

# ZMARSZCZKI CZASOPRZESTRZENI



**mgr Aleksandra  
Olejak**

Jest doktorantką w Centrum Astronomicznym im. Mikołaja Kopernika Polskiej Akademii Nauk w grupie prof. Krzysztofa Belczyńskiego. Główne zainteresowania naukowe to: ewolucja masywnych gwiazd w izolowanych układach podwójnych, ścieżki ewolucyjne prowadzące do powstawania ciasnych układów podwójnych czarnych dziur, pochodzenie sygnałów fal grawitacyjnych odbieranych przez detektory LIGO i Virgo. Laureatka stypendium Start FNP 2022 oraz wyróżnienia im. prof. Adama Sobiczewskiego.  
aleksandra.olejak@wp.pl

Dzięki skonstruowaniu detektorów odbierających fale grawitacyjne możliwe jest penetrowanie najdalszych zakątków Wszechświata w poszukiwaniu czarnych dziur i gwiazd neutronowych.

## Aleksandra Olejak

Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika  
Polskiej Akademii Nauk w Warszawie

**P**rzeźren w astrofizyce czasami staje się pojęciem dużo bardziej skomplikowanym niż nasze intuicyjne wyobrażenie odnoszące się do codziennego otoczenia. Od 2016 roku stała się dostępna zupełnie nowa strategia badania przestrzeni kosmicznej w związku z ogłoszeniem pierwszej detekcji fal grawitacyjnych, czyli wykryciem niezwykle subtelnych zaburzeń czasoprzestrzeni. Zarejestrowany sygnał o nazwie GW150914 pochodził z połączenia się dwóch czarnych dziur o masach oszacowanych na 29 i 36 mas Słońca. Sygnał ten, przemierzając Wszechświat z prędkością światła, dotarł do Ziemi z odległości około 400 Mpc (1 Mpc =  $3 \times 10^{19}$  km!). Detekcja fal grawitacyjnych to przełomowy sukces współczesnej nauki poprzedzony dziesiątkami lat pracy astrofizyków rozwijających teorię fal grawitacyjnych oraz ekspertów technicznych zajmujących się konstrukcją i zwiększaniem czułości niezwykle zaawansowanych technologicznie detektorów. W 2017 roku Rainer Weiss, Barry Barish i Kip Thorne zostali uhonorowani Nagrodą Nobla za swój kluczowy udział w tworzeniu detektorów i obserwacji fal grawitacyjnych.

