

GWTC-2: ROZSZERZONY KATALOG DETEKCJI FAL GRAWITACYJNYCH

Prezentujemy katalog GWTC-2 (czyli „Gravitational-Wave Transient Catalog 2”) uaktualnionych obserwacji fal grawitacyjnych dokonanych przez interferometry [LIGO](#) i [Virgo](#) od czasu pierwszej detekcji fal grawitacyjnych w roku 2015 do końca pierwszej połowy trzeciej kampanii obserwacyjnej, oznaczanej symbolem O3a. Kampania O3a zaczęła się 1go kwietnia i trwała do 1go października 2019 r., w czasie jej trwania dokonano 39 nowych detekcji fal grawitacyjnych, co przy 11 już potwierdzonych w katalogu [GWTC-1](#) zwiększyło do 50 łączną liczbę obserwacji opublikowanych w GWTC-2. Źródła sygnałów fal grawitacyjnych zarejestrowanych podczas O3a pokrywają szeroki zakres parametrów astrofizycznych. Wśród nich znalazły się zjawiska spójne z trzema typami zderzeń: dwóch czarnych dziur (ang. *binary black holes*, BBH), dwóch gwiazd neutronowych (ang. *binary neutron stars*, BNS) i układów mieszanych złożonych z gwiazdy neutronowej i czarnej dziury (ang. *neutron star-black hole*, NSBH).

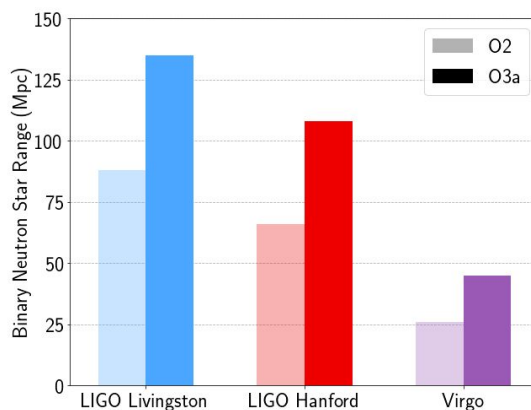
Znaczące jest to, że kampania O3a przyniosła około trzy razy więcej potwierdzonych obserwacji niż dwie poprzednie kampanie obserwacyjne (O1 i O2) razem wzięte. Ponadto detektor Virgo był w stanie dołączyć do dwóch detektorów LIGO przez ponad cały czas trwania O3a, w której co najmniej jeden z trzech detektorów był aktywny przez około 97% czasu obserwacji, a co najmniej dwa były aktywne przez około 82% czasu. Niektóre wyjątkowo interesujące zdarzenia to druga w historii obserwacja koalescencji dwóch gwiazd neutronowych, koalescencja dwóch czarnych dziur o największej w historii dysproporcji mas oraz obserwacja bardzo masywnego układu czarnych dziur o łącznej masie około 150 razy większej od masy Słońca. W tym podsumowaniu opisujemy usprawnienia wprowadzone w detektorach LIGO i Virgo, które umożliwiły te odkrycia, a także wyjaśniamy znaczenie tych odkryć dla astrofizyki.

DETEKCJA FAL GRAWITACYJNYCH

39 detekcji dokonanych w trakcie kampanii O3a jest owocem usprawnień detektorów LIGO i Virgo, lepszej jakości danych, a także wykorzystania różnorodnych procedur do poszukiwania fal grawitacyjnych. [Niedawne udoskonalenia](#) oprzyrządowania detektorów, mające na celu redukcję szumów i zwiększenie czułości, obejmują zastosowanie laserów o większej mocy oraz nowych i ulepszonych zwierciadeł, a także lepszą kontrolę światła rozproszonego. Zmiany te doprowadziły do zwiększenia zarówno zakresu częstotliwości, jak i zasięgu obserwacji dla wszystkich trzech detektorów, poszerzając nasze spojrzenie na wszechświat. [Mediana](#) rozkładu największej odległości, dla której możemy jeszcze obserwować typowe łączenie się gwiazd neutronowych, wzrosła o około 63% od kampanii O2 do O3a, jak pokazano na [Rys. 1](#). Kolejnym istotnym krokiem w kierunku odkrywania nowych Źródeł fal grawitacyjnych jest poprawa jakości „surowych” danych z detektorów. Ten [proces przygotowania danych](#) polega na ich kalibracji, usuwaniu szumów i krótkotrwałych zakłóceń instrumentalnych („gliczy”).

