



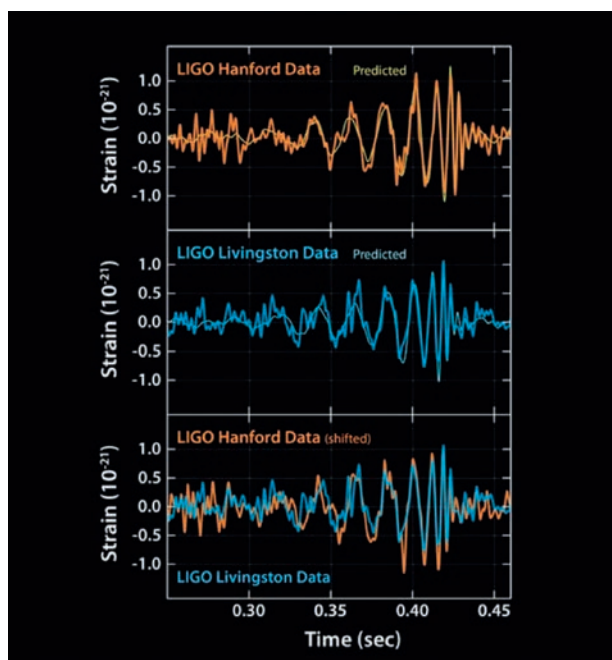
# LIGO i fale grawitacyjne II<sup>1</sup>

Wykład noblowski Barry'ego C. Barisha  
(California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA) 8 grudnia 2017  
Opublikowany w języku polskim za zgodą Nobel Foundation  
©the Nobel Foundation 2017  
Przekład dokonany przy wsparciu finansowym Fundacji Pro-Physica

## Wstęp

Zarejestrowanie fal grawitacyjnych przez Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) (Lasero-Interferometryczne Obserwatorium Fal Grawitacyjnych) zostało ogłoszone 11 lutego 2016 roku [1], w sto lat po tym, jak Einstein przewidział ich istnienie [2,3]. Odkrycie to przyszło po ponad pięćdziesięciu latach wysiłków doświadczalnych zmierzających do zbudowania detektorów wystarczająco czułych, by mogły umożliwić wykrycie odkształceń czasoprzestrzeni powodowanych falami grawitacyjnymi. Nagroda Nobla za rok 2017 została przyznana Rainerowi (Raiowi) Weissowi, Kipowi Thornowi i mnie „za przyczynienie się w decydującym stopniu do skonstruowania detektorów LIGO i zaobserwowania fal grawitacyjnych”. W rzeczy samej, sukces LIGO poprzedziły dekady studiów badawczo-rozwojowych (R&D) poświęconych samej koncepcji detektora i rozwiązaniom technicznym – mówił o nich w swoim wystąpieniu noblowskim Rai Weiss – po których przyszła faza planowania, konstrukcji i udoskonalania pełnowymiarowych interferometrów LIGO tak, aby były coraz bardziej czułe na fale grawitacyjne. Przedsięwzięcie to było realizowane przez LIGO Laboratory, zaś zbudowane instrumenty wykorzystuje LIGO Scientific Collaboration (LSC) (Naukowa Kolaboracja LIGO) licząca ponad tysiąc badaczy, którzy byli współautorami prac donoszących o zarejestrowaniu fal grawitacyjnych. Ważny wkład wniosło także wielu innych uczonych, którzy przyczynili się do badań nad czarnymi dziurami, zajmujących się numeryczną teorią względności itp.

1. Nagrodę Nobla z fizyki w roku 2017 podzielili między siebie Rainer Weiss, Barry C. Barish i Kip S. Thorne. Artykuły numerowane I, II i III są tekstami ich przemówień wygłoszonych z tej okazji. Polski przekład wykładu Kipa S. Thorne'a *LIGO i fale grawitacyjne III* opublikowany został w PF 70 (3), 18 (2019), a polski przekład wykładu Rainera Weissa *LIGO i fale grawitacyjne I* – w PF 71 (2), 22 (2020) (przyp. red.).



Ryc. 1. Pierwsze wykresy dowodzące zarejestrowania fal grawitacyjnych, które zostały przedstawione członkom Naukowej Kolaboracji LIGO kilka chwil po zarejestrowaniu zdarzenia przez zaawansowany detektor LIGO. Każdy z trzech wykresów pokazuje zarejestrowany sygnał (odzwierciedlający amplitudę fali) w jednostkach  $10^{-21}$  w funkcji czasu. Górny wykres jest profilem amplitudy fali zarejestrowanym przez interferometr w Hanford w stanie Waszyngton; środkowy jest profilem amplitudy zarejestrowanym w Livingstone w Luizjanie. Oba profile są niemal identyczne, ale są przesunięte jeden względem drugiego o 6,9 ms. Na dolnym wykresie są one nałożone jeden na drugi. (Dzięki uprzejmości Caltech/MIT/LIGO Lab.)

W tych trzech wykładach: Raia, Kipa oraz moim, przedstawiamy historię fal grawitacyjnych i LIGO dzieląc ją na trzy części. Rai skupia się na fizyce fal grawitacyjnych i związanych z nimi wyzwaniach eksperymentalnych. Omawia pionierskie prace nad interferometrami grawitacyjnymi i zaproponowane na samym początku innowacyjne rozwiązania, które po przetestowaniu na niedużych prototypach zostały następnie wykorzystane w pełnowymiarowych interferometrach LIGO. Ja w tym wykładzie przedstawiam całe przed-

sięwzięcie LIGO i udoskonalenia [pierwotnego projektu detektora<sup>2</sup>], które doprowadziły do zarejestrowania przez zaawansowany interferometr LIGO [fal grawitacyjnych] wyemitowanych przy zlewaniu się dwóch czarnych dziur. Omówię także pewne zasadnicze cechy interferometrów, niektóre konsekwencje dokonanych [z ich pomocą] odkryć, a także to, jak wyobrażamy sobie dalszy rozwój programu LIGO w nadchodzącej dekadzie. Kip zaś będzie mówił o swojej osobistej drodze do badania czarnych dziur, dokonanych postępach teoretycznych, które były kluczowe dla zbudowania interferometrów LIGO i interpretowania zbieranych przez nie danych, wreszcie o tym jak sam widzi przyszłość i możliwości nowopowstałej dziedziny badań. Nasze trzy wykłady można czytać albo jako całość zawierającą pewne powtórzenia, albo oddzielnie. W wykładach tych uwypuklamy rolę niektórych osób, które w odkryciu fal grawitacyjnych odegrały kluczowe role, ale z konieczności pomijamy wiele innych osób, które również znacząco przyczyniły się do tego odkrycia.

### Laboratorium LIGO

Zostałem Głównym Kierownikiem LIGO na początku roku 1994 i w związku z tym moja opowieść zaczyna się od tego momentu. Kilka miesięcy wcześniej stałem się „wolny” wskutek niefortunnego skreślenia przez Kongres USA [4] budowy Superconducting Super Collider (SSC) (Nadprzewodzącego Superzderzacza). Dla amerykańskiej i ogólnoswiatowej społeczności fizyków wysokich energii SSC był koncepcyjną i techniczną realizacją długiego procesu budowy urządzenia, które miało uczynić dostępnym dla badaczy fizyki cząstek nowy zakres energii, w którym, jak na to wskazywały silne argumenty, powinny się ujawnić odstępstwa od standardowego modelu oddziaływań cząstek. Aby wyjaśnić pochodzenie mas<sup>3</sup> cząstek elementarnych proponowany został tzw. mechanizm Higgsa<sup>4</sup> i poszukiwanie będącej jego konsekwencją cząstki Higgsa miało być głównym celem budowy SSC. Cząstka ta została w końcu odkryta w dającym częściowo te same możliwości co SSC Large Hadron Collider (LHC) (Wielkim Zderzaczem Hadronów) zbudowanym przez European

Organization for Nuclear Research (CERN) (Laboratorium Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych) pod Genewą.

Zgodnie z planami SSC miał mieć dwa detektory o odmiennych charakterystykach, które wzajemnie by się uzupełniały i tym samym mogłyby nawzajem potwierdzać swoje ewentualne odkrycia. Wraz z Billem Willisem z uniwersytetu Columbia byłem z ramienia detektora GEM (Gammas, Electronics, Muons) – jednego z dwóch wielkich detektorów SSC – osobą odpowiedzialną za przekazywanie informacji. Na początku lat dziewięćdziesiątych spędziłem kilka lat opracowując pomysły, potrzebne technologie i plany detektora GEM. W roku 1993 jego koncepcja została ustalona. Mieliśmy się właśnie zabrać za ostateczny projekt techniczny i przygotowania do rozpoczęcia budowy, gdy SSC został skreślony przez Kongres. Była to decyzja zabójcza dla wszystkich zaangażowanych w to przedsięwzięcie. Duży kontyngent fizyków budujących detektor GEM dołączył do grup eksperymentalnych pracujących nad LHC w CERN, a wiele naszych rozwiązań technicznych zostało wykorzystanych w budowanych tam detektorach CMS i Atlas.

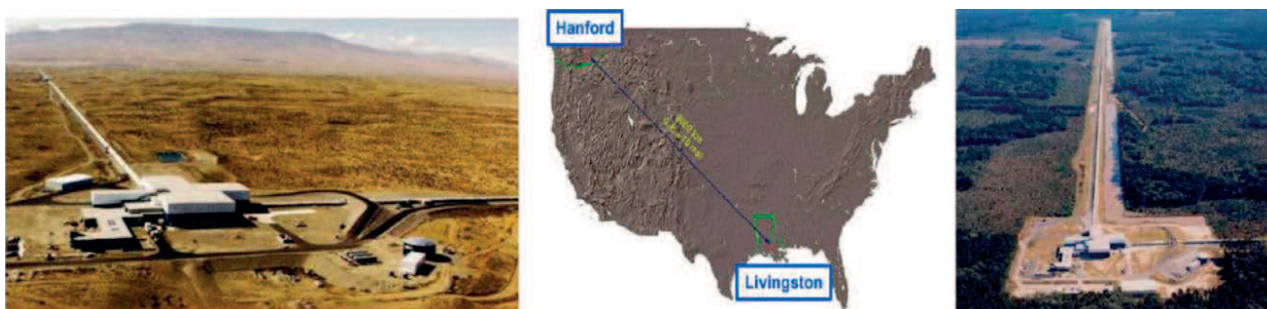
Zdecydowałem się nie przyłączać do eksperymentów w CERN, przynajmniej nie od razu. Chciałem zostawić sobie trochę czasu, by podjąć decyzję, co chcę dalej robić. W rzeczywistości byłem niezmiernie zajęty wszystkimi sprawami związanymi z zamykaniem przedsięwzięcia GEM i pomaganiem w znalezieniu pracy wielu moim kolegom, których zaangażowałem byłem do pracy przy SSC. Jednak z początkiem zimy 1994 r. zgłosił się do mnie California Institute of Technology (Caltech) (Kalifornijski Instytut Technologiczny) z propozycją, bym został Głównym Kierownikiem Projektu LIGO. Przedtem pełniłem w LIGO rolę doradczą, jako że już wcześniej silnie popierałem rozwijanie przez Caltech programu eksperymentalnego związanego z falami grawitacyjnymi. Zgodziłem się przejąć kierowanie LIGO. Moim pierwszym zadaniem było wzmocnienie zespołu oraz krytyczne przejście i zrewidowanie wniosku LIGO do National Science Foundation (NSF) (Narodowej Fundacji Nauki), która wkrótce miała podjąć decyzję, czy dać LIGO „zielone światło”. Fundacja chciała mieć do początku lata 1994 roku zewnętrzną recenzję poprawionego wniosku, by później, tego samego jeszcze lata, przeprowadzić nad nim dyskusję na forum NSF. Jesienią chciała podjąć decyzję, czy program LIGO powinien ruszyć.

Aby zorganizować prace nad LIGO nadałem całemu przedsięwzięciu nową strukturę organizacyjną, budując ją wokół Laboratorium LIGO, w ramach którego współpracowały już Caltech i Massachusetts Institute of Technology (MIT) (Instytut Technologiczny Massachusetts).

2. Teksty w nawiasach kwadratowych dodał tłumacz z uwagi na zbyt zwężony, a czasem wręcz niezrozumiały język oryginału (przyp. red.).

3. Mechanizm Higgsa jest przyczyną niezerowej masy kwarków i naładowanych leptonów (elektronu, mionu i tau) i prawdopodobnie także neutrin. Jednak masa wszystkich hadronów (protonu, neutronu i innych cząstek oddziałujących silnie) z wyjątkiem mezonów  $\pi$  pochodzi (niemal w całości) ze spontanicznego łamania symetrii chiralnej oddziaływań silnych - zob. np. wykład noblowski F. Wilczka PF 56 (4), 154 (2005) (przyp. tłum.).

4. Zob. przekłady wykładów noblowskich P. Higgsa i F. Englerta, PF 70 (2), 35 i 45 (2019) (przyp. tłum.).



Ryc. 2. Interferometry LIGO: w Hanford w stanie Waszyngton (po lewej) i w Livingstone w Luizjanie (po prawej). (Dzięki uprzejmości Caltech/MIT/LIGO Lab.)

Rozdzieliliśmy obowiązki i stworzyliśmy ogólny plan budowy dwóch odległych od siebie instrumentów: jednego w Hanford w stanie Waszyngton i drugiego w Livingstone w Luizjanie. Decyzja o budowie w tych dwu lokalizacjach została podjęta już wcześniej na podstawie krytycznej oceny przez NSF około dwudziestu propozycji.

Moim pierwszoplanowym zadaniem, gdy już zostałem Głównym Kierownikiem Projektu LIGO, było wzmocnienie kierownictwa całego przedsięwzięcia przez obsadzenie kilku kluczowych stanowisk odpowiednimi osobami, przychodzącymi głównie z SSC – wskutek skreślenia tej inwestycji „wolnych” było właśnie kilka wyjątkowo utalentowanych osób. Przede wszystkim więc zaangażowałem Gary’ego Sandersa jako menadżera projektu, dając mu tym samym takie samo stanowisko, jakie dzielił wraz ze mną przy GEM w SSC. Razem już szybko obsadziliśmy najważniejsze stanowiska w LIGO innymi doświadczonymi osobami, m.in. Albertem Lazzarinim jako kierownikiem ds. integracji, Joe Wordenem jako kierownikiem ds. wielkoskalowych układów próżniowych, (zmarłym już) Jayem Heffnerem i Rolfem Borkem jako odpowiedzialnymi za budowę układów kontroli cyfrowej, Denisem Coynem jako kierownikiem pionu inżynieryjnego. Wszyscy razem tworzyliśmy pierwszy zespół.