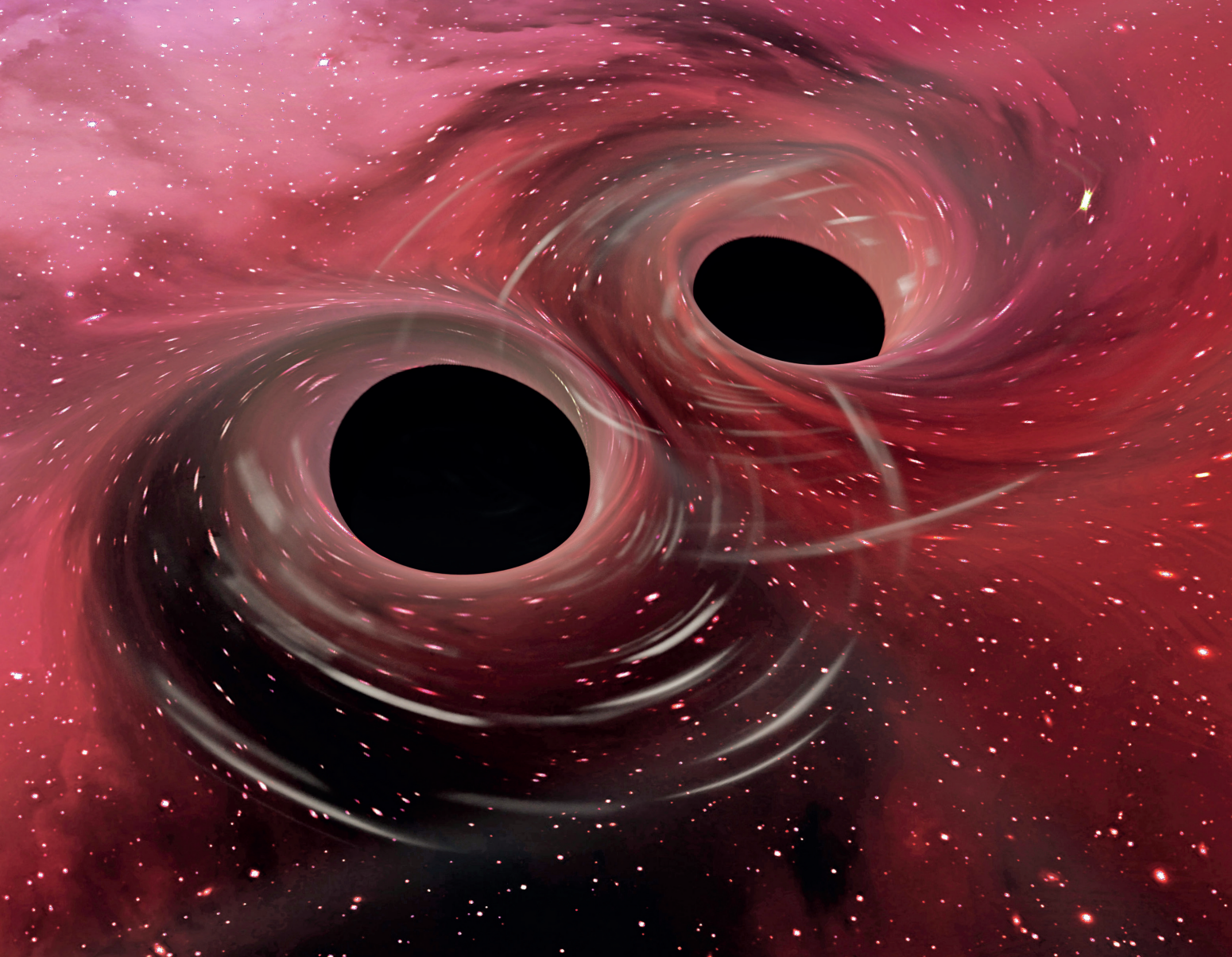
Istnienie fal grawitacyjnych, nazywanych często zmarszczkami czasoprzestrzeni, zostało przewidziane ponad 100 lat temu przez Alberta Einsteina jako jeden z efektów jego ogólnej teorii względności. Początkowo fizycy, w tym również sam Einstein, podchodzili jednak dość sceptycznie do zagadnienia fal, sądząc, że ich wykrycie prawdopodobnie nigdy nie będzie w zasięgu możliwości technologicznych ludzkości.

Jednak dzięki rozwojowi teorii fal grawitacyjnych, w którym swój istotny wkład miał także polski uczyony prof. Andrzej Trautman, oraz dużemu postępowi w technologii udało się osiągnąć to, co naukowcom wydawało się niemożliwe. Wybudowano dwa detektory LIGO (USA) i detektor Virgo (Włochy), których działanie w uproszczeniu jest oparte na zasadzie tzw. interferometru Michelsona. Oznacza to, że detektory składają się z dwóch długich ramion, przez które zostaje skierowana wiązka laserowa. W momencie przejścia przez ramię fali grawitacyjnej długość ramienia ulega zmianie. Nie zmienia się za to prędkość światła i dzięki zjawisku interferencji można wyliczyć różnicę dróg przebytych przez obydwie wiązki. Nadzwyczajnie czułe instrumenty oraz zaawansowane algorytmy pozwalają obecnie na zarejestrowanie zmian w długości ramion dwóch detektorów z niewyobrażalną precyzją (rzędu 1/10 000 szerokości protonu), a także zlokalizowanie i wyznaczenie parametrów źródła sygnału.

Znajdujące się we Wszechświecie układy podwójnych obiektów zwartych, takich jak czarna dziura z czarną dziurą, czarna dziura z gwiazdą neutronową oraz gwiazda neutronowa z gwiazdą neutronową, emitują fale grawitacyjne, które są odbierane przez detektory takie jak LIGO i Virgo. Zanim dojdzie do całkowitego połączenia się układu, jego składniki powoli tracą energię orbitalną na rzecz emisji fal grawitacyjnych aż do stopniowego zacieśniania się orbity. Mechanizm ten jest na tyle powolny, że aby dany układ mógł się połączyć w wystarczająco krótkim czasie (czyli około 13,77 mld lat – obecny wiek Wszechświata), musi być już w momencie swojego powstania stosunkowo ciasny.