Najpierw kalibrujemy zmiany mocy optycznej każdego z detektorów otrzymując bezwymiarowe [odkształcenie czasoprzestrzeni](#) (amplitudę fali grawitacyjnej) w czasie zbliżonym do czasu rzeczywistego, co umożliwia wstępne wykrycie ewentualnego sygnału. Później poprawiamy kalibrację redukując systematyczne błędy i odejmując zakłócenia, co dalej zwiększa zasięg instrumentów i pozwala na wykrycie słabszych sygnałów fal grawitacyjnych ukrytych w danych.

W analizie danych fal grawitacyjnych najczęstszym problemem związanym z jakością danych są „glicze”. Są one krótkotrwałymi przejściowymi zakłóceniami, wywołanymi różnymi przyczynami, takimi jak działanie mechanicznej migawki kamery lub rozpraszanie światła z wiązki lasera. Inne glicze, np. szerokokopasmowe, ale krótko trwające zakłócenia zwane blipami, mają bardziej tajemnicze pochodzenie. Jednym ze sposobów, w jaki identyfikujemy i klasyfikujemy glicze w danych LIGO i Virgo, jest platforma współpracy z tysiącami naukowców-amatorów o nazwie Gravity Spy (zobacz jak i Ty możesz nam pomóc identyfikować glicze w [Gravity Spy](#)). Po zidentyfikowaniu istotnych zakłóceń, usuwamy je z listy kandydatów na fale grawitacyjne, jak pokazano na [Rys. 2](#). Osiem z 39 zdarzeń, które zaobserwowaliśmy w kampanii O3a, skorzystało na procedurze usuwania gliczy na wstępnym etapie przetwarzania danych, przed analizą estymacji (szacowania) astrofizycznych parametrów Źródeł.



Rysunek 1. [Mediana](#) wartości zasięgu obserwacji przez poszczególne detektory sygnałów z układów podwójnych gwiazd neutronowych podczas drugiej kampanii obserwacyjnej (O2) w porównaniu z pierwszą połową trzeciej kampanii (O3a).

1 megaparsek (Mpc) to około 3,26 mln lat świetlnych. (Credit: Współpraca LIGO-Virgo/Eve Chase/Caitlin Rose/Northwestern / University of Wisconsin-Milwaukee).

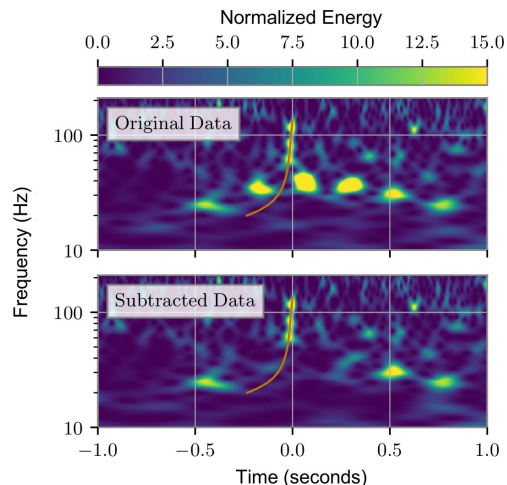
Podczas poszukiwania fal grawitacyjnych, identyfikacja kandydatów odbywa się w dwóch skalach czasowych. Po pierwsze, wiele metod analizy danych przetwarza dane od razu, w celu wygenerowania [publicznych alertów o detekcji](#), dostępnych w ciągu kilku minut. Następnie ponownie analizujemy dane tworząc ulepszoną listę kandydatów, wykorzystując zakalibrowaną kalibrację danych, ocenę jakości danych oraz ulepszone metody obliczania istotności statystycznej. Decydując o tym, którzy kandydaci spełniają warunki astrofizycznego pochodzenia sygnału, ustalamy by częstotliwość wystąpienia fałszywego alarmu nie była większa niż dwa razy w roku (częstotliwość fałszywego alarmu to spodziewana w ustalonym przedziale czasu liczba przypadków przypadkowego pojawienia się w danych sygnału określonego typu, z powodu zakłóceń). Z 39 sygnałów znalezionych podczas O3a, 26 było wcześniej wykrytych w czasie zbliżonym do rzeczywistego i zgłoszonych w publicznych alertach, a 13 zostało wykrytych po dokładniejszej analizie i jest opublikowanych po raz pierwszy w katalogu GWTC-2.

