



LIGO i fale grawitacyjne I¹

Wykład noblowski Rainera Weissa

(Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA), 8 grudnia 2017

Opublikowany w języku polskim za zgodą Nobel Foundation

©The Nobel Foundation 2017

Przekład dokonany przy wsparciu finansowym Fundacji Pro-Physica

Wszyscy trzej, Barry Barish, Kip Thorne i ja, chcemy tu oddać sprawiedliwość uczynom, inżynierom, studentom, technikom i pracownikom administracji pracującym zarówno w laboratorium LIGO, jak i tworzącym LIGO Scientific Collaboration, którzy odegrali decydującą rolę i przyczynili się do otwarcia nowego pola badań naukowych, jakim jest astronomia i astrofizyka fal grawitacyjnych. Jesteśmy głęboko wdzięczni amerykańskiej Narodowej Fundacji Nauki (United States National Science Foundation – NSF) za to, że zechciała ponieść ryzyko wspierania nowej dziedziny, która przy braku pełnego rozeznania co do źródeł fal grawitacyjnych wymagała zarazem znacznego postępu technologicznego; Fundacja była jednak przekonana, że jeśli [dziedzina ta²] odniesie sukces, wyrwie głęboki wpływ na nasze zrozumienie fizyki i Wszechświata.

Wszyscy trzej wygłosimy tu przemówienia o LIGO i odkryciu fal grawitacyjnych, ale każdy skupi się na innych aspektach [tego odkrycia]. Ja przedstawię początki historii fal grawitacyjnych i wprowadzę pojęcia konieczne do zrozumienia [zasad działania] detektorów oraz wyzwania, z jakimi wiązało się mierzenie niezmiernie małych, rzędu 10^{-21} , amplitud. Barry zreferuje, jak przedsięwzięcie LIGO zostało zorganizowane, aby zapewnić dokonywanie systematycznego postępu i w pełni uwieńczyć cały naukowy program sukcesem, Kip zajmie się zaś szerszymi aspektami nowej dziedziny, jaką jest astronomia fal grawitacyjnych. Powie on o kluczowej roli jaką odegrały numeryczna teoria względności i zrozumienie mechaniki kwantowej precyzyjnych

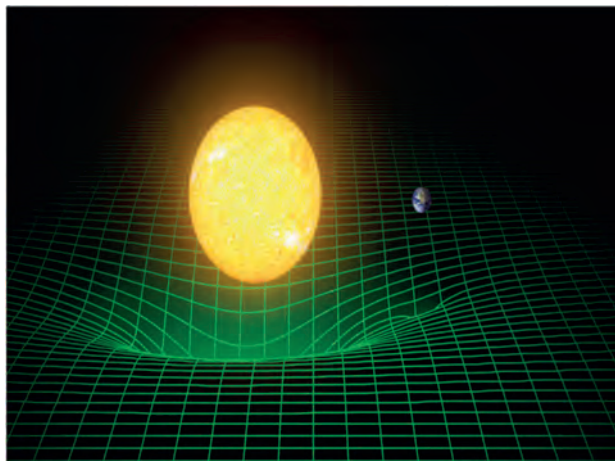
pomiarów. On też przedstawi wizję wiedzy, jaka może się wyłonić z badania nieba za pomocą rejestrowania fal grawitacyjnych o okresach od ułamka milisekundy do miliardów lat.

W roku 1915, niewiele ponad sto lat temu, Einstein opublikował [1,2] nową teorię grawitacji – Ogólną Teorię Względności (OTW), która newtonowską siłę ciężkości zastąpiła ideą, że obecność mas zmienia geometrię przestrzeni i wpływa na bieg czasu. Materia przemieszcza się w takiej zakrzywionej czterowymiarowej czasoprzestrzeni po najkrótszych (w sensie czterowymiarowej geometrii) drogach (ryc. 1 i podpis pod nią mają dać pewne pojęcie o tej koncepcji).

Nowa teoria rozwiązała pozostawiony przez teorię Newtona problem ruchu planety Merkury, która ze wszystkich planet Układu Słonecznego porusza się w najsilniejszym polu grawitacyjnym; ruch ten, nawet po wzięciu poprawki na ruch innych ciał Układu, nadal nie chciał być posłuszny teorii Newtona. Mówiąc dokładniej, Merkury nie przemieszcza się po trajektorii wyznaczonej przez siłę zmieniającą się z odległością jak $1/r^2$. Aby uratować teorię Newtona przyjmowano istnienie pomiędzy Słońcem i Merkurym dodatkowej planety, która jednak nie została nigdy odkryta. Ku wielkiemu zadowoleniu Einsteina, OTW dawała orbitę taką, jak mierzona. Było to pierwsze potwierdzenie, że jest na właściwej drodze. OTW przewidywała także inne możliwe do wykrycia zjawiska. Efekty te były małe i trudne do zmierzenia, ale miały doniosłe znaczenie. Były to m.in. przewidywania, że w silnym polu grawitacyjnym zegary idą wolniej niż w słabym [3,4] oraz że światło gwiazdy przechodząc przez krawędź tarczy Słońca będzie się ku niemu ugiąć - jest to tzw. zjawisko uginania się światła [5]. O trudności pomiaru obu tych efektów świadczy to, że w pełni przekonująco zostały one zmierzone dopiero około 50 lat później.

1. Nagrodę Nobla za rok 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 3/2019, s. 18-41 (przyp. red.).

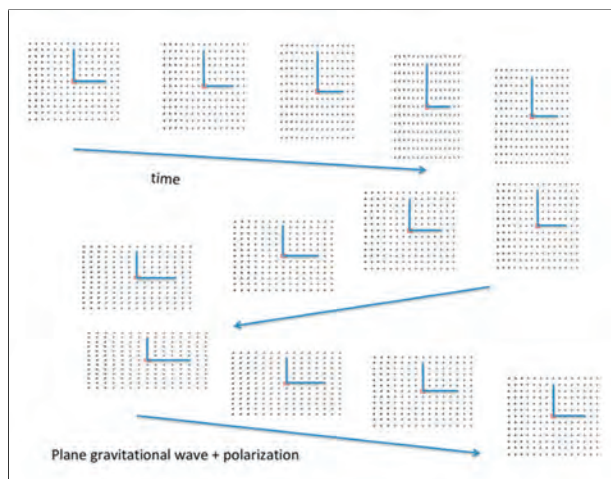
2. Teksty w nawiasach kwadratowych dodał tłumacz z uwagi na zbyt zwięzły, a czasem wręcz niezrozumiały język oryginału (przyp. red.).



Ryc. 1. Próba zobrazowania einsteinowskiej idei grawitacji (tj. Ogólnej Teorii Względności), według której newtonowskie siły ciężenia zostają zastąpione przez odkształcenia geometrii przestrzeni. Pomyślmy o prostokątnej kratce z drążków gimnastycznych w trzech wymiarach. Punkty przecinania się drążków są równo rozmieszczone wzdłuż linii prostych. Wyobraźmy sobie, że w każdym punkcie przecięcia jest umieszczony zegar i że wszystkie zegary wskazują ten sam czas w tej samej chwili. Jest to sytuacja, gdy w pobliżu nie ma żadnych mas. Zróbmy teraz dwuwymiarowy przekrój tej struktury i wprowadźmy Słońce i Ziemię do tego modelu. W pobliżu Słońca i, w trochę mniejszym stopniu, wokół Ziemi struktura kraty odkształca się. Choć nie jest to uwidocznione na rysunku, także zegary w punktach przecięcia blisko Słońca i, w mniejszym stopniu, w pobliżu Ziemi, zaczęły biec nieco wolniej niż te znajdujące się tam, gdzie krata jest mniej odkształcona. Orbita Ziemi wokół Słońca jest teraz wyznaczona przez odkształcenie przestrzeni i dylatację czasu – jest ona drogą, jaką w nowej geometrii podążałby obiekt, na który nie działają żadne siły.

Jednak OTW przewidywała coś jeszcze. W zasadzie, jak się o tym teraz przekonaliśmy bezpośrednio, pozwala ona wyznaczyć ruch masywnych układów o relatywistycznych względnych prędkościach. Co więcej, informacja grawitacyjna, tj. fale grawitacyjne, nie przenosi się nieskończenie szybko, jak to przewiduje teoria grawitacji Newtona, lecz podróżuje ze skończoną prędkością tak, by pozostawać w zgodzie ze Szczególną Teorią Względności.

W roku 1916 Einstein napisał pracę [6] omawiającą niektóre z przedstawionych wyżej idei stosując rachunek zaburzeń i zlinearyzowaną wersję równań pola OTW. W tej to pracy po raz pierwszy omawia on fale grawitacyjne (ryc. 2). Fale takie są poprzeczne i podróżują z prędkością światła, podobnie jak fale elektromagnetyczne. Jednak zamiast wywierać siłę na ładunki, odkształcają one przestrzeń prostopadle do kierunku swojej propagacji: naprzemiennie rozciągają przestrzeń w kierunku np. wschód-zachód jednocześnie ściskając ją w kierunku północ-południe. Odkształcenie to ma tę szczególną właściwość, że zmiana odległości pomiędzy dwoma punktami jest proporcjonalna do tej odległości: względne rozciągnięcie $h = \Delta l/l$ w kierunku wschód-zachód jest takie samo na całym froncie fali, a względne ściśnięcie w kierunku północ-południe jest co do wielkości takie samo, lecz przeciwnego znaku; [wielkość h (ang. *strain*), będąca miarą naprężenia przestrzeni jest



Ryc. 2. Fala grawitacyjna o polaryzacji +. Fale grawitacyjne są emitowane przez przyspieszane masy i rozchodzą się z prędkością światła. Gdy już staną się, w odległości kilku długości fali od swojego źródła, falami płaskimi, są falami poprzecznymi, które powodują naprężenia przestrzeni w kierunku prostopadłym do kierunku swojej propagacji. Naprężenia te rozciągają przestrzeń w jednym kierunku jednocześnie kurczą ją w kierunku do tamtego prostopadłym. Będąca miarą amplitudy fali i naprężenia przestrzeni wielkość $h = \Delta l/l$ (ang. *strain*) jest stosunkiem zmiany odległości między dwoma punktami przestrzeni do ich pierwotnej odległości. Rysunek próbuje to uwidocznić z pomocą przestrzennego rozkładu próbnych mas. Fala grawitacyjna propaguje się prostopadle do płaszczyzny rysunku i do mas. Czas rośnie od górnego lewego do prawego dolnego „okienka” rysunku; jego zakres odpowiada jednemu pełnemu cyklowi oscylacji naprężenia przestrzeni. Kreski tworzące literę *L* symbolizują detektor LIGO. Rzecz, którą należy zauważyć, jest zmiana długości ramion litery *L*; zmiana ta jest w detektorze mierzalna. Im dłuższe jego ramiona, tym większy jest mierzalny sygnał. Wydłużenie jednego z ramion w połączeniu ze skróceniem drugiego umożliwia wykorzystanie interferometru Michelsona, który jest właśnie czuły na różnicę czasów, w jakich światło pokonuje drogi w obu ramionach.

też miarą amplitudy fali grawitacyjnej]. (Przedstawiając pełniejszy obraz trzeba jeszcze przynajmniej dodać, że jest także druga polaryzacja fal podróżujących w tym samym kierunku obrócona o 45° w stosunku do kierunków wschód-zachód i północ-południe i działająca na przestrzeń niezależnie – jest ona do tamtej ortogonalna.) Fale grawitacyjne niosą energię, pęd i moment pędu. W swojej pracy z roku 1916 Einstein poprawnie przedstawia kinematykę takich fal, ale ma kłopoty z pokazaniem, jak przyspieszane masy wypromieniowują fale grawitacyjne. W drugiej pracy z 1918 roku [7], całkowicie poświęconej falom, wyprowadza (z dokładnością do czynnika 2) tzw. wzór kwadrupolowy wiążący energię fali grawitacyjnej wypromieniowywaną przez rozkład masy z jego niesferycznie symetrycznymi przyspieszeniami. Pomimo błędu popełnionego w pracy z 1916 roku, Einstein wypowiada w niej pod koniec zdecydowane (i w roku 1916 słuszne) stwierdzenie, że fale grawitacyjne nigdy nie będą odgrywać w fizyce żadnej istotnej roli. Prosiłem wydawców zebranych prac Einsteina (tzw. Einstein Papers Project), aby w jego notatkach i na odwrotach korespondencji spróbowali odszukać jakieś oszacowania, które go doprowadziły do takiego stwierdzenia, ale nic nie znaleźli.

