające czytelnikowi zrozumienie nomenklatury używanej w tej dziedzinie.

Co kryje się w nazwach?

Zarejestrowane sygnały fal grawitacyjnych nazywamy na podstawie daty i godziny ich wykrycia zgodnie z uniwersalnym czasem koordynowanym (UTC). Pierwsze (chronologicznie) nowe zdarzenie w katalogu, oznaczone jako GW230518_125908, zostało wykryte 18 maja 2023 r. o godzinie 12:59:08 UTC. Dodajemy prefiks



Rysunek 1. Oś czasu dla kampanii obserwacyjnych z zaznaczeniem okresów zbierania danych przez obserwatoria fal grawitacyjnych [GEO](#), [KAGRA](#), [LIGO-Hanford](#) (LHO), [LIGO-Livingston](#) (LLO), i [Virgo](#). Liczby nad kolorowymi blokami określają przybliżoną odległość, z jakiej detektor może wykryć standardowe połączenie się dwóch gwiazd neutronowych – stanowi to miarę czułości poszczególnych detektorów. Na górze pokazujemy znaczniki informujące o tym, kiedy zdarzenie zostało dodane do GWTC, a także poziome paski pokazujące zakres danych w każdym katalogu.

GW do wszystkich wykrywanych przez nas sygnałów-kandydatów (jest to nieco inne podejście niż dotychczas, gdyż sygnały, które naszym zdaniem mogły być pochodzenia ziemskiego, są teraz uwzględniane w katalogu, ale z dodatkowymi danymi wyjaśniającymi, dlaczego naszym zdaniem mogą nie być to autentyczne fale grawitacyjne).

Katalogi kumulatywne

Katalog GWTC ma charakter kumulatywny – innymi słowy, GWTC-4.0 zawiera nie tylko nowe wyniki zaobserwowane w O4a, ale także wyniki z wszystkich poprzednich katalogów. Aby to zilustrować, na Rysunku 1 przedstawiamy oś czasu dla wszystkich kampanii obserwacyjnych (kolorowe paski) i zakres danych dla każdego katalogu. Nasze katalogi stosują konwencję nazewnictwa GWTC-<nr główny>.<nr poboczny>, gdzie numer główny jest zwiększany, gdy zakres danych się zwiększa, a numer poboczny zwiększa się, jeśli nastąpi zmiana w metodach/danych opisujących sygnały (np. ponowna analiza danych, jak miało to miejsce w przypadku [GWTC-2.1](#)). W przeszłości rutynowo pomijaliśmy numer poboczny, gdy wynosił on 0 (patrz np. [GWTC-3](#)). Stwierdziliśmy jednak, że może to prowadzić do pewnych nieporozumień – na przykład, czy GWTC-2 odnosi się do GWTC-2.0 czy do GWTC-2.1? Dlatego od tej pory zawsze będziemy uwzględniać numer poboczny, odnosząc się do konkretnego katalogu. Nadal jednak pomijamy ten numer, odnosząc się wyłącznie do zakresu danych (jak to pokazano na Rysunku 1).

Na Rysunku 1 widać również, że tylko dwa detektory LIGO pracowały w trakcie O4a: wszystkie potencjalne sygnały i pomiary zostały wykonane wyłącznie w oparciu o dane z tych detektorów. Detektor KAGRA krótko zbierał dane na początku O4a, ale jego czułość była niewystarczająca,

DOWIEDZ SIĘ WIĘCEJ!