Przy okazji GWTC-2 zmieniliśmy konwencję nazewnictwa dla zgłoszonych zjawisk grawitacyjnych. Stara konwencja używania daty obserwacji jest kontynuowana dla wcześniej opublikowanych zdarzeń, włączając w to ostatnie: GW190412, GW190425, GW190521 i GW190814. Jednak nowe sygnały GWTC-2 zawierają dodatkowo w nazwie czas UTC ich wykrycia; dla przykładu GW190701_203306 (patrz rys. 2) został wykryty o godzinie 20:33:06 UTC 1 lipca 2019 roku. W ten sposób otrzymujemy unikalne nazwy sygnałów dla dwóch i więcej zdarzeń wykrytych tego samego dnia, co miało miejsce trzy razy w O3a.

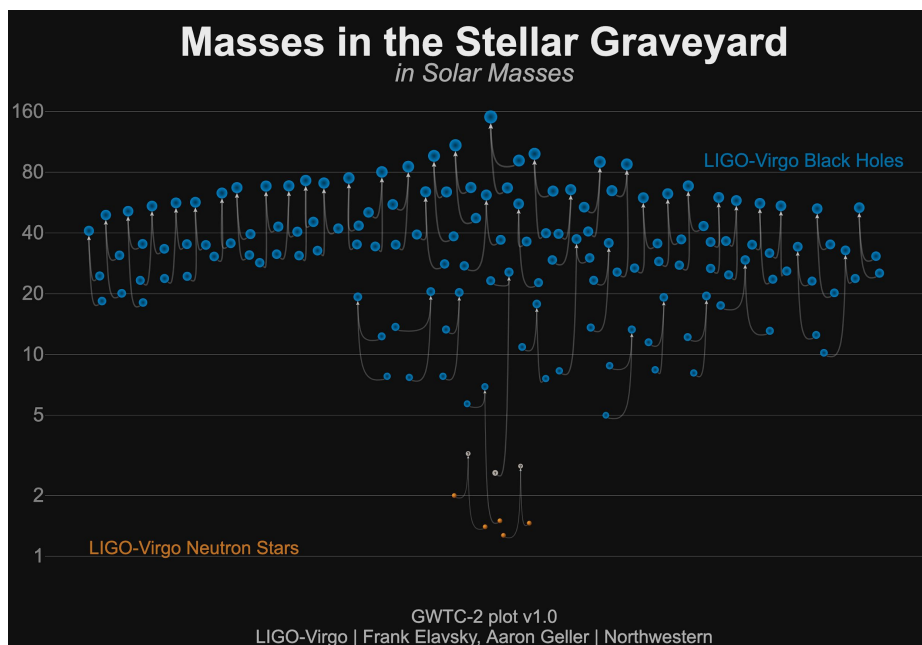
POMIAR PARAMETRÓW ASTROFIZYCZNYCH

Badamy astrofizyczną naturę każdego zdarzenia poprzez proces zwany estymacją parametrów, który ujawnia wartości wielu astrofizycznych właściwości unikalnych dla każdego zdarzenia związanego z falą grawitacyjną. Mierzymy tzw. *parametry zewnętrzne*, które opisują związek układu podwójnego z nami na Ziemi, takie jak odległość do Źródła, położenie Źródła na niebie i orientacja układu podwójnego