Spróbuję zatem zgadnąć, co Einstein mógł wziąć pod uwagę, uwzględniając ówczesny stan technologii i wiedzę astronomiczną jaka była mu dostępna w roku 1916. Pomogą nam w tym dwa wzory: oszacowanie amplitudy fali h , jakie daje wzór kwadrupolowy, oraz związek między mocą niesioną przez falę grawitacyjną i zależnością amplitudy od czasu. Oszacowanie amplitudy fali wywołanej ruchem mas źródła jest dane wyrażeniem

$$h = \left(\frac{Gm}{Rc^2} \right) \left(\frac{v^2}{c^2} \right).$$

G jest tu stałą Newtona, m masą promieniującego układu, R odległością od źródła, c prędkością światła, a v niesferycznie symetryczną prędkością układu promieniujących mas. Jeśli np. układ tworzą dwa krążące jedno wokół drugiego ciała, v jest styczną względem orbity prędkością ich ruchu względnego. Wyrażenie w pierwszym nawiasie ma w ogólnej teorii względności specjalne znaczenie: jest ono bezwymiarowe i jest bezwzględna miarą siły grawitacji w danej sytuacji. Gdy stoimy na powierzchni Ziemi, mierzona w ten sposób siła odczuwanej przez nas grawitacji wynosi 10^{-10} ; na powierzchni Słońca tak mierzona siła grawitacji jest równa około 10^{-6} , na powierzchni gwiazdy neutronowej – 10^{-1} i 1 na powierzchni horyzontu zdarzeń czarnej dziury. Jest jasne, że żyjemy w bardzo słabym polu grawitacyjnym.

Drugi związek, który będzie nam pomocny, to moc na jednostkę powierzchni unoszona przez falę grawitacyjną wyrażona przez jej amplitudę:

$$S_g = \frac{c^3}{16\pi G} \left(\frac{dh}{dt} \right)^2,$$

gdzie

$$\frac{c^3}{16\pi G} = 7,8 \times 10^{36} \text{ erg} \cdot \text{s} / \text{cm}^2.$$

Moc na jednostkę powierzchni niesiona przez falę jest proporcjonalna do średniego kwadratu szybkości zmiany jej amplitudy pomnożonego przez gigantyczny czynnik zdający sprawę z tego, że małemu rozciągnięciu przestrzeni towarzyszy olbrzymia ilość energii. Innymi słowy, odkształcanie przestrzeni wymaga olbrzymiej ilości energii. Jednym ze sposobów wyrażenia tego jest powiedzenie, że sztywność przestrzeni (jej moduł Younga) przy częstotliwości fali odkształcającej równej 100 Hz jest 10^{20} razy większa niż stali.

Przykładem, który, jak można domniemywać, mógł mieć na myśli Einstein, jest promieniowanie grawitacyjne emitowane przy zderzeniu się dwóch pociągów, tj. przy spowodowanym przez człowieka zdarzeniu, w którym dochodzi do znacznego przekazu energii. Biorąc

jako parametry $m = 10^5$ kg, $v = 100$ km/h, 1/3 sekundy jako czas zderzenia i odległość od niego $R = 300$ km (dostatecznie dużą, by przekaz energii był zdominowany przez promieniowanie, a nie przez oddziaływanie newtonowskie) otrzymuje się amplitudę $h = 10^{-42}$ – rzeczywiście zbyt małą, by mogła wywołać jakikolwiek (mierzalny) fizyczny efekt. Inną możliwością mogło być oszacowanie przez Einsteina wielkości zmian, jakie by można było próbować wykryć przy obserwacji układu podwójnego gwiazd przez teleskop. Dwie gwiazdy krążąc jedna wokół drugiej traciłyby z powodu grawitacyjnego promieniowania energię, wskutek czego, w miarę zbliżania się ich do siebie, zmieniłby się okres ich obiegu. Typowe liczby, jakie można było w roku 1916 mieć na myśli, to masy obu gwiazd rzędu masy Słońca i okresy obiegu rzędu dnia. Energia tracona na wypromieniowywane w trakcie jednego obiegu orbity fale grawitacyjne stanowi w takiej sytuacji 10^{-15} energii kinetycznej związanej z ruchem gwiazd po orbicie; zajęłoby więc ok. 10^{13} lat zanim dałoby się zobaczyć, że orbita zacieśnia się; czyni to jakąkolwiek praktyczną astronomiczną obserwację [tego efektu] niemożliwą.

Tak jak działo się to z wieloma innymi zjawiskami przewidzianymi przez Ogólną Teorię Względności, konieczny był rozwój technologii, a także lepsze dzięki niemu poznanie Wszechświata, by dokonać wiarygodnych pomiarów i obserwacji.

Dopiero około połowy lat siedemdziesiątych, po odkryciu pulsarów i po znaczącym ulepszeniu sposobów kontroli czasu, udało się dokonać pomiarów ruchu układów podwójnych gwiazd, które ujawniły straty energii spowodowane wypromieniowywaniem fal grawitacyjnych. Takie przekonywujące pomiary wykonali Russel Hulse i Joseph Taylor przy okazji odkrycia podwójnych gwiazd neutronowych (ryc. 3).

Hulse i Taylor śledzili od roku 1972 pulsacje gwiazd neutronowych wykorzystując radioteleskop w Arecibo (Puerto Rico). Nominalna częstotliwość pulsara wynosiła 17 Hz, oni jednak zauważyli, iż była ona modulowana z okresem 8 godzinnym. Włożywszy znaczny wysiłek w przekonanie się, że w pobliżu układu nie było innych gwiazd przyjęli w końcu jako model teoretyczny parę krążących jedna wokół drugiej gwiazd neutronowych. Szybko ustalili, że bezwymiarowe natężenie pola grawitacyjnego wytwarzanego przez jedną gwiazdę w miejscu, w którym znajdowała się druga, było rzędu 10^{-6} i że wobec tego natrafili na cudowne laboratorium umożliwiające testowanie Ogólnej Teorii Względności. Przewidywane przez tę teorię przesunięcie punktu periastralnego było bliskie 4 stopni na rok, czyli olbrzymie w porównaniu z wynoszącym 43 sekundy łuku na stulecie przesunięciem występującym w układzie Słońce-Merkury. Dzięki temu byli w stanie,



Ryc. 3. Russel Hulse i Joseph Taylor, którzy otrzymali Nagrodę Nobla z fizyki w roku 1993 za odkrycie podwójnego układu pulsarów. Układ ten stał się znakomitym laboratorium umożliwiającym testowanie Ogólnej Teorii Względności. Hulse i Taylor zdołali zmierzyć powodowaną efektami relatywistycznymi precesję punktu periastralnego orbity układu wynoszącą 4 stopnie na rok oraz wiele innych dynamicznych efektów relatywistycznych, co pozwoliło im wyznaczyć masy obu gwiazd neutronowych [tworzących układ]. Jak pokazuje ryc. 4, rozwiązali oni dynamiczne równania ruchu w pełni relatywistycznego modelu tego układu i zminimalizowali odstępstwa jego przewidywań od zebranych danych; aby to osiągnąć, musieli uwzględnić energię traconą przez układ na promieniowanie grawitacyjne.

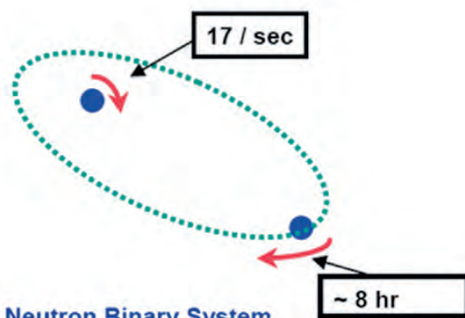
wykorzystując także inne efekty relatywistyczne, wyznaczyć masy obu gwiazd układu. Jednym z najbardziej spektakularnych wyników była zmiana okresu obiegu z biegiem lat. Rycina 4 zaczerpnięta z pracy Taylora i Weisberga [8] pokazuje, że okres ten systematycznie się skracał; taki efekt był zgodny z przewidywanymi przez wzór kwadrupolowy stratami energii wskutek emitowa-

nia przez układ fal grawitacyjnych. Badanie grawitacji wykorzystujące to naprawdę wyjątkowe laboratorium przyniosło Hulsiowi i Taylorowi Nagrodę Nobla za rok 1993. Ich odkrycie stanowiło potwierdzenie istnienia fal grawitacyjnych i zarazem identyfikowało źródło, z którego fale grawitacyjne będzie można wykryć kiedyś bezpośrednio.

Pierwszy eksperyment próbujący bezpośrednio wykryć fale grawitacyjne pochodzące ze źródeł astrofizycznych był pokłosiem poświęconej grawitacji konferencji, która odbyła się w Chapel Hill w roku 1957 [9]. Na tej to konferencji John Wheeler i Joseph Weber przedstawili pomysł zapisania fali grawitacyjnej jako siły pływowej poprzecznej w stosunku do kierunku propagacji i potraktowania detektora słabych fal grawitacyjnych jako rezonatora pobudzanego newtonowskim oddziaływaniem nań takich sił. Pomysł polegał na wykryciu [w ten sposób] fali grawitacyjnej spowodowanej zdarzeniem astrofizycznym takim jak wybuch supernowej w naszej własnej lub pobliskiej galaktyce. Przy zdarzeniu takim spora część masy wybuchającej gwiazdy ulega przekształceniu w fale grawitacyjne. Częstotliwości ruchu [mas] w [wybuchającej] gwiazdzie mieszczą się w dolnej części pasma kHz. Przychodzące fale padając na aluminiowy cylinder, którego mody podłużnych drgań mają częstotliwości w tym samym zakresie, powodowałyby jego drgania. Cylinder dzwoniłby po przejściu przezeń fali, co czyniłoby jej wykrycie łatwiejszym.