## Układy podwójne

Do lipca 2022 roku publicznie doniesiono o wykryciu około 90 sygnałów fal grawitacyjnych. Wraz



KATARZYNA DREWNIAŃY

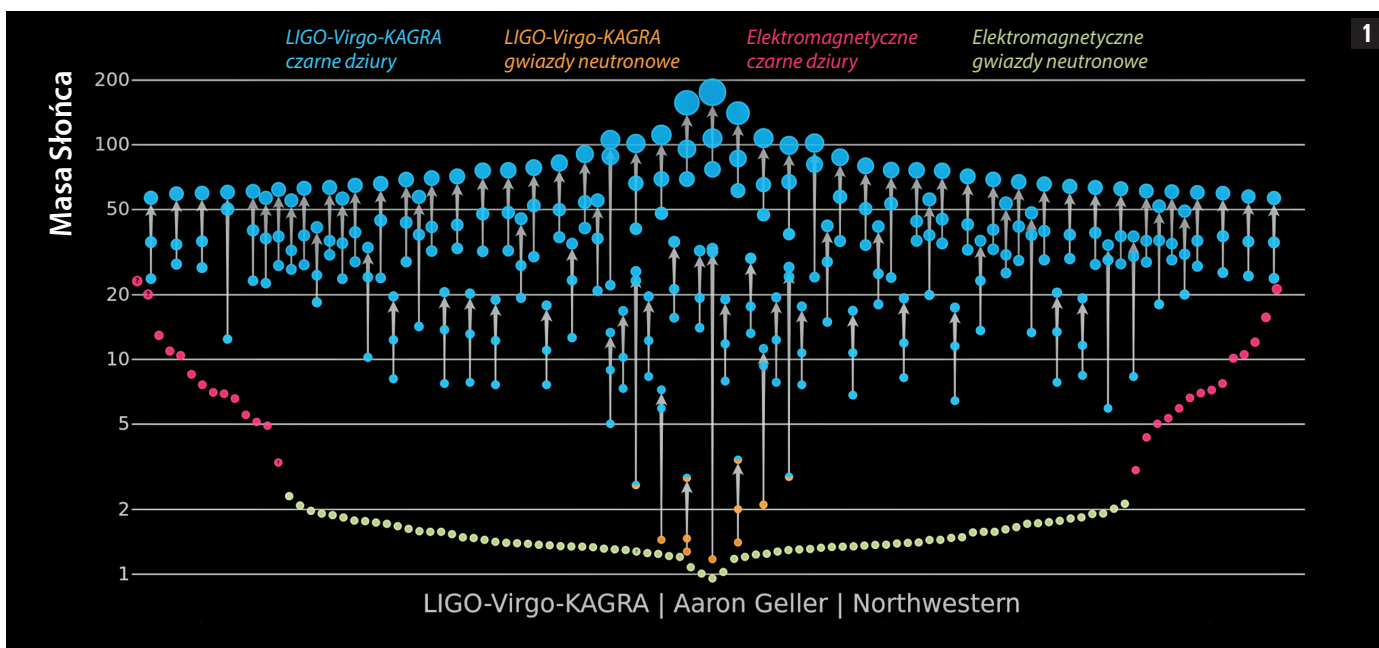
z informacją o detekcji, jeśli jest to możliwe, są też określane typy łączących się obiektów zwartych, czyli czy jest to czarna dziura, czy gwiazda neutronowa. Szacowane są również ich masy, parametry związane z rotacją i przybliżona odległość, z której dotarł do nas sygnał. Na liście wykrytych obiektów zdecydowanie dominują te pochodzące od łączących się układów dwóch czarnych dziur, które ze względu na swoją masę, znacznie większą niż masa gwiazd neutronowych, mogą być wykrywane na dużo większym obszarze. Tylko dwie detekcje sklasyfikowano jako łączące się układy dwóch gwiazd neutronowych oraz dwie inne jako układ gwiazdy neutronowej z czarną dziurą.