z punktu widzenia obserwatora. Dodatkowo mierzymy tzw. *parametry wewnętrzne*, które odnoszą się do właściwości, takich jak masy i własne momenty pędu (spiny) każdego [zwartego obiektu](#) w układzie podwójnym.

Na podstawie parametrów zdarzenia obliczamy [przebiegi czasowe](#), które reprezentują oczekiwane odkształcenie czasoprzestrzeni przez falę grawitacyjną. Następnie porównujemy tę prognozę z danymi zebranymi przez LIGO i Virgo, uwzględniając wszelkie zakłócenia obecne w detektorach. Dzięki technikom szacowania parametrów dostajemy w efekcie 90% [przedziały ufności](#), które reprezentują zakres wartości parametrów zgodny z danymi.

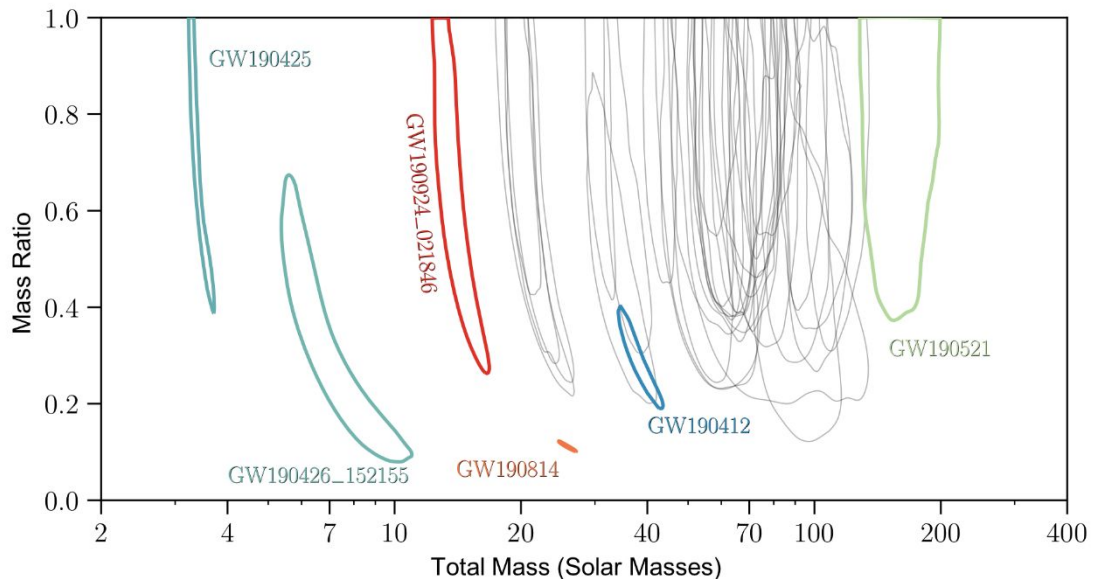


Rysunek 2. Spektrogram (czyli zależność czasowo-częstotliwościowa) danych zawierających sygnał GW190701_203306 przed i po usunięciu zakłócenia. W tym przypadku rozproszone światło w detektorze LIGO Livingston wywołało zakłócenie w postaci zwiększonego poziomu szumu o częstotliwości poniżej około 40 Hz. (Zaadaptowane z Rys. 5 z naszej [pracy](#)).



