

# POSTĘPY FIZYKI



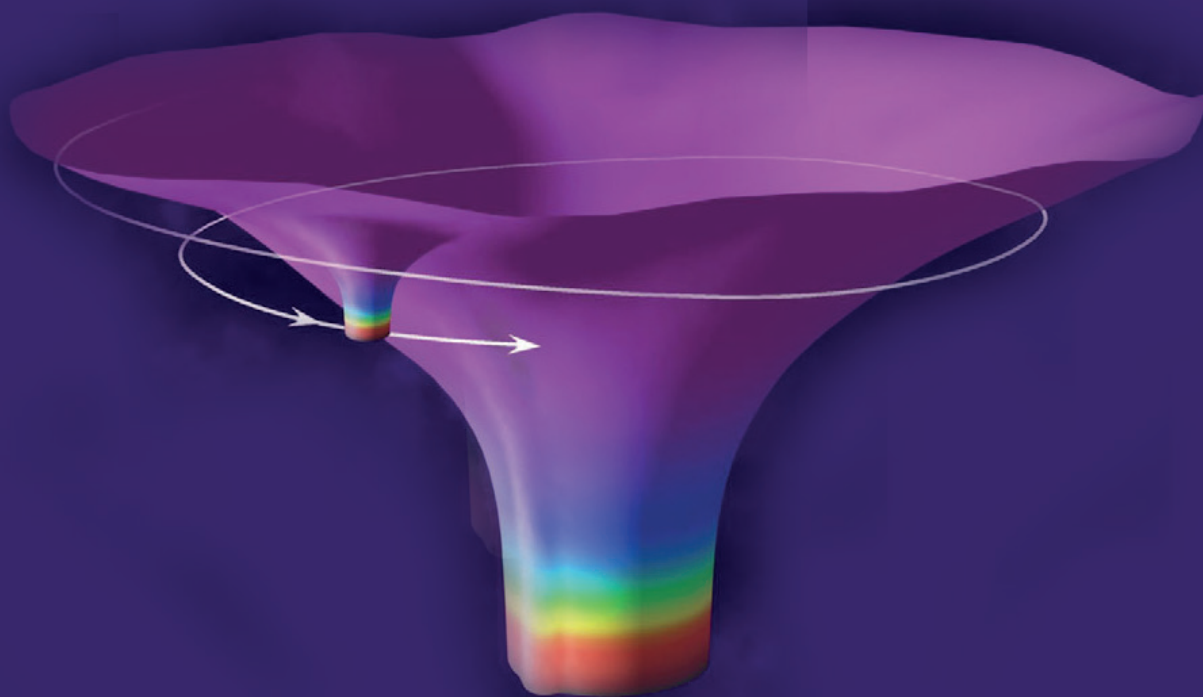
CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO  
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

**Zanim powstało Polskie Towarzystwo Fizyczne**  
Andrzej Kajetan Wróblewski

**O tworzeniu energetyki jądrowej w Polsce**  
Piotr Kociński

**Wykład noblowski 2017: LIGO i fale grawitacyjne III**  
Kip S. Thorne

3 / 2019  
TOM 70





## POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE (PTF) www.ptf.net.pl

### ZARZĄD GŁÓWNY

Leszek Sirko (prezes)  
Bogdan Kowalski (sekretarz generalny)  
Jan Grabski (skarbnik)  
Katarzyna Chałasińska-Macukow  
Dariusz Grech  
Bohdan Grządkowski  
Zbigniew Kąkol  
Stanisław Kistryn  
Mirostaw Łoś  
Maiej Maśka  
Beata Agnieszka Pietrewicz  
Józef Spątek  
Aneta Szczygielska  
Andrzej Ślebarski  
Zbigniew Trybuła

### BIURO ZARZĄDU

ul. Pasteura 5  
02-093 Warszawa  
tel. (+22) 553 28 56 pok.4.56 (4. piętro)  
e-mail: biuro@ptf.net.pl

### PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW

Krzysztof Szymański (Białystok)  
Adam Gadomski (Bydgoszcz)  
Artur Durajski (Częstochowa)  
Jarosław Rybicki (Gdańsk)  
Adam Michczyński (Gliwice)  
Janusz Gluza (Katowice)  
Małgorzata Wysocka-Kunisz (Kielce)  
Józef Spątek (Kraków) Jerzy Żuk (Lublin)  
Wibig (Łódź)  
Ewa Pawelec (Opole)  
Henryk Drozdowski (Poznań)  
Gawel Żyła (Rzeszów)  
Mirostaw Brozis (Stupsk)  
Mariusz P. Dąbrowski (Szczecin)  
Franciszek Rozpłoch (Toruń)  
Andrzej Wymotek (Warszawa)  
Ewa Dębowska (Wrocław)  
Van Cao Long (Zielona Góra)

## POSTĘPY FIZYKI (PF)

CSASOPIŚMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO  
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

czasopismo ukazuje się od 1949 roku

www.ptf.net.pl

### RADA REDAKCYJNA

Andrzej Kajetan Wróblewski (przewodniczący)  
Mieczysław Budzyński  
Witold Dobrowolski  
Henryk Drozdowski  
Józef Spątek  
Józef Szudy  
Arkadiusz Wójs

### KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

Krystyna Perzyńska (Białystok)  
Beata A. Pietrewicz (Bydgoszcz)  
Piotr Gębara (Częstochowa)  
Tomasz Wąsowicz (Gdańsk)  
Lucyna Grządziel (Gliwice)  
Zenon Kukuła (Katowice)  
Maciej Rybczyński (Kielce)  
Małgorzata Nowina-Konopka (Kraków)  
Janusz Filiks (Lublin)  
Janusz Kuliński (Łódź)  
Katarzyna Książek (Opole)  
Sławomir Mamica (Poznań)  
Jacek Fal (Rzeszów)  
Agnieszka Włodarkiewicz (Stupsk)  
Janusz Typek (Szczecin)  
Michał Pawlak (Toruń)  
Grzegorz Siudem (Warszawa)  
Bernard Jancewicz (Wrocław)  
Lidia Najder-Kozdrowska (Zielona Góra)

### REDAKCJA

Anna Szemberg (redaktor naczelna)  
Krzysztof Turzyński  
Wawrzyniec Kaszub

### ADRES

Redakcja „Postępy Fizyki”  
Wydział Fizyki UW  
Pasteura 5, pok. 2.80 (2.piętro), 02-093 Warszawa  
e-mail: postepy.fizyki@gmail.com

### INFORMACJE DLA AUTORÓW

Czekamy na przystępnie napisane artykuły przeglądowe i monograficzne. Układ pracy powinien odpowiadać formie przyjętej w czasopiśmie (patrz ostatnio wydane numery PF). Teksty złożone w systemie LATEX (plik źródłowy + pdf) lub w programie Word wraz z ilustracjami o rozdzielczości co najmniej 300 dpi w osobnych plikach prosimy nadsyłać e-mailem na adres: postepy.fizyki@gmail.com

Redakcja zastrzega sobie prawo do skracania i redagowania tekstów w tym wprowadzania niezbędnych zmian terminologicznych. Zgodnie z obowiązującym prawem autorskim Autorzy będą mogli dokonać korekty autorskiej artykułu przygotowanego do druku. Opublikowanie artykułu w PF wiąże się z nieodpłatnym udostępnieniem go na stronie internetowej PTF www.ptf.net.pl na podstawie licencji Creative Commons.

### PRENUMERATA

dla osób/instytucji niebędących członkami Polskiego Towarzystwa Fizycznego prenumeratę oferuje Garmond Press (www.garmondpress.pl).

Prenumeratory, którzy nie chcą korzystać z usługi pośrednika, proszeni są o wpłacenie odpowiedniej kwoty na główne konto bankowe PTF nr 74 1030 0019 0109 8530 0046 3033, a następnie przesłanie e-mailowo potwierdzenia wpłaty na adres postepy.fizyki@gmail.com podając, którego rocznika PF lub których numerów PF wpłata dotyczy oraz adres, na który czasopismo ma być przesyłane.

Pojedynczy numer PF kosztuje 12 zł, rocznik 48 zł. **Koszty wysyłki pokrywa zamawiający:** do 2 egz. – 7.00 zł, 3 do 5 egz. – 10 zł, przy zamówieniu powyżej 5 egz. prosimy o przystanie zamówienia na wyżej wskazany adres e-mail, a w odpowiedzi potwierdzimy przyjęcie zamówienia i podamy koszty wysyłki.

© Copyright by Polskie Towarzystwo Fizyczne  
Wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne  
Skład i łamanie: Fixpoint Krzysztof Rudnik  
Nakład: 850 egzemplarzy; ISSN 0032-5430

Szanowni Czytelnicy,

45 Zjazd Fizyków Polskich za nami. Było ciekawie, różnorodnie i bardzo dużo się działo. Krótkie sprawozdanie z tych kilku intensywnych dni w Krakowie przedstawiamy w Kronice. Pięknie dziękujemy organizatorom, z prof. Józefem Spałkiem na czele, za interesujący program, włożony trud i świetną organizację. Czynimy starania, by opublikować na łamach naszego czasopisma najciekawsze wystąpienia zjazdowe. Obecnie oddawany w Państwa ręce numer zawiera pozjazdowy, bardzo interesujący artykuł prof. Andrzeja Kajetana Wróblewskiego dotyczący fizyki polskiej w czasach przed powstaniem Polskiego Towarzystwa Fizycznego.

Wszystkich Państwa serdecznie zapraszamy w kwietniu 2020 roku do Warszawy na nadzwyczajny, jubileuszowy Zjazd Fizyków Polskich z okazji setnej rocznicy powstania Polskiego Towarzystwa Fizycznego; więcej informacji znajdziecie Państwo na wciąż rozbudowywanej stronie [100lat.ptf.net.pl/](http://100lat.ptf.net.pl/)

Redakcji bardzo zależy na tym, by *Postępy Fizyki* były czasopismem nas wszystkich, by jego zawartość odzwierciedlała to, czym żyją polscy fizycy, czym się zajmują, czym pasjonują, co ich interesuje, o czym rozmyślają, jakie mają plany i jakie sukcesy osiągają. Sami nie jesteśmy w stanie spełnić tego marzenia — potrzebujemy Was – naszych Czytelników. Oczekujemy na teksty, pomysły i uwagi krytyczne. Gorąco zapraszamy do współpracy z Redakcją. Prosimy o e-maile na adres [postepy.fizyki@gmail.com](mailto:postepy.fizyki@gmail.com) Wprawdzie mamy w oddziałach PTF korespondentów, którzy starają się informować nas o tym, co się dzieje na ich terenie, ale to za mało. Liczymy na szerszą współpracę, tak by *Postępy Fizyki* były pismem całego środowiska, by je integrowały i by każdy Czytelnik mógł tu znaleźć coś dla siebie.

Czytelników i sympatyków naszego czasopisma zachęcamy do korzystania z wersji elektronicznej *Postępów Fizyki* (w formacie pdf):

numery archiwalne [www.ptf.net.pl/pl/towarzystwo/dzialalnosc/postepy-fizyki/roczniki/](http://www.ptf.net.pl/pl/towarzystwo/dzialalnosc/postepy-fizyki/roczniki/)

numery bieżące [www.ptf.net.pl/pl/postepy-fizyki/](http://www.ptf.net.pl/pl/postepy-fizyki/)



Diagram zanurzenia pokazujący geometrię czasoprzestrzeni małej czarnej dziury krążącej wokół dużej, w płaszczyźnie równikowej tejże (dzięki uprzejmości NASA/JPLCaltech)

## Zanim powstało Polskie Towarzystwo Fizyczne

A. K. Wróblewski ..... 2

## O tworzeniu energetyki jądrowej w Polsce

P. Kociński ..... 11

## LIGO i fale grawitacyjne III

K. S. Thorne ..... 18

## Wspomnienie o profesorze Adamie Sobczewskim

Z. Patyk ..... 42

## Wspomnienie o profesorze Moiselu Isaakowiczu Kaganowie

J. Kowalski i T. Paszkiewicz ..... 44

Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego ..... 46

Nagrody Polskiego Towarzystwa Fizycznego ..... 3. strona okładki

## 45. ZJAZD FIZYKÓW POLSKICH

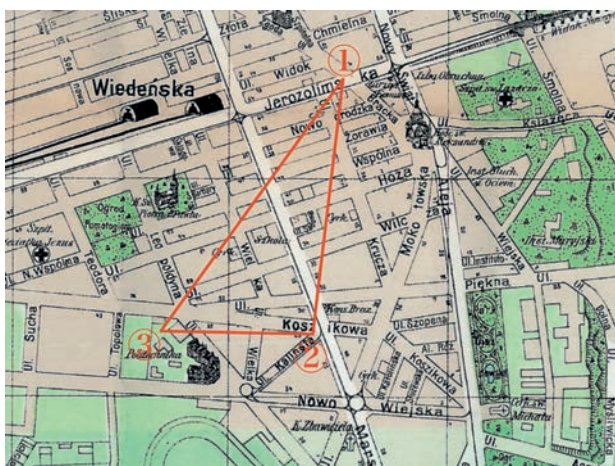
# Zanim powstało Polskie Towarzystwo Fizyczne\*

Andrzej Kajetan Wróblewski

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

**Streszczenie.** W artykule ukazano proces, który doprowadził do założenia Towarzystwa Fizycznego w Warszawie w styczniu 1919 roku. Zanim do tego doszło aktywność fizyków koncentrowała się wokół Koła Matematyczno-Fizycznego, Towarzystwa Kursów Naukowych i Pracowni Radiologicznej Towarzystwa Naukowego Warszawskiego, a od listopada 1915 roku także w odrodzonym uniwersytecie i politechnice w Warszawie. Przedstawiono głównych aktorów wydarzeń, dzięki którym w kwietniu 1920 roku powstało Polskie Towarzystwo Fizyczne. Setną rocznicę jego utworzenia będziemy obchodzili w kwietniu 2020 roku na Nadzwyczajnym Zjeździe Fizyków Polskich w Warszawie.

Na fali liberalizacji politycznej w zaborze rosyjskim po rewolucji 1905 roku odżyły działania w celu odzyskania szkoły polskiej, wprowadzenia języka polskiego i nowych programów nauczania. W Warszawie powstał projekt utworzenia Koła Matematyczno-Fizycznego. Inicjatorem tego przedsięwzięcia był niestrudzony Samuel Dickstein, matematyk, wychowanek Szkoły Głównej Warszawskiej, który od 1897 roku wydawał własnym nakładem „Wiadomości Matematyczne”, czasopismo zawierające istotne artykuły i materiały dotyczące głównie matematyki, lecz także w dużym stopniu fizyki.



Ryc. 1. Wycinek planu Warszawy z początku XX wieku. Zaznaczony jest trójkąt wiążący gmachy 1 – przy ul. Brackiej 18, 2 – przy ul. Kaliksta 8, 3 – przy ul. Koszykowej 75. W tych gmachach koncentrowała się działalność fizyków przed utworzeniem Polskiego Towarzystwa Fizycznego

W końcu marca 1906 roku odbyło się pierwsze zebranie kilkunastu zaproszonych osób. Dyskutowano nad najważniejszymi zadaniami Koła. Prezesem wybrano Dicksteina (pełnił tę funkcję aż do 1 lutego 1912 roku), wiceprezesem został Zygmunt Straszewicz, a sekretarzami Rafał Kornilowicz i Lucjan Zarzecki. Lista członków Koła szybko rosła i już 28 grudnia tegoż roku liczyła 77 nazwisk. Działalność Koła była intensywna, zebrania odbywały się co miesiąc w lokalu Towarzystwa „Uranja” przy ul. Brackiej 18, a sprawozdania ukazywały się jako dodatek do kolejnych numerów „Wiadomości Matematycznych” [1], aż do 1912 roku, kiedy to założono czasopismo „Wektor”, które stało się organem Koła. Organizowano także publiczne odczyty, w których przedstawiano popularne wyjaśnienia bieżących zagadnień i nowych odkryć.