Następnym zadaniem było zintegrowanie nowych członków LIGO z bardzo utalentowanymi członkami istniejącego już wcześniej zespołu LIGO, takimi jak Stan Whitcomb, Robbie Vogt, Bill Althouse, Mike Zucker, Fred Raab oraz z kierowaną przez Raia Weissa grupą z MIT, do której należeli m.in. David Shoemaker i Peter Fritschel. Połączone grupy z Caltechu i MIT utworzyły Laboratorium LIGO, które miało być organizacją odpowiedzialną za zbudowanie i działanie [detektorów] LIGO. Laboratorium to jest zarządzane wspólnie przez Caltech i MIT na podstawie Umowy o Współpracy zawartej przez Caltech z NSF. W skład Laboratorium LIGO wchodzi obserwatoria LIGO w Hanford i w Livingstone oraz pracownie LIGO w Caltechu i MIT. Laboratorium liczy obecnie łącznie 178 pra-

cowników naukowych (wliczając w to stałych pracowników akademickich, postdoków, doktorantów, inżynierów i techników) i wspierających ich pracowników administracyjnych. Funkcję dyrektora przestałem pełnić w roku 2006; po mnie drugim dyrektorem został Jay Marx. Jay bardzo dobrze kierował pracami nad dalszym udoskonalaniem pierwszych detektorów LIGO prowadzonymi do osiągnięcia przez nie zaplanowanej czułości oraz czuwał nad pierwszym etapem budowy zaawansowanych detektorów. W roku 2011 Dyrektorem Wykonawczym został Dave Reitze; wykonał on wspólną robotę prowadząc LIGO przez konstrukcję i uruchomienie zaawansowanych detektorów aż do najważniejszego wydarzenia, tj. wykrycia po raz pierwszy fal grawitacyjnych.

W początku roku 1994 szybko poprawiliśmy składany do NSF wniosek ponownie oszacowując koszty konstrukcji LIGO, aby uwzględnić poszerzenie zespołu, zwiększoną planowaną obsadę placówek w Hanford i w Livingstone oraz bardziej ambitną infrastrukturę techniczną. Plan polegał na tym, by od początku przedsięwzięcie było solidne na tyle, na ile to możliwe, by móc budować następne, ulepszone wersje detektorów (zaawansowanych detektorów LIGO), wykorzystując tę samą infrastrukturę. Koszt tych zmian wyniósł około stu milionów dolarów podnosząc tym samym całkowity koszt budowy pierwszych detektorów LIGO do niemal trzystu milionów dolarów. Okazało się, że występowaliśmy do NSF o finansowanie największego przedsięwzięcia, jakie kiedykolwiek Fundacja wzięła na siebie.

Fundacja przeprowadziła zewnętrzną ocenę naszego zrewidowanego wniosku późną wiosną roku 1994 i przekazała nam bardzo zachęcającą i wyjątkowo pozytywną recenzję. Zanim jednak decyzja została podjęta poproszono mnie i Kipa Thorne’a o przedstawienie projektu LIGO National Science Board (NSB) (Narodowej Radzie Nauki). Ze strony fundacji było to postępowanie nietypowe, jako że zazwyczaj NSB nie kontaktuje się bezpośrednio z autorami propozycji [składanych do NSF]. Na posiedzeniu NSB Kip przedstawił teoretyczne podstawy fal grawitacyjnych oraz na-

kreślił obraz fizyki jaką będziemy mogli uprawiać rejestrując te fale. Ja przedstawiłem nasze plany dotyczące całego przedsięwzięcia, polegające na budowie pierwszych detektorów LIGO wykorzystujących na tyle, na ile to możliwe, już przez nas sprawdzone technologie. Propozycje te były dość śmiałe, bo planowane zaawansowane detektory LIGO wymagały daleko idącej ekstrapolacji wiedzy zdobytej na podstawie prototypów zbudowanych w ramach badań rozwojowych: mniej więcej o czynnik rzędu 100, gdy chodzi o rozmiar i co najmniej o taki sam czynnik, gdy chodzi o ich techniczne wykonanie. Jedną z kluczowych cech naszego planu było zainicjowanie ambitnego programu prac badawczo-rozwojowych mającego na celu opracowanie i przetestowanie technologii koniecznych do zbudowania zaawansowanych detektorów LIGO natychmiast po ukończeniu konstrukcji pierwszych detektorów. Cel ten miał być zrealizowany dzięki niepozbywaniu się głównych pracowników inżynieryjno-technicznych po zakończeniu budowy tych pierwszych detektorów. Żądanie to było nietypowe, gdyż zaawansowane detektory LIGO były dopiero koncepcją strategiczną, która nie została jeszcze na tym etapie zaproponowana [Fundacji]. W rezultacie naszych wystąpień przed NSB otrzymaliśmy formalne zatwierdzenie i pełne finansowanie pierwszych detektorów LIGO, o jakie występowaliśmy wraz ze zobowiązaniem wsparcia zasadniczego programu prac badawczo-rozwojowych nad zaawansowanymi detektorami LIGO.

Podstawowy schemat działania detektorów LIGO polega na wykorzystaniu lasera (na granacie itrowo-aluminiowym domieszkowanym neodymem, w skrócie Nd:YAG) o dużej specjalnie stabilizowanej mocy, emitującego pojedynczą monochromatyczną wiązkę, która wchodzi do interferometru i zostaje rozdzielona na dwie wiązki skierowane w dwu prostopadłych do siebie kierunkach. Rura próżniowa LIGO ma średnicę 1,2 m; utrzymywana jest w niej wysoka próżnia ( $10^{-9}$  Tr). Masy testowe to wysokiej jakości lustra zawieszono tak, by były odizolowane od podłoża. Są one wykonane ze stopionej krzemionki i zawieszono – w zaawansowanych detektorach LIGO – za pomocą czterostopniowego układu wahadłowego. W najprostszej wersji interferometru ramiona o równej długości są tak dopasowane, by światło odbijające się od lusterek na odległych końcach obu ramion powracało równocześnie; dzięki odwróceniu fazy jednej z tych wiązek wygaszają się one, tak iż żadne światło nie jest rejestrowane przez fotodetektor. Jest to zwykły stan interferometru działającego w modzie „ciemnego wyjścia”. Wiele różnych efektów powoduje, że wiązki nie wygaszają się całkowicie i rzeczywista konfiguracja optyczna interferometru jest bardziej skomplikowana.

Gdy fala grawitacyjna przechodzi przez interferometr, na przemian rozciąga i skraca jedno z ramion skracając i rozciągając jednocześnie drugie, z właściwą sobie częstotliwością. W rezultacie światło z obu ramion powraca w trochę innych chwilach (albo z inną fazą) i dwie wiązki nie wygaszają się całkowicie. Dochodząca dzięki temu do fotodetektora, zależna od częstotliwości fali i od chwili czasu, ilość światła jest rejestrowana jako profil przechodzącej fali [(zob. ryc. 1)]. Eksperymentalne wyzwanie stanowi zbudowanie interferometru czułego na niewiarygodnie małe odkształcenia czasoprzestrzeni wywoływane przejściem fali przy jednoczesnym wytłumieniu wpływu wszystkich źródeł szumu tła.

Oczekiwane odkształcenia czasoprzestrzeni wywoływane przejściem fali grawitacyjnej emitowanej przez jakieś źródło astrofizyczne jest rzędu  $h = \Delta L/L \sim 10^{-21}$  – oznacza to, że zmiana długości [ramion interferometru] jest małym ułamkiem rozmiarów protonu. Długości ramion interferometrów LIGO są tak duże, jak tylko to było możliwe z praktycznego punktu widzenia – mają one, w naszym przypadku, po cztery kilometry, co daje wciąż niesłychanie małą różnicę długości jaką instrument musi wykrywać: około  $10^{-18}$  metra. Żeby mieć porównanie: są to odległości około tysiąc razy mniejsze niż rozmiary protonu. Jeśli to wydaje się bardzo trudne, to takim właśnie jest! Nie wdając się w szczegóły, tym, co umożliwia nam osiągnięcie takiej precyzji jest skomplikowana aparatura redukująca wpływ sejsmicznych i termicznych źródeł szumu i dająca efektywnie bardzo wysoką statystykę dzięki przebieganiu w ramionach interferometru bardzo wielu fotonów.

Pierwsza wersja detektorów LIGO została zbudowana w okresie pomiędzy rokiem 1994 a 1999, przy wykorzystaniu technologii będących kompromisem pomiędzy dążeniem do osiągnięcia czułości, przy której ewentualnie mogła być możliwa detekcja fal grawitacyjnych, a korzystaniem z technik, które zostały już w pełni sprawdzone w laboratoriach. Detektory LIGO stanowiły daleko idącą ekstrapolację poprzedzających je prototypów: trzydziestometrowego interferometru zbudowanego w Garching (Niemcy) [5] i czterdziestometrowego zbudowanego w Caltechu [6]. Biorąc pod uwagę olbrzymi wkład finansowy NSF musieliśmy mieć pewność, że od strony technicznej sukces zostanie osiągnięty. W rzeczywistości na podstawie najlepszych ówczesnych oszacowań teoretycznych przewidywaliśmy, że zanim uda się wykryć fale, będziemy zapewne musieli osiągnąć czułość znacznie lepszą niż zapewniana przez pierwsze interferometry. Dlatego właśnie rozwój technik i budowa zaawansowanych detektorów LIGO były zawsze integralną częścią naszych planów.

### Naukowa Kolaboracja LIGO (LSC)

Nawet po wzmocnieniu w roku 1994 Laboratorium LIGO było względnie małe jak na tworzenie tak dużego, ambitnego i będącego wielkim wyzwaniem przedsięwzięcia konstrukcyjnego. Osoby zaangażowane do pełnienia kluczowych funkcji, które zostały dokooptowane do istniejących wcześniej grup LIGO z Caltechu i MIT były [całkowicie] pochłonięte sprawami związanymi z jego rozwojem. Istniały jednak inne ważne obszary, w których byliśmy słabi. Przede wszystkim chodziło tu o obszary, które miały być nieodzowne przy fizycznej interpretacji [zebranych danych], o budowę sieci obliczeniowej, infrastrukturę konieczną przy analizie danych, algorytmy przeszukiwania danych, linie przesyłowe danych itp. Do tego pewne obszary wiedzy eksperckiej w zakresie hardware, niepokryte przez grupy z Caltechu i MIT, mogły zostać obsadzone przez specjalistów znalezionych tylko na szerszym, ogólnoswiatowym rynku.

Obaj, ja i Gary Sanders, mieliśmy doświadczenie zebrane podczas pracy w kolaboracjach tworzonych przez fizyków wysokich energii. Docenialiśmy zalety takich struktur, ale uważaliśmy, że LIGO potrzebuje innego modelu współpracy. W roku 1997, w połowie budowy LIGO, wystąpiłem do NSF za pośrednictwem panelu recenzentów, któremu przewodniczył dobrze zorientowany Boyce McDaniel z Cornell, jak działają kolaboracje w fizyce wysokich energii. Model współpracy, jaki proponowaliśmy przyjąć dla LIGO, był nieco odmienny. Chcieliśmy stworzyć kolaborację skoncentrowaną na fizyce, kolaborację otwartą, do której pojedynczy badacze lub całe grupy mogłyby się przyłączać, jeśli byłyby w stanie wnieść znaczący wkład w fizykę LIGO. Nie musiałyby konieczne wносить swoich zasobów [finansowych], czy sprzętu, tak jak jest to praktykowane w kolaboracjach fizyki wysokich energii. Aby uczynić przyłączanie się do LSC tak atrakcyjnym, jak tylko to możliwe, posunęliśmy się do zapewnienia, iż przy korzystaniu z danych do uprawiania fizyki badacze należący do grup LIGO z Caltechu i MIT nie będą mieć zagwarantowanego pierwszeństwa. Chodziło o to, by indywidualni badacze należący do Laboratorium LIGO korzystając z danych w celu uprawiania fizyki musieli dołączyć do LSC, tzn. by składowa czysto naukowa przedsięwzięcia LIGO była rozwijana za pośrednictwem tej właśnie organizacji. Panel McDaniela poparł ten pomysł; został on następnie zatwierdzony przez NSF i w ten sposób rozpoczęliśmy regularną współpracę badawczą.

Wymagało to trochę wysiłku, ale ostatecznie zdołałem do tego planu przekonać władze Caltechu i MIT, a także wchodzących w skład Laboratorium LIGO badaczy. Poprosiłem Raia Weissa, by został pierwszym

rzecznikiem LSC. Jego wiarygodność i sposób działania w znacznym stopniu pomogły przy jej rozruchu. Później Raia zastąpił w tej roli Peter Saulson z uniwersytetu w Syrakuzach (USA), który również był od dawna członkiem Laboratorium LIGO i był bardzo poważany. Pełnił on tę funkcję jako pierwsza osoba spoza Caltechu i MIT. Jego zaś kolejno zastąpili: David Reitze (obecnie Dyrektor Wykonawczy Laboratorium LIGO), Gabriela Gonzalez ze stanowego uniwersytetu Luizjany i David Shoemaker z MIT pełniący tę funkcję obecnie. W miarę jak Kolaboracja dojrzewała, stawała się coraz bardziej demokratyczna w przyjmowaniu współpracowników, polityce dotyczącej publikacji wyników itd.

Na Naukowej Kolaboracji LIGO spoczywa odpowiedzialność za przekształcanie napływających wstępnie już obrobionych (ang. *calibrated*) danych w fizykę. W jej obrębie stworzone zostały linie przesyłowe danych i utworzone zostały różne grupy analizujące dane z różnych punktów widzenia. Członkowie LSC uczestniczą również w niektórych pracach związanych z działaniem detektorów, planowaniu przyszłych detektorów i pracach badawczo-rozwojowych. Ponadto uczestnicząc we wstępnym obrabianiu danych przyczynili się także do dokładnego scharakteryzowania zasumienia danych. Mamy też program stypendiów umożliwiający młodym badaczom spędzenie pewnego czasu w ośrodkach LIGO.