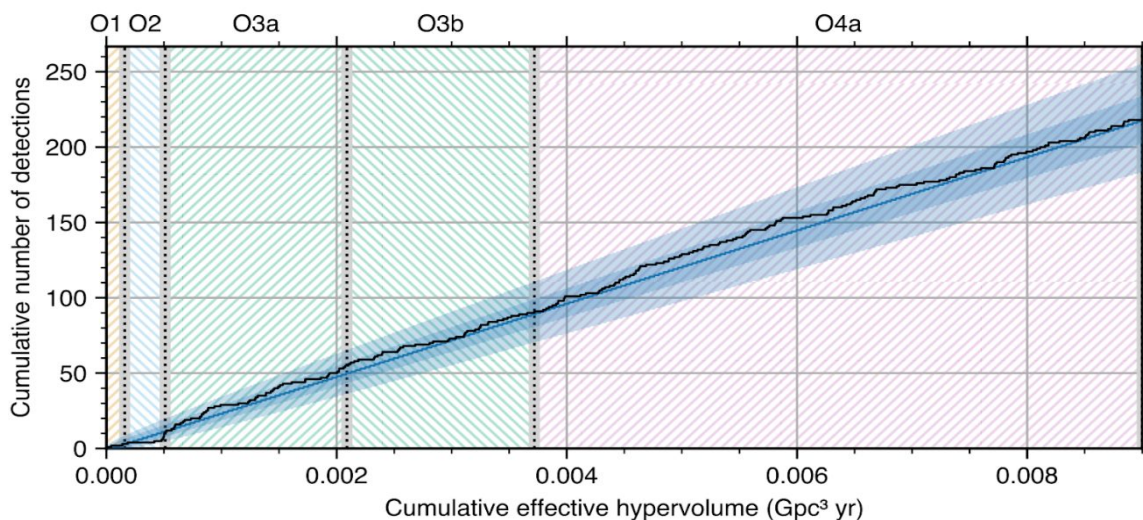
Odwiedź www.ligo.org
 nasze www.virgo-gw.eu
 strony: gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



aby wnieść wkład do wyników katalogu. W omawianym artykule wprowadzającym po raz pierwszy przedstawiamy szczegółowy opis ewolucji poszczególnych detektorów. Gromadząc te informacje w jednym miejscu, mamy nadzieję na lepszą współpracę obserwatorów z ekspertami zajmującymi się instrumentami pomiarowymi i budową detektorów.

Zagłębienie w ciemność

Możemy wyznaczyć czterowymiarową objętość w czasie i przestrzeni, którą zbadały detektory (nazywamy to „hiperobjętością”, ponieważ jest to objętość obejmująca więcej niż trzy wymiary), symulując sygnały i sprawdzając, czy zostaną one wykryte, a następnie łącząc te informacje ze szczegółami dotyczącymi współczynnika aktywności detektorów. Na Rysunku 2 przedstawiamy przybliżoną wartość tej hiperobjętości w zależności od łącznej liczby detekcji o prawdopodobieństwie pochodzenia astrofizycznego większym niż 50%. Pokazuje to, ile sygnałów wykryto w każdej kampanii obserwacyjnej; widać, że w O4a liczba zaobserwowanych sygnałów wzrosła ponad dwukrotnie! Pasma widoczne na rysunku przedstawiają niepewności: podczas gdy wielu kandydatów ma prawdopodobieństwo pochodzenia astrofizycznego bliskie 100%, to w przypadku tych, dla których prawdopodobieństwo to wynosi 50%, równie prawdopodobne jest, że są one niepożądaną fluktuacją szumu. Pasma te pokazują, jak niepewna jest liczba zaobserwowanych zdarzeń.



Rysunek 2. Łączna liczba detekcji (kandydatów znalezionych z prawdopodobieństwem bycia obiektami astrofizycznymi większym niż 50%) w zależności od przybliżonej hiperobjętości czasoprzestrzeni zbadanej przez detektory.

W dalszej części artykułu przedstawiamy przegląd obserwowanych źródeł fal grawitacyjnych o charakterze przejściowym, artykuł kończymy streszczeniem. Celem tego przeglądu nie jest zastąpienie wielu znakomitych podręczników z tej dziedziny, lecz krótkie wprowadzenie do języka i matematyki, których używamy do opisu źródeł w numerze specjalnym. Zapewnia to spójność notacji i stanowi wygodny punkt odniesienia dla osób zainteresowanych tą dziedziną. W załączniku zamieściliśmy również tabelę często używanych akronimów i słownik używanych pojęć oraz krótkie omówienie konwencji zastosowanych w analizie danych.