Ryc. 2. Ulica Bracka na pocztówce wydanej w czasie okupacji niemieckiej 1915–1918. Budynek pod nr 18 to najwyższa budowla, nieco w prawo od środka fotografii. Od 1906 roku Była tam siedziba Koła Matematyczno-fizycznego oraz odbywały się zajęcia Towarzystwa Kursów Naukowych

\* Wykład plenarny wygłoszony podczas 45. ZJF, Kraków, 13–18.09.2019



Większość członków Koła Matematyczno-Fizycznego stanowili nauczyciele, przeważnie matematyki, ale było także wielu fizyków, jak np.: Wiktor Biernacki, Stanisław Bouffał, Jan Kazimierz Danysz, Wanda Drege, Waław Dziewulski, Władysław Gosiewski, Marian Grotowski, Stanisław Kalinowski, Stanisław Kramsztyk, Stanisław Landau, Matylda Meyer (potem Wertensteinowa), Stefan Moycho, Hipolit Piwnikiewicz, Mieczysław Pożaryski, Maria Sadzewiczowa, Jan Sianożęcki-Wojnicz, Ksawery Sporzyński, Waław Werner, Ludwik Wertenstein, Feliks Zagrodzki, Franciszek Zienkowski. Koło było ważnym miejscem wymiany poglądów, gdyż umożliwiało przedstawianie i dyskusowanie wyników badań, własnych i obcych. Dyskusje przyczyniły się do ulepszania programów nauczania matematyki i fizyki w szkołach. Wśród omawianych tematów z fizyki były np. referaty Pożaryskiego o nauczaniu elektryczności i magnetyzmu w szkołach średnich, Landaua o zjawisku Zeemana i o pomiarach Hale'a pola magnetycznego plam słonecznych, Biernackiego o wadach programu fizyki w szkołach. Przypuszczalnie to właśnie dyskusje i kontakty członków Koła przyczyniły się do zbiorowego opracowania dziejów fizyki [2]. W sumie przez Koło przewinęło się aż 135 osób, w tym 12 kobiet. Członkami byli także m.in. Władysław Tatariewicz, matematycy Waław Sierpiński i Włodzimierz Stożek oraz astronom Tadeusz Banachiewicz [3].

Koło Matematyczno-Fizyczne można na pewno uważać za prekursora Towarzystwa Fizycznego powstałego w Warszawie w 1919 roku, ponieważ aż 10 członków Koła było potem wśród członków założycieli tego Towarzystwa (Wanda Drege, Waław Dziewulski, Marian Grotowski, Stanisław Kalinowski, Stanisław Landau (Ziemecki), Matylda Meyer (Wertensteinowa), Mieczysław Pożaryski, Waław Werner, Ludwik Wertenstein, Franciszek Zienkowski).

Członkowie Koła wygłaszali publiczne odczyty poświęcone fizyce i matematyce. Odbywały się one w sali Stowarzyszenia Nauczycielstwa Polskiego (Al. Jerozolimskie 29), w sali „Uranji” (ul. Bracka 18), w sali Szkoły Wawelberga i Rotwanda (ul. Mokotowska 6). Oto przykłady z 1912 roku: 1 kwietnia Waław Werner mówił o doświadczalnym nauczaniu fizyki, następnego dnia ten temat kontynuował Stanisław Landau, natomiast 3 i 4 kwietnia Mieczysław Pożaryski przedstawiał postęp nauki o elektryczności.

Tradycję wykładów publicznych w pierwszych miesiącach roku przejęły potem kolejno Towarzystwo Fizyczne w Warszawie oraz Polskie Towarzystwo Fizyczne.

W Warszawie działała od 1906 roku jedyna całkowicie niezależna polska wyższa uczelnia. Jak podkreślali

jej twórcy, otrzymała ona „dla powodów od nas niezależnych, jak się mawiało, niewyraźne miano Towarzystwo Kursów Naukowych.” [4]. Miała ona początkowo cztery wydziały: Humanistyczny, Techniczny, Rolniczy (od 1913 roku – Ogrodniczy) i Matematyczno-Przyrodniczy. W 1915 roku ten ostatni podzielono na dwie części: Wydział Przyrodniczy i Wydział Fizyczno-Matematyczny. W różnych okresach fizykę w tej uczelni wykładali: Wiktor Biernacki, Jan Kazimierz Danysz, Marian Grotowski, Ludwik Silberstein, Józef Kowalski-Wierusz, Ludwik Wertenstein i Bruno Winawer. Matematykę wykładali m.in. Samuel Dickstein i Waław Sierpiński, a astronomię – Tadeusz Banachiewicz.

Uczelnia nie miała wtedy własnego budynku. Do wykładów i ćwiczeń wykorzystywano rozmaite lokale: Muzeum Przemysłu i Rolnictwa przy ul. Krakowskie Przedmieście, Szkoła im. Wawelberga i Rotwanda, Stowarzyszenie Techników, Szkoła im. Staszica, Towarzystwo „Uranja” (Bracka 18), Szkoła Jeżewskiego, Szkoła Rontalera i inne.

W Towarzystwie Kursów Naukowych podjęto działania zmierzające do utworzenia polskich uczelni, powołując specjalną komisję do Urzędnienia Szkół Wyższych. Pracowano w niej nad projektami statutu uczelni i programów nauczania.

W 1907 roku powstało w Warszawie Towarzystwo Naukowe Warszawskie (TNW). Wiceprezes Towarzystwa hrabia Józef Potocki zakupił w 1911 budynek szkoły Rontalera przy ul. Kaliksta 8, obecnie Śniadeckich 8, i ofiarował go Towarzystwu. W sierpniu 1913 roku utwo-



Ryc. 3. Budynek przy ul. Kaliksta 8 (obecnie Śniadeckich 8) według przedwojennej fotografii. Od 1911 roku była to siedziba Towarzystwa Naukowego Warszawskiego, a od 1913 roku mieściła się tam Pracownia Radiologiczna TNW im. Mirosława Kernbauma

rzono tam Pracownię Radiologiczną TNW im. M. Kernbauma. Specjalna delegacja TNW udała się do Paryża, aby uprosić Marię Skłodowską-Curie do objęcia kierownictwa tego laboratorium. Nie mogła ona jednak wtedy opuścić Paryża, więc przysłała do Warszawy swoich dwóch najzdolniejszych asystentów: Jana Kazimierza Danysza i Ludwika Wertensteina, a sama obiecała kierować zdalnie ich poczynaniami.



Ryc. 4. Jan Kazimierz Danysz

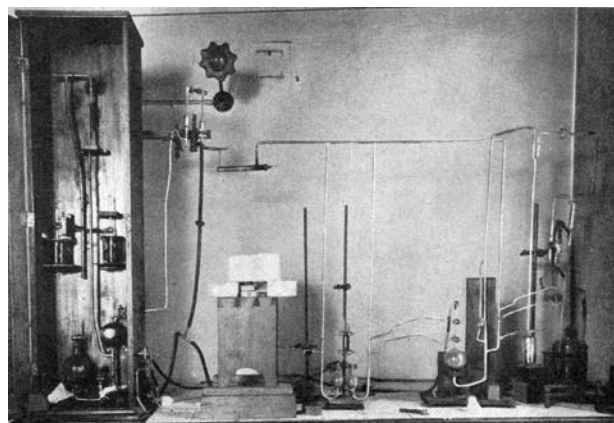
Jan Kazimierz Danysz (1884–1914) był synem bakteriologa Jana Danysza, który wyemigrował do Paryża z zaboru pruskiego [5]. Ukończył szkołę średnią w Paryżu, potem kształcił się w École Municipale de Physique et Chimie Industrielle (Szkoła Fizyki i Chemii Przemysłowej miasta Paryża) pod kierunkiem Piotra Curie, którego asystentem został po uzyskaniu (1905) dyplomu inżyniera. Następnie ukończył Wydział Fizyczno-Matematyczny Sorbony i został asystentem Marii Skłodowskiej-Curie. Zajął się badaniem energii promieni beta wysyłanych przez pierwiastki rodziny radu. W 1911 roku wynalazł i zbudował pierwszy spektrometr beta umożliwiający dokładne pomiary energii elektronów [6].

Ludwik Wertenstein (1887–1945) – syn warszawskiego lekarza [7] – ukończył w 1904 roku II Gimnazjum przy ul. Nowolipki i rozpoczął studia na Cesarskim Uniwersytecie Warszawskim, ale został stamtąd wkrótce wydalony za udział w antyrządowym wiecu studenckim. Przez kilka miesięcy pracował w pracowni fizycznej Muzeum Przemysłu i Rolnictwa przy ul. Krakowskie Przedmieście, a w 1905 roku wyjechał do Paryża na studia fizyczne na Sorbonie. W 1908 roku uzyskał licencjat nauk fizycznych i został asystentem Marii Skłodowskiej-Curie. Pracował w jej laboratorium przez 5 lat zajmując się głównie odrzutem atomu promieniotwórczego pod wpływem emisji z niego cząstki alfa. W 1913 roku uzyskał doktorat.



Ryc. 5. Ludwik Wertenstein

Po zaopatrzeniu laboratorium w niezbędne przyrządy Danysz i Wertenstein rozpoczęli badania. Zaczęli od bombardowania atomów cząstkami alfa oraz wyznaczania ładunku promieni beta. W czerwcu 1914 roku obaj badacze przedstawili wyniki badań na temat możliwości oddziaływania za pomocą promieni na szybkość przemian promieniotwórczych [8].



Ryc. 6. Aparatura do otrzymywania emanacji radu w Pracowni Radiologicznej TNW

Tymczasem zbliżała się wojna światowa. Po ogłoszeniu we Francji mobilizacji Danysz, jako urodzony w Paryżu obywatel francuski, wrócił w sierpniu 1914 roku do Paryża. Niestety już na początku wojny, w listopadzie 1914 roku został śmiertelnie ranny na froncie w okolicach Roubaix. Wiadomość o śmierci utalentowanego, zaledwie trzydziestoletniego uczonego wstrząsnęła Warszawą [9]. Wspomnienie z jego portretem zamieścił nawet „Tygodnik Ilustrowany” (nr 47, s. 787). Sprawozdanie z ostatnich badań Danysza wydał w czerwcu 1916 roku Wertenstein [10].

Po śmierci Danysza Wertenstein był faktycznym kierownikiem Pracowni Radiologicznej TNW. Od 1915 roku był profesorem w Towarzystwie Kursów Naukowych (od 1919 roku Wolnej Wszechnicy Polskiej) w Warszawie.

Podczas wojny i okupacji niemieckiej (1915–1918) Pracownia Radiologiczna była miejscem spotkań fizyków, którzy przebywali w Warszawie. Wygłaszano tam też referaty naukowe na bardzo aktualne tematy. Oto ich lista z lat 1916–1917 [11]: Stanisław Sachs – O teorii kwantów, Bruno Winawer – Z badań nad promieniami Röntgena, Stanisław Glixelli – O elektroosmozie, Edward Bekier – O potencjale elektrochemicznym stopów, Kazimierz Fajans – O pierwiastkach izotopowych, Kazimierz Fajans – Nowa metoda oznaczania ciężaru atomowego pierwiastków izotopowych, Ludwik Wertenstein – Spór o istnienie ładunku elementarnego, Ludwik Wertenstein – Badania nad interferencją promieni Röntgena, Feliks Joachim Wiśniewski – Teoria przewodnictwa elektrycznego i cieplnego metali, Józef Kowalski-Wierusz – O promieniowaniu nadfioletowym, Stanisław Landau – Widma Röntgenowskie pierwiastków chemicznych, Hilary Lachs – O roztworach koloidalnych, Edward Bekier – O teorii alotropowej pasywności metali, Józef Kramsztyk – O teorii budowy atomu Bohra, Wertenstein – O gazach bardzo rozrzedzonych, Kramsztyk i Wertenstein – O nowych dziedzinach teorii kwantów.

W listopadzie 1915 roku po wyparciu Rosjan z Warszawy okupacyjne władze niemieckie wydały zgodę na utworzenie polskojęzycznych uczelni. Uniwersytet i Politechnika nie były jednak autonomiczne, lecz musiały wypełniać zalecenia niemieckich urzędników, a rektorów mianował niemiecki gubernator [12]. Warunki funkcjonowania obu uczelni w pierwszym okresie były bardzo złe. Gmach główny rosyjskiego Instytutu Politechnicznego został zajęty przez wojsko, a do dyspozycji Politechniki oddano tylko gmachy: fizyczny i chemiczny oraz lokal biblioteki. Uniwersytet dysponował tylko pomieszczeniami w Pałacu Kazimierzowskim i sąsiednich budynkach.

Gabinet Fizyczny Uniwersytetu Cesarskiego został w czerwcu 1915 roku wywieziony do Rosji podczas ewakuacji uczelni spowodowanej zbliżaniem się frontu do Warszawy. Podobny los spotkał niemal całą aparaturę z Instytutu Politechnicznego. Na szczęście Rosjanie zdążyli wywieźć tylko niewielką część przyrządów z tamtejszej pracowni studenckiej, którą znakomicie zorganizował Wiktor Biernacki. Pracownia ta służyła więc studentom obu uczelni aż do czasu uruchomienia niezależnej pracowni fizycznej na uniwersytecie.

Sytuacja kadrowa była rozpaczliwa. Spośród wykładowców fizyki w Towarzystwie Kursów Naukowych w Warszawie pozostał tylko Marian Grotowski. Urodził się on w 1882 roku w Rawie Mazowieckiej [13]. Po ukończeniu w 1901 roku III Gimnazjum w Warszawie rozpoczął studia na Wydziale Matematyczno-Fizycznym Cesarskiego Uniwersytetu Warszawskiego. W 1904 roku

został stamtąd wydalony za udział w strajku studenckim i wyjechał do Szwajcarii na uniwersytet we Fryburgu, gdzie zajmował się zjawiskiem fotoelektrycznym i fosforescencją i był asystentem w katedrze fizyki doświadczalnej Józefa Kowalskiego. W 1909 roku uzyskał stopień doktora na podstawie rozprawy *L'effet photoelectrique et la phosphorescence* (Paryż, 1910).

Po powrocie do Warszawy Grotowski wykładał fizykę najpierw w szkole średniej, a następnie, od 1911 roku, w Towarzystwie Kursów Naukowych. Opracował wtedy obszerną historię badań ciepła do dwutomowego dzieła zbiorowego *Z dziejów rozwoju fizyki* [14].

Na apel władz organizowanych uczelni w 1915 roku przyjechał do Warszawy z uniwersytetu we Fryburgu w Szwajcarii Józef Kowalski (1866–1927) [15]. Pochodził on z Puław i po ukończeniu gimnazjum w Warszawie został studentem Wydziału Prawa Uniwersytetu Cesarzowskiego. Już po roku przeniósł się jednak na uniwersytet w Getyndze, gdzie pod wpływem doskonałych wykładów sławnego matematyka Felixa Kleina postanowił studiować nauki ścisłe. Kształcił się więc dalej pod kierunkiem wybitnych fizyków: Woldemara Voigta w Getyndze, Augusta Kundta w Berlinie i Wilhelma Conrada Röntgena w Würzburgu. W 1892 roku został docentem na uniwersytecie w Bernie. Wyjeżdżał stamtąd kilkakrotnie do Paryża, by uzupełnić wiedzę z chemii i elektrotechniki. Przebywał m.in. w École Municipale de Chimie et de Physique, gdzie zatrudniony był Pierre Curie. Właśnie podczas wieczornego przyjęcia w paryskim mieszkaniu Kowalskiego Maria Skłodowska spotkała swego przyszłego męża.

W 1894 roku Kowalski przyjął zaproszenie do objęcia katedry fizyki na uniwersytecie we Fryburgu. Otrzymał też zadanie zorganizowania tam wydziału nauk matematycznych i przyrodniczych. Swymi działaniami we Fryburgu zdobył szacunek władz. Był wybierany na stanowisko rektora uniwersytetu, ponadto był m.in. prezesem szwajcarskiego towarzystwa fizycznego.

Głównym obszarem badań Kowalskiego stała się w tym okresie luminescencja. Opublikował na ten temat szereg pionierskich prac. Za badania fosforescencji w niskich temperaturach uzyskał w 1912 roku nagrodę uniwersytetu Harvarda. Warto także wymienić doświadczenia nad otrzymywaniem kwasu azotowego z powietrza w łuku prądu zmiennego wysokiego napięcia i wielkiej częstotliwości, wykonane razem z ówczesnym jego asystentem Ignacym Mościckim (późniejszym prezydentem Rzeczypospolitej w latach 1926–1939). Po wybuchu I wojny światowej Kowalski został jednym z założycieli Komitetu Opieki nad Polakami w Vevey, wraz z Ignacym Paderewskim, Henrykiem Sienkiewiczem i innymi.

Pomieszczenia w gmachu fizycznym Politechniki służyły początkowo za miejsce wykładów i prac naukowych dla Zakładów Fizycznych Uniwersytetu i Politechniki. Wykłady fizyki doświadczalnej podzielono w ten sposób, że profesor Kowalski-Wierusz prowadził je dla Wydziału Chemicznego Politechniki oraz Wydziałów Medycznego i Filozoficznego Uniwersytetu, zaś wykłady dla studentów Wydziałów Budowy Maszyn i Elektrotechnicznego oraz Inżynierii Budowlanej Politechniki objął Marian Grotowski, któremu przyznano stanowisko zastępcy profesora. Grotowski wykładał także wstęp do fizyki teoretycznej na Uniwersytecie w roku akademickim 1916/17.