Rysunek 3. Zbiór mas dla szerokiej gamy zwartych obiektów. Grafika przedstawia czarne dziury (niebieskie) i gwiazdy neutronowe (pomarańczowe) oraz obiekty o nieokreślonej naturze (szare), wykryte za pomocą obserwacji fal grawitacyjnych. Każda koalescencja zwartego układu podwójnego odpowiada trzem zwartym obiektom: dwóm łączącym się obiektom i końcowej pozostałości po połączeniu (Źródło: LIGO Virgo Collaboration / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern).

Nasze 39 zdarzeń obejmuje szeroki zakres mas zawierających bogactwo informacji na temat historii i powstawania czarnych dziur i gwiazd neutronowych we wszechświecie. Sygnał fali grawitacyjnej generowany na długo przed połączeniem się obiektów, zależy głównie od specjalnej kombinacji poszczególnych mas składników, zwanej [masą ćwierku](#). Inne ważne, zależne od mas parametry to **całkowita masa** każdego układu (czyli sumę mas zwartych obiektów) i [stosunek mas](#): iloraz masy lżejszego zwanego obiektu do masy cięższego.



Rysunek 4. Oszacowane wartości stosunku mas i całkowitej masy dla wszystkich zdarzeń z kampanii O3a. Kontury reprezentują 90% przedziały ufności. Na rysunku wyróżniono sześć zdarzeń (na podstawie Rys. 6 z naszego [artykułu](#)).

WYJĄTKOWE ODKRYCIA PODCZAS KAMPANII O3a

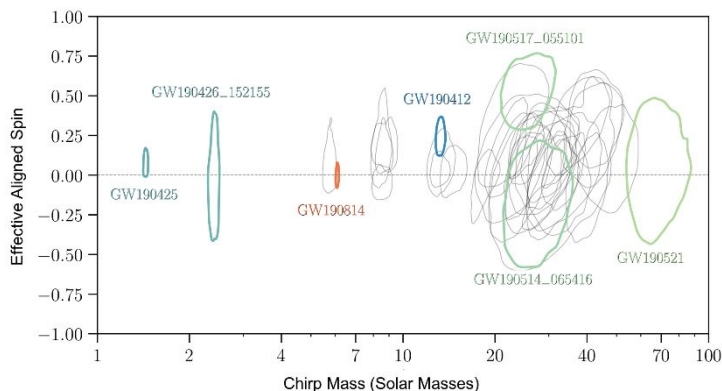
Rysunek 3 ilustruje różnorodność mas zwartych obiektów z katalogu GWTC-2, od gwiazd neutronowych o masie 1,4 masy Słońca do czarnej dziury o masie około 150 mas Słońca. **Rysunki 4 i 5** przedstawiają osiem wybranych sygnałów, z których cztery opisano w oddzielnych publikacjach:

- [GW190412](#): pierwszy BBH z wyraźnie asymetrycznymi masami składników, który wskazuje również na obecność [wyższych harmonicznych](#) w sygnale;
- [GW190425](#): druga, po sygnale [GW170817](#), detekcja fali grawitacyjnej zgodna z BNS;
- [GW190426_152155](#): sygnał z układu ze składnikami o małych masach, zgodny z NSBH lub z BBH;
- [GW190512_065416](#): sygnał BBH z najmniejszym, ze wszystkich zdarzeń O3a, równoległym (do orbitalnego momentu pędu) efektywnym spinem;
- [GW190517_055101](#): sygnał BBH z największym, ze wszystkich zdarzeń O3a, równoległym (do orbitalnego momentu pędu) efektywnym spinem;
- [GW190521](#): sygnał BBH z układu o całkowitej masie przekraczającej 150 mas Słońca;
- [GW190814](#): wysoce asymetryczny układ o niejednoznacznej naturze, odpowiadający połączeniu czarnej dziury o masie 23 mas Słońca ze zwartym obiektem o masie 2,6 masy Słońca, który jest albo najlżejszą czarną dziurą, albo najcięższą gwiazdą neutronową obserwowaną w zwartym układzie podwójnym;
- [GW190924_021846](#): prawdopodobnie najmniej masywny sygnał z układu BBH, tj. z oboma obiektami przekraczającymi 3 masy Słońca.