Neutron Binary System – Hulse & Taylor

PSR 1913 + 16 -- Timing of pulsars



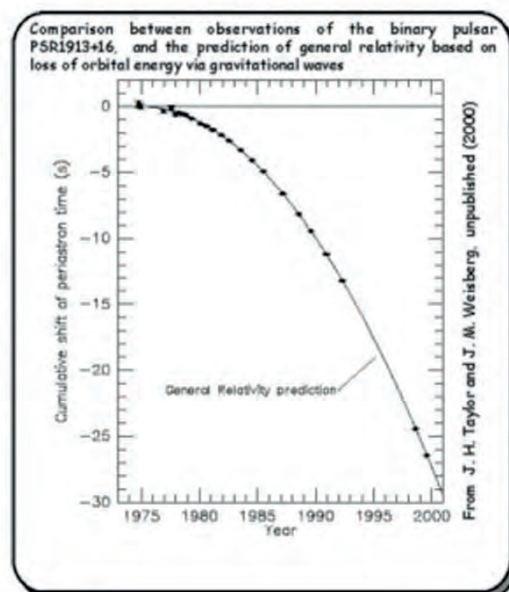
Neutron Binary System

- separated by 10^6 miles
- $m_1 = 1.4m_{\odot}$; $m_2 = 1.36m_{\odot}$; $e = 0.617$

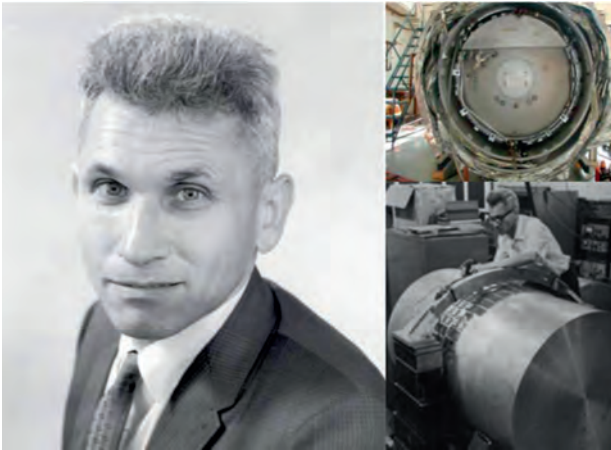
Prediction from general relativity

- spiral in by 3 mm/orbit
- rate of change orbital period

Emission of gravitational waves



Ryc. 4. Zmiany okresu obiegu układu podwójnego pulsarów z upływem lat. Kropki pokazują zmierzane narastające z czasem skrócenie okresu obiegu powodowane traceniem przez układ energii na wypromieniowywanie fal grawitacyjnych. Linia ciągła pokazuje przewidywanie Ogólnej Teorii Względności. Układ ten jako pierwszy ujawnił efekty powodowane promieniowaniem grawitacyjnym, a także stał się pierwszym poświadczonym źródłem fal grawitacyjnych, które można próbować zarejestrować bezpośrednio. Jak pokaże Barry, zlewanie się dwóch gwiazd neutronowych zostało zarejestrowane przez detektory LIGO i VIRGO. [Redakcja PF przeprasza za nie najlepszą czytelność niektórych elementów rycin w tym artykule – takiej jakości ilustracje zawiera oryginalny wykład]

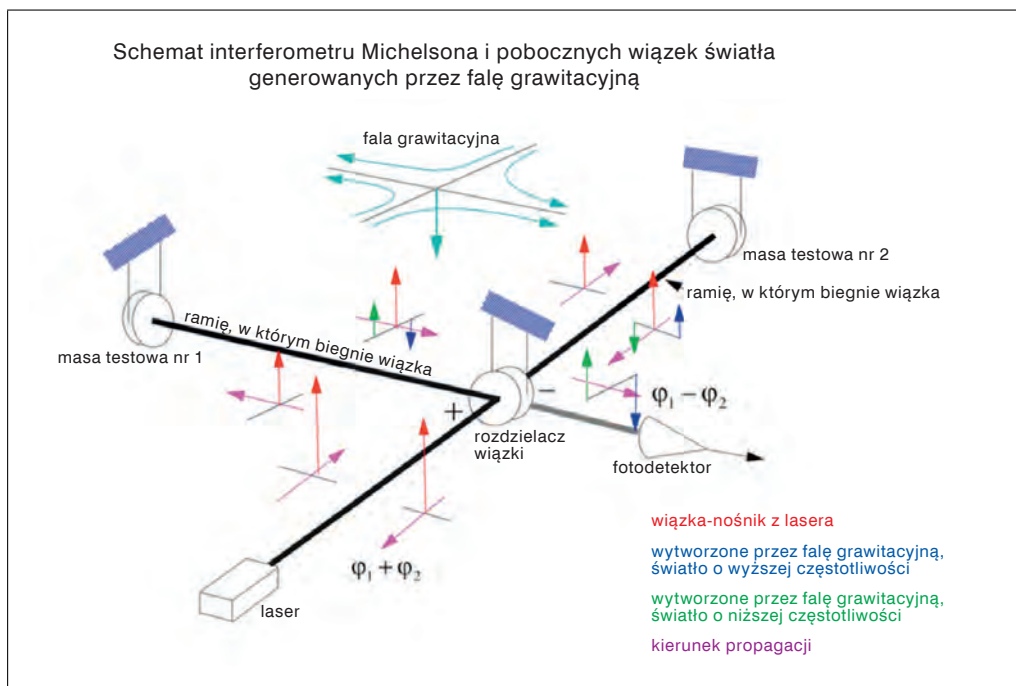


Ryc. 5. Joseph Weber jako pierwszy próbował bezpośrednio wykryć fale grawitacyjne pochodzące ze źródeł astrofizycznych. Pomysł, jak to robić, wypracowali Wheeler i Weber w trakcie odbywającej się w roku 1957 w Chapel Hill konferencji poświęconej grawitacji. Polegał on na mierzeniu wywołanego przez falę grawitacyjną odkształcenia metalowego cylindra. Zamiast myśleć o fali grawitacyjnej jak o naprężeniu przestrzeni, Wheeler i Weber widzieli ją jako działające na cylinder siły pływowe. Tym samym traktowali oni ruch cylindra jak ruch oscylatora w nieruchomej przestrzeni. Siła pływowa była w tym podejściu po prostu jedną z sił newtonowskich działających na cylinder. Weber wyobrażał sobie krótkie impulsy fal grawitacyjnych jako mające niektóre składowe fourierowskie o częstościach odpowiadających częstościom rezonansowym cylindra. Fale przechodząc przez cylinder miały powodować jego dzwonięcie. Na prawej fotografii Weber instaluje na cylindrze czujniki naprężeń mające mierzyć jego wzbudzenia. Cylinder podczas szukania fal grawitacyjnych był umieszczony w komorze próżniowej (widocznej na fotografii za cylindrem).

Rycina 5 przedstawia Webera instalującego czujniki drgań na jednym z takich detektorów. Od początku kluczową częścią pomysłu było szukanie koincydencji wzbudzeń w kilku cylindrach. Miało to umożliwić wyodrębnienie sygnału z występującego w detektorze szumu zdominowanego przez ruchy Browna (tj. przez indukowane termicznie przypadkowe wzbudzenia modów drgań podłużnych cylindra) [10]. Przez cały okres od połowy do końca lat sześćdziesiątych Weber systematycznie ulepszał swój eksperyment. W roku 1969, mając wyniki z jednego detektora umiejscowionego na uniwersytecie w Maryland, drugiego na polu golfowym oddalonym o około 8 mil od uniwersytetu i dalekiego detektora zainstalowanego w laboratorium Argonne w Chicago, opublikował w *Physical Review Letters* pracę [11] ogłaszającą odkrycie fal i demonstrującą koincydencję kilku impulsów na dzień odpowiadających amplitudzie $h \sim 10^{-15}$ i częstotliwości w paśmie kHz. Szybko się jednak okazało, że gdyby impulsy te były falami grawitacyjnymi pochodzącymi z obszaru położonego blisko centrum naszej Galaktyki, musiałyby odpowiadać niesłychanie wydajnej konwersji masy spoczynkowej w fale grawitacyjne – w istocie konwersji w ciągu kilku milionów lat całej masy spoczynkowej materii Galaktyki w fale grawitacyjne. Mimo iż było to nieprawdopodobne, kilkanaście grup eksperymentalnych na całym świecie zaczęło konstruować detektory typu Webera.

W roku 1966 zostałem poproszony przez Wydział Fizyki MIT o poprowadzenie wykładu Ogólnej Teorii Względności. Był to czas ponownego wybuchu zainteresowania społeczności fizyków tą teorią, które zainicjowała konferencja w Chapel Hill i, dzięki działalności Dicke'go i Wheelera w Princeton, Schiffa w Stanfordzie i innych, wzmożenia badań eksperymentalnych nad grawitacją. Właśnie powróciłem na MIT ze stażu podoktorskiego u Dicke'go i utworzyłem nową grupę mającą zajmować się kosmologią i grawitacją. Przez poprzednie czterdzieści lat teoria względności nie była nauczana na wydziale fizyki MIT; niekiedy uczono jej na wydziale matematyki w ramach geometrii różniczkowej. To niewiele, co ja sam wiedziałem o ogólnej teorii względności i fizyce grawitacji, pochodziło z rozmów z moimi kolegami z Princeton, a częściowo z tego, co przeczytałem. Formalny aparat matematyczny geometrii różniczkowej i analizy tensorowej był dla mnie zupełnie nowy, a w owym czasie nie było jeszcze naprawdę dobrych podręczników z tej dziedziny. Miałem więc ciężkie zadanie – często sam uczyłem się od studentów i musiałem ich doganiać. Studenci uczęszczający na mój wykład wiedzieli o eksperymentach Webera i domagali się poświęcenia im wykładów. W tym to właśnie czasie, prowadząc ten wykład, nawróciłem się na einsteinowski geometryczny punkt widzenia, co utrudniało mi widzenie fal grawitacyjnych jako sił pływowych, a w szczególności powodowało trudność ze zrozumieniem koncepcji cylindra oddziałującego z falą.

Spędziłem cały weekend przed wykładem [poświęconym temu zagadnieniu] próbując zastosować oparte na odchyleniu geodezyjnych podejście F.A.E. Piraniego [12] (ryc. 7) do prostego myślowego eksperymentu mającego na celu detekcję fali grawitacyjnej. W końcu przekształciło się to w prosty pomysł pomiaru czasu, jaki światło zajmowałby przelot tam i z powrotem pomiędzy dwiema swobodnymi masami. Umieszczając źródło światła na jednej ze swobodnych mas uruchamiałyby się zegar również umieszczony na tej masie w momencie, w którym światło wyrusza ku drugiej, oddalonej masie. Światło odbijałoby się od lustra umieszczonego na tej drugiej masie i powracałoby do źródła, a zegar byłby zatrzymywany w momencie przybycia powracającego światła. Wykonywałoby się ten pomiar raz wtedy, kiedy pomiędzy masami nie przechodzi żadna fala grawitacyjna oraz drugi raz, gdy przechodzi i porównywałoby się te dwa czasy. Okazuje się, że taki problem łatwo postawić w ramach ogólnej teorii względności, a ponieważ wszystkie pomiary dotyczą tej samej masy, nie powstaje problem przetłumaczenia współrzędnej czasowej na czas własny. Taki sam pomysł pomiaru wysunęło w roku 1963 także dwóch nieznanymi mi Rosjan, Gierszienstiejn i Pustowojt [13]. Następnie



Ryc. 6. Schemat interferometru Michelsona wykorzystywanego jako detektor fal grawitacyjnych. Fala grawitacyjna o niskiej częstotliwości f_g pada od góry na płaszczyznę wyznaczaną przez interferometr. Zaczniemy śledzić światło biegnące od lasera do symetrycznego wejścia rozdzielacza wiązki (jest ono oznaczone +, tj. faza światła odeń odbitego nie ulega odwróceniu). Laser wytwarza wiązkę-nośnik (zaznaczoną na czerwono). Fioletowe strzałki wskazują kierunek propagowania się fali. Światło lasera, które zostaje odbite od rozdzielacza wiązki i biegnie do lustra umieszczonego na masie testowej oznaczonej numerem 1 jest osłabione przez współczynnik odbicia rozdzielacza wiązki. Przy odbiciu od poruszanej przez falę grawitacyjną masy nr 1 wiązka-nośnik wytwarza dwie poboczne wiązki: jedną (zaznaczoną na niebiesko) o częstotliwości wyższej o f_g niż częstotliwość wiązki-nośnika i drugą o częstotliwości niższej o f_g (zaznaczoną na zielono). Powracając, wiązki te padają ponownie na rozdzielacz wiązki. Z kolei światła lasera, które przeszło przez rozdzielacz wiązki, biegnie do masy testowej oznaczonej numerem 2; jest ono osłabione przez współczynnik przejścia rozdzielacza. Ta wiązka odbija się od poruszającej się masy nr 2 i także wytwarza dwie poboczne wiązki o częstotliwościach przesuniętych o $\pm f_g$ w stosunku do częstotliwości wiązki-nośnika; te mają jednak przeciwnie fazy niż wiązki poboczne wytworzone przez masę nr 1, ponieważ fala grawitacyjna ścisza przestrzeń w pobliżu masy 1, ale rozciąga ją w pobliżu masy 2. Wiązka biegnąca od masy 2 zostaje odbita w kierunku detektora przez antysymetryczne wejście rozdzielacza wiązki (oznaczone -, tzn. odwraca ono fazy wiązki głównej i pobocznych). Wiązka biegnąca od masy 1 [także] przechodzi przez rozdzielacz w kierunku detektora. Wiązki z obu ramion interferometru łączą się. Jeśli drogi wiązek po obu stronach zabierają tyle samo czasu licząc od pierwszego do drugiego ich spotkania z rozdzielaczem, co ma miejsce, kiedy przez interferometr nie przechodzi żadna fala grawitacyjna, wówczas wiązki-nośniki znoszą się (wiązki poboczne wtedy nie występują). Jeśli przez interferometr przechodzi fala grawitacyjna, fazy wiązek-nośników przechodzących z powrotem przez rozdzielacz wiązek nie są dokładnie przeciwne i wiązki te nie wygaszają się nawzajem całkowicie; z kolei wiązki poboczne pochodzące z obu ramion po przejściu przez rozdzielacz wzmacniają się. Niosą one informację o fali grawitacyjnej: zarówno o jej amplitudzie jak i o fazie. Tak więc aby wiązki poboczne były wykrywalne jako prąd w fotodetektorze, konieczne jest, by do detektora dotarło też trochę światła wiązki-nośnika.

