

# OKNO NA WSZECHŚWIAT

Pierwsze bezpośrednie detekcje fal grawitacyjnych były przełomem we współczesnej astronomii. Polscy naukowcy brali udział w tym odkryciu.



PIOTR JARANOWSKI

## Andrzej Królak

Instytut Matematyczny Polskiej Akademii Nauk  
w Warszawie



### prof. dr hab. Andrzej Królak

Pracuje w Instytucie Matematycznym PAN i Narodowym Centrum Badań Jądrowych. Zajmuje się teorią względności i analizą danych z detektorów fal grawitacyjnych. Jest liderem zespołu polskich naukowców Polgraw, będącego częścią europejskiego projektu Virgo, związanego z detektorem fal grawitacyjnych o tej samej nazwie.  
a.krolak@impan.pl

## Piotr Jaranowski

Wydział Fizyki  
Uniwersytet w Białymstoku



### prof. dr hab. Piotr Jaranowski

Pracuje na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku. Prowadzi badania w dziedzinie relatywistycznej mechaniki nieba i astronomii fal grawitacyjnych. Członek zespołu Polgraw.  
p.jaranowski@uwb.edu.pl

**Z** matematycznego punktu widzenia fale grawitacyjne – podobnie jak czarne dziury – są pewnymi rozwiązaniami równań Einsteina. Stanowią one rdzeń ogólnej teorii względności – relatywistycznej teorii grawitacji, sformułowanej przez Alberta Einsteina w 1915 roku. Tworzą one układ 10 sprzężonych nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych typu eliptyczno-hiperbolicznego na składowe tensora metrycznego zależnego od czasu i trzech współrzędnych przestrzennych. Einstein przewidział istnienie fal grawitacyjnych już w 1916 roku, linearyzując swoje równania. Jednakże przez kilkadziesiąt lat były wątpliwości, czy fale grawitacyjne są obserwowalnym efektem fizycznym, czy tylko matematycznym artefaktem. Dopiero dokładna analiza równań Einsteina na przełomie lat 50. i 60. ubiegłego wieku wykazała, że fale grawitacyjne przenoszą energię i wywierają obserwowalny wpływ na ruch względny cząstek poruszających się w ich polu grawitacyjnym. Ogromny wkład w te badania wniósł znakomity polski relatywista prof. Andrzej Trautman. Wtedy to rozpoczęły się prace nad bezpośrednim wykryciem tych fal.

Dwa detektory fal grawitacyjnych zbudowane w ramach amerykańskiego projektu LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) po zwiększeniu czułości, jaką miały w pierwszej fazie swojej działalności w latach 2002–2010, rozpoczęły nową kampanię obserwacyjną we wrześniu 2015 roku. Trwała ona do stycznia 2016 roku. 14 września 2015 roku LIGO dokonało pierwszej bezpośredniej detekcji fal grawitacyjnych, które powstały w wyniku połączenia się dwóch czarnych dziur w odległej galaktyce. Po raz pierwszy fale grawitacyjne zostały zarejestrowane na Ziemi i po raz pierwszy zaobserwowano zlanie się dwóch czarnych dziur w jedną „wypadkową” czarną dziurę. Przebieg czasowy wykrytego sygnału, nazwanego GW150914, był zgodny z przewidywaniami ogólnej teorii względności. Za decydujący wkład w budowę detektorów LIGO i w pierwszą obserwację fal grawitacyjnych trzech amerykańscy naukowcy – Rainer Weiss, Kip S. Thorne i Barry C. Barish – otrzymali w 2017 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki.

Widok z lotu ptaka na detektor fal grawitacyjnych Virgo znajdujący się w pobliżu Pizy we włoskiej Toskanii