Artykuł wprowadzający stanowi podstawę dla reszty numeru specjalnego. Chociaż sam w sobie nie zawiera on żadnych istotnych wyników naukowych, jego celem jest wyeliminowanie powtórzeń w innych artykułach, zapewnienie ich spójności i przedstawienie jasnych definicji w tej dziedzinie.

METODY

W artykule „GWTC-4.0: Methods for identifying and characterising gravitational-wave transients” przedstawiono szczegóły metodologii wykorzystywanej do opracowania katalogu GWTC-4.0. Na początek zajmujemy się opracowywaniem teoretycznych modeli przebiegów falowych dla zderzających się czarnych dziur i gwiazd neutronowych, a następnie omawiamy pakiety oprogramowania, za pomocą których generowane są listy kandydatów. Każdy kandydat jest weryfikowany i poddawany kontroli jakości danych przed dokonaniem estymacji parametrów w celu zrozumienia właściwości źródła i przeprowadzeniem testów spójności przebiegów falowych w celu potwierdzenia podstawowych założeń zastosowanych modeli.

Wyzwanie: najbardziej skomplikowana analiza jak dotąd

Od zakończenia kampanii O3 i opublikowania katalogu GWTC-3.0 włożyliśmy wiele wysiłku w udoskonalenie naszych analiz. Wprowadziliśmy nowe modele przebiegów falowych, które lepiej opisują fizykę źródeł fal grawitacyjnych i są szybsze obliczeniowo. W katalogu GWTC-4.0 nie tylko korzystamy z tych najnowszych modeli przebiegów falowych, ale obecnie do

analizy wielu zdarzeń używamy czterech różnych modeli przebiegów falowych: jest to dwukrotnie większa liczba niż ta użyta w katalogu GWTC-3, co pozwala nam lepiej uwzględnić niedokładności w modelach. Dopracowaliśmy również nasze algorytmy wyszukiwania, wprowadzając nowe podejścia mające na celu poprawę [efektywności](#) wykrywania. Wiele z tych usprawnień skomplikowało tworzenie naszego katalogu, dlatego nieustannie rozwijamy innowacyjne technologie, aby zautomatyzować jak największą część analizy danych, co pozwala nam robić więcej i sprawniej, że nasze wyniki są łatwe do odtworzenia.

Perspektywa historyczna

Artykuł metodologiczny zawiera historyczne opisy algorytmów, sięgające, co może zaskoczyć czytelników, pierwszej kampanii obserwacyjnej. Wynika to z kumulatywnego charakteru katalogu: przed ponowną analizą starych danych nowymi metodami ważne jest, aby użytkownicy rozumieli stosowane wcześniej techniki (które mogą znacząco różnić się od metod stosowanych do nowych danych). Dlatego w tym artykule przedstawiamy zarówno perspektywę historyczną, jak i opis zmian w metodologii.

Podsumowując, artykuł metodologiczny daje przegląd stosowanego przez nas procesu pracy, pokazując, jak wykorzystujemy analizy [online/offline](#), badania wstępne oraz dokładną weryfikację, aby zapewnić, że ostateczne wyniki są rygorystyczne i najwyższej jakości.

WYNIKI

Więcej sygnałów, większa różnorodność

Odkryliśmy 128 nowych sygnałów z prawdopodobieństwem pochodzenia astrofizycznego powyżej 50%, co podwoiło całkowitą liczbę kandydatów w katalogu GWTC do 218! W artykule prezentujemy szczegółową analizę 86 z tych nowych sygnałów. Tak duża liczba detekcji jest efektem zwiększenia czułości detektorów i rozwoju technik analizy danych umożliwiających wyodrębnić sygnały z szumu.

To ekscytujące, że mamy tak wiele nowych obserwacji, w tym typowe koalescencje [układów podwójnych czarnych dziur](#), które detektory dobrze identyfikują, oraz zupełnie nowe układy mieszane czarnych dziur i gwiazd neutronowych.