Dodatkowo katalog GWTC-2 zawiera zdarzenia, w których występują zwarte objekty o masach należących do tzw. „dolnej przerwy masowej” obejmującej przedział pomiędzy 2,5 a 5 masami Słońca. Ze względu na niewielką liczbę obserwacji w tym zakresie mas, astrofizycy przez wiele lat dyskutowali istnienie przerwy masowej. Jednak kampania O3a znalazła potencjalne objekty w przerwie masowej, takie jak lżejsze składniki układów związanych z sygnałami [GW190814](#) i [GW190924_021846](#). Jak widać na **Rys. 4**, układ związany z [GW190521](#) ma największą całkowitą masę spośród wszystkich układów zaobserwowanych w kampanii O3a - jest ona prawie dwukrotnie większa od masy układu [GW170729](#), najbardziej masywnego układu BBH z katalogu [GWTC-1](#). Ponadto [GW190521](#) najprawdopodobniej obejmuje najcięższą pojedynczą czarną dziurę wykrytą dotychczas za pomocą obserwacji fal grawitacyjnych, o masie ponad 90 mas Słońca. Kilka innych zdarzeń może mieć całkowitą masę powyżej 100 mas Słońca, m.in. [GW190519_153544](#), [GW190602_175927](#) i [GW190706_222641](#).

Katalog GWTC-2 obejmuje układy, takie jak GW194012 i GW190814 związane z połączeniem czarnej dziury z lżejszym towarzyszem, których składniki mają masy bardziej asymetryczne niż jakiegokolwiek źródło przedstawione w GWTC-1. Asymetryczne masy wzmacniają wkład wyższych harmonicznych do sygnału, co pokazano w detekcji [GW190412](#). Zaktualizowany katalog GWTC-2 zawiera również kilka innych unikalnych osiągnięć astronomii fal grawitacyjnych: w kampanii O3a znaleziono najodleglejsze zdarzenie wykryte do tej pory, a także dziewięć zdarzeń zlokalizowanych na niebie w obszarze o powierzchni mniejszej niż 1% całkowitej powierzchni nieba.

Spiny, czyli własne [momenty pędu](#) zwartych obiektów, mogą dodatkowo ujawnić informację o historii ewolucji układów podwójnych. Spiny mogą mieć wartości od zera - dla nie obracającego się obiektu, do pewnej wartości maksymalnej. Zwykle mierzymy zależny od spinów parametr nazywany „efektywnym równoległym (do orbitalnego momentu pędu układu) spinem”, który jest określoną kombinacją spinów składników układu przed ich połączeniem. Na **Rys. 5** przedstawiamy zależność zmierzonych efektywnych równoległych spinów od mas ćwierku dla każdego zdarzenia. Ujemna wartość efektywnego równoległego spinu wskazuje na niewspółosiowe spiny, co sugeruje, że układ podwójny mógł powstać w gęstym środowisku, takim jak [gromada kulista](#).



Rysunek 5. Oszacowanie efektywnych równoległych spinów i mas ćwierków dla wszystkich zdarzeń O3a. Kontury reprezentują 90% przedziały ufności (na podstawie Rys. 7 z naszego [artykułu](#)).

Jak zaznaczono na **Rys. 5**, układ GW190517_055101 ma prawdopodobnie największy efektywny równoległy spin. W katalogu GWTC-2 nie zidentyfikowano efektywnych równoległych spinów o wartościach ujemnych, chociaż GW190514_065416 prawdopodobnie ma najmniejszy efektywny równoległy spin. Ponadto spiny mogą ujawnić [precesje](#) układu podwójnego; katalog GWTC-2 zawiera zdarzenia, które niezbyt silnie potwierdzają wystąpienie precesji, są to GW190412 i GW190521.