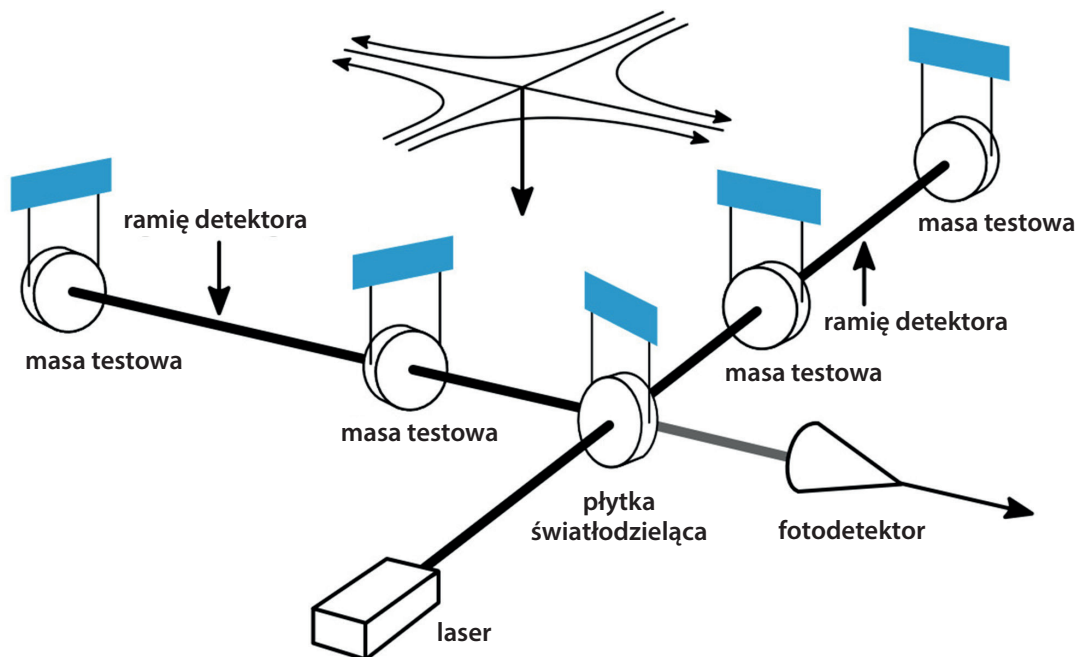
W listopadzie 2016 roku obserwatorium LIGO rozpoczęło nową kampanię obserwacyjną, do której 1 sierpnia 2017 roku dołączył europejski detektor fal grawitacyjnych Virgo, znajdujący się we Włoszech. Virgo to podobnie jak detektory LIGO interferometr laserowy o dwóch wzajemnie prostopadłych ramionach, każde o długości trzech kilometrów. Interferometr ten jest podobny do urządzenia, za pomocą którego Albert A. Michelson i Edward W. Morley przeprowadzili w 1887 roku słynne doświadczenie badania zależności wartości prędkości światła od ruchu dobowego i rocznego Ziemi (ramiona interferometru Michelsona-Morleya miały długość około jednego metra). Urządzenia tego typu są niesłychanie czułe, detektory LIGO-Virgo potrafią zmierzyć różnice długości swoich ramion mniejsze od 1/10 000 średnicy protonu. Do ich konstrukcji używa się najbardziej zaawansowanej techniki laserowej i optycznej, wykorzystuje się również najnowsze osiągnięcia mechaniki precyzyjnej, elektroniki i fizyki materiałowej.

## Sznur pereł

Podczas kampanii obserwacyjnej w latach 2016–2017 obserwatoria LIGO-Virgo prowadziły wspólne obserwacje do 25 sierpnia 2017 roku, kiedy to detektory zostały wyłączane w celu dalszej modernizacji. W czasie tych obserwacji, 14 i 17 sierpnia, zostały zarejestrowane dwa kolejne sygnały fal grawitacyjnych. Pierwszy z nich, oznaczony jako GW170814, był wynikiem złania się dwóch czarnych dziur i był podobny do pierwszego sygnału wykrytego w 2015 roku. Drugi sygnał – GW170817 – powstał w wyniku

połączenia się dwóch gwiazd neutronowych. Zdarzenie to było niezwykle, ponieważ towarzyszył mu elektromagnetyczny odpowiednik, tzw. rozbłysk promieniowania gamma GRB 170817A (GRB – od ang. *gamma-ray burst*), który został zarejestrowany przez satelitarne teleskopy Fermi i INTEGRAL zaledwie 1,7 sekundy po nadejściu fali grawitacyjnej. Dzięki temu, że w obserwacji brał udział detektor Virgo, była możliwa dokładna lokalizacja źródła sygnału na sferze niebieskiej. Lokalizacja ta została przekazana kilkudziesięciu współpracującym z LIGO-Virgo obserwatorium astronomicznym. Obserwacje przez nie przeprowadzone doprowadziły do odkrycia kolejnego zjawiska związanego ze zderzeniem się gwiazd neutronowych – kilonowej. Istnienie tego zjawiska przewidział legendarny polski astrofizyk Bogdan Paczyński. Dokładna lokalizacja źródła, która została jeszcze poprawiona przez kolejne obserwacje astronomiczne, umożliwiła identyfikację galaktyki, w której nastąpiło złanie się gwiazd neutronowych – jest to galaktyka oznaczona w katalogach jako NGC 4993. Obserwacje źródła sygnału GW170817 były ogólnoswiatową kampanią obserwacyjną wykorzystującą całe spektrum promieniowania elektromagnetycznego i prowadzoną przez wiele teleskopów na Ziemi i w przestrzeni kosmicznej. Obserwacje te zapoczątkowały nową erę w astronomii obserwacyjnej – erę astronomii wieloaspektowej. Kolejnym przełomowym wynikiem uzyskanym dzięki obserwacji sygnału GW170817 był nowy i niezależny pomiar wartości stałej Hubble’a, która określa tempo rozszerzania się Wszechświata. Ciąg obserwacji i pomiarów, które były możliwe dzięki wykryciu fal grawitacyjnych