Od analizy online do offline (i z powrotem)

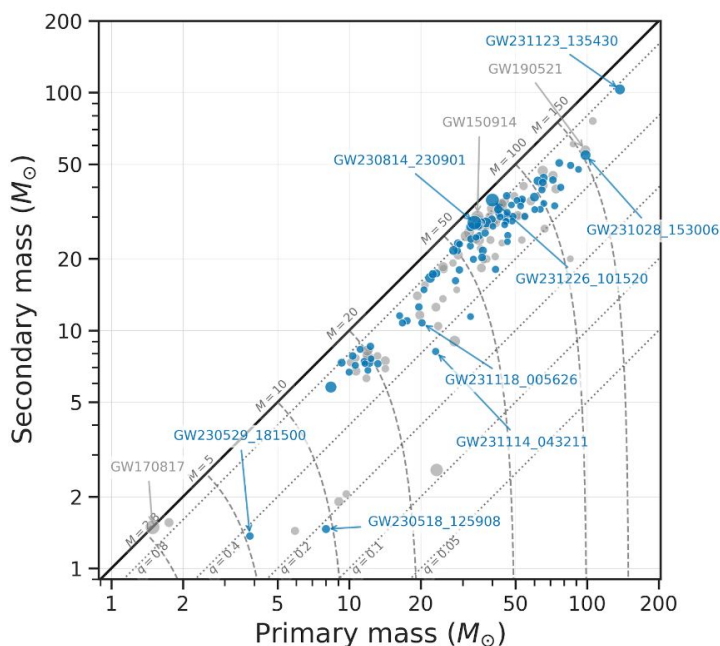
Podczas kampanii O4 wysyłaliśmy możliwie najszybciej publiczne alerty online o zaobserwowanych kandydatach, co umożliwiło innym astronomom prowadzenie obserwacji ewentualnego promieniowania elektromagnetycznego z tych układów. W O4a wysłano 1697 alertów, z których 82 uznano za będące z wysokim prawdopodobieństwem pochodzenia astrofizycznego. Obecnie katalog zawiera 128 wysoce prawdopodobnych kandydatów – są to wyniki tzw. analiz „offline”, które wykorzystują ulepszone metody wyszukiwania. Spośród tych 128 kandydatów, tylko 8 nie zostało wykrytych w analizie online, co pokazuje ich wysoką jakość i wiarygodność.

Ciekawe odkrycia

Dwa zdarzenia w katalogu mogą pochodzić z koalescencji czarnych dziur z gwiazdami neutronowymi. Takie sygnały są interesujące, ponieważ w porównaniu z koalescencją czarnych dziur, które zawierają niewiele lub wcale „rzeczywistej” materii, obecność materii z gwiazdy neutronowej może potencjalnie być wywnioskowana z sygnału fali grawitacyjnej. Choć w tych dwóch przypadkach nie wykryliśmy takich efektów, z każdą nową obserwacją rośnie szansa na ich obserwację.