W tym samym okresie Kowalski-Wierusz obok pięciogodzinnego podstawowego wykładu fizyki, miał też dla studentów UW wykład: Niektóre zagadnienia z dziedziny elektryczności (2 godz.), prowadził Seminarium fizyczne (1 godz.) i zawiadował prowadzonymi przez asystentów zajęciami praktycznymi z fizyki (6 godz.).

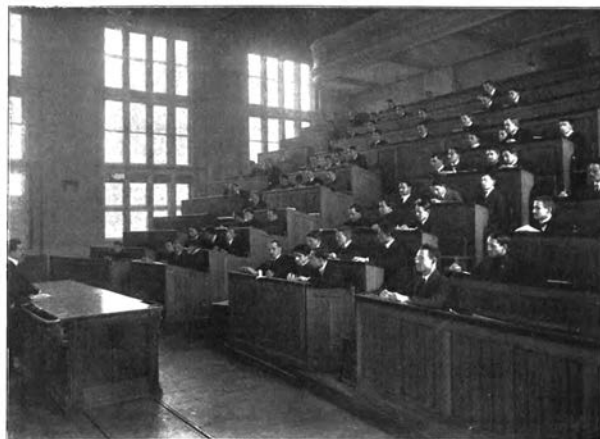
Od 1918 roku wprowadzony został, jako nieobowiązkowy, wykład fizyki praktycznej najpierw dla Wydziału Chemii, a następnie także dla Wydziału Budowy Maszyn i Elektrotechniki Politechniki. Wykład ten prowadził Waław Werner [16]. Pochodził on z Warszawy i po ukończeniu szkoły realnej studiował najpierw elektrotechnikę na politechnice w Darmstadt, lecz szybko zmienił kierunek studiów na fizykę, najpierw na UJ, potem na uniwersytecie w Getyndze (1904–1908) i we Fryburgu (1808–1809), gdzie uzyskał doktorat na podstawie rozprawy *O wpływie ciągłych odkształceń na przewodnictwo cieplne i elektryczne metali*. Od 1915 roku pracował w Zakładzie Fizyki PW jako starszy asystent, potem adiunkt.

W roku akademickim 1915/16 uruchomiono wyłącznie zajęcia pierwszego roku. Do wykładów z fizyki doświadczalnej nadawała się wtedy tylko jedyna sala wykładowa Zakładu Fizycznego Politechniki przy ul. Ko-



Ryc. 7. Gmach fizyki przy ul. Koszykowej 75 – od 15 listopada 1915 roku siedziba Zakładów Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego i Politechniki Warszawskiej

szykowej 75. Była ona jednak niewielka i nie mogła pomieścić wszystkich studentów [17]. Kowalski-Wierusz wykładał we wtorki, środy i czwartki, ale musiał powtarzać ten sam wykład dwa razy: w godzinach 9.30–11.00 dla studentów o nazwiskach zaczynających się na A–G i na M–Z, a w godzinach 11.30–13.00 dla studentów o nazwiskach na H–Ł [18]. Wraz z Grotowskim prowadził też co drugi wtorek, w godzinach 20.00–21.00, tzw. kółkiem z fizyki w jednej z sal Pałacu Kazimierzowskiego.



GABINET FIZYCZNY W POLITECHNICE. WYKŁAD PROF. MARIANA GROTOWSKIEGO. Fot. Szymon Wiśnik

Ryc. 8. Wykład Mariana Grotowskiego w sali wykładowej Gmachu Fizyki PW w listopadzie 1915 roku

Pierwszymi asystentami w Zakładzie Fizycznym UW, mieszczącym się w Gmachu Fizyki PW przy ul. Koszykowej 75 byli wówczas: Józef Kramsztyk, Stanisław Sachs oraz Kazimierz Bogacki. Taki sam skład był w roku następnym.

Pierwszymi asystentami w mieszczącym się tamże Zakładzie Fizycznym PW byli: Wiesław Malinowski, Hipolit Piwnikiewicz, Irena Wasiutyńska, Waław Werner, Bruno Winawer oraz asystent-wolontariusz Kazimierz Bogacki [19].

Największe osiągnięcia z tego grona miał Winawer (1883–1944), który po ukończeniu warszawskiego gimnazjum im. Górskiego odbył studia fizyczne na uniwersytecie w Heidelbergu i tam w 1909 roku uzyskał stopień doktora na podstawie rozprawy *Dielektrische Untersuchungen insbesondere an Erdalkaliphosphoren*. W latach 1909–1911 był asystentem Pietera Zeemana na uniwersytecie w Amsterdamie, a w latach 1912–1914 pracował na uniwersytecie we Frankfurcie nad Menem. Opublikował kilka prac na temat rozszczepienia magnetycznego linii widmowych oraz wyładowań elektrycznych. Jednak w styczniu 1921 roku zrezygnował z pracy na PW i poświęcił się pracy literackiej. Utwory sceniczne, komedie i powieści jego autorstwa cieszyły się sporym powodzeniem. Swoje wykształcenie ściśle Winawer wykorzystywał popularyzując osiągnięcia fizyki w licznych artykułach popularnonaukowych oraz audycjach radiowych.



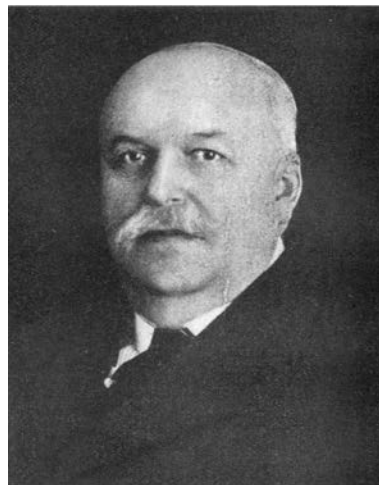
W Heidelbergu studiowali także Stanisław Sachs (doktorat w 1909 roku) oraz Józef Kramsztyk (doktorat w 1914 roku). Kazimierz Bogacki był absolwentem politechniki w Darmstadt, a Wiesław Malinowski ukończył uniwersytet w Odessie. Hipolit Piwnikiewicz był absolwentem Szkoły Wawelberga i Rotwanda i miał już publikacje w „*Physikalisches Zeitschrift*”, natomiast Irena Wasiutyńska była absolwentką UJ i rozpoczęła pracę nad doktoratem pod kierunkiem Mariana Smoluchowskiego, lecz wybuch działań wojennych odciął ją od Krakowa. Pierwsi asystenci uniwersytetu i politechniki nie byli więc nowicjuszami w fizyce.

Dopiero w maju 1916 roku uruchomione zostały ćwiczenia praktyczne pod kierunkiem Waclawa Wenera przy współudziale asystentów. Można było odtworzyć pracownię zasadniczo w tej postaci, jaką jej nadał twórca całego Zakładu, Wiktor Biernacki, ponieważ w Warszawie pozostał niemal cały inwentarz pracowni studenckiej oraz podręcznik fizyki praktycznej jego autorstwa.

Kowalski-Wierusz objął także funkcję prorektora Uniwersytetu Warszawskiego i z wielką energią zajął się wyposażeniem w instalacje i aparaturę budynku przy ul. Hożej 69, który zaczęto budować w 1913 roku z przeznaczeniem dla jednego z gimnazjów rosyjskich [20]. Wybuch wojny światowej spowodował wstrzymanie prac budowlanych. Po odejściu Rosjan z Warszawy gmach ten wprawdzie już stał, ale miał tylko gołe mury i ściany. Miał teraz pomieścić uniwersytecki Zakład Fizyki. Józef Kowalski-Wierusz otrzymał z Komitetu Obywatelskiego znaczną sumę 10 000 rubli [21] i mimo trwających działań wojennych zdołał założyć instalacje elektryczne i sprowadzić sporo przyrządów, zwłaszcza z optyki, ponieważ miał zamiar prowadzić nadal badania luminescencji, a także sterylizacji wód przy użyciu promieni nadfioletowych. Pomogły mu w tym jego rozległe znajomości i stosunki za granicą.

W pierwszych latach istnienia Uniwersytetu i Politechniki uczelnie te miały mniej studentów od Towarzystwa Kursów Naukowych, które było największą warszawską uczelnią, prowadzącą ponadto wszystkie lata studiów [22].

Towarzystwo Fizyczne w Warszawie postanowiono założyć w dniu 13 stycznia 1919 roku uchwałą zebrania fizyków warszawskich w Zakładzie Fizycznym Politechniki Warszawskiej, zwołanego przez Mariana Grotowskiego, Stanisława Kalinowskiego i Józefa Kowalskiego-Wierusza [23]. Już 28 stycznia przyjęto statut i dokonano wyboru zarządu w składzie: Józef Kowalski-Wierusz (prezes), Stanisław Kalinowski (wiceprezes), Waclaw Dziewulski (sekretarz), Mieczysław Pożaryski (skarbnik), Marian Grotowski (członek), Waclaw Werner i Zofia Kowalczevska (zastępcy?).



Ryc. 9. Józef Kowalski-Wierusz



Ryc. 10. Marian Grotowski



Ryc. 11. Stanisław Kalinowski



Ryc. 12. Wacław Dziewulski



Ryc. 13. Mieczysław Pożaryski



Ryc. 14. Wacław Werner

Stanisław Kalinowski [24] urodził się w 1873 roku w Lebedynie, w guberni kijowskiej. Ukończył gimnazjum w Kijowie ze złotym medalem, a potem studiował na Wydziale Matematyczno-Fizycznym uniwersytetu w tym mieście. W 1896 roku został na rok asystentem przy katedrze fizyki. Po przyjeździe do Warszawy nie przyjął proponowanego mu stanowiska asystenta w Instytucie Politechnicznym, ponieważ uczelnia ta była zarządzana przez Rosjan. Utrzymywał się z lekcji w prywatnych polskich szkołach średnich oraz wykładał mechanikę w Szkole Wawelberga i Rotwanda. Wkrótce podjął się organizacji „gabinetu fizycznego” przy Muzeum Przemysłu i Rolnictwa. W 1906 roku zorganizował tam Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, który stanowił zaczątek Towarzystwa Kursów Naukowych, stając się pierwszym wydziałem tej uczelni.

Wacław Dziewulski urodził się w 1882 roku w Warszawie, wstąpił na Wydział Mechaniczny rosyjskiego Instytutu Politechnicznego w Warszawie, lecz po wybuchu strajku w 1905 roku wyjechał do Getyngi. Tam w 1912 roku uzyskał doktorat na podstawie badań zjawiska Kerra. Od 1913 roku był asystentem Mariana Smoluchowskiego na UJ, ale wybuch wojny zastał go w Warszawie. W 1916 roku został asystentem Kowalskiego-Wierusza na UW [25].

Mieczysław Pożaryski urodził się w 1875 roku w Warszawie. Ukończył Instytut Technologiczny w Petersburgu oraz wydział elektryczny Politechniki w Darmstadt. Wykładał w Szkole Wawelberga i Rotwanda. Specjalizował się w elektrotechnice, ale fascynowała go fizyka. Był od 1906 roku aktywnym członkiem Koła Matematyczno-Fizycznego, a na początku 1915 roku został nawet wybranym prezesem Koła. Działał w nim jako członek podkomisji programowej fizycznej opracowującej programy nauczania w szkołach).



Ryc. 15. Zofia Kowalczevska

Zofia Kowalczevska [26] urodziła się w 1889 roku w Zgierzu. Odebrała studia fizyki i matematyki na uniwersytecie w Getyndze. Po powrocie do Warszawy od 1915 roku była nauczycielką fizyki i matematyki na pensji Jadwigi Sikorskiej (przekształconej potem w Gimnazjum Żeńskie im. Królowej Jadwigi).

Tymczasem w 1919 roku Ministerstwo Wyznań Religijnych i Oświecenia Publicznego niepodległej Polski zarządziło nowe obsadzenie katedr wyższych uczelni. W kwietniu Kowalski-Wierusz, który był zatrudniony tymczasowo jako profesor na Uniwersytecie Warszawskim, otrzymał mianowanie na profesora Politechniki Warszawskiej. Nie widząc możliwości prowadzenia w tej uczelni zaplanowanych badań optycznych, do których się przygotowywał, postanowił zrezygnować z pracy na Politechnice Warszawskiej od 1 czerwca 1919 roku. Przyjął propozycję premiera Ignacego Paderewskiego, przeszedł do służby dyplomatycznej i wyjechał z Polski, by objąć funkcję ambasadora Polski w Watykanie.

Od lipca 1919 roku ster zarządu Towarzystwa Fizycznego przejął Kalinowski. We wrześniu 1919 roku z Warszawy wyjechał Dziewulski, który otrzymał nominację na stanowisko profesora fizyki w powstającym Uniwersytecie Stefana Batorego w Wilnie.

Towarzystwo Fizyczne rozwinęło ożywioną działalność. Odbywano posiedzenia naukowe i zebrania poświęcone sprawom organizacyjnym, a także wycieczki. Towarzystwo liczyło 58 członków, a jego najbardziej aktywnymi członkami byli, poza wymienionymi członkami Zarządu, Feliks Joachim Wiśniewski, Witold Pogorzelski, Stanisław Landau, Edward Stenz, Czesław Witoszyński oraz Ludwik Wertenstein i Aniela Muszkátówna z Pracowni Radiologicznej TNW.

Do 1 lutego 1920 roku Towarzystwo Fizyczne odbyło 8 posiedzeń, na których załatwiano sprawy bieżące i wygłaszano referaty naukowe. O ówczesnych zainteresowaniach fizyków i „gorących” tematach świadczą tytuły wystąpień: *O wyładowaniach bezelektrodowych w parach i gazach* (Kowalski-Wierusz), *O pewnym zagadnieniu z teorii promieniowania* (Pogorzelski), *O absorpcji wtórnych promieni Röntgena* (Wiśniewski), *O anomalnym przebiegu linii izomagnetycznych na ziemiach polskich* (Kalinowski), *O stosowaniu elektrometru do badań fluktuacji promieniotwórczych* (Wertenstein i Muszkátówna), *O laboratoriach aerodynamicznych* (Witoszyński), *Przyczynek do teorii równowagi masy gazowej* (Pogorzelski), *O lampkach katodowych w zastosowaniu do radiotelegrafii* (Pożaryski), *Wpływ dysocjacji na rezonancję optyczną w gazach* (Landau i Stenz), *Teoria ogólna budowy atomu* (Wiśniewski), *Polaryzacja dielektryków* (Pogorzelski).

Poza kolejnymi zebraniem Zarządu, poświęconymi sprawom bieżącym, odbyły się specjalne zebrania:

1. łącznie z kierownikami zakładów fizycznych w Warszawie w sprawie wspólnej prenumeraty czasopism, 2. z przedstawicielami Towarzystwa Wiedzy Wojskowej dla omówienia udziału fizyków w pracy dla wojska, 3. z zaproszonymi prelegentami w celu zorganizowania cyklu odczytów publicznych pod wspólnym tytułem „Budowa materii”. Poza tym odbyły się wycieczki w celu obejrzenia urządzeń na lotnisku Mokotowskim oraz zwiedzenia stacji radiotelegraficznej w Cytadeli.

Bardzo udaną inicjatywą był cykl wykładów publicznych, które Towarzystwo Fizyczne zorganizowało w lutym i marcu 1920 roku. Prelegentami byli kolejno: Mieczysław Pożaryski – *Jony i elektrony*, Waclaw Werner – *Doświadczalne podstawy atomistyki*, Stanisław Kalinowski – *Promienie Röntgena*, Ludwik Wertenstein – *Pierwiastki promieniotwórcze i ich promieniowanie*, Stanisław Sachs – *Teoria promieniowania i kwanta energii*, Stefan Pieńkowski – *Zjawiska optyczne w związku z budową materii*, Zofia Kowalczevska – *Jonizacja gazów w związku z budową materii*, Henryk Lachs – *Pierwiastki promieniotwórcze, ich własności chemiczne*, Witold Pogorzelski – *Dynamika elektronu i teoria względności*. Przeciętna frekwencja na tych wykładach wynosiła 300 osób!

Od początku istnienia Towarzystwo Fizyczne w Warszawie prowadziło działania zmierzające do rozszerzenia działalności na całą Polskę. Mimo trwającej wciąż wojny na wschodzie działania te zakończyły się sukcesem. Zjazd Organizacyjny Polskiego Towarzystwa Fizycznego (PTF) odbył się 11 kwietnia 1920 roku w jednej z sal Gmachu Fizyki Politechniki Warszawskiej. Na Nadzwyczajnym Zjeździe Fizyków Polskich w Warszawie w kwietniu 2020 roku będziemy obchodzili stulecie tego wydarzenia.