Schemat działania interferometru laserowego jako detektora fal grawitacyjnych. Monochromatyczne światło emitowane przez laser jest dzielone na dwie wiązki przez płytkę światłodziącą. Dalej wiązki przemieszczają się wzdłuż wzajemnie prostopadłych ramion, poruszając się tam i z powrotem między dwoma zwierciadłami odgrywającymi rolę mas testowych. Ramiona interferometru stanowią wnęki optyczne, w których wielokrotne odbicia światła od zwierciadeł zwiększają jego drogę optyczną (około 300 razy) i w ten sposób poprawiają czułość urządzenia. Niewielka część światła z każdego z ramion jest skierowana w stronę fotodetektora, w drodze do niego światło z obu ramion łączy się, ulegając interferencji. Fala grawitacyjna, przechodząca przez detektor np. w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wyznaczonej przez jego ramiona, w różny sposób zmienia długość każdego z ramion, powodując względne przesunięcie fazowe interferujących z sobą wiązek. Skutkuje to zmianą natężenia światła rejestrowanego przez fotodetektor



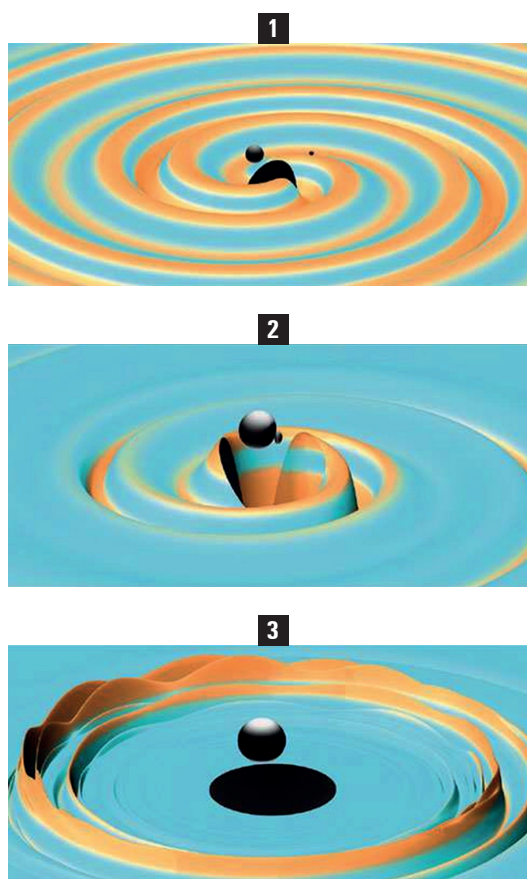
ze zderzenia się gwiazd neutronowych: rejestracja błysku gamma, zaobserwowanie kilonowej i wreszcie pomiar stałej Hubble'a, został nazwany przez naukowców sznurem pereł.

## Udział Polaków

W 2016 roku ukazała się publikacja, w której ogłoszono pierwszą detekcję fal grawitacyjnych. Wśród jej autorów było dziewięciu polskich naukowców będących członkami zespołu Polgraw, części projektu Virgo (związanego z detektorem fal grawitacyjnych o tej samej nazwie). Zespół Polgraw jest prowadzony przez prof. Andrzeja Królaka z Instytutu Matematycznego PAN. Obecnie grupa składa się z 30 członków z dziewięciu instytucji: Instytutu Matematycznego PAN, Centrum Astronomicznego im. Mikołaja Kopernika PAN, Uniwersytetu Jagiellońskiego, Uniwersytetu Warszawskiego, Uniwersytetu w Białymstoku, Uniwersytetu Zielonogórskiego, Uniwersytetu Wrocławskiego, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Świerku. Zadaniem zespołu jest analiza danych uzyskiwanych przez detektory LIGO i Virgo, prowadzenie badań źródeł astrofizycznych fal grawitacyjnych, opracowywanie teoretycznych modeli sygnałów fal grawitacyjnych oraz udział w rozbudowie detektora Virgo. Polacy stworzyli podstawy wielu algorytmów i metod służących do wykrywania i estymacji parametrów fal grawitacyjnych z układów podwójnych, przyczynili się do precyzyjnego modelowania sygnału fali grawitacyjnej z takich układów, przeprowadzili symulacje pokazujące, że układy podwójne czarnych dziur są najlepiej wykrywalnymi przez detektory LIGO-Virgo źródłami promieniowania grawitacyjnego, a także poszukiwali błysków optycznych mogących towarzyszyć rejestracji fal grawitacyjnych.