Efekt masy

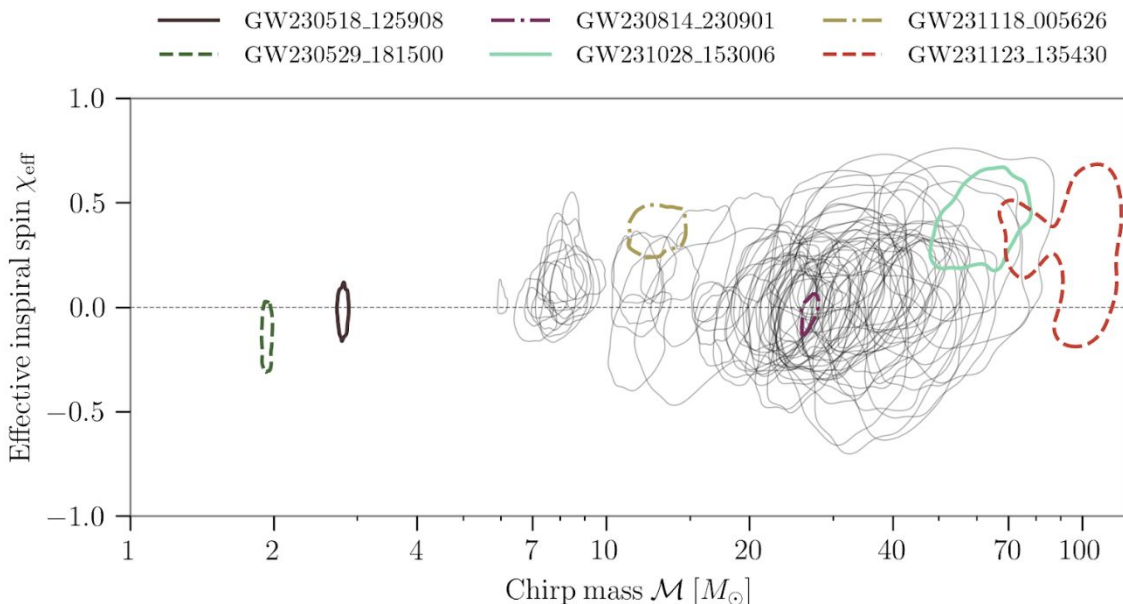
Na podstawie sygnału możemy bezpośrednio zmierzyć masę układu podwójnego. Na Rysunku 3 pokazujemy najbardziej prawdopodobne wartości mas obu obiektów. Choć nie znaleźliśmy żadnych nowych układów podwójnych gwiazd neutronowych (lewy dolny róg wykresu), to odkryliśmy bardzo interesujące prawdopodobne układy mieszane typu gwiazda neutronowa–czarna dziura oraz nowe zdarzenia o łącznych masach większych niż 150 mas Słońca!



Rysunek 3. Wykres przedstawiający masy nowych kandydatów znalezionych w O4a (na niebiesko) oraz kandydatów z O1–O3 (na szaro), z większą masą na osi poziomej i masą mniejszą na osi pionowej. Są to estymaty punktowe, które pomijają znaczną niepewność i przedstawiają najbardziej prawdopodobne wartości. Linie kropkowane oznaczają różne wartości stosunku mas q (masy mniejszej do większej), a linie przerywane – różne wartości masy całkowitej. Wszystkie masy są podane w [masach Słońca](#). (Źródło: G. Ashton, Royal Holloway University of London.)

Właściwy spin

Możemy mierzyć dwie właściwości czarnych dziur lub gwiazd neutronowych biorących udział w koalescencji: ich masę oraz obrót wokół własnej osi, czyli spin. Jeśli obiekty się obracają, możemy określić prędkość ich obrotu oraz względną orientację osi obrotu. Dla każdego sygnału obliczamy tzw. „efektywny spin”, który daje ogólny obraz obrotu obu obiektów. Duży dodatni efektywny spin oznacza, że jeden lub oba obiekty obracają się szybko i w tym samym kierunku, a ujemny efektywny spin wskazuje na to, że obiekty obracają się w przeciwnych kierunkach.



Rysunek 4. Zależność efektywnego spinu od [masy chirpu](#) dla wszystkich nowych kandydatów w katalogu GWTC-4.0; szczególnie interesujące przypadki wyróżnione są kolorem. Każdy kontur obejmuje 90% [przedział ufności](#) dla parametrów danego kandydata.

Katalog GWTC-4.0 podwoił liczbę znanych sygnałów fal grawitacyjnych. To ogromne osiągnięcie i dowód licznych ulepszeń wprowadzonych w detektorach. Nowe sygnały dostarczają nam wielu nowych informacji o czarnych dziurach i gwiazdach neutronowych i budzą ogromne podekscytowanie w społeczności naukowej, umożliwiając szeroki wachlarz nowych badań.

DOWIEDZ SIĘ WIĘCEJ!

Odwiedź nasze strony:

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Przeczytaj darmowe preprinty pełnych artykułów naukowych:

- artykuł wprowadzający: [tutaj](#) lub na [arXiv](#),
- artykuł metodologiczny: [tutaj](#) lub na [arXiv](#),
- artykuł z wynikami: [tutaj](#) lub na [arXiv](#).