Kolaboracja LIGO okazała się wielkim sukcesem, o czym świadczy znacząca i efektywna rola jaką odegrała w odkryciu fal grawitacyjnych, analizowaniu danych, ich interpretowaniu, w pisaniu prac i przygotowaniu wystąpień prezentujących rezultaty. Także obecnie odgrywa tę rolę mając swój udział w ogłoszeniu wykrycia [fal emitowanych przy] zlewaniu się dwóch gwiazd neutronowych i we wszystkich następujących po nim obserwacjach wykonywanych za pomocą różnych instrumentów astronomicznych.

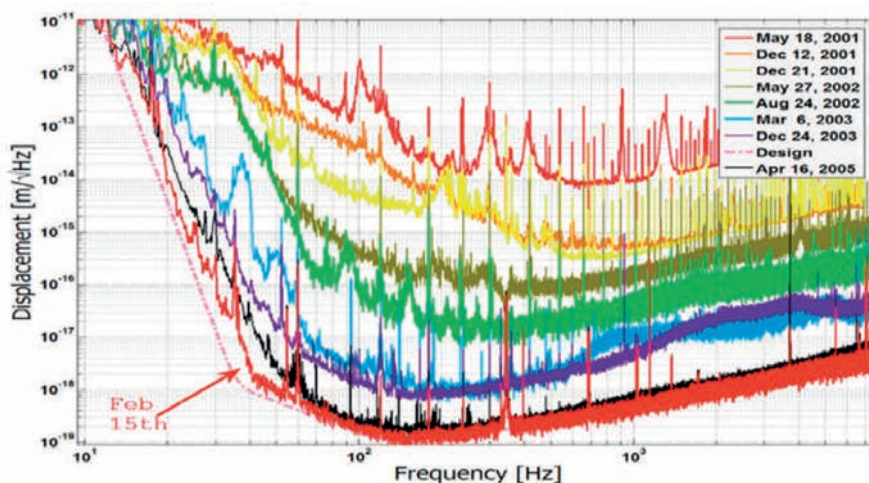
Naukowej Kolaboracji LIGO i jej wszystkim członkom w równym stopniu przypada zasługa w relacjonowanych tu odkryciach uhonorowanych nagrodą Nobla, która zgodnie z jej regułami nie może być przyznana więcej niż trzem osobom. LSC rozrosła się do ponad 1200 współpracowników naukowych pochodzących ze 108 instytucji z 18 krajów. W zeszłym roku przeprowadziliśmy studium, aby wyrobić sobie rozeznanie, jak powinna ona ewoluować w nadchodzącej epoce [rutynowego] rejestrowania fal grawitacyjnych. Oczekujemy, że pewne zmiany zostaną wdrożone w planowanym następnym okresie zbierania danych, który ma się rozpocząć pod koniec tego roku kalendarzowego. Oczekujemy też, że LSC odegra główną rolę w przyszłym uprawianiu fizyki za pomocą detektorów LIGO.

### Działanie i fizyka pierwszych detektorów LIGO

Od początku całego przedsięwzięcia pomysł na LIGO składał się z dwóch etapów. Pierwsze detektory LIGO [7] wykorzystywały, tak dalece, jak było to możliwe, przetestowane już metody i technologie. Na drugim zaś etapie, zaawansowane detektory LIGO miały osiągnąć znacznie większą czułość dzięki wdrożeniu metod i technologii, które miały być dopiero rozwijane w ramach ambitnego programu prac badawczo-rozwojowych realizowanego po zbudowaniu pierwszych detektorów. To właśnie mając na uwadze zaproponowaliśmy NSF, żebyśmy w tym czasie, gdy będziemy uruchamiać, wykorzystywać i uczyć się rozumieć pierwsze detektory, także otrzymywali finansowanie przeznaczone na to, żeby równolegle prowadzić ambitne prace badawczo-rozwojowe w celu opracowania technik udoskonalających działanie detektorów LIGO, tak by na drugim etapie osiągnęły one czułość, przy której rejestracja fal stałaby się „prawdopodobna”. Fundacja zatwierdziła ten plan i finansowała to, co miało stać się skutecznym programem badań rozwojowych; rozpoczął się on około roku 2000 i doprowadził do powstania koncepcji zaawansowanych detektorów LIGO, która została zgłoszona do NSF i zaaprobowana przez nią w roku 2003. Rzeczywiste finansowanie projektu zostało przyznane kilka lat później. Podkreślam, iż to, że byliśmy w stanie prowadzić ten program badań rozwojowych i planowania dzięki niepozbyciu się najważniejszych osób, które planowały i zbudowały pierwsze detektory LIGO, było kluczowe dla odniesienia ostatecznego sukcesu, jakim było zarejestrowanie fal grawitacyjnych przez zaawansowane detektory LIGO. Drugą ważną okolicznością było to, że infrastruktura związana z pierwszymi detektorami LIGO została zaplanowana tak, że podukłady interferometrów mogły być udoskonalane lub zastępowane ulepszonymi w ramach tej samej infrastruktury (komór próżniowych).

Po ukończeniu budowy pierwszych detektorów LIGO rozpoczęliśmy ich uruchamianie i szybko osiągnęliśmy czułość wyższą niż miał jakikolwiek poprzedni detektor fal grawitacyjnych. Mogliśmy więc rozpocząć pierwszą rundę zbierania danych i szukania fal grawitacyjnych. Nie wykryliśmy ich, ale nałożyliśmy nowe ograniczenia na [moc] wielu różnorodnych źródeł fal. Po zakończeniu pierwszej rundy zbierania danych dokonaliśmy kilku technicznych ulepszeń, które zredukowały poziom szumów tła. Niektóre z tych ulepszeń były zaplanowane od początku, inne zaś wynikły z tego, czego się nauczyliśmy podczas zbierania danych. Następnie rozpoczęliśmy drugą rundę zbierania danych. Znowu nie wykryliśmy fal grawitacyjnych ale ustanowiliśmy i opublikowaliśmy nowe ograniczenia na [moc] różnych możliwych ich źródeł. Taki podstawowy cykl działania powtarzaliśmy przez całą dekadę, zwiększając czułość i zbierając dane – w sumie sześć rund przy coraz wyższej czułości (ryc. 3). Podczas ostatnich rund zbierania danych interferometri osiągnęły czułość bardzo zbliżoną do zamierzonej przy ich planowaniu.

Szukaliśmy fal grawitacyjnych pochodzących z wielu potencjalnych źródeł: ze zlewania się układów podwójnych czarnych dziur, czarnej dziury i gwiazdy neutronowej, układu dwóch gwiazd neutronowych. Szukaliśmy także sygnałów pochodzących z rozciągniętych źródeł takich jak znane i nieznanne pulsary, możliwych sygnałów stochastycznego tła oraz pochodzących z jakichś nowych źródeł sygnałów, na które wcześniej specjalnie się nie nastawialiśmy i nie mieliśmy modeli ich możliwych profilów. Niestety, nawet przy wydawnie zwiększonej czułości interferometrów nie wykryliśmy fal grawitacyjnych. Ustanowione ograniczenia na moc różnych źródeł fal grawitacyjnych nałożyły [tylko] więzy na pewne opublikowane modele emisji fal grawitacyjnych towarzyszących zjawiskom astrofizycznym.



Ryc. 3. Postępy w ulepszaniu czułości pierwszych detektorów LIGO. [Redakcja PF przeprasza za nie najlepszą czytelność niektórych elementów rycin w tym artykule – takiej jakości ilustracje zawiera oryginalny wykład udostępniony przez Nobel Foundation]

Końcowe poszukiwania fal pochodzących z układów podwójnych czarnych dziur za pomocą pierwszych detektorów LIGO były już prowadzone we współpracy z detektorem Virgo [8]. Mimo iż nie wykryliśmy żadnego sygnału, ostrożnie ufaliśmy, że techniczne udoskonalenia przewidywane dla zaawansowanych detektorów wystarczą, by w końcu fale wykryć.

### Zaawansowane interferometry LIGO

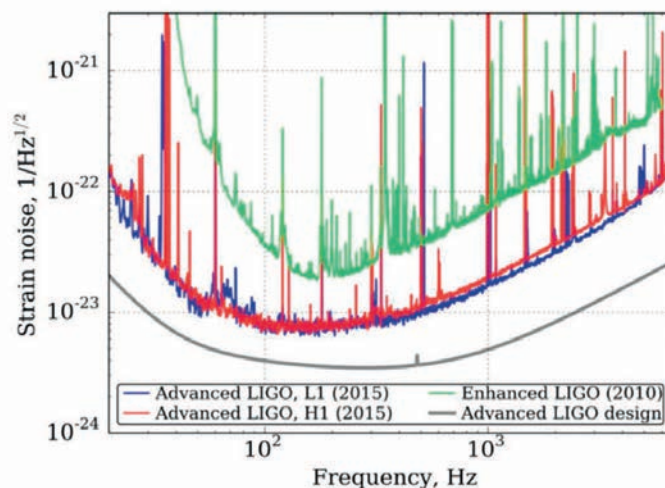
Około roku 2004 ulepszone technologie opracowane dla zaawansowanych detektorów LIGO [9] były na tyle rozwinięte, że można było zaproponować takie detektory Narodowej Fundacji Nauki. Po poddaniu tej propozycji ocenie, Fundacja podtrzymała wspieranie prac nad rozwojem technicznym prowadzonych równoległe z działaniem pierwszych detektorów LIGO. Projekt zaawansowanych detektorów otrzymał główne finansowanie za pośrednictwem specjalnego funduszu NSF przeznaczonego na konstrukcję wielkich urządzeń badawczych (MREFC). Tym samym zakończył się naukowy program pierwszych detektorów LIGO i rozpoczęła budowa detektorów zaawansowanych. Dodatkowe znaczące udoskonalenia tych detektorów obejmowały: wstępnie stabilizowany system laserowy skonstruowany w Instytucie Maxa Plancka w Niemczech, układ zawieszenia mas testowych wykonany przez laboratoria należące do brytyjskiego Science and Technology Facilities Council i termicznie kompensowane czujniki frontu fali oraz elementy kontrolne interferometrów wykonane przez laboratoria należące do Australian Research Council.

Podstawowym celem zaawansowanych detektorów LIGO jest przynajmniej dziesięciokrotne zwiększenie czułości w stosunku do pierwszych detektorów w całym zakresie częstotliwości obejmowanych przez interferometry (ryc. 4). Trzeba także powiedzieć, iż dziesięciokrotne zwiększenie czułości detektora zwiększa,

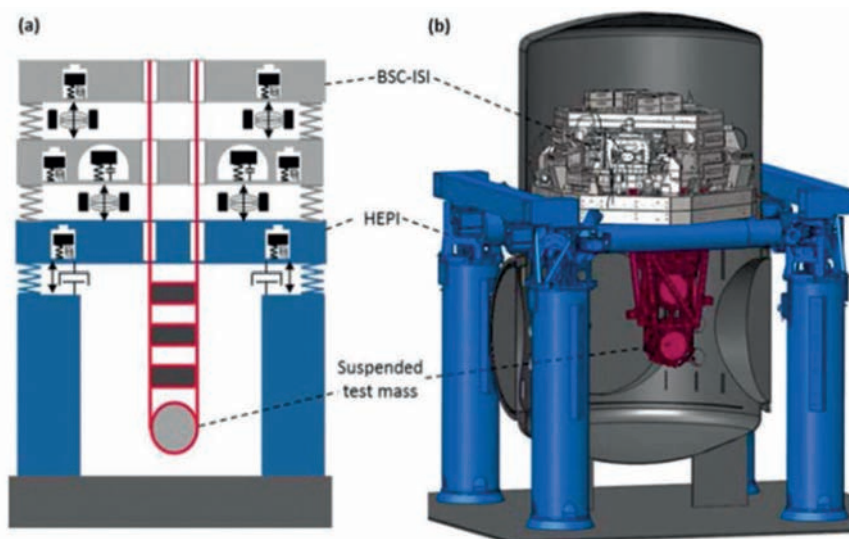
jako że rejestrowana jest amplituda fali, o taki sam czynnik przeszukiwaną odległość [do źródeł fal]. Zwiększa się tym samym tysiąckrotnie przeszukiwana objętość wszechświata (lub częstość wykrywania danego rodzaju źródeł - prawdopodobieństwo zarejestrowania jest w przypadku większości źródeł proporcjonalne do przeszukiwanej objętości). Zwiększona czułość detektora daje więc bardzo dużą premię polegającą na poszerzeniu pola poszukiwań i to z tego powodu spędziliśmy dużą część naszego czasu podwyższając ją, zamiast poświęcać ten czas na długie rundy zbierania danych.

Pierwsze i zaawansowane detektory fal grawitacyjnych LIGO są interferometrami Michelsona o ramionach długości czterech kilometrów. I jedno i drugie wykorzystują wnęki Fabry'ego-Perota, aby wydłużyć czas oddziaływania z falą grawitacyjną oraz recykling mocy, by zwiększyć efektywną moc lasera. Nowym elementem w zaawansowanych interferometrach LIGO jest recykling sygnału na (ciemnym) wyjściu. Pociąga on za sobą zmianę układów kontroli i odczytu. Recykling sygnału umożliwia dopasowywanie maksymalnej czułości detektora do celu fizycznego; obecnie celem tym jest poszukiwanie fal pochodzących ze zlewania się czarnych dziur i gwiazd neutronowych. Maksimum czułości zaawansowanych detektorów jest [więc teraz] przesunięte w kierunku niższych częstotliwości (do zakresu od 10 do 40 Hz).

Ulepszony układ izolujący od szumów pochodzenia sejsmicznego składa się z izolacji pasywnej i aktywnej, a ulepszone zawieszenia mas testowych wykorzystują poczwórne układy wahadłowe. Zwiększone zostały [także] moc lasera i masy testowe oraz udoskonalono pokrycia luster. Zaawansowane interferometry zostały zainstalowane w tej samej infrastrukturze, co pierwsze interferometry, m.in. w tym samym układzie komór próżniowych.