Udział polskiej grupy Polgraw w pracach obserwatorium fal grawitacyjnych Virgo sprawia, że odkrycie fal grawitacyjnych, mające fundamentalne znaczenie dla nauki, jest również polskim osiągnięciem. Obserwacje prowadzone wspólnie przez detektory LIGO i Virgo pozwoliły na otwarcie nowego okna na Wszechświat dzięki rozwojowi nowej dziedziny astronomii – astronomii fal grawitacyjnych. Polscy uczeni mają znaczący wkład w powstanie i rozwój tej dyscypliny. Ponadto planowany polski wkład aparatury w rozbudowę detektora Virgo z pewnością przyczyni się do rozwoju wysokich technologii w Polsce.

Obserwacje fal grawitacyjnych dostarczają niezwykle cennych informacji o Wszechświecie, jego budowie i ewolucji. Informacje te są często niemożliwe do uzyskania za pomocą obserwacji promieniowania elektromagnetycznego i pozwalają na badanie obszarów niedostępnych falom elektromagnetycznym. Astronomia fal grawitacyjnych dostarcza unikatowych informacji dotyczących zlewających



ALBERT EINSTEIN INSTITUTE, GERMANY

się wskutek emisji promieniowania grawitacyjnego układów podwójnych złożonych z gwiazd neutronowych lub czarnych dziur. W przyszłości spodziewamy się wykryć fale grawitacyjne pochodzące od rotujących pojedynczych gwiazd neutronowych (niektóre z nich są pulsarami), wybuchów supernowych, a także zarejestrować grawitacyjne promieniowanie tła będące pozostałością po procesach zachodzących w bardzo wczesnych etapach ewolucji Wszechświata. Odkrycie fal grawitacyjnych otworzyło zupełnie nowe możliwości badań dotyczących podstaw współczesnej fizyki i astronomii: przeprowadzania precyzyjnych testów teorii grawitacji Einsteina i teorii w stosunku do niej alternatywnych, zdobywania danych umożliwiających lepsze zrozumienie praw rządzących bardzo gęstą materią tworzącą wnętrza gwiazd neutronowych, dokonywania niezależnych testów modeli kosmologicznych. Astronomia fal grawitacyjnych pomoże znaleźć odpowiedzi na pytania: jak formują się czarne dziury? Czy teoria Einsteina jest poprawną teorią grawitacji? Jak zachowuje się materia we wnętrzach gwiazd neutronowych i podczas wybuchów supernowych? Rozwijane przy okazji poszukiwania fal grawitacyjnych wyrafinowane metody analizy danych, m.in. metody wykorzystujące uczenie maszynowe i sztuczną inteligencję, z wielkim prawdopodobieństwem znajdą zastosowania w innych dziedzinach nauki i techniki. ■

Graficzna ilustracja wyników numerycznej symulacji ruchu i emitowanego promieniowania grawitacyjnego układu dwóch czarnych dziur będącego źródłem pierwszego zarejestrowanego sygnału fal grawitacyjnych – GW150914. Widać trzy różne etapy w ewolucji układu:

- 1) etap zbliżania się będącego skutkiem straty energii układu unoszonej przez promieniowanie grawitacyjne – czarne dziury, krążąc wokół wspólnego środka masy, zbliżają się do siebie i przebiegają orbity spiralne;
- 2) etap zlania się, w którym czarne dziury łączą się, tworząc pojedynczą „wypadkową” czarną dziurę;
- 3) drgania nowo powstałej czarnej dziury, które są źródłem końcowego impulsu fal grawitacyjnych o szybko zanikającej amplitudzie

Chcesz wiedzieć więcej?

Abbott B.P. et al., *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, „Physical Review Letters” 2016, 116, 061102.

Królak A., Bejger M., *Einsteina igła w stogu siana*, „Academia” 1/2016.

*The Nobel Prize in Physics 2017*, <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/popular-physicsprize2017-1.pdf>.