Stosunkowo niewielką dziś bazę około 90 detekcji wraz z ich parametrami, dzięki rozwijanym przez lata modelom teoretycznym, naukowcy wykorzystują do lepszego zrozumienia i ograniczania niepewności w wielu obszarach współczesnej astrofizyki. Przykładowo są one bezcennym źródłem informacji dla badaczy zajmujących się zagadnieniami obejmującymi ewolucję masywnych gwiazd czy mechanizmami tworzenia się gwiazd neutronowych i czarnych dziur (wybuchów supernowych). Detekcje fal grawitacyjnych poddały również testowi ogólną teorię względności

czy zweryfikowały pochodzenie ciężkich pierwiastków takich jak złoto i platyna.

Mechanizmy prowadzące do powstania układów podwójnych obiektów zwartych o masach takich jak te rejestrowane przez detektory LIGO i Virgo nie są jeszcze dokładnie poznane. W literaturze jest proponowanych kilka koncepcji dotyczących tego, jak może dojść do powstania źródeł fal grawitacyjnych. Dwie najpopularniejsze to tworzenie ciasnych układów obiektów zwartych w wyniku odizolowanej ewolucji masywnych gwiazd oraz wyłapywanie obiektów zwartych w wyniku tzw. oddziaływań dynamicznych (wielociałowych) w gęstych skupiskach gwiazd. Masywne gwiazdy tworzące układ podwójny podczas różnych etapów swojej ewolucji mogą wymieniać między sobą masę. Taki transfer masy między składnikami układu wpływa znacząco zarówno na końcowe masy utworzonych obiektów zwartych (czyli gwiazd neutronowych bądź czarnych dziur), jak i na orbitę układu. Są to procesy obecnie słabo rozumiane, a ich badanie wymaga zestawienia z sobą modeli teoretycznych z obserwacji masywnych gwiazd na różnych etapach ewolucji i jej końcowego produktu, czyli układu obiektów zwartych. Przebieg ewolucji układów podwójnych masywnych gwiazd prowadzący do powstania źródeł fal

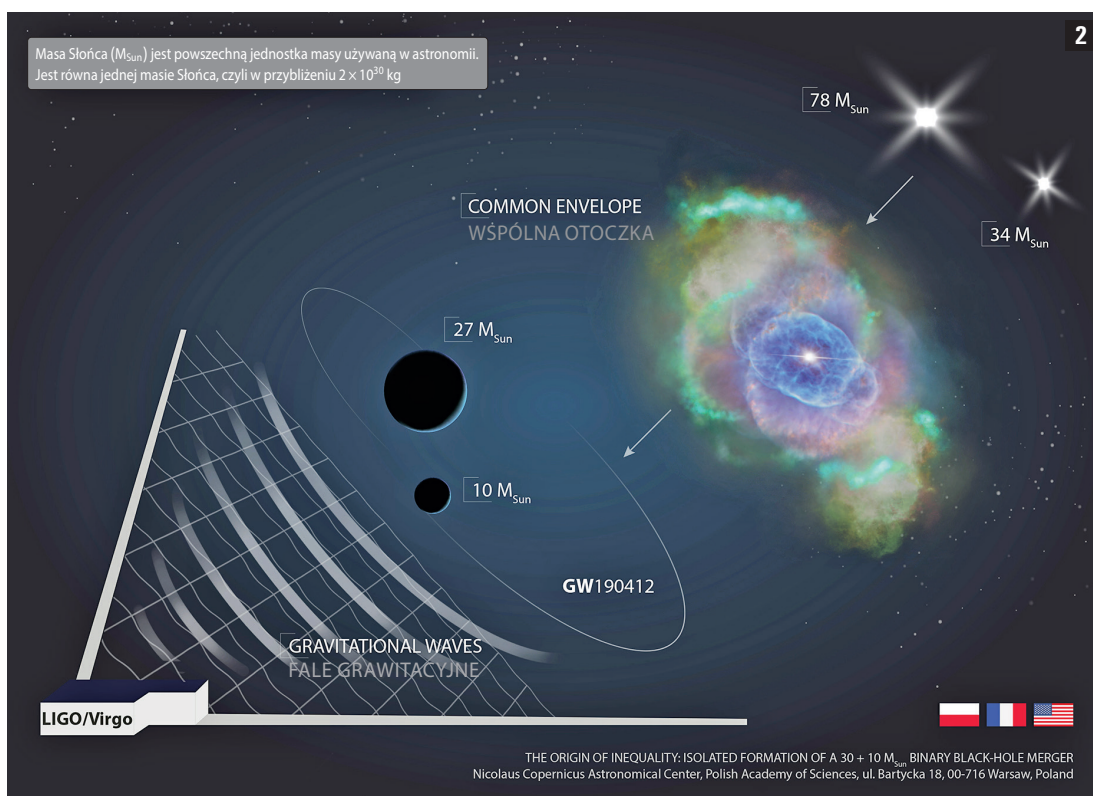
Artystyczna wizja  
ciasnego układu dwóch  
czarnych dziur autorstwa  
Katarzyny Drewniańy