Ryc. 4. Docelowa czułość zaawansowanych detektorów LIGO



Ryc. 5. Wielostopniowy układ zawieszenia mas testowych zastosowany w zaawansowanych detektorach LIGO stanowiący aktywno-pasywną izolację od szumów pochodzenia sejsmicznego

Jako lasery w zaawansowanych interferometrach wykorzystywane są wielostopniowe lasery Nd:YAG. Najszym celem jest zwiększenie mocy z 18 W w pierwszych interferometrach do 180 W w zaawansowanych, co pozwoli zwiększyć czułość detektorów. Układ wstępnie stabilizowanych laserów składa się z lasera i układu kontrolnego, który pozwala utrzymać stabilną częstotliwość, kierunek i moc emitowanego przez laser światła. Z uwagi na sprawy związane ze stabilnością, grzanie się [lasera] i efekty spowodowane [przypadkowym] rozpraszaniem światła, przedstawione tu rezultaty zostały uzyskane przy jedynie nieznacznie zwiększonej mocy lasera. Planujemy podnosić tę moc stopniowo, badając jednocześnie tego skutki w trakcie następnych rund zbierania danych.

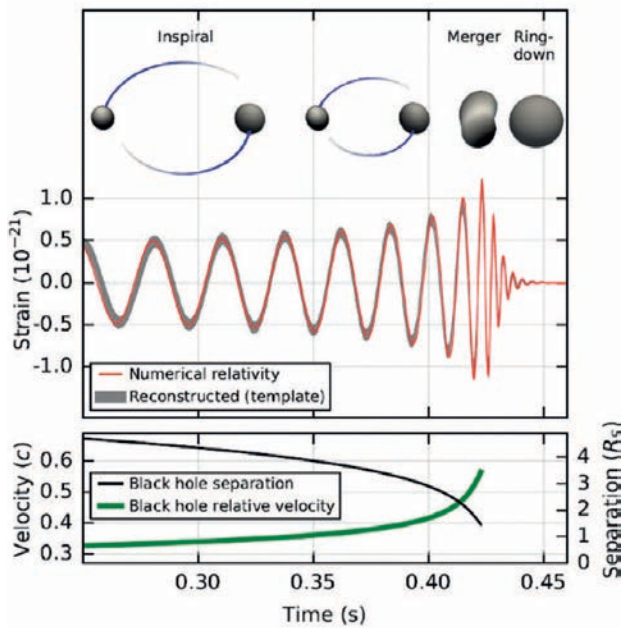
Kluczowym udoskonaleniem, którego wprowadzenie w zaawansowanych detektorach umożliwiło wykrycie fal emitowanych przy zlewaniu się dwóch czarnych dziur, była aktywna izolacja od szumów sejsmicznych i poczwórny układ zawieszenia (ryc. 5). W układzie tym wszystkie ruchome elementy zostały umieszczone poza masami testowymi, co skutkuje lepszą izolacją. W pierwszych detektorach masy testowe były jedenastokilogramowymi tarczami ze stopionej krzemionki o średnicy 25 cm. W zaawansowanych detektorach, aby bardziej zredukować szum termiczny, mają one średnice 34 cm i ważą po 40 kg, co redukuje szum ciśnienia promieniowania (śrutowy) do mniej więcej tego samego poziomu, jaki osiąga szum termiczny wytwarzany w zawieszeniu. Masy testowe zamiast na stalowych drutach, użytych w pierwszych detektorach, są zawieszane na włóknach ze stopionej krzemionki. Na kompletny układ zawieszenia składają się cztery wahadłowe segmenty, co ulepsza izolację od szumu sejsmicznego dając zarazem kilka punktów ruchomych.

Układ aktywnej izolacji sejsmicznej wyczuwa ruch i jest połączony z układem izolacji pasywnej wykorzystującej techniki typu „servo”. Pozwala to zwiększyć stokrotnie czułość w zakresie niskich częstotliwości. Ponieważ częstość występowania [we wszechświecie] zdarzeń, [którym towarzyszy emisja fal] grawitacyjnych skaluje się z objętością, zwiększa to o czynnik  $10^6$  częstość występowania zdarzeń, [które detektor może zarejestrować]. To właśnie to udoskonalenie pozwoliło zaawansowanym detektorom LIGO po zaledwie kilku dniach wykryć zlewanie się czarnych dziur, co nie udało się pierwszym detektorom mimo całych lat zbierania danych.

#### Zarejestrowane zlanie się czarnych dziur (zdarzenie GW150914)

Zlanie się dwóch czarnych dziur zostało po raz pierwszy zarejestrowane przez zaawansowane detektory LIGO 15 września 2015 roku [11, 12, 13, 14]. Rycina 1 pokazuje zarejestrowany sygnał, a na ryc. 6 podane są główne charakterystyki kolapsu tego zwartej układu podwójnego. Otrzymał je w wyniku analizy pokazanego na ryc. 1 sygnału tego zdarzenia. Górna część ryc. 6 przedstawia trzy fazy (zacieśnianie się orbity układu, zlewanie się i dzwonięcie) tego kolapsu; pod nimi pokazane są odpowiadające im profile fali grawitacyjnej. W miarę, jak obiekty krążą jeden wokół drugiego po zacieśniającej się orbicie, emitowanych jest coraz więcej fal grawitacyjnych; wzrasta przy tym zarówno ich częstotliwość, jak też i amplituda (daje to charakterystyczny sygnał podobny do świergotu). Po tym następuje ostateczne zlanie się i dzwonięcie pojedynczego już obiektu. Skala na lewej pionowej osi wykresu w dolnej części ryc. 6 pokazuje, że w trakcie ostatecznego zlewania się oba obiekty poruszają się z prędkościami przewyższającymi połowę prędkości światła – są więc one wysoce





Ryc. 6. Analiza fizyczna zarejestrowanego zdarzenia zinterpretowanego jako zlanie się układu dwóch czarnych dziur

relatywistyczne; skala na prawej osi, na której jednostką jest promień Schwarzschilda, pokazuje, że cały układ jest bardzo zwarty – obiekty dzieli zaledwie kilkaset kilometrów, gdy ich sygnał zaczyna wchodzić w monitorowany przez nas zakres częstotliwości.

Porównując zarejestrowany profil fali z przewidywanym przez Ogólną Teorię Względności ustaliliśmy, że zaobserwowaliśmy zlanie się dwóch ciężkich zwartych obiektów (czarnych dziur), z których każdy miał masę rzędu 30 Słońc i krążących jeden wokół drugiego w odległości zaledwie kilkuset kilometrów z relatywistycznymi prędkościami.

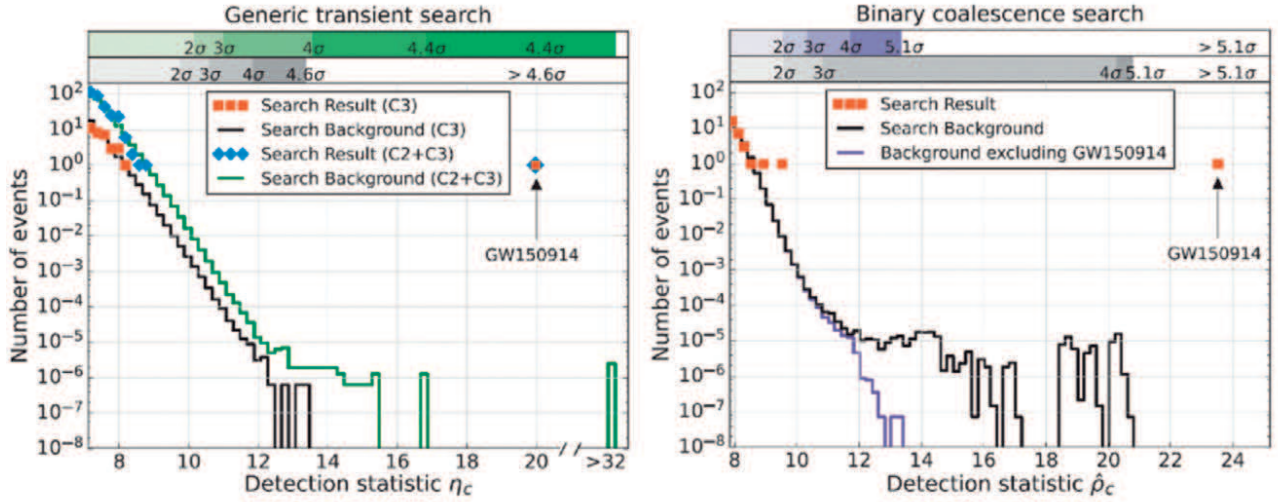
W górnej części ryc. 6 widzimy trzy kolejne fazy zlewania się: fazę krążenia układu podwójnego czarnych dziur po zacieśniającej się orbicie, następnie fazę zlewania się tych dwóch obiektów i wreszcie następującą po tym fazę dzwonienia. Ostry wzrost z czasem częstotliwości i amplitudy (tzw. sygnał-świergot) jest charakterystyczny dla pierwszej fazy. Amplituda jest największa w fazie zlewania się. Zdarzenie kończy charakterystyczna częstotliwość dzwonienia. Dwie czarne dziury krążą po zacieśniającej się orbicie i zlewają się wskutek emitowania promieniowania grawitacyjnego będącego skutkiem ich przyspieszeń.

Dolna część ryc. 6 jest jeszcze bardziej pouczająca. Jednostką na skali na prawej osi jest z grubsza sto kilometrów. Wykres pokazuje więc, że wzajemna odległość dwu zlewających się obiektów wynosiła początkowo około 400 kilometrów, a na końcu około 100 km. Te dwa obiekty, każdy o masie około 30 Słońc, zajmują zatem objętość około dwa razy większą niż rozmiary Sztokholmu, chociaż końcowa czarna dziura ma masę 60 razy większą niż Słońce, czyli jest 10 milionów razy

bardziej masywna niż Ziemia. Ze skali na lewej osi możemy odczytać, że gdy zdarzenie to zaczęło być rejestrowane, oba obiekty poruszały się z prędkościami równymi około 0,3 prędkości światła, które wzrosły do ponad 0,5 tej prędkości w momencie ostatecznego zlania się obiektów!

Aby mieć pewność, że to co zaobserwowaliśmy było rzeczywistym zdarzeniem, a nie fluktuacją tła, mierzymy bezpośrednio prawdopodobieństwo [takiej fluktuacji] szukając koincydencji przekrojów czasowych wskazań obu detektorów zarówno pojawiających się w tym samym momencie (tzn. w odstępie czasowym nie większym niż 10 milisekund), jak i w różnych chwilach! Ponieważ zdarzenie GW150914 zaszło zaledwie kilka dni po rozpoczęciu zbierania danych przez zaawansowany detektor, zajęło nam około miesiąca, zanim mogliśmy ilościowo ocenić prawdopodobieństwo tego, że zarejestrowane zdarzenie było rzeczywiste. Innymi słowy, oprócz szukania podobnych sygnałów zachodzących w tym samym czasie, szukamy także podobnych wskazań detektorów w różnych momentach w całym okresie zbierania danych. Podobne przekroje czasowe wskazań obu detektorów, występujące w różnych chwilach, nie mogą pochodzić od żadnych zjawisk fizycznych, które rozprzestrzeniają się z relatywistycznymi prędkościami, takich jak fale grawitacyjne. Całkowita liczba przekrojów, które porównaliśmy, odpowiada poziomowi tła koincydencji równoczesnych równoważnemu 67 000 lat zbierania danych przez detektory. Uwzględniając podział poszukiwanych przez nas sygnałów na różne klasy, otrzymujemy częstość występowania fałszywych alarmów nie wyższą niż 1 na 22500 lat. Odpowiada to prawdopodobieństwu tego, iż zarejestrowane zdarzenie GW150914 jest przypadkowe, nie większemu niż  $2 \times 10^{-6}$  i ustanawia tym samym poziom istotności tego zdarzenia na  $4,6\sigma$ . Podkreślam tu, że poziom ten jest wyznaczony przez liczbę porównanych przekrojów sygnałów pochodzących z 16 dni „żywego” zbierania danych. Jest więc to dolna granica rzeczywistego poziomu istotności zdarzenia GW150914.

Rycina 7 pokazuje omówioną wyżej statystyczną istotność zdarzenia GW150914 porównaną do mierzonych poziomów tła przy dwu różnych założeniach. Na osi poziomej odłożona jest miara istotności zdarzenia, a na osi pionowej częstość jego występowania. Wykres po lewej pokazuje zarejestrowany przypadek GW150914 jako pojedyncze zdarzenie o statystycznej istotności równej  $4,6\sigma$  wyznaczonej tak, jak wyjaśniałem wyżej, bez przyjmowania żadnej hipotezy co do jego pochodzenia, tj. do otrzymania tego wykresu założony został typowy kształt sygnału pochodzącego ze zdarzenia. Wykres po prawej pokazuje istotność przewyższającą  $5\sigma$ , otrzymywaną, gdy założy się, że zarejestrowany sygnał



Ryc. 7. Statystyczna istotność zarejestrowanego sygnału: po lewej potraktowanego jak typowa przypadkowa fluktuacja, a po prawej – jak wynik bezpośredniej obserwacji zdarzenia złączenia się dwóch obiektów

pochodził ze zlewania się układu podwójnego. Zauważyć należy, iż drugie najbardziej istotne zdarzenie w tym zbiorze danych odpowiada istotności  $2\sigma$ , co oznacza, że i ono równie dobrze mogłoby być złączeniem się układu podwójnego czarnych dziur, ale na tym wczesnym etapie działania LIGO tylko zdarzenia o istotności przekraczającej  $5\sigma$  uznajemy za fale grawitacyjne wyemitowane przy zlewaniu się układów podwójnych.

Kształt [czasowego] profilu fali, w którym zawarta jest informacja o zacieśnianiu się orbity, zlewaniu się i końcowym dzwonieniu pozwala także wyznaczyć parametry układu podwójnego. Orbita zacieśnia się w miarę, jak obie czarne dziury przyspieszają w swoim ruchu okrężnym jedna wokół drugiej i promieniają energię w postaci fal grawitacyjnych. Szybkość zmian częstotliwości emitowanej fali wyznacza parametr zwany „masą świergotu” (ang. *chirp mass*), który w pierwszym rzędzie względem natężenia grawitacji występującej w układzie jest dany wzorem

$$\mathcal{M} \equiv \frac{(M_1 M_2)^{3/5}}{(M_1 + M_2)^{1/5}} \simeq \frac{c^3}{G} \left[ \frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \frac{df}{dt} \right]^{3/5},$$

[w którym  $M_1$  i  $M_2$  są masami zbliżających się do siebie czarnych dziur, a  $f$  jest chwilową częstotliwością emitowanej fali.] Poprawki wyższego rzędu do tego wzoru umożliwiają wyznaczenie stosunku mas i spinów [tj. wewnętrznych momentów pędu] czarnych dziur. Masy obu czarnych dziur można więc bezpośrednio wyznaczyć z dopasowania modelu teoretycznego do danych, amplituda [fali] zaś jest odwrotnie proporcjonalna do (jasnościowej) odległości [do układu podwójnego]. Jeśli spiny dziur nie są równoległe do ich orbitalnego momentu pędu, zachodzi precesja orbity. Układ GW150914 jej nie wykazuje. Położenie tego układu na niebie jest wyznaczane na podstawie opóź-

nienia, z jakim sygnał jest rejestrowany w jednym detektorze względem drugiego, oraz na podstawie różnic w amplitudzie i fazie sygnałów rejestrowanych przez te detektory.