[w wykładzie] przeszliśmy do kosmologii i bardziej interesujących problemów.

Z początkiem lat siedemdziesiątych, gdy stało się jasne, że wyniki Webera nie zostaną potwierdzone, powróciłem do myślenia o tym, czy nie byłoby możliwe przekształcenie myślowego eksperymentu analizowanego przeze mnie w ramach Ogólnej Teorii Względności w eksperyment rzeczywisty (ryc. 6), którego układ eksperymentalny musiałby mieć konfigurację interferometru Michelsona, aby wykorzystać symetrię fali grawitacyjnej. Interferometr taki musiałby także mieć pewne niecodzienne właściwości: lustra-masy musiałby być tak zawieszono, by mogły poruszać się w odpowiedzi na falę; światło odbijając się od mas musiałoby przebiegać wzdłuż ramion interferometru wiele razy tam i z powrotem; wreszcie aby zejść do granicy szumu śrutowego (do kwantowego ograniczenia), potrzebna byłaby metoda modulacji światła z częstością wyższą niż pasmo szumu nadmiarowego typowych laserów (ryc. 7). Przebada-

nie różnych fundamentalnych fizycznych szumów [mogących występować] w takim instrumencie oraz szumów wytwarzanych przez otoczenie pokazało, że zbudowanie interferometru o rozmiarach rzędu kilometra, dawałoby szansę osiągnięcia czułości wymaganej dla wykrycia [fal grawitacyjnych pochodzących z] niektórych astrofizycznych źródeł. Umieściłem te oszacowania w *Quarterly Progress Report of the Research Laboratory for Electronics* (Kwartalnych Sprawozdaniach z Postępów w Badaniach Laboratorium Elektronicznego) [14] i poprosiłem kierownictwo Laboratorium o pomoc w sfinansowaniu budowy półorametrowego prototypu z wojskowych funduszy badawczych (ryc. 7).

W tamtym czasie, na początku lat siedemdziesiątych XX w., podstawowym warunkiem, którego spełnienia wymagało wojsko, by wspierać finansowo badania, było szkolenie naukowców i inżynierów. Około roku 1974 jako jeden z destruktywnych skutków wojny w Wietnamie pojawiło się wysuwane przez wielu demonstrowane

Initial interferometric GW detector groups late 1970's



H. Billing



L. Schnupp



K. Maischberger



W. Winkler



R. Schilling



A. Rudiger

Max Planck Garching



R. Drever



J. Hough



B. Meers



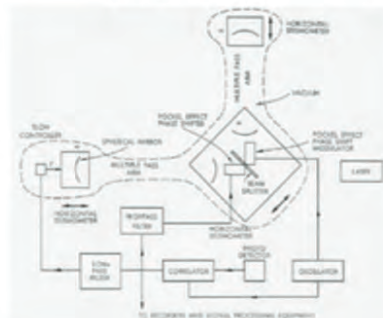
H. Ward

Glasgow



F.A.E. Pirani

MIT



J. Livas, D.H. Shoemaker, D. Dewey

Ryc. 7. U dołu po lewej: F.A.E. Pirani. To on wykazał, iż możliwe jest mierzenie względnego ruchu (tzw. odchylenia geodezyjnych) dwóch swobodnych mas przechodzących przez falę grawitacyjną w sposób niezależny od układu współrzędnych. Ta kluczowa idea nie była powszechnie akceptowana aż do konferencji w Chapel Hill w roku 1957. U dołu pośrodku: schemat interferometrycznego detektora fal grawitacyjnych wykorzystującego swobodnie zwisające masy i wielokrotne przebieganie wiązki światła między nimi wzdłuż ramion interferometru, w którym zaimplementowana została metoda redukcji amplitudy szumu światła laserowego. U dołu po prawej: półtorametrowy prototyp i trzech doktoranci MIT, którzy go zbudowali i obsługiwali. Górny rząd fotografii: grupa badaczy grawitacji z Max Planck Institute of Astrophysics w Garching (Niemcy), którzy zbudowali najpierw trzymetrowy prototyp interferometru, a następnie trzydziestometrowy, aby pokazać, że różne rozwiązania techniczne skalują się należycie. Grupa ta wymyśliła wiele z wykorzystywanych obecnie sposobów radzenia sobie z szumem w takich urządzeniach, m.in. poddała pomysł zawieszenia całego układu optycznego tej części interferometru, która jest najbardziej wrażliwa na zaburzenia fazy i [zauważyła] konieczność stabilizowania lasera poprzez wysokoczęstotliwościową modulację jego światła, by radzić sobie z przypadkowym rozpraszaniem. Schnupp poddała pomysł, by uczynić ramiona interferometru trochę nierównymi, co umożliwiło zewnętrzne modulowanie fazy; Schilling wymyślił recykling mocy pozwalający wzmocnić wiązkę modulowanego światła w interferometrze. Środkowy rząd: grawitacyjna grupa badawcza z Glasgow (Szkocja). Drever opracował wykorzystanie w interferometrze wnek Fabry'ego-Perota jako elementów, przez które światło przechodzi wielokrotnie, a także był autorem pomysłu recyklingu mocy [16]; Brian Meers jako pierwszy poddał pomysł umieszczenia dodatkowego, częściowo odbijającego lustro pomiędzy fotodetektorem a rozdzielaczem wiązki w celu dostosowania spektralnej odpowiedzi interferometru poprzez odbijanie wiązek pobocznych z powrotem do głównych ramion interferometru [17]; Ward rozwinął metodę wyrównywania interferometru.

jących przeciw wojnie, zmierzające do zduszenia wysiłków wojennych żądanie wywierania nacisku, by wojsko wspierało tylko te badania, które wiążą się z jego misją bezpośrednio. Tego samego domagali się także urzędnicy administracji państwowej z grupy „jastrzębi” popierający wojnę, którzy generalnie nie dowierzali naukowcom akademickim. Kierownictwo badań Laboratory of Electronics (Laboratorium Elektronicznego) uznało, że badania kosmologiczne i badania nad grawitacją nie są istotne dla wojska i zaprzestało ich finansowania. Rozpoczęciem wtedy trwające wiele lat starania o zdobycie wsparcia innych federalnych agencji, ale natrafiłem na sceptycyzm recenzujących, którzy wątpili, czy metody

interferometrii wykorzystujące swobodne masy mogą być użyte do wykrycia fal grawitacyjnych, i na wzrastający pesymizm, jeśli chodzi o badania nad falami grawitacyjnymi w ogóle.

Ci z badaczy w Europie, którzy byli zaangażowani w próby potwierdzenia wyników Webera zainteresowali się [jednak] detektorem będącym interferometrem ze swobodnymi masami. Kierowana przez Heinza Billinga grupa z Max Planck Institute of Astrophysics (Instytutu Astrofizyki Maxa Plancka) w Garching współpracowała wcześniej z włoską grupą z Frascati przy detektorach opartych na zasadzie koincydencji „dzwoniennia” metalowych cylindrów. Grupa ta dokonała szcze-

gółowej analizie szumu występującego w jej detektorach i zaprojektowała system zbierania danych o odpowiednich pasmach częstotliwości, umożliwiającą pełne scharakteryzowanie sygnału. Opracowali także algorytmy dające wiarygodne prawdopodobieństwa fałszywych alarmów. Nie wykryli jednak żadnych koincydencji „dzwonienia”. Musieli więc podjąć decyzję, czy porzucić te badania, czy budować kriogeniczny detektor albo interferometr ze swobodnymi masami. Zdecydowali się zbudować trzymetrowy prototyp interferometru i szybko zidentyfikowali podstawowe źródła szumu nakładające ograniczenia na czułość takiego urządzenia.

Niektóre z tych źródeł oszacowałem byłem w moim raporcie; zidentyfikowali jednak i takie, które pominąłem (ryc. 7). Pracując nad tym prototypem systematycznie diagnozowali szумы i wynajdywali sposoby, jak sobie z nimi radzić. W końcu jedynymi ich ograniczeniami pozostały szумы: fundamentalny kwantowy i termiczny. Doszedłszy w swoich badaniach do tego punktu zaprojektowali i zbudowali prototyp trzydziestometrowy [15] aby zorientować się, jak różne efekty będą się skalować przy zwiększeniu instrumentu do kilometrowego (ryc. 8).




Ryc. 8. Abstrakt pracy przedstawiającej trzydziestometrowy interferometr grupy z Max Planck Institute of Astrophysics w Garching. W pracy pokazano, że interferometr ten osiągnął lepszą czułość niż najlepsze kriogeniczne cylindryczne detektory Webera. Osiągi tego trzydziestometrowego interferometru były bardzo pomocne przy naukowym uzasadnianiu budowy instrumentów o długiej bazie, takich jak LIGO. Dwie fotografie u góry pokazują czterdziestometrowy instrument zbudowany w Caltechu (California Institute of Technology) przez Whitcoma i Drevera. Interferometry: czterdziestometrowy Caltechu i pięciometrowy zbudowany w MIT (pokazany na ryc. 13) były ostatnimi testowymi instrumentami przed zbudowaniem pierwszego detektora LIGO.

Interferometrycznymi detektorami ze swobodnymi masami zainteresowała się też grupa z Glasgow w Szkocji kierowana przez Ronalda Drevera (ryc. 7), także zajmująca się wcześniej detektorami typu Webera. Ci mieli doświadczenie nieco innego rodzaju. Przeprojektowali oni detektor cylindryczny tak, by stał się szerokopasmowy i teraz głównym źródłem ich zakłóceń był szum wytwarzany przez przetwornik ruchu. Zainteresowali się więc możliwością użycia interferometru jako czujnika drgań zamiast czujnika piezoelektrycznego. Osta-

ecznie i oni doszli do konfiguracji ze swobodnymi masami, ale zdecydowali się na wnęki optyczne (interferometry Fabry'ego-Perota) jako sposób odbijania światła tam i z powrotem w ramionach interferometru, zamiast zaproponowanych wcześniej przeze mnie linii opóźniających Herriota (dyskretne miejsca na lustrach). Doszli do tego rozwiązania zauważając, że linie opóźniające były bardziej niż interferometry Fabry'ego-Perota podatne na szum fazowy pochodzący z rozpraszania optycznego.