## Literatura

- [1] *Sprawozdania z posiedzeń Koła Matematyczno-Fizycznego w Warszawie*, red. przez L. Zarzeckiego. Rok 1906/7. Dodatek do tomu X „Wiadomości Matematycznych” i w tomach kolejnych.
- [2] *Z dziejów rozwoju fizyki*. Wypisy z dzieł oryginalnych zebrali i przełożyli M. Grotowski, St. Landau, M. Sądzewiczowa i W. Werner, Warszawa, t.1 1913, t.2 1914.
- [3] W. Piotrowski, *Koło Matematyczno-Fizyczne w Warszawie 1905–1915*, Przegląd Historyczno-Oświatowy 32, nr 1, 39–54 (1989); K. Wuczyńska, *Koło Matematyczno-Fizyczne w Warszawie a reforma nauczania matematyki i fizyki na początku XX wieku*, Roczniki Polskiego Towarzystwa Matematycznego, Seria II: Wiad. Mat. 20, 183–188 (1978).

- [4] *Dziesięciolecie Wolnej Wszechnicy Polskiej. Sprawozdanie z działalności Towarzystwa Kursów Naukowych 1906–1916*, praca zbiorowa pod red. Stanisława Orłowskiego, Warszawa 1917; [Towarzystwo Kursów Naukowych zmieniło nazwę na Wolna Wszechnica Polska dopiero w 1919.]
- [5] I. Stroński, *Jan Kazimierz Danysz*, *Postępy Fizyki* 5, 473–480 (1954).
- [6] J. Danysz, *Sur les rayons beta de la famille du radium*, C. 153, 339–341, 1066–88 (1911).
- [7] W. Billig, *W dwudziestą rocznicę śmierci Ludwika Wertensteina*, *Postępy Fizyki* 16, nr 6, 627–629 (1935).
- [8] J. Danysz i L. Wertenstein, *Próba oddziaływania za pomocą promieni  $\alpha$  na szybkość przemian promieniotwórczych*, *Sprawozdania TNW* 7, 546–555 (1914); ci sami: *Essai d'accélération des transformations radioactives*, C. 161, 784 (1915).
- [9] J. J. Boguski, *Jan Kazimierz Danysz*, *Sprawozdania TNW* 7, 661–663 (1914); L. Wertenstein, *Prace naukowe ś.p. Jana Danysza*, tamże, 664–672 (1914).
- [10] L. Wertenstein, *Ś.p. Jana Danysza praca ostatnia: ładunek promieni beta Ra B i C*, *Sprawozdania TNW* 9, 929–952 (1916).
- [11] *Rocznik Towarzystwa Naukowego Warszawskiego*, rok IX, 1916; Rok X, 1917.
- [12] T. Manteuffel, *Uniwersytet Warszawski w latach 1915/16–1934/35. Kronika*, Warszawa 1936; *Politechnika Warszawska 1915–1965*, pod red. Eugeniusza Olszewskiego, PWN Warszawa 1965.
- [13] A. Zawadzki: *Ś.p. prof. dr Marian Grotowski*, *Postępy Fizyki* 2, 1–5 (1951); *Marian Grotowski (8 IX 1882–28 I 1951)*, s. 51–53 w: J. Kita, S. Pytlas, *Profesorowie Uniwersytetu Łódzkiego w latach 1945–1994. Pro memoria*, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 1995.
- [14] *Z dziejów rozwoju fizyki...* patrz [2].
- [15] Używał on początkowo takiej właśnie formy swego nazwiska i tak figuruje w pierwszych spisach wykładów uczelni warszawskich; następnie stopniowo pisał się jako Kowalski-Wierusz, a potem Wierusz-Kowalski. E. Stenz: *Józef Wierusz Kowalski*, *Mathesis Polska* 3, 1–4 (1928); L. Klecki: *Ś.p. Józef Wierusz Kowalski*, *Sprawozdania PTF* 4, 1–10 (1929) – zawiera bibliografię jego publikacji; J. Specht: *Wśród fizyków polskich*, 99–106, Lwów 1938; Alfons Kawski, *W sześćdziesiątą rocznicę śmierci Józefa Wierusza-Kowalskiego*, *Postępy Fizyki* 38, 479 (1987).
- [16] S. Werner, *Wspomnienie o Profesorze Wacławie Wernerze*, Brwinów 2103.
- [17] Sam tylko Wydział Lekarski miał w tym roku akademickim 538 studentów; patrz Tabela 2, s. 54 w: *Dzieje Uniwersytetu Warszawskiego 1915–1939*, pod red. Andrzeja Garlickiego, Warszawa 1982. Politechnika Warszawska miała na Wydziale Chemicznym 138, na Wydziale Budowy Maszyn i Elektrotechnicznym – 273, a na Wydziale Inżynierii Budowlanej 146 studentów; patrz *Politechnika Warszawska 1915–1965*, op.cit., s. 46.
- [18] *Spis wykładów w semestrze zimowym 1915/1916 i w semestrze letnim 1916*, Uniwersytet Warszawski, Warszawa 1916.
- [19] *Kalendarz Uniwersytecki, semestr letni 1915/16*, opracował Jan Muszkowski, Warszawa 1916; *Kalendarz Uniwersytecki Rok 2, semestr zimowy 1916/17*, opracował Jan Muszkowski, Warszawa 1917.
- [20] L. Królikowski, *Szkolnictwo dawnej Warszawy*, s. 459, Muzeum Historyczne m. st. Warszawy, 2008.
- [21] Cały budżet Uniwersytetu wynosił wtedy 60 000 rubli; patrz: Hanna Kolendo, *Odrodzenie Uniwersytetu Warszawskiego w roku 1915. Pierwszy skład wykładowców*, *Roczniki UW*, XIII, 1973, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego 1974.
- [22] W latach 1915/16 i 1916/17 TKN miało odpowiednio 1515 i 2428 studentów, podczas gdy UW 1039 i 1621, a PW 615 i 1136. Patrz: *Uniwersytet Warszawski w latach 1915/16–1934/35*, *Kronika*, oprac. Tadeusz Manteuffel, Warszawa 1936; *Politechnika Warszawska 1915–1965*, s. 340, Warszawa 1965; *Sprawozdanie z działalności Wolnej Wszechnicy Polskiej w latach 1916/17–1918/19*, Warszawa 1919.
- [23] *Towarzystwo Fizyczne w Warszawie*, *Nauka Polska* 2, 579–580 (1919).
- [24] J. Specht, *Wśród fizyków polskich*, s. 189–221, Lwów 1938; J. Hurwic, *Stanisław Kalinowski (1973–1946) w dziesiątą rocznicę śmierci*, *Postępy Fizyki* 7, 254–284 (1956).
- [25] J. Patkowski i Sz. Szczeniowski, *Wacław Dziewulski*, *Acta Physica Polonica* 7, 103–109 (1939).
- [26] A. Wolska, *Zofia z Kowalczewskich Dobrowolska (1889–1979)*, *Postępy Fizyki* 30, 400–401 (1979).

---

# O tworzeniu energetyki jądrowej w Polsce

Piotr Kociński\*

doradca zarządu Grupy LOTOS S.A.

---

**Streszczenie.** W Polsce od wielu lat toczy się dyskusja, w jaki sposób rozbudowywać energetykę, zwiększać moce wytwórcze. Kwestią bardzo istotną jest niska emisyjność dwutlenku węgla urządzeń wytwarzających energię. Mając to na uwadze staramy się przekonać Czytelnika, że energetyka jądrowa byłaby dobrym uzupełnieniem nowego energetycznego miksu dla Polski, co więcej wskazujemy, że już w tej chwili winniśmy jako państwo rozpocząć działania. Podajemy też optymalne uwarunkowania w jakich te działania należy prowadzić.

---

## 1. Wstęp

W Polsce toczy się dyskusja, czy budować energetykę jądrową, a jeśli tak, to jakiego typu reaktory winny stać się podstawą naszego programu jądrowego. Poniżej przedstawimy argumenty przemawiające za rozpoczęciem budowy polskiej energetyki jądrowej wykorzystującej reaktory dużej mocy. W dość powszechnie przyjętej systematyce, wartością mocy rozgraniczającą małe reaktory od dużych jest 300 MW. Jednak ze względu na dostępne obecnie na rynku technologie nuklearne przyjmujemy założenie, że duży reaktor dostarcza moc powyżej 800 MW. Wskazując, jaką rolę duże reaktory winny odegrać w naszym mieszkaniu energetycznym, podamy przesłanki, którymi się kierowaliśmy. W rozważaniach odniesiemy się do całego szeregu kwestii, takich jak: potrzeby, w tym energetyczne, polskiej gospodarki, zdolność do tworzenia dużych i złożonych rozwiązań nasyconych wysoko zaawansowaną technologią, koszt budowy i koszt przyszłej energii związanej z poszczególnymi rozwiązaniami jądrowymi, przepisy prawne odnoszące się do energetyki w ogólności i energetyki jądrowej w szczególności, nasza obecność w Unii Europejskiej i związane z tym obowiązki (na przykład dążenie do eliminacji śladu węgla w naszej gospodarce poprzez zmniejszenie spalania węgla), bezpieczeństwo państwa. Generalnie weźmiemy pod uwagę tylko te kwestie, które mają wpływ na dokonanie wskazanego wyżej wyboru. Nie będziemy wszakże dokonywali przeglądu historii rozwoju cywilnych technologii nuklearnych, pewne tematy potraktujemy jako oczywiste i odniesiemy się do nich w sposób postulatyczny.

Reaktory jądrowe o mocy co najmniej 800 MW priorytetem polskiej energetyki.

Wskażemy obszary i perspektywę czasową, odniesioną do momentu, gdy zaczniemy pracować nad pierwszą elektrownią składającą się z co najmniej dwóch bloków o mocy 1 GW każdy, w których prace nad innymi rozwiązaniami opartymi na uzyskiwaniu energii z rozszczepienia jąder (*fission*) atomowych byłyby pożądane.

Na koniec przypominamy, że, choć stosowaną przez wszystkich jednostką energii w odniesieniu do urządzeń wytwarzania energii jest MWh (megawatogodzina), to ze względu na ewentualną potrzebę porównania czy dokonania bilansu energetycznego np. z energią skupioną w kopalinach, takich jak węgiel czy ropa naftowa, wyrażoną zwykle w kaloriach,<sup>1</sup> to relacja pomiędzy tymi jednostkami wyraża się następująco,

$$1 \text{ MWh} = 8.6 \times 10^8 \text{ cal}$$

## 2. Potrzeby energetyczne polskiej gospodarki w perspektywie najbliższych 20 lat

Energia potrzebna jest do podtrzymywania życia na Ziemi, a w szczególności cywilizacji jako uporządkowanej formy egzystowania zgromadzeń ludzkich. Warunkiem niezbędnym do budowy i trwania jakiegokolwiek cywilizacji była zawsze umiejętność przekształcania energii,

---

1. Jedna kaloria (cal) jest miarą energii potrzebnej do ogrzania jednego grama wody o jeden stopień.

---

\* O autorze. Piotr Kociński uzyskał tytuł doktora fizyki w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie w roku 1992. Od 1998. pracował w międzynarodowych korporacjach, między innymi 13 lat w IBM, tworząc oprogramowanie dla przemysłu, instytucji finansowych i sektora publicznego oraz pisząc dla IBM International Technical Support Organization podręczniki na temat tworzenia oprogramowania. W roku 2016 kierował spółką specjalnego znaczenia Aplikacje Krytyczne, której zadaniem było stworzenie oprogramowania wspierającego uszczelnienie systemu poboru podatku VAT. Pierwsza gotowa do użycia wersja tego oprogramowania powstała w marcu 2017 roku. Od września 2017 pełnił funkcję wiceprezesa spółki LOTOS Lab.



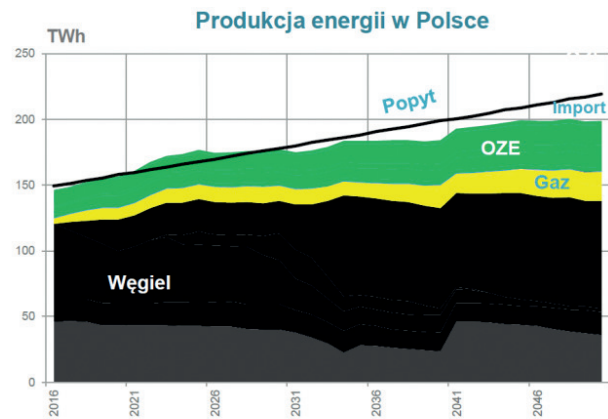
skupionej bądź w mięśniach ludzi czy zwierząt, bądź w kopalinach czy roślinach, w pracę niezbędną do wykonania różnych czynności, takich jak tworzenie i utrzymanie ludzkich siedzib czy narzędzi, polowanie, prowadzenie wojny oraz w ciepło potrzebne do gotowania strawy, ogrzewania itp. Powyższy warunek pozostaje w mocy, zmianie uległy natomiast sposoby przekształcana energii skupionej w kopalinach, drewnie, jak i wielość potrzeb, do zaspokajania których jest stosowana. Do zapewnienia bezpiecznego, w miarę komfortowego i zasobnego życia obywatelom Polska potrzebuje w 2019 roku około 150 TWh<sup>2</sup> energii (przede wszystkim tej, która zamieniana jest na prąd elektryczny dostarczany gospodarstwom domowym i gospodarce oraz energii cieplnej).

Możliwości naszej energetyki, której moc wytwarza kształtuje się obecnie na poziomie 44 GW, zaspokajają te potrzeby. Pamiętać jednak należy, że:

- Sposoby uzyskiwania energii, czyli przede wszystkim spalanie węgla, przy polityce Unii Europejskiej nastawionej z powodu ochrony klimatu na eliminację spalania węgla jako źródła produkowania energii, skutkują nieuchronnie ciągłym wzrostem cen prądu, powodowanym rosnącą ceną opłat związanych z emisją dwutlenku węgla.
- Zasoby węgla w Polsce są ograniczone: złoża węgla brunatnego skończą się około 2030 roku, a złoża węgla kamiennego starczą na dłużej, jednak węgiel kamienny w Polsce zalega bardzo głęboko, co zwiększa koszt jego wydobycia (zwróćmy uwagę, że ze względu na dużą automatyzację wydobycia, jak i zapewnienie górnikom bezpieczeństwa i znośnych warunków pracy pod ziemią, już teraz bilans energetyczny pracy kopalni mierzony współczynnikiem *maksymalna energia uzyskana w wyniku spalania węgla wydobytego na dobę / energia potrzebna do funkcjonowania wszelkich urządzeń w kopalni w ciągu doby* w przypadku kopalni ze stosunkowo płytkimi pokładami węgla wynosi ok. 1.3) W rezultacie uzależnienia nas to od węgla importowanego, przede wszystkim z Rosji.
- Rozwijająca się polska gospodarka będzie potrzebować coraz więcej energii; przewiduje się, że w 2040 roczne zapotrzebowanie sięgnie przypuszczalnie poziomu 200 TWh.

W tej sytuacji najprościej byłoby skupić się na budowie nowych bloków opartych o spalanie węgla kamien-

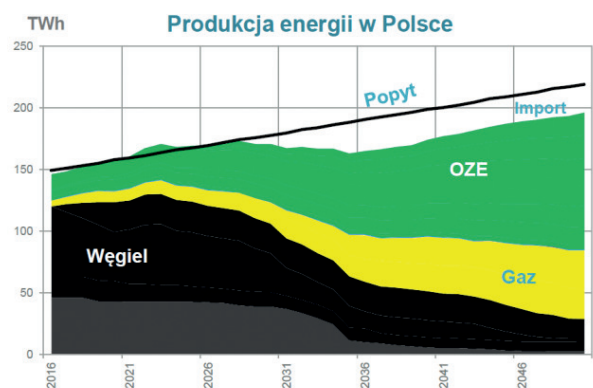
nego, o lepszych parametrach technicznych z punktu widzenia emisji dwutlenku węgla, wydłużaniu czasu funkcjonowania starych bloków i w dotychczasowym tempie (mierzonym stałymi, niewielkimi jak dotąd, rocznymi przyrostami) zwiększaniu udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w produkcji energii, realizując scenariusz rozwoju jak na poniższym diagramie, zaprezentowanym w materiałach opracowanych przez Parlamentarny Zespół Górnictwa i Energii w 2017 roku.