Wykorzystując numeryczne symulacje w celu dobrania parametrów teoretycznego opisu układu kolapsującego ustaliliśmy, że całkowita energia wyemitowana w postaci fal grawitacyjnych wynosi  $3,0 \pm 0,5 M_\odot c^2$ . Moc emitowanego promieniowania osiąga maksymalną wartość  $\sim 3,6 \times 10^{56}$  erg/s, a wartość spinu utworzonej w wyniku zdarzenia pojedynczej czarnej dziury jest nie większa niż 0,7 maksymalnej możliwej wartości spinu czarnej dziury. Podstawowe parametry układu są podsumowane w tabeli:

Masa pierwszej czarnej dziury	$36_{-4}^{+5} M_\odot$
Masa drugiej czarnej dziury	$29_{-4}^{+4} M_\odot$
Masa końcowej czarnej dziury	$62_{-4}^{+4} M_\odot$
Spin końcowej czarnej dziury	$0,67_{-0,07}^{+0,05}$
Jasnościowa odległość do układu	$410_{-180}^{+160}$ Mpc
Przesunięcie ku czerwieni	
<i>redshift</i> źródła	$0,09_{-0,04}^{+0,03}$

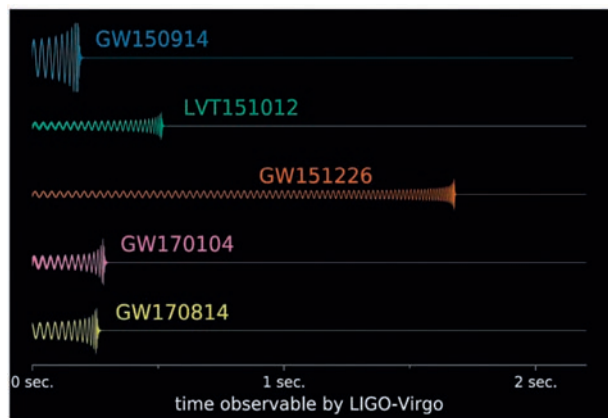
Mając tylko dwa detektory nie możemy dostatecznie dokładnie ustalić kierunku do układu, ale porównując czasy, amplitudy i fazy [sygnału rejestrowanego] przez detektory w Livingstone i w Hanford możemy umiejscowić źródło fali na południowej półkuli nieba w obszarze o kątowym rozmyciu około 600 stopni kwadratowych. Nasze ostatnie obserwacje, które omówię dalej, są już wykonywane przy udziale detektora Virgo i na podstawie danych z trzech detektorów lokalizację źródeł na niebie można ustalać z dokładnością rzędu dziesiątków stopni kwadratowych.

### Kolejne przypadki zlewania się czarnych dziur

Pierwsza runda ( $O_1$ ) zbierania danych przez zaawansowane detektory LIGO trwała cztery miesiące, od września 2015 do stycznia 2016 r. Następną rundę ( $O_2$ ) trwała od grudnia 2016 do końca sierpnia 2017 r. Podobnie jak w przypadku przedstawionego tu rozwoju pierwszych detektorów LIGO, także zaawansowane detektory udoskonalamy pomiędzy kolejnymi rundami zbierania danych i mamy nadzieję osiągnąć zaplanowaną docelową ich czułość w ciągu kilku lat. Aktywnie szukamy innych sygnałów niż te pochodzące ze zlewania się układów podwójnych, w tym sygnałów towarzyszących zjawiskom takim, jak wybuchy supernowych, błyski promieniowania gamma; szukamy także ciągłych fal grawitacyjnych emitowanych przez obracające się gwiazdy neutronowe (pulsary), sygnałów tła stochastycznego itp. Jak dotąd wykryliśmy tylko fale emitowane przez zlewające się układy podwójne, mamy jednak nadzieję wykryć także inne, gdy zwiększymy czułość naszych detektorów.

Sygnałów krótkotrwałych, albo mających charakter wybuchów, szukamy na dwa różne sposoby. Po pierwsze, szukamy niemających jakiegos z góry przewidywanego charakteru wzrostów mocy [zarejestrowanych sygnałów], wykorzystując technikę falek, w której nie robi się żadnych założeń co do oczekiwanego czasowego profilu fali. Druga metoda opiera się na porównywaniu sygnału ze wzorcami profili fal emitowanych przy zlewaniu się obiektów. Dysponujemy zbiorem takich wzorców czasowych profili fal odpowiadających różnym kombinacjom mas obu obiektów otrzymanym na podstawie obliczeń wykonanych albo w ramach przybliżenia postnewtonowskiego, albo, jeśli to konieczne, wykorzystujących numeryczną ogólną teorię względności [zob. wykład Kipa Thorne'a, którego polski przekład opublikowany został w PF 70 (3), 18 (2019)]. Zgromadziliśmy kilkadziesiąt tysięcy takich wzorców, z których każdy jest kombinowany z mierzonym szumem w każdym z przedziałów czasowych (na tym polega technika dopasowywania wzorców).

Od czasu doniesienia o zarejestrowaniu zdarzenia GW150914 ogłosiliśmy [15,16] zarejestrowanie kilku dalszych przypadków zlewania się czarnych dziur. Jak to zostało uwidocznione na ryc. 8, jak dotąd zarejestrowaliśmy cztery takie zdarzenia charakteryzujące się wysoką statystyczną istotnością ( $> 5\sigma$ ) i jedno o istotności  $2\sigma$ , którego nie ogłaszamy jako przypadku. Jednak wszystkie charakterystyki tego zdarzenia są podobne do odpowiednich charakterystyk innych przypadków zlewania się czarnych dziur, z wyjątkiem tego, że ono zaszło w większej od nas odległości, co powoduje, iż jego sygnał był słabszy i stosunek sygnału do szumu był niższy.



Ryc. 8. Charakterystyka zdarzeń zlewania się czarnych dziur zarejestrowanych przez detektory LIGO

Interesujące jest to, że mamy tylko jeden taki przypadek o marginalnym stosunku sygnału do szumu. Wynika to z niezwykle ostrego cięcia [nakładanego przez nas] na szum tła, gdy żądamy koincydencji sygnałów rejestrowanych w dwu odległych detektorach, co jest odzwierciedlone bardzo ostrym spadkiem szumu tła pokazanego na ryc. 7. Możemy wnosić, że jest tylko nieznaczna korelacja pomiędzy bardzo zaszumionymi przypadkami rejestrowanymi w obu placówkach. Tego się właściwie nie spodziewaliśmy, kiedy zastanawialiśmy się nad korelacjami szumu. Wynik ten jest jednak zarówno przekonujący w odniesieniu do zdarzeń, które już zarejestrowaliśmy, jak też dobrze wróży, gdy chodzi o czystość przypadków, które będziemy rejestrować w przyszłości używając techniki koincydencji.

Należy zauważyć, że długość trwania i liczba cykli oscylacji rejestrowanych przez detektory LIGO w przedstawionych na ryc. 8 przypadkach zlewania się układów czarnych dziur silnie zależy od masy takiego układu. Najcięższym z zarejestrowanych układów był pierwszy, przy którym zaobserwowaliśmy tylko kilka cykli; przy najlżejszym zaś (GW151226) – zaobserwowaliśmy ich wiele. Powtórzę jeszcze raz, że wszystkie charakterystyki kandydata na przypadek, zdarzenia LVT152-12, są całkowicie zgodne z pozostałymi przypadkami, ale miał on miejsce niemal dwukrotnie dalej i z tej przyczyny ma znacznie niższą statystyczną istotność.

### Fizyczne konsekwencje zarejestrowanego zlewania się czarnych dziur

Fale grawitacyjne stanowią zupełnie nowy sposób patrzenia na Wszechświat. Mamy wszelkie powody oczekiwać, że dzięki falom grawitacyjnym odkryjemy nowe zjawiska i poznamy „nową” astrofizykę. To stało się jasne już od pierwszych zarejestrowanych przypadków. Wnioski z nich płynące są m.in. następujące:

- „Gwiazdowe” czarne dziury istnieją.

- „Gwiazdowe” czarne dziury tworzą układy podwójne.
- Kolaps takich układów zachodzi w czasie krótszym niż wiek Wszechświata.
- Masy takich układów są znacznie większe ( $M > 20M_{\odot}$ ) niż te, jakich się spodziewaliśmy po czarnych dziurach o masach „gwiazdowych”.

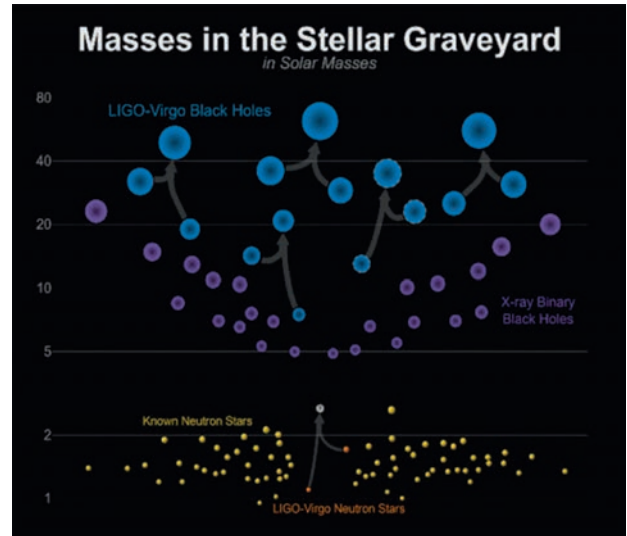
Fakt, że czarne dziury, których zlewanie się zarejestrowały detektory LIGO, są tak masywne, nasuwa pytanie, w jaki sposób obiekty te powstały. Wprawdzie detektory LIGO łatwiej wykrywają obiekty o większych masach, gdyż ich sygnały są silniejsze, co powoduje, że czułość detektorów wystarcza, by wykrywać obiekty bardziej odległe, a „przechesywana” przez nie objętość Wszechświata rośnie jak sześćcian odległości, to jednak pytanie, w jaki sposób powstały obiekty tak masywne, jak te których sygnały zostały wykryte, domaga się odpowiedzi. Jeśli czarne dziury o masach typowych dla gwiazd powstały w wyniku kolapsu ciężkich gwiazd, konieczne były szczególne warunki, takie jak obszar wszechświata o niskiej zawartości metali, by gwiazdy dające im początek przetrwały. Inną możliwością jest powstanie ich w gęstych gromadach, a trzecią, że są one pierwotne i mogą mieć coś wspólnego z ciemną materią.

Następnym wyzwaniem będzie rozróżnienie tych lub jeszcze innych możliwości, jeśli chodzi o pochodzenie wartości mas i innych parametrów takich ciężkich czarnych dziur. Więcej zarejestrowanych podobnych przypadków pozwoli nam poznać [statystyczny] rozkład ich mas i innych parametrów, a wyższy stosunek sygnału do szumu tła da nam informację o innych cechach zlewających się układów. Na przykład, czy spiny zlewających się czarnych dziur są ustawione równoległe czy antyrównoległe, czy też nie występuje między nimi żadna korelacja?

Naszym podstawowym celem badawczym jest sprawdzenie ogólnej teorii względności w bardzo ważnym reżimie silnego pola grawitacyjnego. Zlewanie się czarnych dziur stanowi właśnie znakomite laboratorium do prowadzenia takich badań. Możemy bowiem porównywać rejestrowany czasowy profil fali grawitacyjnej z przewidywanym przez teorię względności i szukać odstępstw. Na razie wszystkie rezultaty pomiarów są w dobrej zgodzie z teorią.

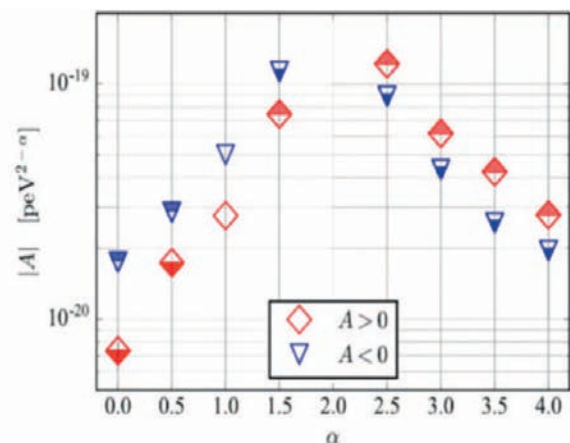
Pierwszym takim sprawdzianem jest to, jak dobrze ogólna teoria względności przewiduje szczegółowe cechy zebranych danych. Przy obecnym poziomie dokładności pomiarów wszystkie odstępstwa, jakie widzimy, dają się wyjaśnić szumem aparaturowym w naszych interferometrach.

Próbowaliśmy nadać stopniowi zgodności [teorii z pomiarami] jakąś formę ilościową wprowadzając [do



Ryc. 9. Masy zlewających się czarnych dziur zarejestrowanych przez LIGO

równań teorii] człon powodujący dyspersję [fal grawitacyjnych] tj. powodujący, iż różne składowe fali rozprzestrzeniają się z prędkościami różnymi od prędkości światła i tym samym fale ulegają dyspersji. Duża odległość do punktu przestrzeni, w którym zachodzi zlewanie się czarnych dziur, powoduje, że rejestrowany sygnał jest bardzo silnie zależny od takiej dyspersji. Z ryciny 10 wynika, że tylko niewielki stopień dyspersji jest wciąż możliwy. Granica  $\alpha = 0$  odpowiada górnemu ograniczeniu na masę grawitonu (hipotetycznej cząstki przenoszącej oddziaływania grawitacyjne). Przy założeniu, że dyspersja grawitonów w próżni byłaby taka, jak zwykłych cząstek o niezerowej masie, otrzymuje się  $M_g < 7,7 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$  jako górne ograniczenie na masę grawitonu.