ŚWIETLANA PRZYSZŁOŚĆ ASTRONOMII FAL GRAWITACYJNYCH

Jakkolwiek surrealistyczne może się to wydawać, wykrywanie fal grawitacyjnych stało się obecnie rutynowe, i to zaledwie pięć lat po [pierwszej detekcji](#), która miała miejsce we wrześniu 2015 roku. Dzięki obecnie 50. zarejestrowanym sygnałom fal grawitacyjnych jesteśmy w stanie lepiej zbadać populację czarnych dziur i gwiazd neutronowych we Wszechświecie (zobacz [podsumowanie](#)). Dodatkowo detekcje fal grawitacyjnych zwiększają również nasze zrozumienie teorii grawitacji, tj. ogólnej teorii względności (zobacz [podsumowanie](#)).

39 detekcji w pierwszych 6 miesiącach kampanii obserwacyjnej O3 zapowiada obiecującą przyszłość astronomii fal grawitacyjnych. Analiza drugiej części kampanii O3 (zwanej O3b) jest obecnie w toku - jej wyniki jeszcze bardziej rozbudują katalog zaobserwowanych przejściowych sygnałów fal grawitacyjnych. Po zakończeniu kampanii O3 detektory są poddawane dodatkowym inżynierskim ulepszeniom w celu poprawienia ich czułości w czasie kolejnej, czwartej już kampanii obserwacyjnej (O4). Podczas oczekiwania na instrumentalne udoskonalenia i budowę nowych detektorów, społeczność astronomów fal grawitacyjnych będzie badać, na podstawie otrzymanych dotychczas obserwacji, naturę czarnych dziur i gwiazd neutronowych we Wszechświecie.

SŁOWNICZEK

Masa ćwierku: matematyczna kombinacja mas dla każdego zwartego układu podwójnego. Masa ćwierku jest kluczowym parametrem opisującym charakterystyczny wzrost częstotliwości fali grawitacyjnej podczas zacieśniania się orbity układu podwójnego w czasie spiralowania

Obiekt zwarty: obiekt astrofizyczny o wyjątkowo dużej masie przy małym rozmiarze, taki jak czarna dziura, biały karzeł lub gwiazda neutronowa.

Kształt fali grawitacyjnej: zależność amplitudy fali grawitacyjnej rejestrowanej przez detektor od czasu

Stosunek mas: stosunek masy lżejszego do cięższego obiektu zwartego

Mediana: wartość dokładnie w środku danego rozkładu, tak że połowa pozostałych wartości leży powyżej, a połowa poniżej wartości mediany

Szacowanie (estymacja) parametrów: techniki statystyczne stosowane do uzyskania parametrów astrofizycznych odpowiadających sygnałowi fali grawitacyjnej

Masa Słońca: wynosi $2 \cdot 10^{30}$ kg i jest powszechnie używaną w astronomii jednostką masy

Odształcenie: zmiana długości ramienia detektora interferometrycznego, spowodowana deformacją czasoprzestrzeni przez fale grawitacyjne przechodzące przez detektor, podzielona przez całkowitą długość ramienia.

DOWIEDZ SIĘ WIĘCEJ:

Odwiedź nasze strony internetowe:

www.ligo.org, www.virgo-gw.eu.

Przeczytaj ogólnodostępną, wstępną wersję artykułu naukowego na <https://dcc.ligo.org/P2000061/public>.

Dane z trzydziestu dziewięciu obserwacji zarejestrowanych podczas O3a są dostępne na serwerze Centrum Otwartych Danych Fal Grawitacyjnych GWOSC (ang. Gravitational Wave Open Science Center) dostępnym poprzez portal

<https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC-2>. Strona GWOSC zawiera kompletną dokumentację i przykłady kodów do analizy danych, oraz tutoriale by pomóc Ci w odkrywaniu publicznie dostępnych zbiorów danych.



Nasze strony www:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>