Źródło: enervis Enerav Advisors

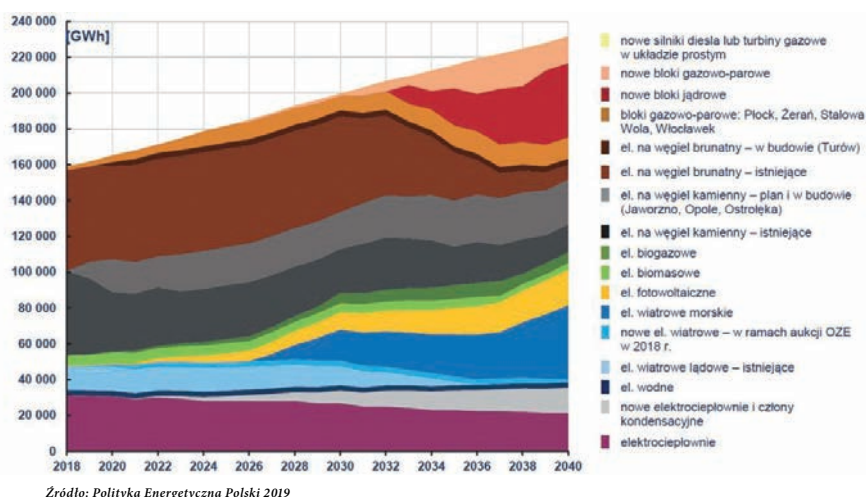
Zwróćmy uwagę, że w tej projekcji od 2031 popyt (zaznaczony na diagramie czarną, ciągłą linią) przewyższa możliwości produkcyjne i Polska będzie zmuszana do importu energii. Z tego powodu, jak i ze względu na wynikającą z przynależności Polski do Unii Europejskiej konieczność zmniejszenia emisji dwutlenku węgla, w długiej perspektywie czasu sensowniejszym wydaje się jednak rozważenie innych scenariuszy. Jednym z możliwych, bardzo silnie promowanym przez wiele państw Unii Europejskiej, jest oparcie energetyki na OZE (czyli wiatraki, fotowoltaika, biogazownie, elektrownie wodne, spalanie biomasy i odpadów). Prognoza rozwoju mogłaby wyglądać następująco:

Ten kuszący, „zielony” scenariusz, choć znakomicie realizuje wymóg zmniejszenia emisji dwutlenku węgla, ma jednak wady. Nadal zakładamy niedobór produkowanej energii w stosunku do potrzeb (patrz czarna,



Źródło: enervis Energy Advisors

2. terawatogodzina 1 Twh = 1 000 000 000 kWh (przyp. red.).



ciągła linia na powyższym diagramie obrazująca popyt), które będą kompensowane importem energii. Przed wszystkim jednak OZE dostarcza energię w sposób nieciągły, duża moc (moc wiatraków umiejscowionych na polskich wodach terytorialnych na Bałtyku to rząd 8 GW) w znacznym stopniu ma jednak charakter potencjalny. Nie zawsze może być użyta do produkcji energii. Oparcie energetyki krajowej na OZE wymagałoby zastosowania szeregu nowych urządzeń, takich jak choćby magazyny energii, oprogramowanie klasy *energy/battery management system*, które technologicznie nie są jeszcze dojrzałe, w dużej mierze są dopiero na etapie badań. OZE może być zatem komponentem tzw. miksu energetycznego, ale nie wiodącym rozwiązaniem. W chwili obecnej warto zatem rozważyć scenariusz (patrz diagram poniżej), w którym energię uzyskiwaną ze spalania węgla powoli zastępujemy energią uzyskiwaną z rozszczepiania jąder atomów takich jak uran czy tor, przy czym tor jako paliwo jądrowe w cywilnych reaktorach nie jest stosowany.

Zastosowanie na wielką skalę energii jądrowej przyczyni się do zmniejszenia emisji dwutlenku węgla przez naszą gospodarkę.

W dalszej części zastanowimy się jaki typ reaktorów jądrowych w okolicznościach, z jakimi obecnie mamy w Polsce do czynienia, powinien wyznaczyć punkt startowy programu energetyki jądrowej w Polsce. Ten „startowy” typ reaktora będzie miał zatem charakter strategiczny.

Powyższe scenariusze winny być odczytywane w skali całego kraju. Strategiczny wybór technologii jądrowej proponujemy odnosząc się właśnie do skali całego państwa. W skali lokalnej natomiast (małe miasto czy też konkretny ośrodek przemysłowy potrzebujące zastąpienia starego bloku o mocy ok. 100 MW wytwarzającego zarówno energię elektryczną, jak i przede wszystkim energię ciepłą, bądź ewentualnie elektrownie węglowe planujące wymianę jednego ze swoich starych blo-

ków o mocy ok. 200 MW) można myśleć o zastosowaniu innej niż strategiczna dla całego kraju technologia jądrowa. Tym technologicznym wariantom, do zastosowania w skali lokalnej, również się przyjrzymy, umiejscawiając ich dojrzałość technologiczną na osi czasu względem już rozwiniętych, sprawdzonych w praktyce technologii jądrowych.

### 3. Energetyka jądrowa. O sposobach wytwarzania prądu i ciepła

Od 120 lat każde rozwinięte państwo potrzebuje prądu. Prąd napędzając wszelkie urządzenia znajdujące się w gospodarstwach domowych, fabrykach, instalacjach wojskowych itd. jest tym, na czym opiera się funkcjonowanie państwa we wszystkich jego aspektach. W elektrowniach obracająca się turbina uruchamia generator, który wytwarza prąd. Typologia elektrowni czy też środków wytwarzania prądu jest oparta na źródle energii poruszającej turbinę. Poruszać turbinę może wiatr, spadająca woda, para wodna podawana pod ciśnieniem. Ten ostatni wariant poruszania turbiny jest wspólny dla elektrowni, w której transformacja energii skupionej w jakimś naturalnie występującym mineralu (na przykład węgla) polega na jego spalaniu (*combustion*) oraz takiej, w której ta transformacja zachodzi w wyniku rozszczepiania jąder atomowych jakiegoś pierwiastka (przede wszystkim uranu). Ten ostatni typ to elektrownie jądrowe.

Zasadnicza linia podziału elektrowni jądrowych przebiega względem rodzaju używanego chłodziwa pobierającego ciepło od rdzenia (*core*) składającego się z paliwa jądrowego (materiału rozszczepialnego) oraz moderatora (materiału spowalniającego neutrony poruszające się w reaktorze w celu zwiększenia prawdopodobieństwa zderzenia neutronu z jądrem, co skutkuje wzrostem wytwarzanej energii). Chłodziwem może być woda bądź schłodzony gaz (*cooledgas*). W przypadku stosowania wody jako chłodziwa możemy podzielić

reaktory na te, w których woda jest utrzymywana pod dużym ciśnieniem (zatem nie może się zagotować), bądź ma możliwość dochodzenia do stanu wrzenia. Upraszczając, mamy do czynienia z następującą systematyką:

- Reaktory z wodą jako chłodziwem:
  - wodą pod ciśnieniem – PWR (*pressurized water reactor*),
  - wodą, która nie jest pod ciśnieniem – BWR (*boiled water reactor*).
- Reaktory z gazem jako chłodziwem – HTGR (*high temperature gas cooled reactor*).

Reaktory typu PWR są w tej chwili najpowszechniej stosowane. Na rynku dostępne są między innymi modele takie jak:

- koreański APR-1400 stworzony przez Korea Electric Power Corporation,
- francuski EPR zwany European Pressurized Reactor,
- amerykański AP1000, który zaprojektowała firma Westinghouse.

W przypadku reaktorów z wodą jako chłodziwem niekiedy różnicującym elementem był materiał stosowany jako moderator, jak i sposób w jaki stosowano chłodziwo. Na przykład w radzieckich reaktorach RBMK (*Реактор большой мощности канальный*), od katastrofy w Czarnobylu dość niesławnej pamięci, stosowano jako moderator grafit zamiast tzw. ciężkiej wody, a zamiast jednego zbiornika ciśnieniowego (*pressure vessel*), pręty paliwowe wsunięte do rur o średnicy 8 centymetrów, wokół których krążyła woda (stąd w nazwie reaktora słowo *канальный* – kanałowy).

Dwie trzecie z eksploatowanych reaktorów w USA to reaktory PWR. Ponad 30% energii generowanej w świecie przez elektrownie jądrowe powstaje w USA.

Od początku stosowania reaktorów, w których kontrolowana reakcja łańcuchowa rozszczepiania jąder atomowych wytwarza energię, dzieli się je na **małe** i **duże**. Te pierwsze były potrzebne do poruszania silników okrętów wojennych (łodzi podwodne, lotniskowce) czy statków (lodołamacze). Granica pomiędzy małymi a dużymi nie jest precyzyjnie zarysowana, ale przyjmuje się moc 300 MW jako górną granicę mocy małych reaktorów jądrowych. Od początku budowano jeden i drugi typ, jednak okazało się już w latach 60. ubiegłego stulecia, że choć budowa małych reaktorów była tańsza, to ich eksploatacja, a zatem i cena wytwarzanej w nich energii, była wyższa niż w tych wielkich! Małe reaktory zbudowano w latach 60. zeszłego stulecia w ZSRR, USA, później budowano takie jednostki w Indiach, Chinach. Praktycznie wszystkie zostały zamknięte. Rozwój

reaktorów stosownych w cywilnych elektrowniach jądrowych przebiegał w kierunku coraz większych jednostek, do mocy około 2 GW (Francja).

Reaktory wymienione wyżej, będące ofertą handlową kilku firm z różnych krajów (między innymi AP1000, AP-14000, EPR) stanowią III Generację reaktorów. Detale techniczne nieistotne dla niniejszych rozważań umieszczają niektóre z nich w podkategorii III Generacja+.

Budowa elektrowni jądrowej z dużymi reaktorami okazała się jednak niezwykle trudnym przedsięwzięciem zarówno pod względem inżynierskim, jak i finansowym. W chwili obecnej, choć takie kraje jak Francja czy USA zachowały zdolności technologiczne budowy reaktorów, to tylko silnie wspierane przez państwo firmy rosyjskie, chińskie, japońskie, koreańskie posiadają zdolność wznoszenia dużych elektrowni jądrowych. Kłopoty z budową dużych bloków energetycznych nawet w krajach o tzw. wysokiej kulturze technicznej, będących często liderami w fizyce i inżynierii jądrowej, spowodowały, że zaczęto znowu poważnie rozważać koncepcję małych bloków energetycznych. Firmy z USA, Wielkiej Brytanii czy Argentyny rozpoczęły intensywne prace nad tzw. małymi reaktorami modularnymi (SMR – *small modular reactors*). Są to w sensie koncepcyjnym klasyczne reaktory (na ogół typu PWR) w znacznie pomniejszonej skali, z jedną zasadniczą różnicą konstrukcyjną w stosunku do dużych, otóż mają być budowane z prefabrykatów tworzonych w wyspecjalizowanych fabrykach. W zamierzeniu ich budowa ma być zatem po prostu łatwiejsza niż budowa dużych, ma polegać *de facto* na składaniu z gotowych elementów. Brytyjczycy wiążą z programem SMR duże nadzieje, upatrując w nim mechanizmu przełamania niemocy w tworzeniu cywilnych reaktorów jądrowych. Podkreślić wszakże należy, że **małe reaktory, modularne** to w najlepszym razie **prototypy**. Ich stosowanie komercyjne wymaga zatem długiej fazy badań, kalibrowania prototypu, stworzenia projektu inżynierskiego czyli tego wszystkiego, co jest niezbędne, żeby koncepcję, nawet zweryfikowaną prototypem, zamienić w **technologię** gotową do zastosowania.

Projekt SMR, zaliczany do tzw. IV Generacji, jest rozważany również z innego powodu, otóż mała skala zmniejsza ryzyka eksploatacyjne. Każda elektrownia jądrowa produkuje odpady radioaktywne (poddawane bombardowaniu neutronów paliwo jądrowe przekształca się w radioaktywny odpad). W przypadku stopienia się rdzenia (*coremelting*) cały ten odpad może przebić się przez betonowy fundament elektrowni i zatruć materiałem radioaktywnym o czasie połowkowego rozpadu mierzonym w tysiącach lat (czyli upłyną tysiące

lat zanim taki materiał ulegnie neutralizacji) wody gruntowe czy pobliski elektrowni akwen wodny (jak ma to miejsce w Fukushima w Japonii). Im mniej paliwa jądrowego tym mniejszy rozmiar potencjalnego skażenia. Zatem intensywne prace badawcze w USA, Wielkiej Brytanii, Argentynie, Chinach, Japonii trwają. Nie mamy jednak jeszcze do czynienia z gotową technologią. Podkreślmy zatem jeszcze raz, że dopiero w przyszłości będzie można zweryfikować, czy małe reaktory w nowej, modularnej odsłonie będą tańsze w eksploatacji niż ich poprzednicy z lat 60. i 70.

Tylko duże reaktory o mocy co najmniej 800 MW są technologicznie dojrzałe i sprawdzone w eksploatacji w cywilnych elektrowniach jądrowych.

Japończycy i Chińczycy poszli tropem większego bezpieczeństwa i od lat 90. zeszłego stulecia pracują nad małymi reaktorami typu HTGR, również zaliczanymi do IV Generacji. Pod Tokio zlokalizowano badawczy reaktor typu HTGR, w którym zastosowano paliwo jądrowe nowego typu (tzw. TRISO). Paliwo to charakteryzuje się tym, że kawałki uranu pokryte są materiałami będącymi słabymi przewodnikami ciepła w jednym kierunku, co powoduje, że rdzeń nie topi się nawet w sytuacji braku chłodziwa! Międzynarodowa Agencja Atomistyki, przyglądająca się temu projektowi od początku, zwraca uwagę na to, że ze względu na wyżej wskazaną cechę strefa zastrzeżona wokół reaktora będzie mogła być zasadniczo zmniejszona. Podkreślić trzeba, że w zamysle jego twórców taki reaktor został pomyślany nie jako środek wytwarzania prądu, ale jako urządzenie do wytwarzania pary wodnej, która ma być stosowana w reakcji **reformingu parowego** do wytwarzania wodoru. Należy więc myśleć o reaktorze HTGR raczej jako o kolejnym bloku ciepłowniczym dla ośrodków przemysłowych, a nie wielkoskalowym generatorze energii elektrycznej.

Jeszcze innym kierunkiem rozwoju elektrowni jądrowych, zaliczanym również do IV Generacji, jest używanie reaktorów na szybkie neutrony. Zużyte w innych reaktorach paliwo jądrowe staje się tu ponownie paliwem. Amerykańska firma GE (wspólnie z japońskim Hitachi) prowadzi w tej dziedzinie zaawansowane badania, których rezultatem jest prototyp reaktora, nazywany PRISM. Reaktory takie należy sklasyfikować jako „górną strefa” małych reaktorów. Zwróćmy uwagę, że nie są to jednak nawet w założeniach reaktory modularne.

Wielkim promotorem reaktorów IV Generacji (SMR, HTGR, PRISM) jest rząd USA. Jednak reaktory te są w najlepszym razie na etapie działających prototypów. Dodajmy też, że kwestia opłacalności sto-

sowania tych reaktorów, zwłaszcza w Polsce, jest co najmniej otwarta.

Podkreślić należy, że niezależnie od wszystkich problemów energetyka jądrowa rozwija się. Wydaje się, że tworząc ten komponent w polskim miksie energetycznym działać będziemy racjonalnie. W chwili obecnej na świecie buduje się elektrownie jądrowe, w których instalowane są duże reaktory jądrowe.

Liczba reaktorów budowanych w różnych krajach

Chiny	11	Białoruś	2	Argentyna	1
Indie	7	Japonia	2	Brazylia	1
Rosja	6	Pakistan	2	Finlandia	1
Korea Płd.	5	Słowacja	2	Francja	1
Emiraty Arabskie	4	Ukraina	2	Turcja	1
Bangladesz	2	USA	2	Wielka Brytania	1

#### 4. O tworzeniu w Polsce złożonych, zaawansowanych technologicznie rozwiązań

Jednym z dziedzictw komunizmu, które od 30 lat utrudniają rozwój Polski, jest brak umiejętności tworzenia i wdrażania złożonych rozwiązań, w których stosuje się różne zaawansowane, ale już dojrzałe technologie. To ostatnie oznacza niestety więcej niż tylko niski poziom innowacyjności naszego przemysłu, słabo działające mechanizmy przekładania wyników badań prowadzonych w instytutach badawczych i na uczelniach wyższych na konkretne technologie. W Polsce A.D.2019 nawet gdy technologia jest gotowa, sprawdzona, najczęściej niestety kupiona za granicą, to wdrożenie rozwiązania, w którym ta technologia jest stosowana, jest wyzwaniem. Przyczyny są różne, poczynając od specyficznie polskich interpretacji Prawa Zamówień Publicznych, opartego wszak na standardach unijnych, polegających na przykład na praktycznym zakazie tworzenia prototypu bazującego na różnych technologiach i opartego o badania tego prototypu poprawiania projektu inżynierskiego w trakcie wdrożenia, a kończąc na braku właściwego kształcenia inżynierów. Choć na polskich uczelniach istnieje kilka dobrych kierunków Inżynierii Produkcji, to generalnie przyszłych inżynierów czy naukowców nie uczy się w ogóle pracy w zespole przy realizacji jakiegoś większego niż praca dyplomowa przedsięwzięcia. Efekty tego stanu rzeczy są szczególnie widoczne w informatyzacji różnych instytucji publicznych. Pomimo że w Polsce pracuje prawie 100 tysięcy dobrych programistów i projektantów IT, pomimo że mnóstwo prywatnych firm (w tym banków) jest skutecznie wyposażonych w aplikacje stworzone w Polsce przez polskich inżynierów pracujących zgodnie z zachodnimi procedurami, to instytucje publiczne generalnie są słabo wyposażone w dobre aplikacje (co widać wyraźnie w europejskich rankingach IT in Government).