Ryc. 10. Test polegający na wprowadzeniu do [równań] teorii członu prowadzącego do dyspersji [fal grawitacyjnych]. Pokazane są górne granice możliwych jeszcze wartości współczynnika przy takim członie

Bardziej precyzyjne testy teorii względności staną się możliwe, gdy zarejestrujemy więcej przypadków. W szczególności będziemy wtedy mogli poddać testom różne alternatywne wersje teorii grawitacji.

### Detektor VIRGO wykrywa fale grawitacyjne

Ogłosiliśmy ostatnio [17] zarejestrowanie jeszcze jednego przypadku (GW170814) zlewania się czarnych dziur. I po raz pierwszy przypadek ten został również zarejestrowany przez detektor Virgo znajdujący się nieopodal Pizy w Włoszech. Virgo jest kolaboracją badaczy z Francji, Włoch, Holandii, Polski i Węgier. Jej założycielami byli Adalberto Giazotto i Alain Brillet; obecnie jej liderami są Frederico Ferrini kierujący nią z ramienia European Gravitational Observatory (EGO) (Europejskiego Obserwatorium Grawitacyjnego) oraz Jo van de Brand jako osoba kontaktowa. Detektor Virgo jest interferometrem o trzykilometrowych ramionach, podobnym do LIGO, ale różniącym się od LIGO pewnymi rozwiązaniami technicznymi.



Ryc. 11. Fotografia laboratorium mieszczącego Interferometr Virgo w Cascinie (Włochy).

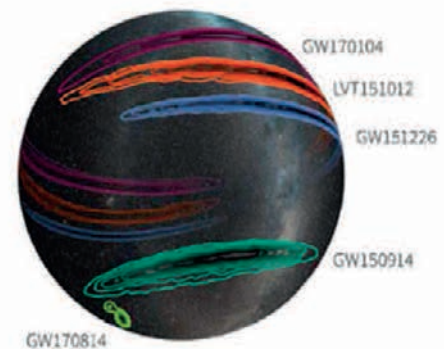
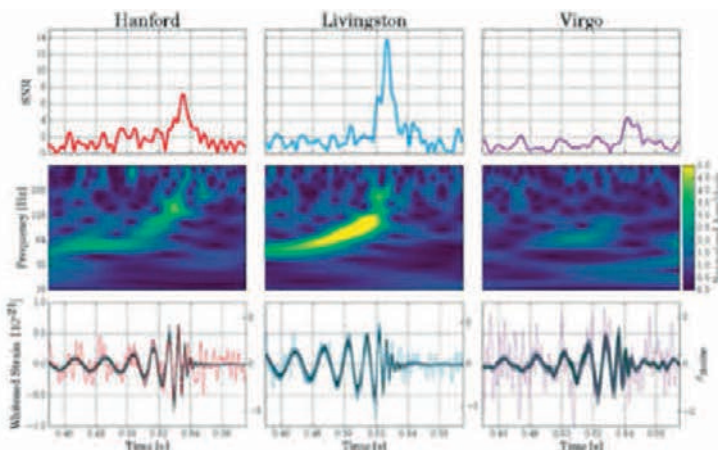
Zarejestrowanie wspomnianego przypadku także przez Virgo nie tylko daje niezależne potwierdzenie wykrycia przez LIGO tego zlewania się czarnych dziur, ale także wydatnie zwiększa możliwość jego lokalizacji na niebie metodą triangulacji. Stanowi to wstęp do możli-

wości, jakie da włączenie się do sieci japońskiego detektora KAGRA i detektora LIGO-India. Pracując razem detektory te zapewnią pełniejsze pokrycie nieba i o więcej niż rząd wielkości zwiększą możliwość wyznaczenia kierunku do źródła [fali]. Jest to widoczne na ryc. 12, na której lokalizacja na niebie ostatniego z wykrytych przypadków zlewania się czarnych dziur jest znacznie dokładniejsza niż poprzednich.

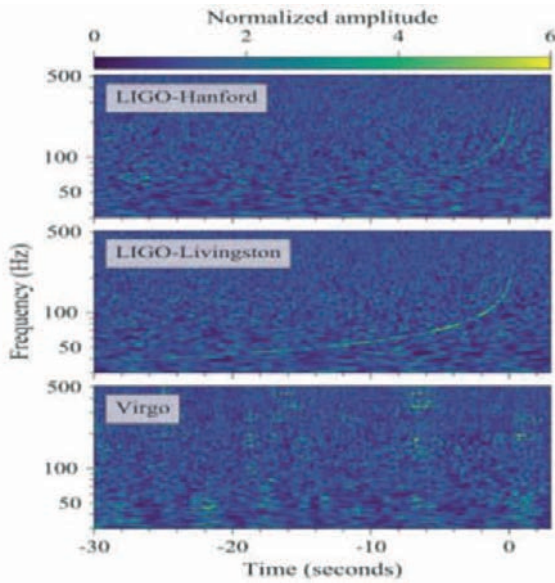
Pierwsza potrójna koincydencja umożliwiła dokonanie sprawdzianu ogólnej teorii względności, który nie mógłby być przeprowadzony na podstawie danych zebranych tylko przez detektory LIGO, ponieważ kierunki ich ramion są niemal takie same. Uwzględniając dane z Virgo, którego ramiona mają inny kierunek, można badać polaryzację fal grawitacyjnych i sprawdzić, czy są one poprzeczne, jak to przewiduje ogólna teoria względności. Przypadek GW170814 jako pierwszy umożliwił zatem przeprowadzenie testu pod kątem szukania niepoprzecznych składowych polaryzacji fali. Pierwsza wykonana taka analiza nie ujawniła ich występowania. Następne przypadki zarejestrowane zarówno przez detektory LIGO, jak i przez Virgo pozwolą przeprowadzić dokładniejsze testy i analizy.

### Kolaps układu dwóch gwiazd neutronowych

Dwa tygodnie po ogłoszeniu przyznania nam nagrody Nobla i niemal dwa miesiące przed tym wykładem, opublikowaliśmy [18] doniesienie o odkryciu po raz pierwszy fal grawitacyjnych pochodzących ze zlewania się układu dwóch gwiazd neutronowych. Był to także pierwszy przypadek, kiedy zarejestrowany sygnał fali grawitacyjnej miał swój odpowiednik elektromagnetyczny zarejestrowany przez wiele różnych instrumentów astronomicznych. Zainicjował on niecierpliwie oczekiwaną nową dziedzinę astronomii wykorzystującej różne sygnały.



Ryc. 12. Po lewej: sygnały zdarzenia GW170814 zlewania się dwóch czarnych dziur zarejestrowane przez detektory LIGO-Hanford, LIGO-Livingstone i Virgo. Po prawej: rekonstrukcja kierunków na niebie, z których dotarły zarejestrowane sygnały poszczególnych przypadków



Ryc. 13. Sygnał pierwszego zarejestrowanego przypadku (GW170817) zlewania się gwiazd neutronowych. Wykresy przedstawiają zależność częstotliwości sygnału od czasu rejestrowaną przez detektory LIGO-Hanford (u góry), LIGO-Livingstone (pośrodku) i Virgo (na dole).

17 sierpnia 2017 roku detektory LIGO i Virgo zarejestrowały sygnał fali grawitacyjnej pochodzący z fazy zacieśniania się orbity podwójnego układu gwiazd neutronowych. Wcześniej wielu z nas oczekiwało, że to właśnie zlewanie się dwóch gwiazd neutronowych będzie źródłem pierwszego zarejestrowanego przez LIGO sygnału, gdyż częstość wykrywania przez radioteleskopy takich układów w naszej Galaktyce jest znana. Choć dokonywane na tej podstawie przewidywanie częstości wykrywania przez LIGO przypadków zlewania się podwójnych gwiazd neutronowych nie jest zbyt precyzyjne, wiedzieliśmy [przynajmniej], iż ich wykrywanie jest w zasięgu możliwości tego instrumentu. Jeśli chodzi o przypadki zlewania się układów podwójnych czarnych dziur lub przypadki zlewania się układów czarna dziura–gwiazda neutronowa (tego rodzaju przypadków jeszcze nie wykryliśmy<sup>5</sup>), to takie przewidywania nie były możliwe.

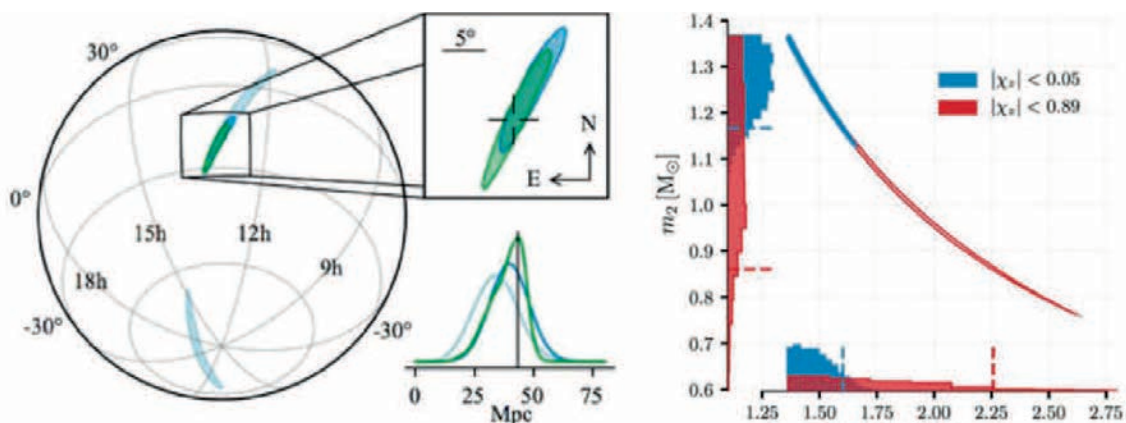
Gwiazdy neutronowe są zbudowane z bardzo gęstej materii jądrowej. Jednym z głównych celów ich badania jest wyznaczenie związku nazywanego „równaniem stanu” [takiej materii]. W układzie podwójnym masa gwiazdy neutronowej i równanie stanu determinują wielkość i powodowaną siłami pływowymi deformację drugiej gwiazdy. Z pierwszego zarejestrowanego przypadku nie możemy jeszcze wyznaczyć równania stanu – to jednak jest celem badania następnych takich przypadków.

Według wykonanych oszacowań parametrów, masy tych dwóch zwartych obiektów znajdują się, jak to pokazuje ryc. 14, w przedziale od 0,86 do 2,26 mas Słońca. Jeśli się jednak przyjmie, że spiny tych obiektów są w przedziale typowym dla znanych układów podwójnych gwiazd neutronowych, to przedział ten można zawęzić: od 1,17 do 1,60 mas Słońca, co się zgadza z typowymi masami gwiazd neutronowych. Na podstawie amplitudy sygnału fali grawitacyjnej emitowanej przez zlewający się układ, daje się dobrze wyznaczyć odległość do jej źródła: wynosi ona w tym przypadku 40 Mpc (130 milionów lat świetlnych).

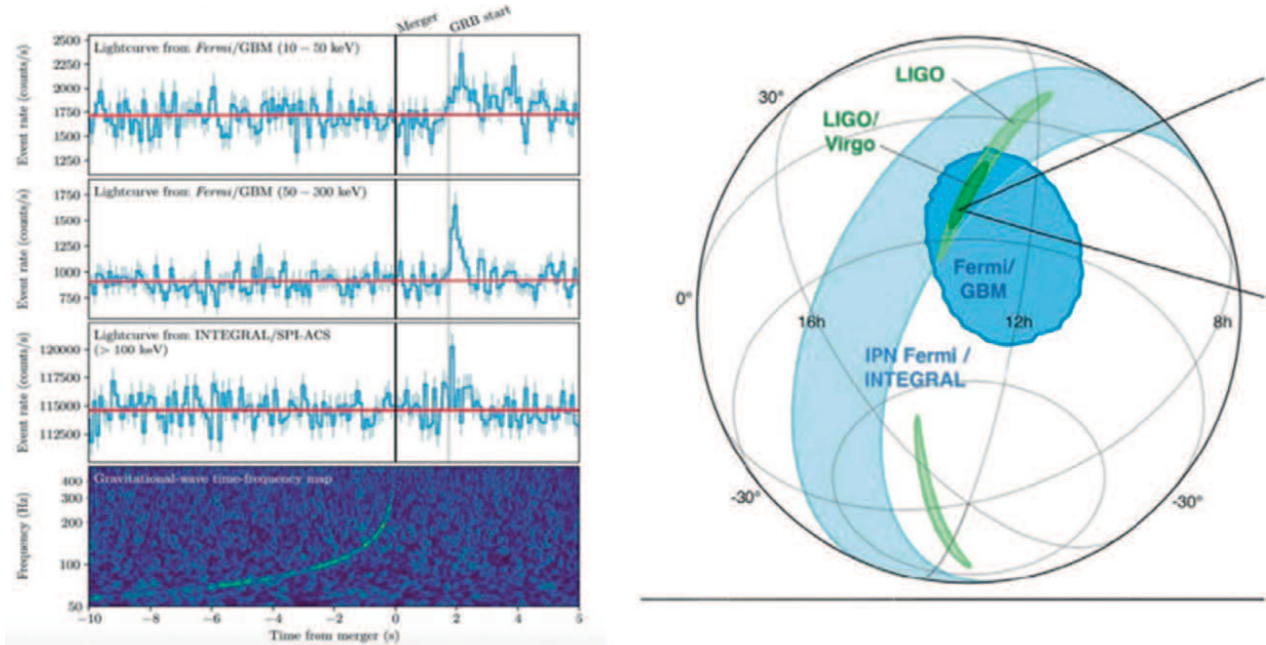
Zdarzenie to zostało zarejestrowane tylko kilka dni po dołączeniu się do sieci instrumentów wykrywających fale grawitacyjne detektora Virgo, co, jak już mówiłem, znacznie zwiększyło dokładność lokalizacji źródła. Wyznaczony przy udziale detektora Virgo obszar na niebie, z którego przybył ten sygnał, jest owalem o szerokości  $2^\circ$  i długości  $15^\circ$  i ma rozmiar około 28 stopni kwadratowych.