The measurement challenge



$h = \frac{\Delta L}{L} \leq 10^{-21}$

$L = 4\text{km} \quad \Delta L \leq 4 \times 10^{-18} \text{ meters}$

$\Delta L \sim 10^{-12}$ wavelength of light

$\Delta L \sim 10^{-12}$ vibrations at earth's surface

Kip Thorne

Ryc. 9. Kip Thorne około roku 1980. Obok jego wyzwanie rzucone eksperymentatorom, wynikające z wykonanych przez niego i innych badaczy oszacowań dynamiki i populacji możliwych astronomicznych źródeł fal grawitacyjnych.

Ważnym punktem zwrotnym było moje spotkanie w Waszyngtonie z Kipem Thornem (ryc. 9) w roku 1975. Spotkaliśmy się, by popracować nad powołaniem komitetu mającego rozpatrzyć możliwą rolę programu eksploracji przestrzeni [kosmicznej] w badaniach nad grawitacją. W tamtym czasie Kip założył był właśnie w Caltechu (California Institute of Technology) jedną z pierwszych grup zajmujących się grawitacją od strony teoretycznej i zamierzał zachęcić Caltech, by rozwinął równoległe program jej eksperymentalnych badań. Omawialiśmy więc sprawę charakteru takiego programu. Kip myślał o badaniach nad falami grawitacyjnymi i ostatecznie uświadomił sobie, że zrealizowanie programu, który w końcu umożliwiłby detekcję fal grawitacyjnych pochodzących z „możliwych” źródeł astrofizycznych, wymagałoby czułości na amplitudy $h \leq 10^{-21}$ w zakresie od 10 do 1000 Hz, tj. czułości o czynnik milion większej niż ta, jaką osiągały detektory Webera. Kip był pod silnym wpływem Władimira Bragińskiego (z uniwersytetu w Moskwie), którego ideą było skonstruowanie detektorów typu Webera działających blisko ograniczenia kwantowego. Zasugerowałem mu, żeby się zastanowił nad interferometrem o długiej bazie i spróbował sprowadzić do Caltechu ludzi z instytutu Maxa Plancka albo z grupy z Glasgow, którzy pomogliby mu rozpocząć taki program. W roku 1978 Caltech podjął decyzję o stworzeniu nowej grupy z Ronaldem Dreverem jako jej liderem i przeznaczył na to znaczne środki. W roku 1980, by pomóc w prowadzeniu tej nowej grupy, sprowadzony został do Caltechu Stan Whitcomb.

Połączenie sukcesu, jaki odniosła grupa z instytutu Maxa Plancka dowodząc skalowania się właściwości interferometrów, postępu osiągniętego w zwiększaniu czułości prototypowych detektorów [budowanych] przez nią i przez grupę z MIT i wreszcie znaczące nakłady finansowe przeznaczane na tę dziedzinę przez Caltech skłoniły mnie do wystąpienia do NSF z propozycją zba-

dania, co jest rzeczywiście niezbędne do zbudowania interferometrycznego detektora o czułości odpowiedniej, by mógł on wykrywać fale grawitacyjne emitowane przez źródła astrofizyczne. W nasze prace, których celem było przyjrzenie się planom i kosztom układu próżniowego, układu optycznego i laserowego o wielkiej skali i wyborowi miejsca budowy wielokilometrowego układu interferometrów-detektorów odległych jeden od drugiego o kontynentalne odległości, zaangażowanych było wielu naukowców współpracujących z konsultantami z zakresu inżynierii przemysłowej (ryc. 10). Celem tych prac studyjnych było zorientowanie się w wykonalności [takich detektorów] i w skalowaniu się kosztów wielkiej infrastruktury, a także w wyzwaniach eksperymentalnych jakie stwarzała konieczność zaprojektowania detektora tak, by przewyżczyć dwa wielkie czynniki. Przy ramionach długości wielu kilometrów detekcja fal o amplitudach rzędu 10^{-21} wymaga mierzenia przemieszczeń rzędu 10^{-18} m, tj. rzędu tysięcznej części rozmiarów protonu. Jeśli wykorzystuje się światło o długości fali 10^{-6} m, konieczne do tego jest stworzenie technologii optycznej pozwalającej mierzyć [przemieszczenia] rzędu 10^{-12} długości fali. Do tego typowe drgania terenu, nawet w spokojnych miejscach, są z grubsza rzędu 10^{-6} m; aby więc móc wyczuwać fale grawitacyjne ponad samym szumem terenu, konieczna jest izolacja lusterek wyznaczających końce interferometru z dokładnością charakteryzującą się kolejnym czynnikiem rzędu 10^{-12} . Od początku wiadomo więc było, że głównym wyzwaniem jest zredukowanie szumu w układzie o te dwa czynniki 10^{-12} . Prace studyjne miały w zamierzeniu służyć jako podstawa wspólnego wystąpienia [do NSF o środki] wszystkich grup zainteresowanych budową LIGO, czyli Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (Laserowego Interferometrycznego Obserwatorium Fal Grawitacyjnych).

Wyniki prac zostały zaprezentowane w roku 1983 komitetowi NSF rozpatrującemu nowe wielkie przedsięwzięcia fizyki. Prezentacja ta była wspólnym dziełem grup badawczych z MIT i Caltechu, które już wcześniej zaczęły współpracować. Ocena prezentacji przez Komitet była bardzo zachęcająca:

Komitet jest pod wrażeniem dalekosiężnych naukowych konsekwencji możliwości wykrywania fal grawitacyjnych. Nie tylko testowałyby to nasze podstawy rozumienia grawitacji, ale otworzyłyby także zupełnie nowe okno na Wszechświat.

Rozpatrzyliśmy układ detekcyjny wykorzystujący interferometr laserowy rozwijany obecnie przez grupy z MIT i Caltechu. Bierzymy pod uwagę, nie tylko to, że prace te dają wybitną naukową szansę, ale także i to, że Fundacja jest jedynym możliwym źródłem [finansowego] wsparcia dla naziemnych badań fizyki grawitacji.

Jak przy każdej próbie dokonania jakościowego postępu istnieje pewne ryzyko: tu niepewność dotyczy zarówno wielkości sygnału, który musiałby być zarejestrowany, jak też i zakładanej przy propo-

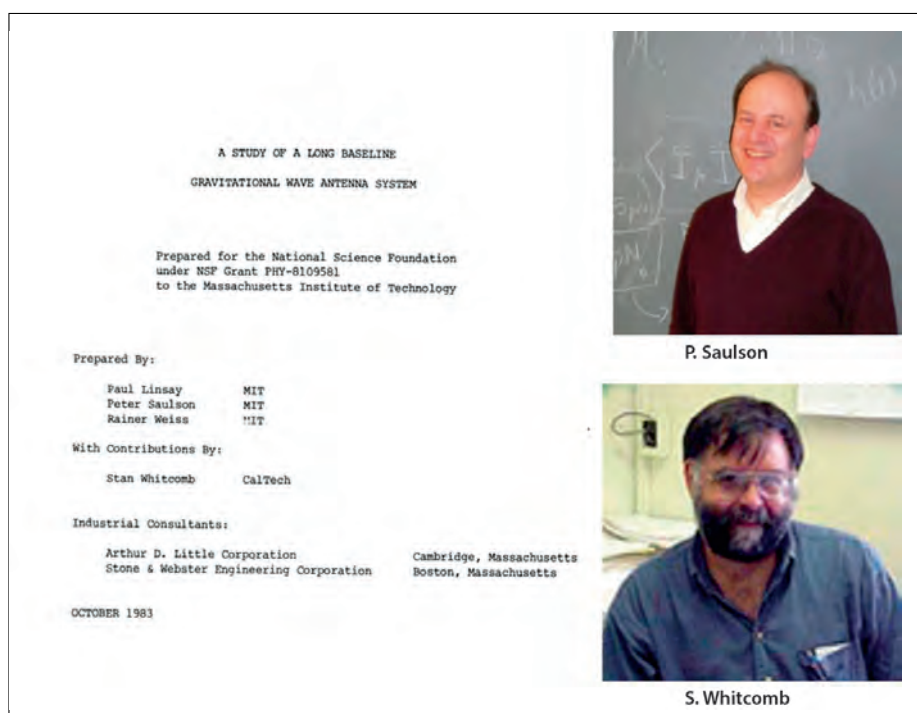
nowanej skali projektu daleko idącej ekstrapolacji istniejących technik eksperymentalnych. Uważamy jednak, iż fundamentalne naukowe znaczenie takich badań jest tak duże, że są one warte poniesienia znacznych nakładów.

(Komitet doradczy fizyki NSF, 12–13 grudnia 1983 r.)

Zachęteni przez Komitet rozpoczęliśmy przechodzenie od nauki uprawianej na małą skalę przez niezależnych badaczy do organizacji projektu wymagającego skoordynowanego wysiłku naukowego na wielką skalę. Z początku nam się nie udało; dopiero w roku 1994, kiedy to kierownikiem projektu LIGO został Barry Barish, udało nam się takie przejście zrealizować. W międzyczasie w różnych laboratoriach dokonano pewnego rozwoju technologii, jednak dokonał się tylko nieznaczny postęp, jeśli chodzi o podjęcie decyzji zasadniczych dla całego przedsięwzięcia, takich jak wybór lokalizacji, albo bardziej konkretny projekt konfiguracji interferometru. W roku 1986 rozpoczęliśmy starania o znalezienie znacznych funduszy na rozwój programu interferometrycznego wykrywania fal grawitacyjnych. Richard Garwin podsunął myśl, by NSF przeprowadziła latem, za pośrednictwem niezależnych grup roboczych, studium całej tej dziedziny pod kątem zarówno ponownej oceny jej ważności i już osiągniętej gotowości, jak też oszacowania kosztów przedsięwzięcia. Powstał w ten sposób Panel on Interferometric Observatories for Gravitational Waves (Panel ds. Inter-

ferometrycznych Obserwatoriów Fal Grawitacyjnych), w skład którego weszli uznani naukowcy mający doświadczenie w wielkich przedsięwzięciach, eksperci od różnych potrzebnych technologii i uczeni mający wiedzę o istotnych dla tego przedsięwzięcia aspektach grawitacji i astrofizyki. W styczniu 1987 r. przedłożyli oni dokument, który sugerował NSF budowę dwu interferometrycznych detektorów w pełnej skali w dwu położonych daleko jedna od drugiej lokalizacjach i zalecał, by przed rozpoczęciem prac powierzyć misję konkretnemu jednemu kierownikowi.

Pierwszym dyrektorem LIGO został w roku 1987 Robbie Vogt. Nadał on programowi badań laboratorium strukturę organizacyjną i przydzielał zadania budowy detektorów, planowania i oszacowania [kosztów] infrastruktury, jego zaś głównym zadaniem było skoordynowanie naszych, tj. badaczy i inżynierów – uczestników projektu z MIT i Caltechu, wysiłków przy pisaniu dokumentu-propozycji budowy LIGO zawierającego wystarczająco dużo szczegółowych informacji, by umożliwić oszacowanie czasu potrzebnego na budowę i jej kosztów. Dokument ten [19] miał także służyć zebraniu w jednym miejscu całej wiedzy o źródłach fal grawitacyjnych, wszystkich szumach mogących występować w detektorach oraz planów dotyczących analizy danych wyznaczającej kryteria wiarygod-



Ryc. 10. W roku 1979 NSF wsparła wykonanie, przy współudziale przemysłu, studium [18] mającego na celu zbadanie wykonalności interferometrycznego detektora fal grawitacyjnych o bazie rzędu kilku kilometrów. Studium to podsumowało aktualny stan badań nad prototypowymi urządzeniami tego typu, a także zebrało oszacowania mocy różnych możliwych źródeł fal grawitacyjnych. Analizowało także możliwość zbudowania połączonym wysiłkiem przemysłu i ośrodków akademickich odpowiednich układów optycznych, laserów, izolacji od drgań i układu kontrolnego, które by spełniały wymagania niezbędne dla osiągnięcia celu naukowego. Przedstawiało także plany i kosztorys układu próżniowego i budynków oraz skalowanie kosztów wraz z wielkością przedsięwzięcia. Analizowało możliwe lokalizacje interferometru o bazie aż do 10 km, zarówno naziemne, jak i podziemne. Z założenia studium to miało być źródłem danych potrzebnych do wystąpienia do NSF przez konsorcjum badaczy i instytucji z propozycją budowy w USA dwóch detektorów.