Kryteria wyboru technologii jakie należy stosować, by efektywnie wdrożyć rozwiązanie zaawansowane technologicznie.

Zatem rozpoczynając niezwykle złożone przedsięwzięcie inżynierskie należy stosować następujące kryteria wyboru technologii:

- Technologia powinna być dojrzała i sprawdzona – wybranie koncepcji popartej jedynie prototypem jest niezbyt dobrym pomysłem.
- Projekt inżynierski (techniczny) rozwiązania powinien być gotowy i wymagać już tylko adaptacji do lokalnych warunków; faza prototypowania nie powinna być potrzebna!
- Powinny istnieć sprawdzone metody prowadzenia projektów danego typu.
- Istnieć powinny firmy czy instytucje typu **inżynier kontraktu**, które mają doświadczenie we wdrażaniu danej technologii i z przeglądu rynku wynika, że byłyby zainteresowane uczestnictwem w przedsięwzięciu.
- Sprawdzić należy, czy dana technologia w jak najprostszy i oczywisty sposób pozwala zrealizować główny cel stawiany rozwiązaniu.

Poza wyżej wskazanymi kryteriami, w przypadku projektu o znaczeniu strategicznym w skali kraju, należy rozważyć podjęcie dodatkowych kroków związanych z ewentualnym wyborem technologii uzupełniających, które pozwalałyby na:

- kalibrację elementów głównego rozwiązania,
- szkolenie i kształcenie polskich inżynierów i naukowców w danej dziedzinie,
- rozwiązanie lokalnych problemów, dla których, ze względu na skalę, rozwiązanie główne nie jest adekwatne.

Podkreślić należy, że zważywszy na krajowe doświadczenia wynikające z wdrażania zaawansowanych technologicznie rozwiązań, realizacją przedsięwzięcia powinna zająć się firma specjalnego znaczenia (*special purpose vehicle*) działająca na podstawie specjalnych ustaw.

## 5. Polityka!

Decyzja o budowie energetyki jądrowej ma charakter polityczny. Po pierwsze większość państw, wśród przesłanek branych pod uwagę w kontekście cywilnych projektów jądrowych, rozważa, czy efektem dodatkowym określonych wyborów technologicznych jest pozyskanie zdolności wzbogacania uranu. Ta ostatnia zdolność jest niezbędna do stworzenia broni jądrowej. Polityczne uwikłania energetyki jądrowej się na tym nie kończą. Kraje posiadające technologię i zdolność tworzenia elektrowni jądrowych można pogrupować następująco:

- 1) demokracje typu zachodniego (Francja, Wielka Brytania, Włochy),
- 2) USA,
- 3) kraje azjatyckie (Korea, Japonia, Indie),
- 4) Rosja,
- 5) kraje neutralne (Argentyna),
- 6) Chiny.

Staje się więc oczywistym, że wybór technologii jądrowej, to również opowiedzenie się za pewną koncepcją funkcjonowania państwa. Polska w sposób naturalny winna zdecydować się na zakup technologii wytworzonej w jednej z dwóch pierwszych grup. Zakup technologii jądrowych oznacza związanie się z partnerem oferującym technologię na dziesiątki lat. Kraje duże, jak na przykład Indie, posiadające własne technologie jądrowe, mogą sobie pozwolić na dywersyfikację dostawców, podczas gdy kraj wielkości Polski winien się skoncentrować na jednym dostawcy, którego wybór wzmocni bezpieczeństwo, narodowe *sensu largo*, nie tylko energetyczne.

Budowa elektrowni jądrowych jest traktowana przez większość krajów jako mechanizm do poszerzania swojej sfery wpływów, co za tym idzie, państwa są gotowe silnie subsydiować własne firmy budujące elektrownie w innych krajach. Poziom takiego wsparcia finansowego winien być brany pod uwagę przez kraj-odbiorcę podczas dokonywania wyboru konkretnej technologii.

Ze względu na fakt, że Polska jako członek Unii Europejskiej oraz sygnatariusz konwencji Euroatom musi uzyskać zatwierdzenie swych wyborów i planów jądrowych przez odpowiednie instytucje Unii Europejskiej, potencjalny dostawca spoza Unii Europejskiej musi wyrazić gotowość na taką formę zaangażowania, która uczyniłaby proces zatwierdzenia wykonalnym.

## 6. Wybór reaktora jądrowego dla Polski

Wziąwszy pod uwagę przesłanki natury politycznej, których wagę podkreślono w poprzednim rozdziale, powinno się rozważać firmy z USA jako dostawcę potrzebnych technologii jądrowych. Przyjmując zatem, że głównym dostawcą technologii jądrowej będą USA, należy dokonać wyboru, czy tworzymy energetykę jądrową stosując:

- reaktory III Generacji + (patrz rozdział 3),
- reaktory IV Generacji (patrz rozdział 3),
- jedno i drugie.

Bloki jądrowe o mocy około 1 GW to optymalne rozwiązanie do rozpoczęcia budowy energetyki jądrowej w Polsce.



Reaktory budowane w technologii AP1000

Kraj	Elektrownia	Liczba reaktorów	Budowa	Data uruchomienia
Chiny	Sanmen NPP, Zhejiang	1	ukończona	02.07.2018
Chiny	Sanmen NPP, Zhejiang	2	ukończona	24.08.2018
Chiny	Haiyang NPP, Shandong	1	ukończona	22.11.2018
Chiny	Haiyang NPP, Shandong	2	ukończona	09.01.2019
USA	Vogtle, Georgia	3	kontynuowana	nie ustalona?
USA	Vogtle, Georgia	4	kontynuowana	nie ustalona?
USA	VC Summer, South Carolina	Unit 2	zawieszona	brak informacji
USA	VC Summer, South Carolina	Unit 3	zawieszona	brak informacji

Zważywszy na kryteria wyboru technologii wskazane w rozdziale 4, jak i fakt, że już kilka bloków opartych na reaktorach jądrowych o mocy około 1 GW pozwoliłyby zrealizować „atomowy” scenariusz rozwoju naszej energetyki wskazany w dokumencie Polityka Energetyczna Polski (patrz rozdział 2), to wybór dużych reaktorów jako podstawy naszej przyszłej energetyki jądrowej wydaje się optymalny.

Firma Westinghouse dysponuje nowoczesnym rozwiązaniem o nazwie AP1000 (reaktor należący do Generacji III+), które można uznać za dojrzałą i sprawdzoną w praktyce technologię, co dobrze pokazuje poniższe zestawienie.

Co więcej, istnieją doświadczone firmy oferujące wdrożenie tej technologii, w tym polscy dostawcy. Wstępne oceny wskazują, że polskie firmy mogą dostarczyć do 88% elementów składających się na elektrownię jądrową. Istnieje sprawdzona metoda wdrażania elektrowni jądrowej stworzona przez IAEA (International Atomic Energy Agency) zaprezentowana m.in. w dokumencie Milestones in the Development of National Infrastructure for Nuclear Power. Tak więc jeśli firma kierująca wdrożeniem AP1000 byłaby gotowa:

- dopasować i uzgodnić własną metodykę z wzorcową, wytworzoną przez IAEA,
- uzgodnić ze stroną polską taką formułę współpracy, która umożliwiłaby zatwierdzenie budowy reaktorów w tej technologii w instytucjach Unii Europejskiej,

to wybór konstrukcji AP1000 można by uznać za dokonany.

Przypomnijmy, że w rozdziale 4 wśród kryteriów dokonywania wyboru odpowiedniej technologii jest kryterium mówiące o braniu pod uwagę tylko konstrukcji sprawdzonych w eksploatacji przemysłowej. Jego zastosowanie eliminuje użycie reaktorów IV Generacji do budowy fundamentu naszej energetyki jądrowej. Wskazać wszakże należy, że o ile reaktory dużej mocy wpisują się w scenariusz pełniejszego zróżnicowania środków wytwarzania prądu przy jednoczesnym zmniejszaniu spalania węgla w gospodarce, to nie rozwiązują wielu lo-

kalnych problemów energetycznych o małej skali (jeśli mierzonej w MW, to nie przekraczających 200 MW). Do takich celów stosowanie reaktorów klasyfikowanych jako IV Generacja wydaje się zasadne. Na przykład, gdy mówimy o dostarczaniu energii cieplnej dla małego miasta czy ośrodka przemysłowego, to można rozważyć, prowadzony równoległe do dużego programu jądrowego, projekt zbudowania najbardziej dojrzałego spośród kategorii SMR, małego reaktora typu HTGR, zwłaszcza że ze względu na stosowane paliwo jądrowe jest on w naturalny sposób bezpieczny (*intrinsic safety*), co może mieć znaczenie dla małych społeczności. Takie małe przedsięwzięcie (w stosunku do głównego, jakim jest budowa elektrowni opartych na dużych reaktorach) przyczyniłoby się dodatkowo do lepszego uformowania kadr inżynierów jądrowych, jak i pozwoliłoby na testowanie pewnych szczegółowych rozwiązań stosowanych w głównym przedsięwzięciu. O ile technologicznie projekt HTGR w wersji oferowanej przez Japan Atomic Energy Agency jest dojrzały i przetestowany w warunkach laboratoryjnych, to brak ciągle konkretnego wdrożenia przemysłowego, a zatem wykonanie tego wdrożenia wymaga m.in. przygotowania odpowiedniego projektu technicznego. Pomimo małej skali tego japońskiego reaktora w stosunku do reaktora typu AP1000 należy zakładać, że w warunkach polskich, perspektywa wdrożenia przemysłowego reaktora typu HTGR jest bardziej odległa niż wdrożenie dwóch dużych bloków typu AP1000, zwłaszcza gdy wdrożenie tego ostatniego będzie się odbywać z udziałem firmy posiadającej odpowiednie doświadczenie i umiejętności (tzw. inżyniera projektu). Innym obszarem wykorzystania w przyszłości reaktorów IV Generacji jest zastosowanie reaktorów PRISM (patrz rozdział 3) do utylizacji zużytego paliwa jądrowego pochodzącego z już funkcjonujących dużych reaktorów (polskich i zagranicznych).

Póki co stosowanie reaktorów IV Generacji ma charakter bardziej badawczo-rozwojowy niż przemysłowy. W warunkach polskich charakter przemysłowy mogą mieć w najbliższej dekadzie tylko reaktory należące do III Generacji+.



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

Wykład noblowski Kipa S. Thorne'a

(California Institute of Technology, Pasadena, USA), 8 grudnia 2017

Opublikowany w języku polskim za zgodą Nobel Foundation

©The Nobel Foundation 2017

Przekład opublikowany przy wsparciu finansowym Fundacji Pro-Physica



## Spis treści

- I. Wprowadzenie i przegląd
  - II. Trochę osobistych wspomnień z przeszłości: lata 1962–1976<sup>2</sup>
  - III. Źródła fal grawitacyjnych
  - IV. Informacje niesione przez fale grawitacyjne i teoretyczne wyznaczenie profilu fal grawitacyjnych
    - A. Informacje zawarte w falach pochodzących ze zlewających się zwartych układów podwójnych
    - B. Przybliżenie postnewtonowskie przy wyznaczaniu profilu fal emitowanych przez zlewające się układy podwójne
    - C. Zastosowanie numerycznej teorii względności do wyznaczania profilu fal emitowanych przez zlewające się układy podwójne
    - D. Geometrodynamika i zlewanie się podwójnych czarnych dziur
  - V. Wkład teoretyków w zrozumienie i kontrolę szumu w interferometrach LIGO
    - A. Szum generowany przez rozproszenie światła w interferometrze
    - B. Szum grawitacyjny
    - C. Szum termiczny
    - D. Szum kwantowy i standardowe kwantowe ograniczenia czułości grawitacyjnego interferometru
    - E. Fluktuacje kwantowe, niewystępowanie kwantowej destrukcji i ściśnięta próżnia
  - VI. Przyszłość: cztery zakresy grawitacyjnych częstotliwości
    - A. LISA: laserowa przestrzenna antena interferencyjna
    - B. Chronometraż grup pulsarów (PTA)
    - C. Polaryzacja kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła
  - VII. Przyszłość: badanie Wszechświata za pomocą fal grawitacyjnych
    - A. Astronomia oparta na różnorodnych sygnałach
    - B. Badanie czarnych dziur i geometrodynamiki za pomocą fal grawitacyjnych
    - C. Poznawanie pierwszej sekundy życia naszego Wszechświata
  - VIII. Wnioski
- Podziękowania  
Literatura

## I. Wprowadzenie i przegląd

Zaobserwowanie po raz pierwszy fal grawitacyjnych przez detektor LIGO 14 września 2015 roku było zwieńczeniem trwającego prawie pół wieku wysiłku ok. 1200 naukowców i inżynierów Kolaboracji LIGO/Virgo. Był

to wspaniały początek całkowicie nowego sposobu obserwowania Wszechświata: astronomii grawitacyjnej.

Nagroda Nobla za „decydujące przyczynienie się” do tego tryumfu została przyznana tylko trzem członkom Kolaboracji: Reinerowi Weissowi, Barry Barishowi i mnie. W rzeczywistości jednak na uznanie zasługuje przede wszystkim cała Kolaboracja. Z tego powodu przyjmując Nagrodę Nobla uważam się za ikonę Kolaboracji.

Ponieważ było to osiągnięcie kolektywne, Rai, Barry i ja zdecydowaliśmy, że przedstawimy jeden zunifikowany Wykład Noblowski w trzech częściach. Choć moja trzecia część może do pewnego stopnia być zrozumiała bez pozostałych dwóch, to jednak jak doszło do osiągnięcia naszej Kolaboracji i ku czemu nas ono wiedzie, czytelnicy mogą w pełni zrozumieć tylko czytając wszystkie trzy części. Nasz spisany trójczęściowy wykład jest pogłębionym rozwinięciem wykładu, który rzeczywiście wygłosiliśmy w Sztokholmie 8 grudnia 2017.

W części I tej spisanej wersji wykładu Rai przedstawia podane przez Einsteina przewidywanie istnienia fal grawitacyjnych oraz podejmowane w okresie od 1960 do 1994 roku wysiłki eksperymentalne poprzedzające nasze odkrycie. W części II Barry opisuje eksperymentalne próby mające miejsce po roku 1994 aż do chwili obecnej (dochodząc do zaobserwowania fal po raz pierwszy przez naszą Kolaborację) i wyjaśnia, czego możemy się spodziewać, gdy około roku 2020 obecne detektory LIGO osiągną swoją planowaną czułość i zostaną następnie jeszcze ulepszone. W mojej części III przedstawiam rolę teoretyków i teorii w sukcesie odniesionym przez LIGO oraz pokazuję do kąd, jak się spodziewam, astronomia fal grawitacyjnych uprawiana w czterech zakresach częstotliwości nas zaprowadzi. Najpierw jednak poczynię kilka osobistych uwag na temat początków historii naszych wspólnych eksperymentalno-teoretycznych poszukiwań mających

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.

2. Więcej osobistych przeżyć i wydarzeń, które doprowadziły do tego wystąpienia można znaleźć w moim biogramie noblowskim.



Ryc. 1. John Wheeler, Robert Dicke i Joseph Weber. [Dzięki uprzejmości: Archiwum Wizualnego AIP Emilio Segré, Kolekcja Wheelera (fotografia Wheelera); Wydziału Fizyki Uniwersytetu w Princeton (fotografia Dickęgo); Archiwum Wizualnego AIP Emilio Segré (fotografia Webera).]

na celu otworzenie pierwszego grawitacyjno-falowego okna na Wszechświat.

## II. Trochę osobistych wspomnień z przeszłości: lata 1962–1976

Zapałałem miłością do grawitacji gdy byłem nastolatkiem dorastającym w Logan w stanie Utah. To, że poszedłem na uniwersytet w Princeton studiować pod opieką wielkiego guru relatywistyki Johna Archibalda Wheelera, było więc nieuniknione. Przyjechałem do Princeton jesienią 1962 roku, ukończyłem doktorat wiosną 1965 i pozostałem tam jeszcze rok po doktoracie. Wheeler był dla mnie inspiracją, gdy chodzi o czarne dziury, gwiazdy neutronowe i fale grawitacyjne, czyli koncepty relatywistyczne, które w owym czasie nie były jeszcze potwierdzone obserwacyjnie. Z kolei Robert Dicke inspirował i kształcił mnie w dziedzinie fizyki eksperymentalnej, a szczególnie w eksperymentach mogących być sprawdzianem Ogólnej Teorii Względności Einsteina.