Satelita Fermi zarejestrował błysk gamma GRB170817A w tym samym obszarze nieba i uruchomione tym sygnałem obserwacje pozwoliły zidentyfikować gasnące światło pochodzące z tego zdarzenia w pobliżu galaktyki NGC4993. Jako pierwszy światło to zaobserwował [19] jednometrowy optyczny teleskop Swope.

5. Możliwe, że przypadek taki został już zarejestrowany 14.08.2019 roku przez wszystkie trzy detektory (przyp. tłum.).

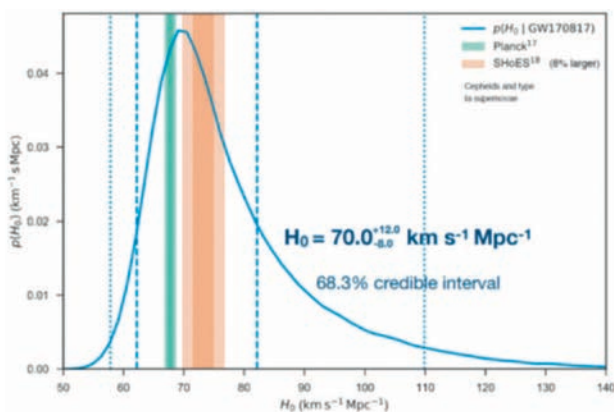


Ryc. 14. Podstawowe parametry przypadku GW170817



Ryc. 15. Krótki błysk gamma zaobserwowany przez satelitę Fermi 1,7 s po zarejestrowaniu pochodzącej z tego samego obszaru nieba fali grawitacyjnej

Zarejestrowanie fali grawitacyjnej wyemitowanej przy zlewaniu się gwiazd neutronowych daje niezależną metodę wyznaczania stałej Hubble’a charakteryzującej tempo rozszerzania się Wszechświata. Metodę tę, nazywaną pomiarem „standardowej syreny” zaproponował Bernard Schutz [20]. Jej idea polega na wykorzystaniu odległości do galaktyk wyznaczanych wprost z rejestrowanych sygnałów fal grawitacyjnych oraz na zmierzeniu w drodze bezpośredniej obserwacji ich jasności (czyli ich odległości jasnościowej). Standardowymi syrenami są [w tej metodzie] zwarte układy podwójne składające się z gwiazd neutronowych lub czarnych dziur – profil fali grawitacyjnej emitowanej przez nie na etapie

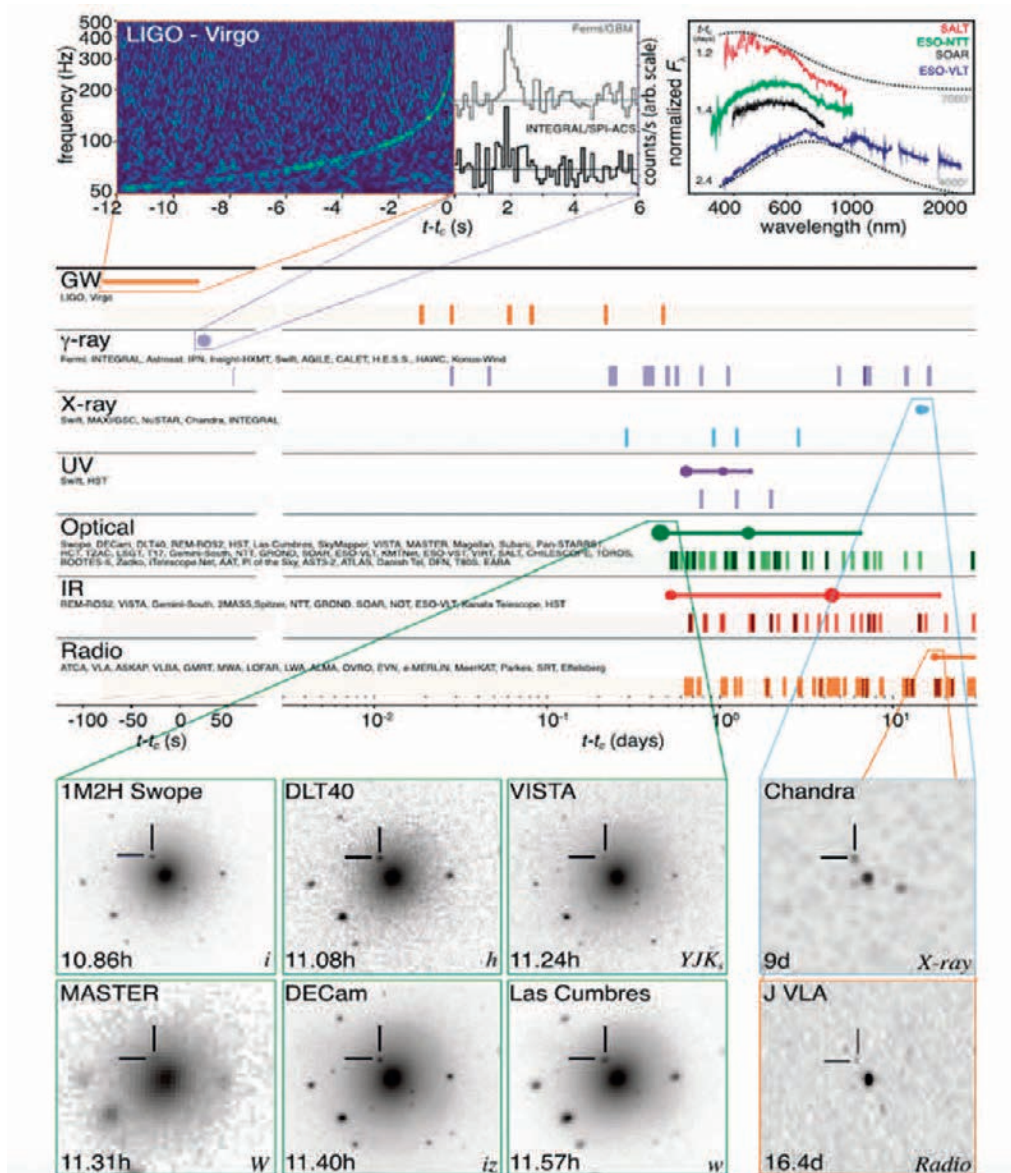


Ryc. 16. Wyznaczanie stałej Hubble’a  $H_0$  z danych dotyczących fal grawitacyjnych. Niebieska krzywa obrazuje względne prawdopodobieństwo różnych wartości  $H_0$ . Ma ona maksimum przy  $70 \text{ km/s/Mpc}$ . Przerywane i kropkowane niebieskie krzywe pionowe wyznaczają granice zakresów  $H_0$  odpowiadających poziomom ufności 68,3% i 95,4%. Nasze wyniki zgadzają się zarówno z tymi otrzymanymi przez sondę Planck, jak i z otrzymanymi przez SHoES. Zauważmy, że na podstawie jednego tylko zdarzenia nie możemy faworyzować żadnego z tych dwóch wyników, które są ze sobą niezgodne z prawdopodobieństwem 95,4%

zacieśniania się ich orbity niesie, oprócz informacji o masach obiektów i innych parametrach układu, także informację o odległości do źródła fali. W tym przypadku dokładną informację o tym, w której z galaktyk zaszło rejestrowane zdarzenie, czerpiemy z obserwacji optycznych.

Przypadek GW170817 jest pierwszym odkryciem zarówno fal grawitacyjnych, jak i elektromagnetycznych pochodzących z tego samego astrofizycznego źródła. Wszystkie dane są zgodne z hipotezą, że źródłem tym było zlanie się dwóch gwiazd neutronowych położonych w galaktyce NGC4993 w konstelacji Hydry. Analiza profilu fali zdarzenia GW170817 pozwala oszacować odległość do źródła na około 44 Mpc, przy założeniu, że położenie tego źródła fali grawitacyjnej dokładnie pokrywa się z jego optycznym odpowiednikiem. Oszacowanie odległości na podstawie profilu fali grawitacyjnej jest całkowicie niezależne od tzw. drabinki kosmicznych odległości wykorzystującej obserwacje elektromagnetyczne. Przyszłe pomiary wykonane z pomocą fal grawitacyjnych pozwolą więc wyjaśnić niepewności w obserwacjach elektromagnetycznych.

Zarejestrowanie przez LIGO fal grawitacyjnych połączone z obserwacją krótkiego błysku gamma zapoczątkowało całą kampanię mającą na celu rejestrowanie takich zdarzeń za pośrednictwem fal [elektromagnetycznych] o różnych długościach i za pomocą różnych instrumentów, włączając w to wielkie detektory neutron. Nie będę podsumowywał tu tych rezultatów [21, 22, 23], gdyż nie należą one do tematu tego wykładu noblowskiego. Powiem tylko, że szeroka gama takich obserwacji stanowi mocny argument na rzecz modelu zlewania



Ryc. 17. Zarejestrowane sygnały elektromagnetyczne odpowiadające zdarzeniu GW170817

się gwiazd neutronowych zwanego „kilonowa”, a także za tym, że takie zlewające się podwójne układy gwiazd neutronowych są bardzo ważnym źródłem występujących w przyrodzie ciężkich pierwiastków. Jeszcze bardziej interesujące jest to, że już od dawna istniejąca koncepcja uprawiania astronomii badającej różnorodne sygnały – wykorzystującej komplementarne informacje niesione przez fale elektromagnetyczne, grawitacyjne i neutrino do badania tego samego zjawiska - stała się wreszcie rzeczywistością.

### Przyszły rozwój LIGO i badania fal grawitacyjnych

Jak już mówiłem, za pomocą zaawansowanych detektorów LIGO zrealizowaliśmy dwie rundy ( $O_1$  i  $O_2$ ) zbierania danych. W pierwszej rundzie po raz pierwszy bezpośrednio zarejestrowaliśmy fale grawitacyjne pochodzące ze złania się dwóch czarnych dziur około 1,3 mi-

liarda lat temu. Profil zarejestrowanej fali grawitacyjnej bardzo dobrze zgadza się z przewidywanym przez einsteinowską ogólną teorię względności i wszystkie szczegółowe analizy są zgodne z tą teorią. Każda z czarnych dziur, które połączyły się w jedną, miała masę rzędu 30 Słońc, czyli były one zaskakująco masywne. W trakcie tej samej rundy zbierania danych zarejestrowaliśmy także słabsze zdarzenie, mające statystyczną istotność około  $2\sigma$ , którego nie ogłosiliśmy jako odkrycia fali grawitacyjnej; niemniej i ono wydaje się dobrze zgadzać z hipotezą, że było to także zlanie się czarnych dziur, które jednak zaszło dwa razy dalej od nas, niż to pierwsze i z tego powodu dało słabszy sygnał, o mniejszej statystycznej istotności.

Po ukończeniu rundy  $O_1$  spędziliśmy dziewięć miesięcy kalibrując i udoskonalając interferometry. Przed rundą  $O_2$  czułość została zwiększona mniej więcej tak,



jak planowaliśmy, jednak pewne problemy techniczne, zwłaszcza w Hanford, nie pozwoliły wprowadzić wszystkich udoskonaleń. Nie oczekiwaliśmy więc, że runda  $O_2$  przyniesie tak spektakularne odkrycia, jak runda  $O_1$ , przede wszystkim dlatego, że osiągnięte zwiększenie czułości było mniejsze od tego, na jakie liczyliśmy. A jednak runda ta okazała się niemal tak samo ciekawa, jak  $O_1$ . Zarejestrowaliśmy kilka następnych przypadków zlewania się czarnych dziur i szycujemy się na to, że niedługo będziemy już mieć informacje o statystycznym rozkładzie ich mas itp. Pod sam koniec zbierania danych, w sierpniu 2017, detektor Virgo we Włoszech miał już wystarczająco wysoką czułość, by dołączyć do detektorów LIGO jako część sieci detektorów. Krótco potem zarejestrowaliśmy kolejny przypadek zlewania się czarnych dziur, tym razem już z koincydencją trzech sygnałów. Tak jak przypuszczaliśmy, trzeci detektor znacząco zwiększył dokładność lokalizacji źródła sygnału na niebie - z kilkuset stopni kwadratowych do kilkudziesięciu. Pokazuje to nasze przyszłe możliwości w zakresie porównywania informacji uzyskiwanych [z detektorów fal grawitacyjnych], z informacjami otrzymywanymi za pomocą innych instrumentów astronomicznych szukających sygnałów towarzyszących tym samym zjawiskom. W przypadku zlewania się czarnych dziur nie oczekuje się jednak żadnego sygnału elektromagnetycznego i rzeczywiście, żaden taki sygnał nie został zarejestrowany.

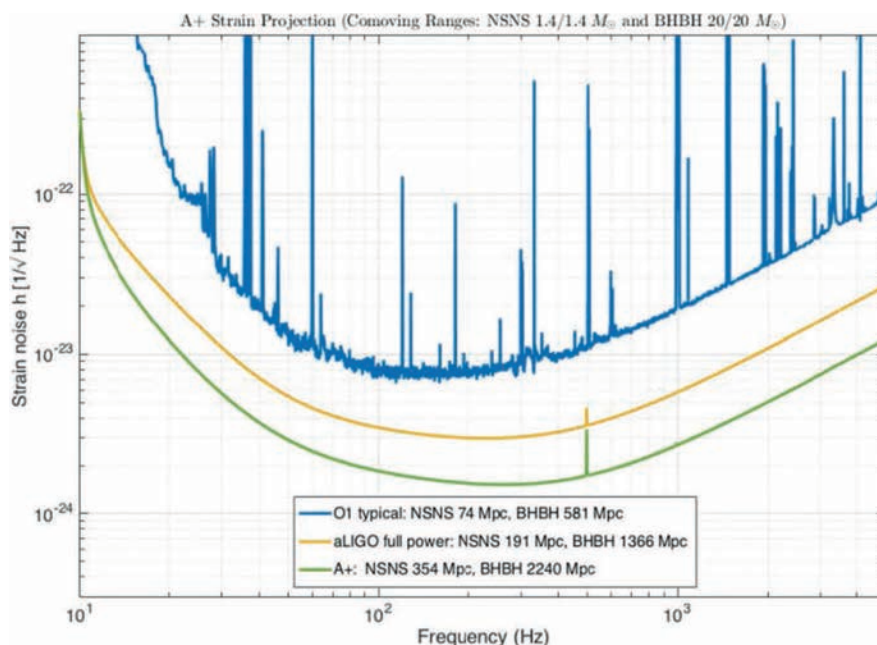
Podsumowując, tak jak to omówiłem wyżej, zarejestrowaliśmy po raz pierwszy fale grawitacyjne emitowane przy zlewaniu się gwiazd neutronowych. Łączne wykorzystanie sygnałów rejestrowanych przez detektory LIGO i Virgo umożliwiło znacznie dokładniejszą lokalizację ich źródła, co z kolei pozwoliło dokonać omówionej wyżej obserwacji emitowanych przez te źródła sygnałów elektromagnetycznych. Był to spektakularny początek astronomii wykorzystującej różnorodność sygnały i zarazem zapowiedź dokonywania w przyszłości podniecających obserwacji połączonych.