Ryc. 11. Dokument-propozycja zbudowania i wykorzystania LIGO z roku 1989 [19]. Współpracę MIT i Caltechu, w wyniku której powstał ten dokument, zorganizował Rochus (Robbie) Vogt, który w roku 1987 został dyrektorem projektu LIGO. Propozycja ta zawierała szczegółowe parametry projektu: dwa równoległe działające interferometry – jeden w Hanford w stanie Waszyngton i drugi w Livingstone w Luizjanie – mające bazy o długości 4 kilometrów, plany techniczne pierwszego detektora i spektrum jego czułości na amplitudy fal, plany układu monitorowania detektora, układu próżniowego mającego pomieścić instrumenty i układu próżniowego rur prowadzących wiązki światła, budynków i stałej infrastruktury. Zawierała także plan rozwoju przedsięwzięcia: pierwszy detektor wykorzystujący istniejącą już technologię, zdolny do detekcji i następny, mający wielkie szanse odkryć fale, zaawansowany detektor oparty o jeszcze nie do końca dostępną technologię; rozwój ten miał być realizowany etapami w różnych laboratoriach badawczych [projektu] LIGO. Budynki były zaprojektowane tak, by można w nich było umieścić zarówno pierwszy, jak i zaawansowany detektor. Ja pracowałem z inżynierami Boude Moorem, a później z Larrym Jonesem nad projektem technicznym, konstrukcją i sprawdzeniem czterokilometrych rur, w których miały biec wiązki światła.

ności detekcji. Szkicował także podzieloną na etapy strategię rozwoju całej dziedziny; stał się dla niej dokumentem źródłowym (ryc. 11). Infrastruktura miała być rozplanowana i zbudowana tak, by być odpowiednią zarówno dla pierwszego detektora wykorzystującego już (prawie) istniejącą technologię, jak też by nie uniemożliwiać budowy przyszłego zaawansowanego detektora z testowymi masami ważącymi tonę, działającego blisko kwantowego ograniczenia, który mogliśmy sobie na tym etapie tylko wyobrażać. Do pisania tego dokumentu-propozycji Vogt połączył w parę inżynierów z uczonymi, aby mieć pewność, że planowana infrastruktura będzie mogła służyć eksperymentowi. Nadzorował także wybór lokalizacji.

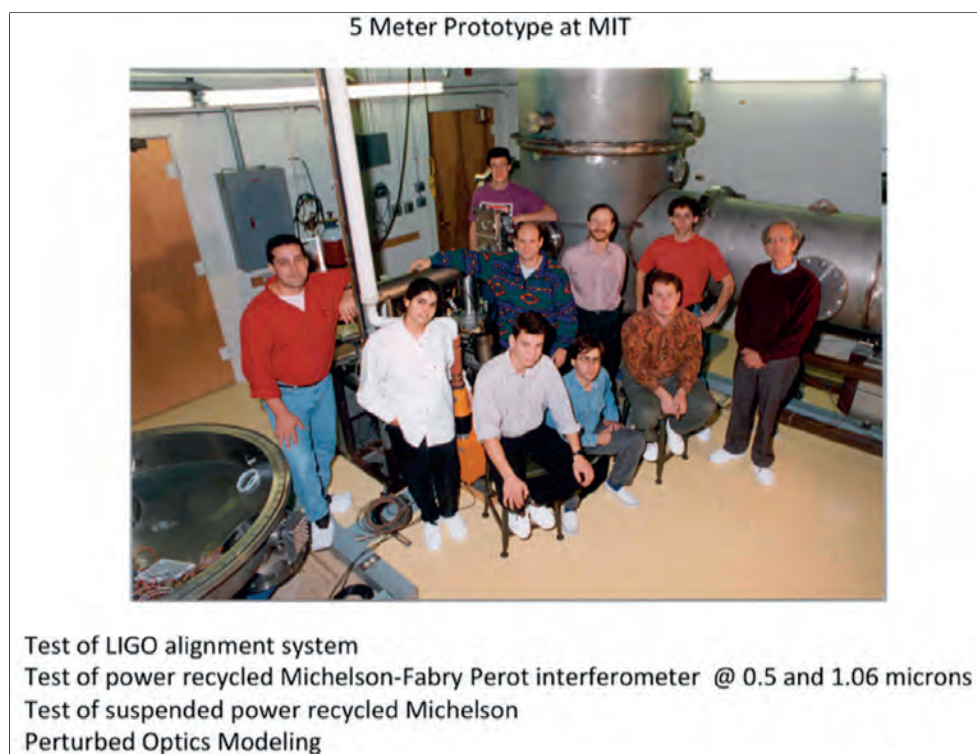
Po burzliwym okresie jaki przeszedł projekt, drugim dyrektorem LIGO został w roku 1994 Barry Barish. Wprowadził on wiele zmian w organizacji przed-

sięwzięcia poszerzając jego kierownictwo z jednoosobowego działającego w charakterze „sikawkowego” do większej grupy menadżerskiej (ryc. 12). Wymyślił też i zorganizował LIGO Scientific Collaboration, do której weszli członkowie projektu LIGO, a także te grupy spoza Caltechu i MIT, które były zainteresowane nowym polem badań, jakie mogło się otworzyć dzięki LIGO. Niektóre z tych grup są [obecnie] także zaangażowane w bezpośrednie badania nad rozwojem detektorów.

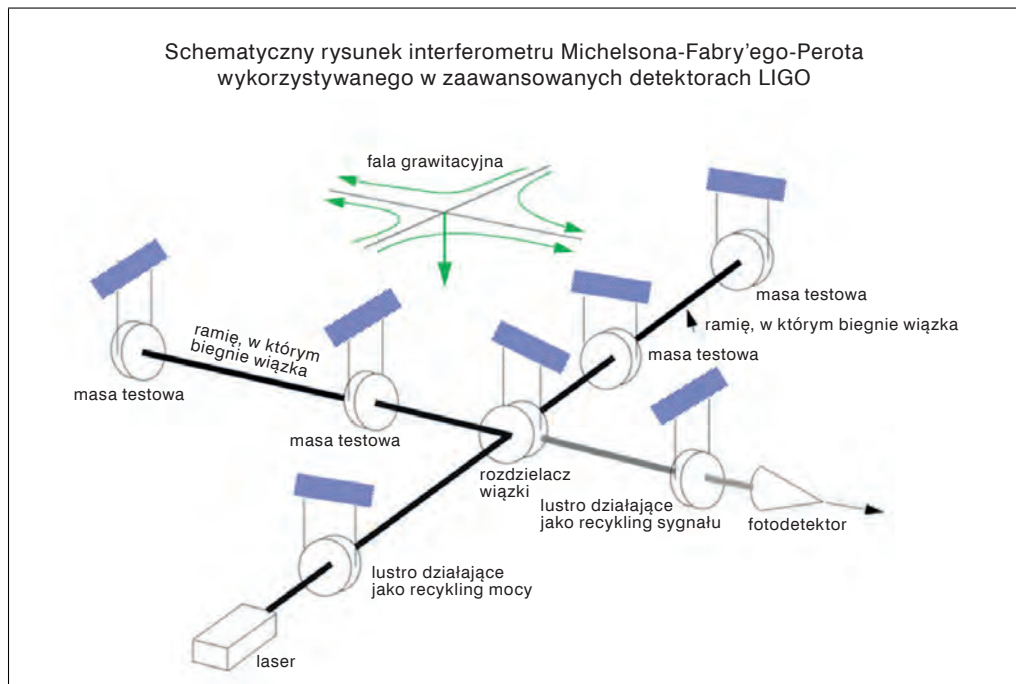
Około połowy lat osiemdziesiątych prace nad rozwojem technik mających na celu pokonanie wspomnianych (ryc. 9) dwóch czynników 10^{-12} były prowadzone w kilku laboratoriach badawczych: w Caltechu, gdzie powstał 40-metrowy prototyp, w MIT, gdzie pracowano nad 5-metrowym prototypem (ryc. 13), w Glasgow, gdzie skonstruowano prototyp



Ryc. 12. Około roku 1994 zarówno NSF, jak też i administracje Caltechu i MIT uznały, że kierownictwo projektu LIGO wymaga wzmocnienia. W roku 1994 dyrektorem LIGO został profesor Barry Barish z Caltechu, który znacznie poszerzył grono kierownicze i grono pracowników technicznych projektu. Powierzył dr. Garry'emu Sandersowi stanowisko kierownika projektu oraz zatrudnił dr. Alberta Lazzariniego i Dennisa Coyne jako kierowników pionów naukowego i inżynierskiego. Zaproponował S. Whitcombowi kierowanie planowaniem i konstrukcją pierwszego interferometru. Barish zdał sobie sprawę z tego, że przy opracowywaniu danych i publikacji wyników potrzebny będzie zespół szerszy niż tworzący przez same tylko grupy z Caltechu i MIT. Stał się tym samym architektem LIGO Scientific Collaboration. Mnie Barry poprosił, bym został jej pierwszym rzecznikiem prasowym.



Ryc. 13. Grupa MIT w latach dziewięćdziesiątych i lista niektórych z wykonanych [przez nią] prac. W pierwszym rzędzie od lewej do prawej: Michael Zucker, Nergi Mavalvala, Peter Csatorday, Peter Fritschel, Joseph Kovalik, R. Weiss. Drugi rząd: Yaron Hefetz, David Shoemaker, Brett Bochner. Z tyłu: Brian Lantz.



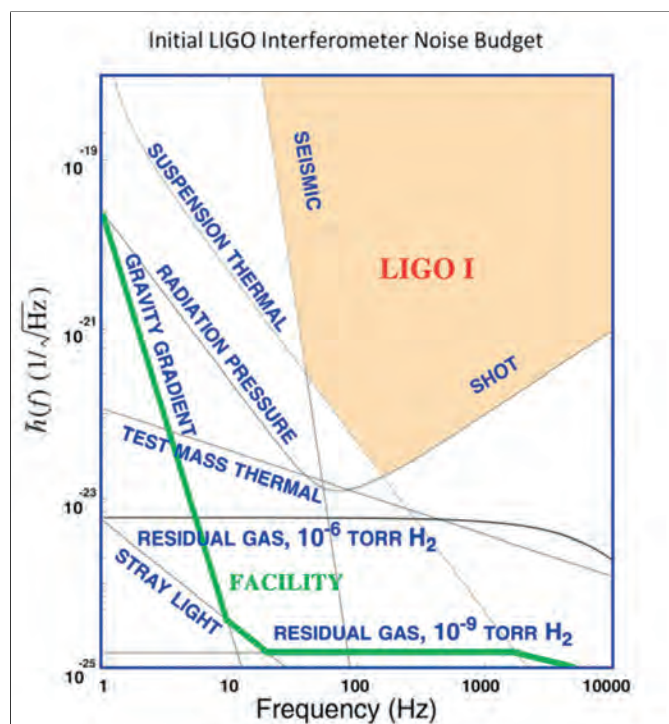
Ryc. 14. Schemat zaawansowanego detektora, który w roku 2015 zarejestrował fale grawitacyjne emitowane przy zderzeniu dwóch czarnych dziur. Interferometr ten ma wszystkie elementy niezbędne, by jego czułość przewyższała czynnik 10^{-12} i pozwalała mu mierzyć małe przemieszczenia mas testowych. Do zasadniczych elementów interferometru pokazanych na ryc. 6 dodane są tu, pokryte częściowo przepuszczającymi światło warstwami optycznymi, wejściowe masy testowe umieszczone pomiędzy rozdzielaczem wiązki i masami testowym znajdującymi się na końcach ramion. Testowe masy wejściowe i końcowe tworzą razem optyczny rezonator (wnękę Fabry'ego Perota); można je sobie wyobrazić jako wielokrotnie odbijające między sobą wiązkę światła (typowo kilkaset razy, zanim powróci ona i z powrotem przejdzie przez rozdzielacz wiązki) w celu wzmocnienia o czynnik równy tej wielokrotności generowanych przez falę grawitacyjną wiązek pobocznych. Próbuje się sprawić, by liczba odbić w obu ramionach była taka sama. Tak jak na ryc. 6, wiązki poboczne z obu ramion sumują się biegnąc do fotodetektora, podczas gdy wiązki-nośniki wzajemnie (niemal) się znoszą. Z kolei w kierunku lasera nie biegnie żadna z wiązek pobocznych, za to wraca w jego kierunku wiązka-nośnik. Pomiędzy rozdzielacz wiązki a laser wstawione jest dodatkowe lustro częściowo przepuszczające światło. Działa ono jako recykling mocy. Jego położenie i stopień przepuszczalności są tak dobrane, by stworzyć dodatkowy interferometr, który powoduje, że odbita od niego wiązka z lasera znosi się z przepuszczaną przez nie wiązką-nośnikiem odbitą od rozdzielacza wiązki. Eliminuje to odbitą wiązkę powracającą do lasera zwiększając kilkusetkrotnie moc wiązki-nośnika między rozdzielaczem wiązki, a wejściową masą testową. Jest to równoważne użyciu lasera o większej mocy. Przedstawiona tu konfiguracja optyki była wykorzystana w pierwszym interferometrze LIGO. Zaawansowany detektor posiada jeszcze jedno częściowo odbijające lustro, działające jak recykling sygnału, umieszczone pomiędzy rozdzielaczem wiązki a fotodetektorem. Lustro to odbija wiązki poboczne z powrotem do interferometru i modyfikuje spektralną odpowiedź całego detektora na częstotliwości poboczne, dostrajając w ten sposób czułość instrumentu do rodzaju poszukiwanych fal grawitacyjnych.