W lecie 1963 roku wziąłem udział w ośmiotygodniowej *École d'Été de Physique Théorique* w Les Houches we Francji. Tam dzięki wykładom Raya Sachsa zetknąłem się z elegancką matematyczną teorią fal grawitacyjnych,<sup>3</sup> a dzięki wykładom Joe Webera zapoznałem się z doświadczalnym ich poszukiwaniem. Wykłady te oraz wpływ Wheelera, w połączeniu z dyskusjami odbytymi z Weberem podczas wspólnych wspinaczek na oko-

liczne szczyty alpejskie, przywiązały mnie do fal grawitacyjnych jako potencjalnego kierunku badawczego. To też gdy w roku 1966 przenieśliśmy się z Princeton do Caltechu i zacząłem budować grupę badawczą składającą się z sześciu doktorantów i trzech postdoków, skoncentrowaliśmy się jako grupa na czarnych dziurach, gwiazdach neutronowych i falach grawitacyjnych.

Początkowo badania prowadzone nad falami grawitacyjnymi przez moją grupę były raczej teoretyczne. Skupialiśmy się na reakcji związanej z emisją promieniowania grawitacyjnego (czy i jak wysyłanie fal grawitacyjnych powoduje odrzut ich źródła, podobny do odrzutu odczuwanego przy wystrzeliwaniu pocisku). Co ważniejsze jednak, rozwinęliśmy nowe techniki dokładnego obliczania szczegółowych charakterystyk fal grawitacyjnych emitowanych przez takie źródła astrofizyczne, jak wirujące, zdeformowane gwiazdy neutronowe, pulsujące gwiazdy neutronowe i pulsujące czarne dziury. I co najważniejsze, zaczęliśmy (opierając się nie tylko na pracach naszej grupy, ale także na pracach kolegów z innych ośrodków) tworzyć *wizję przyszłej astronomii fal grawitacyjnych*: jakie będą zakresy częstotliwości, na których można będzie dokonywać obserwacji, jakie mogą być najsilniejsze źródła fal grawitacyjnych w każdym z takich zakresów i jaką informację fizyczną można uzyskać z fal pochodzących z danego źródła. Spisaliśmy tę rozwijającą się wizję w serii przeglądowych artykułów, poczynając od artykułu mojego i mojego studenta, Billa Pressa (Press i Thorne, 1972) i kontynuując ją w ukazujących się co kilka lat artykułach aż do roku 2001 (Cuter i Thorne, 2002), kiedy to wraz z kolegami napisałem naukowe uzasadnienie budowy Zaawansowanych Interferometrów Grawitacyjnych LIGO (Thorne i inni, 2001).

Dla naszej ewoluującej wizji szczególnie ważna była skrajnie duża różnica pomiędzy falami elektromagnetycznymi, za pomocą których astronomowie badali

3. Czytelnikowi polskiemu warto w tym miejscu przypomnieć, że jedną z fundamentalnych prac dających podstawy matematyczne tej teorii napisał Andrzej Trautman (Wydział Fizyki UW). W pracach prowadzących do opisywanego przez autora sukcesu brała też bardzo aktywny udział liczna grupa polskich astronomów, astrofizyków i relatywistów tworząca grupę Virgo-Polgraw, zob. polgraw.camk.edu.pl (przyp.tłum.).

w owym czasie Wszechświat, a oczekiwanyimi właściwościami astrofizycznych fal grawitacyjnych:

- Fale elektromagnetyczne (światło, fale radiowe, promieniowanie X, promieniowanie gamma,...) są oscylującymi elektrycznymi i magnetycznymi polami rozchodzącymi się w czasoprzestrzeni. Fale grawitacyjne zaś są oscylacjami „tkaniny” czy też formy samej czasoprzestrzeni. Trudno o większą różnicę w fizycznym charakterze obu tych rodzajów fal!
- Fale elektromagnetyczne pochodzące ze źródeł astrofizycznych są zawsze niekoherentnymi superpozycjami fal wysłanych przez pojedyncze cząstki naładowane, atomy lub cząsteczki. Natomiast astrofizyczne fale grawitacyjne są emitowane w sposób koherentny przez całościowy ruch masy lub energii. Znów więc te dwa rodzaje fal nie mogą się bardziej od siebie różnić.
- Wszystkie astrofizyczne fale elektromagnetyczne są bardzo łatwo absorbowane i rozpraszane przez materię znajdującą się pomiędzy ich źródłem i Ziemią. Fale grawitacyjne nigdy nie są znacząco absorbowane lub rozpraszane przez materię, nawet gdy były wyemitowane w najwcześniejszych chwilach życia Wszechświata.

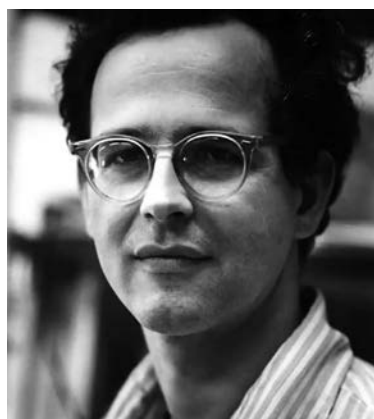
Konsekwencją tych znaczących różnic było, jak mi się wydawało, to że:

- Wielu źródeł fal grawitacyjnych nie da się zobaczyć elektromagnetycznie.
- Tak jak każdy nowy zakres częstotliwości lub „okno” fal elektromagnetycznych: fale radiowe, promieniowanie X, promieniowanie gamma – gdy stał się dostępny, przynosił wielkie niespodzianki dzięki różnicom pomiędzy zakresami oraz innym różnicom, tak też jest wielkie prawdopodobieństwo, iż fale grawitacyjne, dzięki temu, że tak znacząco różnią się od elektromagnetycznych, przyniosą jeszcze większe niespodzianki.
- Astronomia grawitacyjna ma wszelkie dane by zrewolucjonizować nasze rozumienie Wszechświata.

Gdy w roku 1972 z Billem Pressem spisywaliśmy naszą pierwszą pracę kreslącą tę wizję, w MIT Rai Weiss pisał jedną z najistotniejszych i dalekowzrocznych prac ze wszystkich, jakie w życiu czytałem (Weiss, 1972). Proponował w niej użycie jako detektora fal grawitacyjnych interferometru laserowego w kształcie litery L (*interferometru grawitacyjnego*) wyposażonego w swobodnie wahające się lustra, których zmieniająca się wzajemna

odległość byłaby mierzona dzięki interferencji wiązek laserowych. Główna idea takiego urządzenia była zaproponowana wcześniej niezależnie przez Michaela Gertsenshteina i Vladislava Pustovoita (Gertsenshtein i Pustovoit 1963), ale to Weiss i tylko Weiss zdiagnozował najpoważniejsze źródła szumu, z jakimi trzeba by się uporać i zaproponował sposoby radzenia sobie z każdym z tych źródeł, a także oszacował osiągalną dzięki nim czułość urządzenia na fale grawitacyjne. Porównując ją z oszacowanym natężeniem fal pochodzących ze źródeł astrofizycznych, Rai doszedł do wniosku, iż tego typu interferometr o ramieniu długości rzędu kilometra miałby realną szansę odkryć fale grawitacyjne. (To dlatego uważam Raia za głównego wynalazcę interferometrów grawitacyjnych).

Rai, jak to Rai, nie opublikował tej ważnej pracy w normalnym czasopiśmie fizycznym. Uważał, że publikować powinno się dopiero po zbudowaniu interferometru i odkryciu fal grawitacyjnych. Zamiast tego wydał więc swoją pracę w serii wewnętrznych raportów MIT, ale rozprowadził też jej kopie wśród kolegów.



Ryc. 2. Rainer Weiss około roku 1970. [Dzięki uprzejmości Weissa.]

Usłyszałem o pomysłe Raia na grawitacyjny interferometr wkrótce po napisaniu przez niego tej pracy, w czasie gdy wraz z Johnem Wheelerem i Charlesem Misnerem nadawaliśmy ostatni szlif podręcznikowi *Gravitation* (Misner, Thorne i Wheeler, 1973) i przygotowaliśmy go do wysłania do naszego wydawcy. Nie przestudiowałem więc jeszcze pracy Raia ani nie przedyskutowałem z nim jego pomysłów, ale nie wydało mi się prawdopodobnym, by ta koncepcja mogła się kiedykolwiek sprawdzić. Wymagała ona w końcu mierzenia przemieszczeń luster bilion razy mniejszych (tj. o czynnik  $10^{-12}$ ) niż długość fali światła użytego do pomiaru tego przemieszczenia, tzn., używając języka technicznego, by rozdzielić włos na  $10^{12}$  części. Wydawało się to niedorzecznością, więc zamieściłem w podręczniku kilka słów na temat interferometru grawitacyjnego Raia, opatrując go mianem „mało obiecującego”.



Ryc. 3. Uczestnicy Warsztatów na temat fal grawitacyjnych z roku 1978. [Dzięki uprzejmości Larry'ego Smarra.]

W ciągu następnych trzech lat dowiedziałem się więcej o pomysłach Raia, przedyskutowałem go szczegółowo z nim samym (najbardziej wryła mi się w pamięć całonocna rozmowa w pokoju hotelowym w Waszyngtonie w roku 1975) i z innymi. I nawróciłem się. Zaczęłem rozumieć, że grawitacyjny interferometr Raia ma realną szansę odkryć fale grawitacyjne pochodzące ze źródeł astrofizycznych.

Byłem także przekonany, że jeśli uda się zaobserwować fale grawitacyjne, mogą one zrewolucjonizować nasze rozumienie Wszechświata. Podjąłem więc decyzję, że ja i moja grupa badawcza fizyków teoretyków musimy zrobić wszystko co możliwe, by pomóc Raiowi i jego kolegom doświadczalnikom odkryć fale grawitacyjne. Najważniejszym pierwszym krokiem w tym kierunku było przekonanie władz Caltechu do stworzenia grupy eksperymentalnej zajmującej się badaniem fal grawitacyjnych, pracującej równoległe z grupą Raia w MIT.

Resztę tej historii od strony eksperymentalnej opisuje Rai w swojej części I naszego wykładu noblowskiego, a ja trochę o niej opowiadałem w moim noblowskim biogramie. Teraz więc naszkicuję stronę teoretyczną tej historii.

### III. Źródła fal grawitacyjnych

Gdy Bill Press i ja pisaliśmy naszą pracę-wizję z 1972 roku, nasze rozumienie źródeł fal grawitacyjnych było dość mętne, ale gdzieś około roku 1978 społeczność

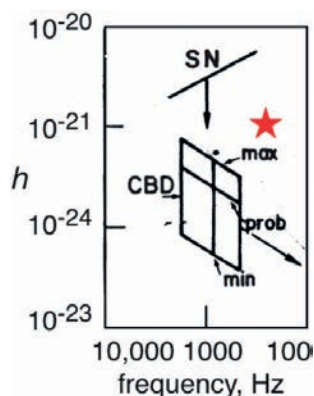
astrofizyków-relatywistów dopracowała się znacznie lepszemu zrozumieniu. Osiągnięcie tego przyspieszyły dwutygodniowe Warsztaty: Źródła Fal Grawitacyjnych zorganizowane przez Larry'ego Smarra w Seattle w Stanie Washington na przełomie lipca i sierpnia 1978. Wzięli w nich udział niemal wszyscy czołowi teoretycy i doświadczalnicy zajmujący się falami grawitacyjnymi z całego świata, a także pewna liczba doktorantów i postdoków.

Pewne wnioski, do których doszliśmy na Warsztatach, zostały podsumowane wykresami pokazującymi przewidywane amplitudy  $h$  fal grawitacyjnych pochodzących z różnych możliwych źródeł w funkcji ich częstotliwości  $f$  (Epstein i Clark, 1979). Wykresy takie były trzy: jeden odpowiadający falam krótkotrwałym („roz-błyskom”), jeden odpowiadający długo trwającym falam periodycznym (pochodzącym przede wszystkim z pulsarów i innego rodzaju wirujących, zdeformowanych gwiazd neutronowych) i jeden odpowiadający falam stochastycznym (będącym przede wszystkim efektem, jak wtedy sądziliśmy, superpozycji fal emitowanych z wielu dyskretnych źródeł). Najistotniejszy dla tego wykładu jest fragment (pokazany na ryc. 4) wykresu odpowiadającego falam-robłyskom, który obejmuje zakres częstotliwości LIGO.

Fale uwzględnione na ryc. 4 pochodzą z:

- *Supernowych* (SN), tj. z prowadzącego do powstania gwiazdy neutronowej zapadania się rdzenia normalnej gwiazdy; uwolniona zostaje przy tym





Ryc. 4. Fragment sporządzonego w roku 1978 wykresu źródeł rozbłysków grawitacyjnych

olbrzymia ilość energii grawitacyjnej, co prowadzi do rozerwania zewnętrznych warstw gwiazdy.

- *Destrukcji zwartych układów podwójnych*, tj. z krążących wokół siebie po zacieśniających się orbitach i w końcu zlewających się jedna z drugą dwóch czarnych dziur, dwóch gwiazd neutronowych lub czarnej dziury i gwiazdy neutronowej.

Linia oznaczona na ryc. 4 literami SN pokazuje szacowane maksymalne natężenia fal grawitacyjnych pochodzących z supernowych. Bardziej współczesne oszacowania przewidują, że fale takie są znacznie słabsze. Równoległobok oznaczony literami CBD (od Compact Binary Destruction) pokazuje zakres, w którym oczekiwane były najsilniejsze fale grawitacyjne pochodzące z układów podwójnych.

Na podstawie tego rysunku, my, uczestnicy tych Warsztatów, stwierdziliśmy, iż najsilniejszy rozbłysk fal grawitacyjnych dochodzący co roku do Ziemi powinien mieć amplitudę z grubsza  $h \sim 10^{-21}$ ; (mylnie chyba) pamiętam, że uniesieni entuzjazmem dla tego celu nosiliśmy T-shirty z umieszczonym na nich logo „ $10^{-21}$  lub rozbłysk”. Koledzy obdarzeni lepszą niż ja pamięcią zapewniają mnie jednak, że tylko rozważaliśmy zrobienie takich T-shirtów; T-shirty takie nigdy naprawdę nie powstały.

Pierwszy rozbłysk, który ostatecznie zarejestrował detektor LIGO w 2015 r. sytuuje się na wykresie z ryc. 4 w miejscu, w którym dodałem czerwoną gwiazdkę. Pochodził on z destruktacji układu podwójnego (CBD) – z zacieśniania się orbity i w końcu zlania się dwóch czarnych dziur (czyli z „podwójnej czarnej dziury” oznaczanej BBH). Rozbłysk ten miał amplitudę  $h$  wynoszącą dokładnie  $10^{-21}$  i częstotliwość około 200 Hz – amplituda ta była trochę większa, częstotliwość zaś trochę niższa, niż przewidywały nasze oszacowania z roku 1978. Ta zgodność przewidywań z obserwacją jest trochę wynikiem szczęścia. Poziom naszego zrozumienia w roku 1978 był znacznie niższy niż sugeruje.