SŁOWNICZEK

Czarna dziura: Obszar czasoprzestrzeni, w którym grawitacja jest tak silna, że uniemożliwia ucieczkę czegokolwiek, w tym światła. Czarne dziury występują w różnych rozmiarach: *czarne dziury o masach gwiazdowych* powstają w wyniku zapadania się gwiazd i mają masy od kilku mas Słońca do około 65 mas Słońca. *Czarne dziury o masach pośrednich* mają masy od około 100 mas Słońca do 10⁵ mas Słońca. Z kolei *supermasywne czarne dziury* mają od ponad 10⁶ do ponad 10⁹ mas Słońca.

Masa ćwierku: Pewna matematyczna kombinacja mas każdego z obiektów w układzie podwójnym. Masa ćwierku determinuje w wiodącym rzędzie ewolucję orbity w wyniku utraty energii układu podwójnego poprzez emisję fal grawitacyjnych.

Przedział ufności (przedział wiarygodności): Określony jest przez procent przypadków, dla których prawdziwa wartość jakiegoś parametru znajduje się w podanym przedziale.

Współczynnik aktywności (ang. duty cycle): Ułamek okresu czasu, w którym sygnał lub system, np. detektor, jest aktywny.

Efektywność: Ułamek wykrytych symulowanych sygnałów przy założeniu losowego kierunku Źródła i losowego czasu nadejścia sygnału. Wyrażana jako funkcja rodzaju przebiegu falowego i jego amplitudy.

Fale grawitacyjne: Odształcenia czasoprzestrzeni powstające w wyniku najbardziej gwałtownych procesów we Wszechświecie, takich jak koalescencja gwiazd neutronowych lub czarnych dziur.

Gwiazda neutronowa: Pozostałość po masywnej gwiazdzie o masie powyżej 8 mas Słońca, ale mniejszej niż 20 mas Słońca. Gdy gwiazda wyczerpie swoje paliwo jądrowe, jej jądro zapada się do gwiazdy neutronowej, niezwykle gęstej obiektu, w którym gęstości przewyższają gęstość jądrową. Zewnętrzne warstwy odrzucają się z bardzo dużymi prędkościami tworząc supernową. Gwiazdy neutronowe mają masę porównywalną z masą Słońca, lecz promień zaledwie około dziesięciu kilometrów.

Szum: Fluktuacje w sygnale pomiaru fal grawitacyjnych spowodowane różnymi efektami instrumentalnymi i środowiskowymi. Czułość detektora fal grawitacyjnych jest ograniczona przez szumy.

Analiza offline: Analizy offline to analiza danych z poprzedniego okresu obserwacyjnego, zazwyczaj podczas przerw, gdy detektory nie działają z powodu konserwacji i modernizacji. Uzupełniają one analizy w czasie rzeczywistym (tzw. analizy online), prowadzone podczas okresów obserwacyjnych.

Szacowanie (estymacja) parametrów: Technika statystyczna służąca do uzyskania wartości parametrów astrofizycznych odpowiadających sygnałowi fal grawitacyjnych.

Pakiet oprogramowania (ang. search pipeline): Zbiór programów komputerowych realizujących ciąg procesów, które przygotowują dane do analizy, filtrują je, a następnie obliczają różne wielkości w celu odrzucenia jak największej liczby zdarzeń będących szumem oraz oszacowania istotności potencjalnych zdarzeń astrofizycznych.

Spin: Szybkość i kierunek obrotu (tj. moment pędu) czarnej dziury rotującej wokół własnej osi. Jedną z fundamentalnych własności czarnej dziury, obok masy i ładunku.

Odształcenie: Względna zmiana odległości między dwoma punktami pomiarowymi spowodowana deformacją czasoprzestrzeni przez przechodzącą falę grawitacyjną. Typowe odształcenie najsilniejszych fal grawitacyjnych docierających do Ziemi jest bardzo małe — zazwyczaj poniżej 10⁻²¹.

Postać (ang. waveform) fali grawitacyjnej: Reprezentacja ewolucji amplitudy sygnału fali grawitacyjnej w czasie.