10-metrowy i w laboratorium w Hannoverze, do którego przeniosła się grupa z Garching; powstał też wspólny włosko-francuski program badawczy VIRGO z ośrodkiem w Cascinie (Włochy).

Zamiast kontynuować relacjonowanie historii rozwoju całego przedsięwzięcia, zajmę się teraz głównymi pomysłami na pokonanie owych dwu czynników 10^{-12} . Konstrukcja układu optycznego zaawansowanego detektora (Barry pokaże niektóre rezultaty dotyczące jego charakterystyk) jest schematycznie przedstawiona na ryc. 14. Pierwszy detektor LIGO był właśnie taki, poza tym, że nie posiadał lusterek służących do recyklingu sygnału. Podpis pod ilustracją objaśnia główną zasadę jego działania. Zestawienie szumów występujących w pierwszym detektorze LIGO o długiej bazie jest pokazane na ryc. 15. Podane są na niej zarówno oszacowania przyczynków wynikających z fundamentalnych zasad fizyki, jak też i te pochodzenia technicznego, które można zredukować udoskonalając konstrukcję. Zestawienie to znakomicie pozwala prześle-

dzić powolny lecz stały postęp, jaki osiągnęliśmy zmagając się z dwoma czynnikami 10^{-12} . Postęp ten dokonywał się, jak na przykładzie rzeczywistych danych dostarczonych przez instrument pokaże Barry, w miarę, gdy uruchamiając instrument uczyliśmy się coraz lepiej go rozumieć.

Istotny krok w udoskonalaniu izolacji od szumu sejsmicznego i szumu termicznego występującego w zawieszeniu wahadła został zrobiony przy planowaniu i konstrukcji detektora zaawansowanego (ryc. 16). Jednym z dwóch głównych udoskonaleń był nowy układ zawieszenia składający się z czterech podwieszonych jedno pod drugim wahadeł, z których każde kolejne stanowiło filtr szumu drgań sejsmicznych zmieniającego się jak $1/(\text{częstotliwość})^2$. Aby zredukować szum termiczny w zawieszeniu masa testowa podwieszona była do ostatniego segmentu za pomocą zapewniających małe straty mechaniczne stopionych włókien krzemionkowych (zamiast stalowych). Zawieszenia te dostarczyła grupa z Glasgow. Drugim głównym ulepszeniem był wielo-



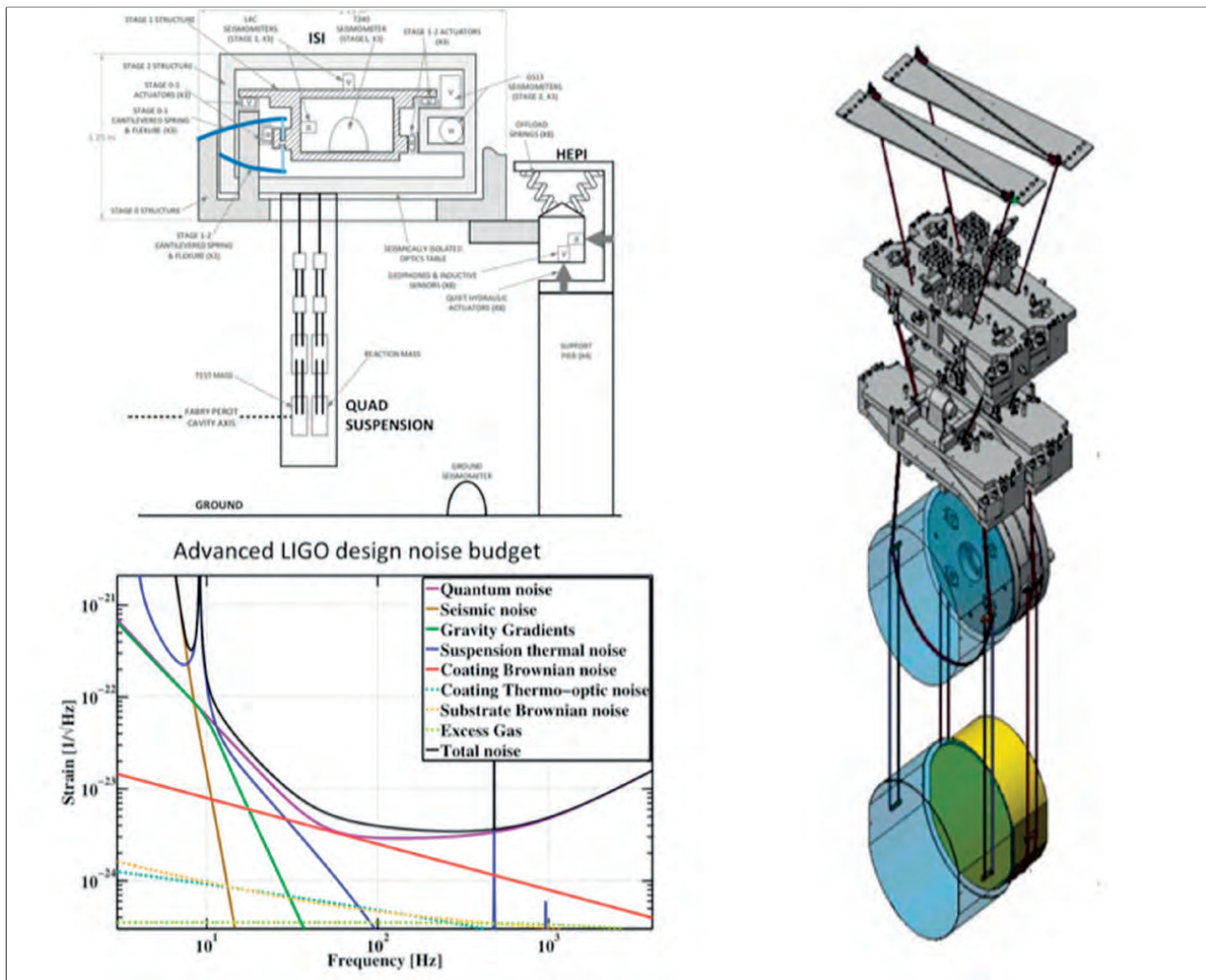
Ryc. 15. Zestawienie szumów występujących w pierwszym interferometrze LIGO pochodzące z wystąpienia do NSF z roku 1989. Należy zauważyć, że na osi pionowej odłożona jest amplituda spektralna (transformata Fouriera) w jednostkach pierwiastek z częstotliwości. Aby przetłumaczyć tę wielkość na pierwiastek ze średniego kwadratu amplitudy, który był używany na początku tego artykułu, należy pomnożyć wielkość wykreśloną przez pierwiastek szerokości pasma detekcji. Przy częstotliwości ok. 100 Hz detektor jest czuły na pierwiastek ze średniego kwadratu amplitudy rzędu 10^{-22} . Wykres pokazuje główne szumy, które ograniczają czułość detektora. Przy częstotliwościach wyższych niż 200 Hz jest ona ograniczona przez kwantowy szum śrutowy. Krzywa oznaczona „ciśnienie promieniowania” (ang. *radiation pressure*), która nie pochodzi od fluktuacji ciśnienia, jakie promieniowanie wywiera na lustro. Oba przyczynki razem wyznaczają kwantowe ograniczenie i są równoważne szumowi występującemu w mikroskopie Heisenberga; tu jednak dotyczą one nie elektronu, a obiektu makroskopowego, jakim jest dziesięciokilogramowe lustro. Naiwnie ujmując, można zredukować szum śrutowy zwiększając moc lasera, ale za cenę zwiększenia szumu ciśnienia promieniowania. Przy częstotliwości 100 Hz, w swoim najczulszym zakresie, detektor jest ograniczany przez szum termiczny w zawieszeniu wahadła, który w tym przypadku pochodzi od wzbudzeń fononowych na brzegach wahadła. Przy częstotliwościach niższych niż 70 Hz działanie detektora jest ograniczone przez niepełne wytłumienie drgań terenu (szumu sejsmicznego), wpływających na lustro. Szum sejsmiczny i szum termiczny w zawieszeniu wahadła zostały znacznie zredukowane w zaawansowanym detektorze (ryc. 16). Szum o szerokim spektrum oznaczony jako gaz resztkowy (ang. *residual gas*) odpowiada fluktuacjom fazy indukowanym przez rozpraszanie do przodu na resztkowych molekułach gazu przechodzących przez wiązki optyczne w długich ramionach interferometru. Szum ten jest główną przyczyną, dla której wiązka biegnie przez ultra-doskonałą próżnię. Krzywa ostro wznosząca się przy niskich częstotliwościach oznaczona „gravity gradients” odpowiada fluktuacjom newtonowskich sił grawitacji działających na masy testowe umieszczone na końcach ramion, które są skutkiem fluktuujących w czasie gęstości zarówno atmosfery jak i gruntu. Choć jest nadzieja, że będzie można mierzyć te fluktuacje, albo je zredukować przez izolację instrumentu, stanowią one poważne ograniczenie naziemnej detekcji fal grawitacyjnych o częstotliwościach niższych niż kilka herców.

stopniowy aktywny układ izolacji od drgań mający jeszcze bardziej zredukować wpływ ruchów sejsmicznych, zwłaszcza przy niskich częstotliwościach, przy których wahadła nie są skuteczne. Rezultaty tych udoskonaleń przedstawi w następnym wykładzie Barry.

Rozpocząłem ten wykład od uznania istotnej roli, jaką odegrała National Science Foundation (NSF) sprzyjając programowi LIGO i wspierając go przez ponad 45 lat, od pojawienia się pomysłu detektora aż do pierwszych odkryć i otwarcia się całego nowego pola badań. Jest to tym bardziej godne uznania, że było to ryzykowne przedsięwzięcie naukowe. Fundacja dostrzegła jednak jego znaczenie mimo silnej zewnętrznej krytyki i naszego wewnętrznego braku zorganizowania. Znaczną część tej zasługi i dalekowzroczności zawdzięczać należy Richardowi Isaacsonowi (ryc. 17), który był zarówno rzecznikiem całej dziedziny grawitacji w NSF jak też i strategiem tego, co możliwe.