ZŹRÓDŁO: [https://ligo.northwestern.edu/media/mass-plot/index.html?fbclid=IwAR3NOFVWXZFTT-GYISQTHP2JOV2HW-YWMT-HBRFMNSAHBNV\\_CZASWPPI](https://ligo.northwestern.edu/media/mass-plot/index.html?fbclid=IwAR3NOFVWXZFTT-GYISQTHP2JOV2HW-YWMT-HBRFMNSAHBNV_CZASWPPI)

Rys. 1  
Znane masy obiektów zwartych. Popularna wśród astrofizyków ilustracja podsumowująca obecnie znane masy czarnych dziur i gwiazd neutronowych pochodzenia gwiazdowego. Są to masy znane z detekcji fal grawitacyjnych (na niebiesko czarne dziury, na pomarańczowo gwiazdy neutronowe) lub obserwacji w spektrum fal elektromagnetycznych (na czerwono czarne dziury, na żółto gwiazdy neutronowe).

Rys. 2  
Uproszczony schemat ewolucji dwóch masywnych gwiazd prowadzący do powstania asymetrycznego masowo układu czarnych dziur takiego jak parametry detekcji o nazwie GW190412



THE ORIGIN OF INEQUALITY: ISOLATED FORMATION OF A 30 + 10  $M_{\text{Sun}}$  BINARY BLACK-HOLE MERGER  
Nicolaus Copernicus Astronomical Center, Polish Academy of Sciences, ul. Bartycka 18, 00-716 Warsaw, Poland

KATARZYNA DREWNIANY

Chcesz wiedzieć więcej?

Lasota J.-P., *Druga do czarnych dziur*, Kraków 2022.

*Fale grawitacyjne – Astronarium* odc. 26, [https://www.youtube.com/watch?v=TZgNFpf6\\_1Q](https://www.youtube.com/watch?v=TZgNFpf6_1Q).

*Fale grawitacyjne – nowe badania – Astronarium* odc. 84, [https://www.youtube.com/watch?v=j\\_lqmhvJ5XE](https://www.youtube.com/watch?v=j_lqmhvJ5XE).

grawitacyjnych, czyli ciasnych układów podwójnych obiektów zwartych, jest obiektem badań m.in. grupy badawczej z Centrum Astronomicznego im. Mikołaja Kopernika PAN prowadzonej przez prof. Krzysztofa Belczyńskiego.

Wszystko wskazuje na to, że jest to dopiero początek osiągnięć młodej i szybko rozwijającej się dyscypliny astrofizyki fal grawitacyjnych. W planach jest już budowa detektorów grawitacyjnych kolejnych gene-

racji (Einstein Telescope i Cosmic Explorer) o zwiększonej czułości, dzięki którym prawdopodobnie uda się zarejestrować zdarzenia z okresu, gdy Wszechświat był w bardzo wczesnym stadium ekspansji, niedługo po Wielkim Wybuchu. Pozwoli to m.in. na zweryfikowanie licznych teorii dotyczących ewolucji Wszechświata, tempa tworzenia się gwiazd, ścieżek prowadzących do powstania łączących się układów podwójnych obiektów zwartych. ■