Przyszłość

### Przyszłość

Obecnie jesteśmy w trakcie przygotowywania się do trzeciej rundy,  $O_3$ , zbierania danych, która rozpocznie się mniej więcej za rok. Długi okres przez jaki detektory LIGO pozostają nieczynne jest uzasadniony dużym zyskiem, jaki daje udoskonalenie czułości interferometrów. W chwili obecnej jest ona [jeszcze] o czynnik dwa niższa od docelowej. Rycina 18 ukazuje planowane udoskonalenie działania zaawansowanych detektorów LIGO i to, co zostało osiągnięte przed rundą  $O_1$  zbierania danych. Przed rundą  $O_2$  dokonaliśmy tylko skromnych udoskonaleń, ale mamy nadzieję dokonać ich więcej przed rundą trzecią. Planowaną docelową czułość chcemy osiągnąć stopniowo, w ciągu kilku następnych lat.

Ogólnoswiatowa sieć detektorów wzbogaci się w przyszłym dziesięcioleciu o interferometr KAGRA w Japonii i detektor LIGO-India. Pozwoli to na lepsze



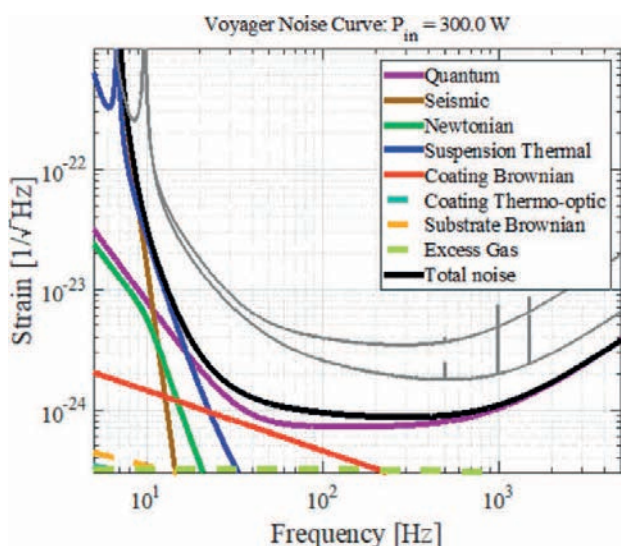
Ryc. 18. Typowa czułość detektorów LIGO w trakcie pierwszej rundy ( $O_1$ ) zbierania danych, planowana docelowa czułość zaawansowanych detektorów LIGO i oszacowanie czułości, jaką przyniesie udoskonalenie A+. Składać się na nie będą różne uzupełnienia obecnych interferometrów, w tym także posłużenie się ściśniętym światłem<sup>6</sup>, ulepszone pokrycia testowych mas warstwami optycznymi i być może chłodzenie kriogeniczne

6. Zob. wykład Kipa Thorne'a – polski przekład opublikowany został w PF 70 (3), 18 (2019).

pokrycie nieba i zwiększy dokładność lokalizacji źródeł. W porównaniu z rundami  $O_1$  i  $O_2$ , liczba wykrywanych przypadków zlewania się czarnych dziur i gwiazd neutronowych wzrośnie o ponad rząd wielkości. Oprócz wykrywania takich zwartych układów będziemy za dziesięć lat w stanie dokładniej poznawać ich cechy i studiować ich fizykę; możliwe jest też, że zwiększona czułość detektorów otworzy dla obserwacji także inne zakresy [częstotliwości] fal grawitacyjnych.

Pracujemy ponadto nad całym wahlarzem udoskonaleń idących dalej niż zaawansowane detektory LIGO [24]. Mają one być wdrożone w ciągu następnych dziesięciu lat. Program ten nazywamy programem udoskonaleń A+ mając nadzieję, że przeprowadzenie niezbędnych do niego studiów badawczo-rozwojowych i wprowadzenie udoskonaleń do instrumentów w ciągu dziesięciu lat jest realistycznym celem. Udoskonalecia te zwiększą czułość o kolejny czynnik 2 w stosunku do czułości zaawansowanych detektorów LIGO. Przygotowujemy się do złożenia odpowiedniego wniosku do Narodowej Fundacji Nauki [o finansowanie] w najbliższej przyszłości.

Pracujemy także nad technologicznymi udoskonaleciami aby w pełni wyzyskać potencjał obecnych urządzeń LIGO i sond (Voyager), a także myślimy nad koncepcją detektora trzeciej generacji (Cosmic Explorer). Rycina 19 ilustruje jak aktualnie widzimy udoskonalecia, które mogą ostatecznie umożliwić pełne wykorzystanie obecnych placówek LIGO. Studia badawczo-rozwojowe konieczne do konstrukcji Voyagera mogą zostać wykorzystane przy trzeciej generacji detektorów. Wydaje się możliwe dziesięciokrotne zwiększenie czułości detektorów LIGO w stosunku do tej, jaka już została osiągnięta.



Ryc. 19. Pełne wykorzystanie urządzeń LIGO. Z pomocą udoskonaleń technologicznych możliwe wydaje się zwiększenie czułości o czynnik 10 w porównaniu z tą, jaka została osiągnięta przed rundą  $O_1$  zbierania danych

Ubiegłe dwa lata były wspaniałym początkiem tej nowej, wykorzystującej rejestrację fal grawitacyjnych dziedziny. Mamy nadzieję dokonać stopniowo w nadchodzącym dziesięcioleciu całego zestawu udoskonaleń, najpierw doprowadzając interferometry LIGO do stanu zaplanowanego zaawansowania, a następnie w pełni wykorzystać istniejące instrumenty dochodząc do dziesięciokrotnego zwiększenia czułości detektorów w porównaniu z obecną.

Nie będzie to jednak koniec tej historii. Prowadzone w USA prace koncepcyjne nad detektorem Cosmic Explorer [25], a przede wszystkim prace prowadzone w Europie nad Teleskopem Einsteina [26], są przykładem tego, że powinniśmy być w stanie zbudować trzecią generację ulokowanych na Ziemi detektorów, które będą dziesięciokrotnie bardziej czułe niż obecne urządzenia LIGO. Teleskop Einsteina jest tak planowany, żeby był dziesięciokrotnie lepszy niż LIGO. Najważniejsze w tej koncepcji jest to, że detektor, który będzie kriogeniczny, ma być ulokowany głęboko pod ziemią, mieć ramiona dziesięciokilometrowej długości, konfigurację w kształcie trójkąta i być zoptymalizowany do rejestrowania zarówno niskich, jak i wysokich częstotliwości. Koncepcja detektora Cosmic Explorer jest na razie mniej opracowana, ale zasadniczo ma to być ulokowany na powierzchni ziemi detektor typu LIGO przeskalowany o czynnik 10. Nie jest jeszcze jasne, która z tych koncepcji jest lepsza i ile detektorów będzie potrzebnych. W środowisku trwają prace nad naukowym potencjałem nowej generacji detektorów i powinny nam one ułatwić wybór priorytetów przy tworzeniu spójnej koncepcji rozwoju, która będzie realizowana.

Jest jasne, iż możliwe jest zbudowanie przyszłych detektorów, które, jak to ujął Kip Thorne w swoim wykładzie, stworzą zapierające dech w piersiach perspektywy uprawiania badań z pomocą fal grawitacyjnych. Kip przedyskutował także możliwości badawcze programu LISA – realizowanego w przestrzeni kosmicznej eksperymentu z falami grawitacyjnymi, chronometrażu pulsarów oraz innych możliwych w przyszłości instrumentów wykrywających fale grawitacyjne.

Zapoczątkowawszy nową dziedzinę, jaką są fale grawitacyjne, niecierpliwie wyczekujemy możliwości pogłębienia naszego rozumienia Wszechświata oraz wielu niespodzianek.

#### Uwagi końcowe i refleksje

Epopeja LIGO, która rozpoczęła się od przewidzenia przez Einsteina w roku 1916 istnienia fal grawitacyjnych i od późniejszych zachwian w jego własnych poglądach na nie, była wspaniałą przygodą. Długo trwało,

zanim w latach pięćdziesiątych fizycy teoretycy doszli do całkowitej pewności ich istnienia. Część eksperymentalna tej historii zaczęła się na serio także w latach pięćdziesiątych, gdy Joseph Weber rozpoczął pierwsze poważne próby wykrycia tych fal za pomocą cylindrycznych rezonatorów. Przydarzyły się na początku tej historii i fałszywe odkrycia, ale ogólnie rzecz biorąc wyciągnięto z tej epoki detektorów cylindrycznych sporo pożytecznych nauk, których użyto przy konstrukcji interferometrów. LIGO wykorzystuje w zasadniczy sposób pomysł badania koincydencji sygnałów rejestrowanych w oddalonych detektorach w celu uzyskania pewności co do odkrycia, analizę źródeł szumów i wreszcie analizę profili sygnałów niewykazujących koincydencji, w celu bezpośredniego mierzenia poziomu przypadkowych szumów.

Początki ery interferometrów omawia w swoim wykładzie Rainer Weiss. Okres ten charakteryzują zakrojone na skalę światową prace badawczo-rozwojowe, do których zaliczyć trzeba też wdrażanie pomysłów i testowanie ich na prototypach o dużej skali. Większość z kluczowych rozwiązań, które zostały zastosowane w zaawansowanych detektorach LIGO została zaproponowana i przetestowana już kilkadziesiąt lat temu.

Samo przedsięwzięcie LIGO zostało zrealizowane i działa jako bardzo ścisła współpraca grup z Caltechu i MIT; istotny wkład wnieśli w nie także współpracownicy z kilku innych amerykańskich uniwersytetów oraz ze Szkocji, Niemiec, Australii. Naukowa Kolaboracja LIGO wykonała wiele analiz danych i napisała całą serię prac donoszących o odkryciach w sposób, z którego wszyscy możemy być dumni.

Ponadto, nasze macierzyste instytucje, Caltech i MIT, dawały nam nadzwyczajne wsparcie i zachętę przez wszystkie te lata, kiedy pracowaliśmy w nadziei na ostateczny sukces, tj. odkrycie fal grawitacyjnych. Przede wszystkim jednak jesteśmy wdzięczni amerykańskiej Narodowej Fundacji Nauki za to, że jest tak wspaniałą instytucją wspierającą i ułatwiającą uprawianie nauki na najwyższym poziomie! Dziękujemy Wam!

### Kilku najważniejszych członków LIGO

Jesteśmy szczególnie wdzięczni Laboratorium LIGO, które przeprowadziło wszystkie konieczne prace badawczo-rozwojowe, zaprojektowało interferometrię, skonstruowało detektory i uruchomiło je, a później nadzorowało ich działanie i dokonywało udoskonaleń. Współpracowało ono ściśle z 1200 członami Naukowej Kolaboracji LIGO, którzy byli odpowiedzialni za analizę danych i badania naukowe. Z konieczności przedstawione niżej kluczowe osoby z LIGO stanowią tylko część listy [osób], które przyczyniły się do sukcesu.



### LITERATURA

- [1] B.P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).
- [2] A. Einstein, *Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss.* **1**, 688 (1916).
- [3] A. Einstein, *Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss.* **1**, 154 (1918).
- [4] M. Riordan, L. Hoddeson, and A. Kolb. (2015). *Tunnel Visions: The Rise and Fall of the Superconducting Super Collider*. U. of Chicago Press. ISBN 978-0-226-29479-7.
- [5] Shoemaker et al., *Phys. Rev.* **38**, 423 (1988).
- [6] Abramovici et al., *Physics Letters A* **218**, 157–163 (1996).
- [7] Abbott et al., *Rep. Prog. Phys.* **72** (2009) 076901.
- [8] J. Aasi et al., *Phys. Rev. D* **87**, 022002 (2013).
- [9] Advanced LIGO, *Classical and Quantum Gravity*, Vol 32, Number 5, 2015.

- [10] B.P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).
- [11] B.P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 131103 (2016).
- [12] B.P. Abbott et al., *Phys. Rev D* **93**, 122003 (2016).
- [13] B.P. Abbott et al., *Phys. Rev Lett.* **116**, 221101 (2016).
- [14] B.P. Abbot et al., *Astrophysics Journal Letters* **833**, 1 (2016).
- [15] B.P. Abbot et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 241103 (2016).
- [16] B.P. Abbot et al., *Phys. Rev. Lett.* **118**, 221101 (2017).
- [17] B.P. Abbot et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 141101 (2017).
- [18] B.P. Abbot et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101 (2017).
- [19] LIGO, Virgo, IM2H, Dark Energy Camera, DES, DLT40 las Cumbres Observatory, VINROUGE and MASTER Collaborations, *Nature* **551**, 85 (2017).
- [20] B.F. Schutz, *Nature* **323**, 310 (1986).
- [21] Multimessenger Collaboration *Astro Phys. Journal Letters* **848**:L12 (2017).
- [22] LIGO, Virgo, Fermi and Integral Collaborations *Astro Phys. Journal Letters*, **848**:L13 (2017).
- [23] LIGO and VIRGO Collaborations, *Astro Phys. Phys. Journal Letters*, **850**:L39 (2017).
- [24] Miller, John; Barsotti, Lisa; Vitale, Salvatore; Fritschel, Peter; Evans, Matthew; Sigg, Daniel (16 March 2015). *Physical Review D.* **91**.
- [25] McClelland, David; Evans, Matthew; Lantz, Brian; Martin, Ian; Quetschke, Volker; Schnabel, Roman (8 October 2015). Instrument Science White Paper (PDF) (Report). LIGO Scientific Collaboration. LIGO Document T1500290-v2.
- [26] M. Punturo, K. Somiya *Int. J. Mod. Phys. D* **22**, 1330010 (2013).