Gdy już decyzja o budowie LIGO zapadła w samej Fundacji, niezwykle istotne było poparcie trzech dyrektorów NSF (ryc. 18) w krytycznych momentach przeprowadzania projektu przez Kongres i przez krytykę sceptycznie nastawionej części środowiska naukowego.

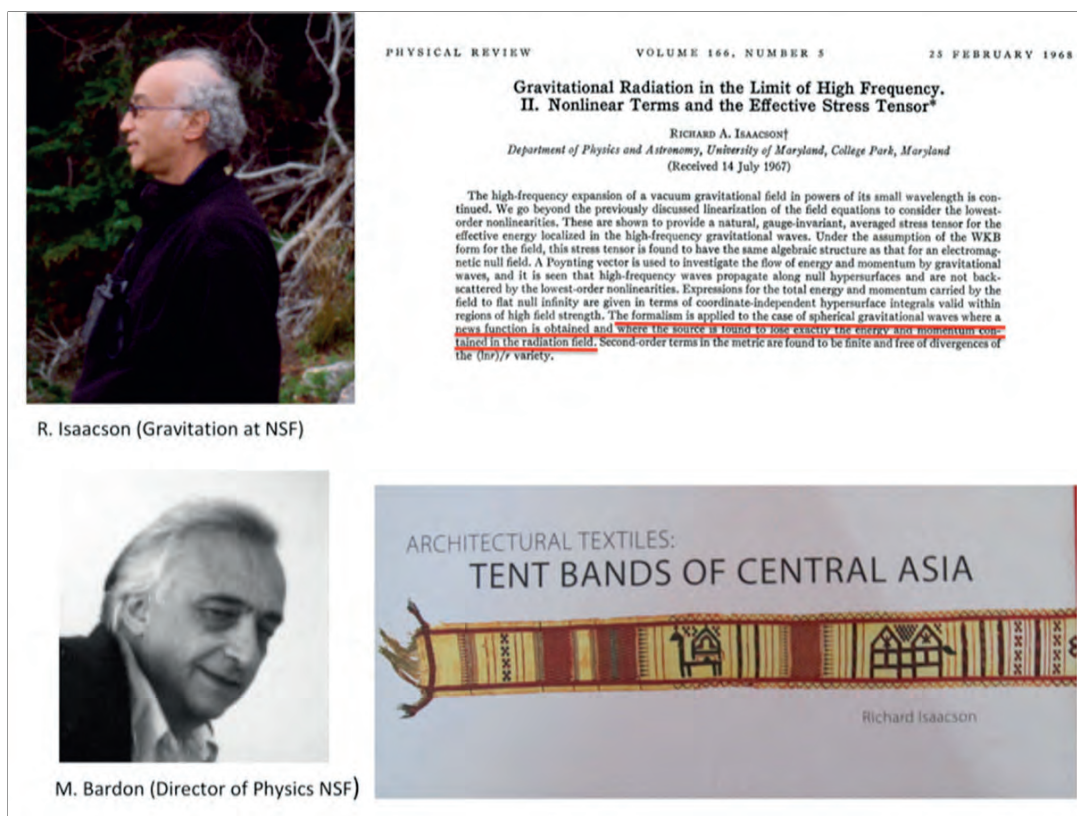
Jeszcze refleksja osobista: komentatorzy nauki, którzy pisali o projekcie LIGO odnotowywali, że upłynęło 45 lat od jego poczęcia do pierwszych pomiarów. Podkreślali naszą wytrwałość i innowacyjność grupy uczonych pracujących tak długo bez satysfakcji z uzyskania znaczących wyników naukowych. Tak może to wyglądać z zewnątrz. Od wewnątrz wyglądało to zupełnie inaczej. To, co utrzymywało tę grupę razem, to były codzienne małe zwycięstwa lub zagadki, jakie pojawiały się w miarę rozwoju pomysłów i technologii (zarówno hardwerowych jak i softwerowych), a także kolegalność działania grupy ludzi, którzy poświęcili się temu przedsięwzięciu.



Ryc. 16. Niektóre właściwości zaawansowanego detektora. Po prawej: Poczwórny układ wahadeł skonstruowany na uniwersytecie w Glasgow, który zapewnia czterostopniową izolację od szumów gruntowych o wysokiej częstotliwości, a także niski poziom szumu termicznego wahadła dzięki zastosowaniu ostatniego podwieszenia ze stopionych włókien krzemionkowych (pierwszy raz zastosowanych przez moskiewską grupę Bragińskiego). U góry po lewej: Skonstruowany na uniwersytecie stanfordzkim układ podwójnej aktywnej izolacji od szumu sejsmicznego. Układ mierzy ruch platformy za pomocą trójwymiarowego sejsmometru i następnie przesyła informację do układu kontrolnego, aby [stłumić ruch i] wyzerować sejsmometr. Dwa takie aktywne układy umieszczone są jeden pod drugim; do dolnego podwieszony jest poczwórny układ wahadeł. U dołu po lewej: Zestawienie szumów w zaawansowanym detektorze. Dominuje tu już szum kwantowy zarówno przy wysokich, jak i przy niskich częstotliwościach (omówi to w swoim wykładzie Kip). Szumem ograniczającym działanie przy najważniejszej częstotliwości 100 Hz jest tu szum termiczny w pokrywających lustra warstwach optycznych. W chwili gdy to piszę, tj. w lutym 2018 r., szum w zaawansowanym detektorze jest, jak pokaże to Barry, przy tej częstotliwości 2.5 raza wyższy niż planowany, któremu odpowiada krzywa.

LITERATURA

- [1] Einstein, A. (1915) "Zur Allgemeinen Relativitätstheorie", *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 778 & 799.
- [2] Einstein, A. (1916) "Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie", *Annalen der Physik*, 49, 769.
- [3] Pound, R.V. and Rebka, G.A. (1960) "Apparent Weight of Photons", *Physical Review Letters* 4, 337.
- [4] Brault, J (1963) "Gravitational Redshift of Solar Lines", *Bulletin of the American Astronomical Society* 8, 28.
- [5] Fomalont, E.B. and Sramek, R.A. (1975) "A Confirmation of Einstein's General Theory of Relativity by Measuring the Bending of Microwave Radiation in the Gravitational Field of the Sun", *Astrophysical Journal* 199, 749.
- [6] Einstein, A. (1916) "Näherungsweise integration der feldgleichungen der gravitation", *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften XXXIII*, 688.
- [7] Einstein, A. (1918) "Über gravitationswellen", *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 8, 154.
- [8] Taylor, J. H. and Weisberg, J.M. (1982) "A new test of general relativity: Gravitational radiation and the binary pulsar PSR 1913+16", *Astrophysical Journal* 253, 908.



Ryc. 17. Najważniejszą postacią w NSF był dr Richard Isaacson, który w Oddziale Fizyki został dyrektorem dyscypliny grawitacja. Uzyskał doktorat na uniwersytecie w Maryland [pracując] w grupie Charlesa Misnera. Napisał pracę ściśle wykazującą, że fale grawitacyjne unoszą że źródła energii i pęd³ – sprawa ta w latach sześćdziesiątych budziła wciąż kontrowersje. Isaacson wyczuwał jaką szansę stanowił dobry program eksperymentalnych i teoretycznych badań grawitacji i stał się w NSF wpływowym poplecznikiem tej dziedziny. Przekonał dyrektora Wydziału Fizyki, dr. Marcela Bardona, że [program badawczy mający na celu] wykrycie fal grawitacyjnych, jakkolwiek ryzykowny bo z jednej strony wymagający rozwoju technologii, a z drugiej strony opierający się na niepewnej wiedzy o ich źródłach, jest tym rodzajem badań, jakie mogą przynieść przełomowe wyniki i są zgodne z misją Fundacji. Oprócz popierania tego programu w Fundacji, Isaacson służył uczniom z tej dziedziny strategicznym doradztwem i wiedzą o tym, co jest możliwe. Po przejściu na emeryturę przekształcił w zawód swoje szczególne hobby, jakim było badanie tkanin i wytwarzających je kultur azjatyckich. Był kuratorem wystawy pasów namiotowych używanych w jurtach w waszyngtońskim muzeum tkanin.



Ryc. 18. Trzej dyrektorzy National Science Foundation, którzy odegrali kluczową rolę w rozwoju projektu LIGO: Eric Block był pierwszym dyrektorem, który rozpatrywał rozpoczęcie programu z detektorami LIGO o długiej bazie. Walter Massey bronił programu w czasie, gdy astronomowie uważali projekt za przedwczesny i będący zapewne marnowaniem pieniędzy. W przedłożonym Kongresowi budżecie NSF Neal Lane był zdecydowanym rzecznikiem punktu dotyczącego funduszy na konstrukcję wielkich urządzeń badawczych (MREFC). Program LIGO był jednym z pierwszych, który skorzystał z tych funduszy; od tamtej pory fundusz był wykorzystywany przy uruchamianiu wielu innych dużych projektów finansowanych przez NSF.

³Znacznie wcześniej wykazał to prof. Andrzej Trautman z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Ukazała się seria prac – najważniejsza z nich to: <https://inspirehep.net/authors/985720> Andrzej Trautman, <https://inspirehep.net/literature/1445105> „Radiation and Boundary Conditions in the Theory of Gravitation”, *Bull. Acad. Pol. Sci. Ser. Sci. Math. Astron. Phys.* 6 (1958) 6, 407–412; ponieważ ta praca była mało znana, 4 lata temu w archiwum elektronicznym ukazał się reprint: 1604.03145) (przyp. tłum. dzięki informacji prof. Krzysztofa Meissnera IFT UW).

- [9] “The Role of Gravitation in Physics”, Report from the 1957 Chapel Hill Conference, Reprinted Max Planck Research Library for the History and Development of Knowledge Sources 5.
- [10] Weber, J. (1960) “Detection and generation of gravitational waves”, *Physical Review* **117**, 306.
- [11] Weber, J. (1969) “Evidence for the Discovery of Gravitational Waves”, *Physical Review Letters* **22**, 1320.
- [12] Pirani, F.A.E. (1956) “On the physical significance of the Riemann tensor”, *Acta Physica Polonica*, **15**, 389 and (1957) “Measurement of classical gravitation fields”, Chapel Hill Conference (Reference 9, 61).
- [13] Gertsenshtein, M.E. and Pustovoi, V.I. (1963) “On the Detection of Low Frequency Gravitational Waves”, *Soviet Physics – JETP* **16**, 433.
- [14] Weiss, R. (1972) “Electromagnetically coupled broadband gravitational antenna”, *Research Laboratory for Electronics*, MIT, Quarterly Progress Report, No 105, 54.
- [15] Shoemaker, D., Schilling, R., Schnupp, L., Winkler, W., Maischberger, K., and Rüdiger, A. (1988). “Noise behavior of the Garching 30-meter prototype gravitational wave detector”, *Physical Review D* **38**, 423.
- [16] Drever, R.W.P. (1983). “Interferometric detectors for gravitational radiation”, *Gravitational Radiation*, NATO Advanced Physics Institute, Les Houches, ed N. Deruelle and T. Piran, (North Holland Publishing), 321.
- [17] Meers, B.J. (1988). “Recycling in laser-interferometric gravitational-wave detectors”, *Physical Review D* **38**, 2317.
- [18] NSF Bluebook (1983). https://emvogil-3.mit.edu/~weiss/ligo_history_documents/NSF_bluebook_1983.pdf
- [19] Caltech/MIT NSF proposal (1989). <https://dcc.ligo.org/LIGO-M890001/public/main/>

Przekład Piotr Chankowski