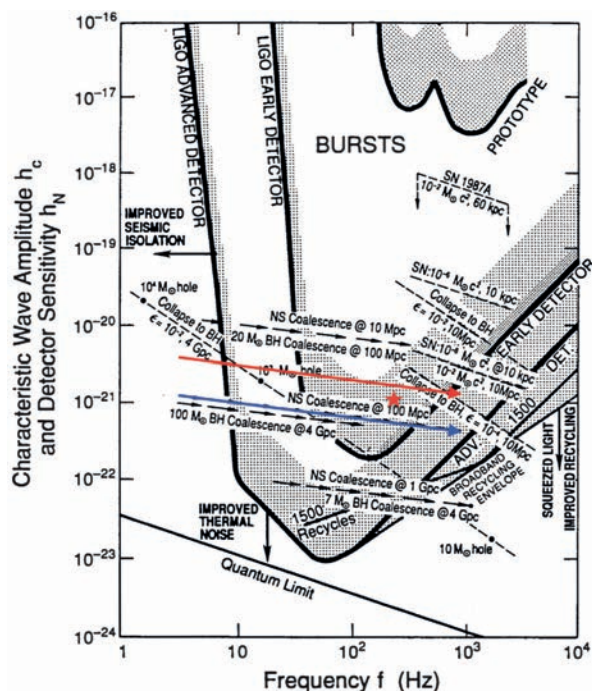
Do roku 1984, kiedy to Weiss, Drever i ja wspólnie zapoczątkowaliśmy projekt LIGO, uważałem że jest prawdopodobne, iż najsilniejsze fale jakie detektor LIGO zarejestruje, będą pochodzić ze zlewania się podwójnych czarnych dziur (tak jak się rzeczywiście stało). Rozumowałem w prosty sposób:

- Amplituda  $h$  fali grawitacyjnej emitowanej przez zwarty układ podwójny jest proporcjonalna do jego masy (jeśli składa się on z dwóch obiektów o mniej więcej takich samych masach).
- W związku z tym odległość, z jakiej LIGO może jeszcze „widzieć” taki układ o masie od kilku po kilkaset mas Słońca (tj. układ podwójny o „gwiazdowej” masie) jest również proporcjonalna do jego masy (jeśli tylko fale przezeń emitowane mają częstotliwość leżącą w zakresie LIGO).
- Przestrzenna objętość, wewnątrz której LIGO może widzieć takie układy podwójne, jest więc proporcjonalna do sześcianu ich masy.
- Masy znanych podówczas czarnych dziur o „gwiazdowych” masach były aż dziesięciokrotnie większe niż masy gwiazd neutronowych, więc przeszukiwana objętość byłaby tysiąckrotnie większa niż analogiczna objętość odpowiadająca gwiazdom neutronowym.
- Wydawało mi się, że ten czynnik 1000 powinien kompensować to, iż liczba (bardzo słabo rozumiana) podwójnych czarnych dziur (BBH) we Wszechświecie jest mniejsza od liczby układów podwójnych gwiazd neutronowych (BNS).

Choć były to tylko domysły, spowodowały one, że przy planowaniu LIGO główny nacisk położyliśmy na układy podwójne czarnych dziur oraz na o wiele lepiej zrozumiane układy podwójne gwiazd neutronowych.

Do roku 1989, kiedy to pod kierownictwem Rochusa (Robbiego) Vogta napisaliśmy projekt konstrukcji detektora LIGO (Vogt i inni. 1989) i wysłaliśmy go do Narodowej Fundacji Nauki (NSF – National Science Foundation), fale grawitacyjne ze zwartych układów podwójnych były głównym argumentem naszego uzasadnienia, jak duża powinna być czułość interferometru grawitacyjnego.

Oszacowane częstość zachodzenia zdarzeń i natężenia fal były tak istotne w naukowym uzasadnieniu projektu LIGO, że uważaliśmy za sprawę zasadniczej wagi oparcie się na oszacowaniach wykonanych przez astrofizyków nie mających bezpośredniego związku z naszym projektem. Takie odnoszące się do układów podwójnych gwiazd neutronowych (BNS) oszacowania



Ryc. 5. Wykres A-4a pochodzący z projektu konstrukcji detektora LIGO z 1989 roku pokazujący krzywe oszacowania szumu (linie ciągłe) w interferometrach LIGO: pierwotnym i zaawansowanym oraz oszacowania natężeń fal grawitacyjnych pochodzących z różnych źródeł. Górne części zaciętych obszarów są natężeniami, jakie sygnał musiałby mieć, żeby mógł być wykryty w sposób nie budzący wątpliwości, przy założeniu szumu gaussowskiego i optymalnym przetwarzaniu sygnału. Krzywa ograniczenia kwantowego odpowiada lustrom o masie 1000 kg

(oparte na statystyce obserwowanych podwójnych pulsarów w naszej własnej galaktyce, tj. Drodze Mlecznej – Clark, Van den Heuvel i Sutantyo, 1979) umiejscawiała najbliższe, zachodzące co roku zlewanie się układów BNS gdzieś w odległości pomiędzy 60 a 200 Mpc, przy najbardziej prawdopodobnej ich odległości 100 Mpc (320 milionów lat świetlnych) i przewidywały natężenie sygnału takie, jak pokazuje linia niebieskich strzałek na ryc. 5. (W roku 2017, gdy został zaobserwowany pierwszy układ BNS, jego odległość wynosiła 40 Mpc, czyli była trochę mniejsza niż oczekiwana, a natężenie wyemitowanej przezeń fali było takie, jak wskazuje linia czerwonych strzałek na rycinie). W roku 1989 niepewność co do tego, jak często zdarza się zlewanie układów podwójnych czarnych dziur (BBH) była wciąż tak duża, że nie przytoczyliśmy żadnych oszacowań. (Na rycinie 5 pierwszy, zaobserwowany w roku 2015, układ BBH wskazuje czerwona gwiazdka.)

Pomiędzy rokiem 1990 a 2010 astrofizycy dokonali bardziej wiarygodnych oszacowań charakterystyk fal pochodzących z układów BBH i BNS (LIGO/Virgo, 2010). Zmieniły one o czynnik mniejszy niż 2 szacowane odległości do układów BNS i zawężyły niepewność oszacowania odległości do najbliższych układów BBH do czynnika rzędu 10 (i czynnika rzędu 100, gdy chodzi o częstość występowania rozbłysków).

#### IV. Informacje niesione przez fale grawitacyjne i teoretyczne wyznaczanie profilu fal grawitacyjnych

##### A. Informacje zawarte w falach pochodzących ze zlewających się zwartych układów podwójnych

W roku 1986 Bernard Schutz (Schutz, 1986), jeden z liderów niemiecko-brytyjskich badań nad falami grawitacyjnymi, zidentyfikował *observable*, tj. wielkości, których wartości można odczytać z fali grawitacyjnej emitowanej przez układ podwójny we wczesnej fazie jego ewolucji, gdy dwa obiekty poruszają się po zacieśniających się trajektoriach. Mierząc zmienność z czasem  $t$  amplitudy  $h(t)$  fali grawitacyjnej w kilku punktach na Ziemi, można – jak ustalił – wyznaczyć:

- kierunek do układu podwójnego,
- nachylenie orbity takiego układu względem kierunku, z którego jest on obserwowany,
- kierunek, w jakim dwa obiekty obiegają swoją orbitę,
- *masę świergotu* (ang. chirp mass),  

$$M_c = (M_1 M_2)^{3/5} / (M_1 + M_2)^{1/5},$$
gdzie  $M_1$  i  $M_2$ , są masami tych obiektów,
- odległość  $r$  układu podwójnego od Ziemi (dokładniej, używając języka technicznego, jego *odległość jasnościową*).

Warto zauważyć, że astronomia grawitacyjna daje nam odległość  $r$  do układu podwójnego, ale nie jego przesunięcie  $z$  ku czerwieni (względną zmianę długości fali spowodowaną oddalaniem się jej źródła od Ziemi), podczas gdy astronomia elektromagnetyczna, patrząc na ten sam układ podwójny, potrafi bezpośrednio zmierzyć jego przesunięcie ku czerwieni, ale nie odległość.



Ryc. 6. Bernard F. Schutz. [Dzięki uprzejmości Schutza.]

W tym sensie obserwacje grawitacyjne i elektromagnetyczne są komplementarne – nie dublują się.

Zależność  $r(z)$  pomiędzy odległością i przesunięciem ku czerwieni jest podstawową daną obserwacyjną kosmologii. Jeśli układ podwójny nie jest zbyt odalony,  $r(z)$  wyznacza dzisiejsze hubbleowskie tempo rozszerzania się Wszechświata. Jak podkreślał Schutz, w przypadku podwójnych gwiazd neutronowych powinno być możliwe zaobserwowanie zarówno emitowanych przez nie fal grawitacyjnych (odległości), jak i fal elektromagnetycznych (przesunięcia ku czerwieni) i w ten sposób uprawianie kosmologii. To właśnie zdarzyło się w roku 2017, gdy interferometr LIGO odkrył swój pierwszy układ BNS o numerze GW170817 (zob. część II Barisha tego wykładu).

(W roku 1986, po zidentyfikowaniu obserwabli dostępnych poprzez badanie fal grawitacyjnych, Schutz zaczął kłaść podwaliny pod analizę danych dostarczanych przez interferometry grawitacyjne (Schutz, 1989). Stał się intelektualnym przywódcą pierwszych lat takich badań, zanim jeszcze ktokolwiek z zespołu LIGO zaczął myśleć o analizie danych. Na temat analizy danych zbieranych przez detektor LIGO – zob. części I Weissa i II Barisha tego wykładu.)

Gdy zwarty układ podwójny zacieśnia się z powodu reakcji promieniowania, siła wzajemnego przyciągania grawitacyjnego dwu ciał zwiększa się, wzrasta prędkość ich ruchu i z tego powodu efekty relatywistyczne (odstępstwa od newtonowskiego prawa grawitacji) stają się coraz silniejsze. Stanowi to problem (konieczne jest obliczanie poprawek relatywistycznych do profilu fali emitowanej przez układ podwójny), ale zarazem także i *okazję* (gdy takie odstępstwa zostaną zaobserwowane, mogą dać nam dodatkową informację o układzie i zostać wykorzystane jako nowe sposoby sprawdzania Ogólnej Teorii Względności).

## B. Przybliżenie postnewtonowskie przy wyznaczaniu profilu fal emitowanych przez zlewające się układy podwójne

Relatywistyczne poprawki oblicza się w praktyce wykorzystując tzw. *postnewtonowskie przybliżenie* Ogólnej Teorii Względności, tj. rozwinięcie w szereg potęgowy względem szybkości orbitalnych  $v$  ciał i względem newtonowskiego potencjału grawitacyjnego  $\Phi \sim v^2$ . Wobec znaczenia takich poprawek do profilu falowego dla astronomii, włożono, poczynając od lat siedemdziesiątych XX w., wiele wysiłku w ich obliczenie. Wysiłek ten wzmógł się w latach osiemdziesiątych, dziewięćdziesiątych i po roku 2000. Szacuję, że poszło nań więcej niż 100 osobolet intensywnej pracy. Główny wkład wnieśli tu, między innymi, Luc Blanchet, Thibault Damour, Bala Iyer i Clifford Will; do chwili obecnej rachunki wychodzące poza newtonowską teorię grawitacji doprowadzono do rzędu  $v^7$  (Blanchet, 2014). Tak jak się spodziewano, w każdym kolejnym rzędzie rachunku pojawiają się nowe obserwabli, których wartości można odczytać z obserwowanych fal. Chodzi tu przede wszystkim o masy  $M_1$  i  $M_2$  obu ciał układu podwójnego, o wektorowy moment pędu, a także – jeśli orbita układu podwójnego nie jest kołowa – o jej zmieniającą się eliptyczność, orientację eliptyczną i relatywistyczne odstępstwa od ruchu po elipsie. I z każdym rzędem pojawiają się nowe możliwości obserwacyjnego weryfikowania einsteinowskiej Ogólnej Teorii Względności – testy takie przeprowadza się teraz wykorzystując dane zebrane przez LIGO (Cutler i inni, 1993; LIGO/Virgo 2016).

## C. Zastosowanie numerycznej teorii względności do wyznaczania profilu fal emitowanych przez zlewające się układy podwójne

Gdy względna prędkość ciał układu podwójnego dochodzi do 1/3 prędkości światła, a same ciała są już blisko



Ryc. 7. Luc Blanchet, Thibault Damour, Bala Iyer oraz Clifford M. Will. [Dzięki uprzejmości tychże panów.]



zderzenia się, przybliżenie postnewtonowskie załamuje się. Stanowi to znów *problem* (jak wyznaczyć profil fali) i zarazem *okazję* (nowe informacje zawarte w profilu).

Jedynym godnym zaufania sposobem wyznaczenia profilu fali na tym etapie zderzenia ciał jest symulacja numeryczna: rozwiązywanie relatywistycznych równań einsteinowskiej Ogólnej Teorii Względności na komputerze, czyli *numeryczna teoria względności*. Z tego powodu w latach osiemdziesiątych zacząłem popędzać moich kolegów zajmujących się numeryczną teorią względności, aby bardziej żwawo przyłożyli się do takich symulacji.

Symulowanie układów podwójnych czarnych dziur (BBH) było szczególnie ważne z kilku powodów:

- Detektor LIGO miałby trudności w wykryciu i monitorowaniu mających bardzo wysokie częstotliwości fal wytwarzanych na etapie zderzenia się dwóch gwiazd neutronowych (BNS), które mają małe masy (około 1,4 masy Słońca każda); niemal cały sygnał i możliwa do uzyskania informacja będzie więc pochodzić z niższych częstotliwości, przy analizie których postnewtonowskie przybliżenie jest wystarczająco dokładne.
- W przeciwieństwie do zderzeń gwiazd neutronowych, na etapie zderzenia się dwóch czarnych dziur powstają fale o częstotliwościach, na które interferometr LIGO jest najbardziej czuły. (To właśnie zdarzyło się, gdy po raz pierwszy zarejestrowano rozbłysk falowy GW150914. Niemal całe natężenie tego sygnału pochodziło z etapu zderzenia, który może być analizowany jedynie za pomocą numerycznej teorii względności).
- Profile fal pochodzących ze zderzeń i zlewania się czarnych dziur skrywają szczegółowe informacje o *geometrodynamice*, tj. o nieliniowej dynamice zakrzywionej czasoprzestrzeni, o której w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych wiedzieliśmy bardzo niewiele.

W końcu lat pięćdziesiątych i na początku sześćdziesiątych John Wheeler doszedł do przekonania, że geometrodynamika jest niezwykle istotna. Jest ona obszarem, w którym einsteinowska Ogólna Teoria Względności powinna być najbogatsza, a odstępstwa od newtonowskich praw grawitacji najsilniejsze. Idealną areną do studiowania geometrodynamiki powinny być, jak twierdził, właśnie zderzenia czarnych dziur. Świadom tego, że badanie geometrodynamiki metodami analitycznymi, tj. za pomocą jedynie kartki papieru i długopisu, jest niemal niemożliwe, Wheeler zachęcał swoich studentów i kolegów do badania jej za pomocą symulacji komputerowych.

Mając to na celu, studenci i koledzy Wheelera zaczęli kłaść podwaliny pod symulacje komputerowe układów podwójnych czarnych dziur: w latach 1959–61 Charles Misner, Richard Arnowitt i Stanley Deser (Arnowitt, Deser i Misner, 1962 i prace tam cytowane) sprowadzili matematykę równań Einsteina do postaci niemal idealnej dla metod numerycznych, a Misner rozwiązał analitycznie *problem danych początkowych*, zwany też *problemem więzów* tych równań, otrzymując matematyczny opis znajdujących się chwilowo w spoczynku i blisko siebie dwóch czarnych dziur (Misner, 1960). Następnie, w roku 1963, Susan Hahn i Richard Lindquist (Hahn i Lindquist, 1964) rozwiązali na komputerze IBM 7090 kompletne równania Einsteina i w ten sposób mogli obserwować, jak dwie czarne dziury spadają czołowo jedna na drugą i zaczynają się nawzajem deformować. Niestety Hahn i Lindquist nie mogli prowadzić tych obliczeń wystarczająco długo, by zobaczyć zderzenie i zlanie się czarnych dziur, ani też emitowanych przy tym fal grawitacyjnych.

Rachunki te w końcu lat sześćdziesiątych ponownie podjęli, zmieniając nieco szczegóły sformułowania problemu, Bryce DeWitt oraz jego student Larry Smarr, a do końca doprowadzili je w roku 1978 Smarr i z kolei jego student Kenneth Eppley (Smarr, 1979 i prace tam cytowane). W symulacjach tych dwie czarne dziury zderzały się czołowo i zlewały, tworząc jedną, silnie zniekształconą czarną dziurę, która wykonywała kilka oscylacji (dzwoniła jak tłumiony dzwon) emitując rozbłysk fal grawitacyjnych, by następnie ustabilizować się i przejść w spokojny stan. Tym samym mieliśmy wreszcie nasz pierwszy przykład geometrodynamiki.

Jednak w przyrodzie zderzenia czołowe, jeśli w ogóle mogłyby się zdarzać, to rzadko. Gdy dwie czarne dziury krążą jedna wokół drugiej, reakcja promieniowania grawitacyjnego powoduje, iż orbita dość szybko staje się kołowa. Tak więc zderzające się i zlewające czarne dziury w układach podwójnych powinny niemal zawsze poruszać się po zacieśniających się orbitach spiralnych. Wyzwaniem na lata osiemdziesiąte i dziewięćdziesiąte stało się więc symulowanie takich właśnie układów.

Było to tak trudne, że do roku 1992 udało się osiągnąć jedynie niewielki postęp. Aby go przyspieszyć Richard Isaacson (który w Narodowej Fundacji Nauki z wielką zręcznością prowadził eksperymetalną część programu LIGO – zob. część I Weiss'a tego wykładu) naciskał na wszystkie istniejące na świecie grupy zajmujące się numeryczną teorią względności, by choć luźno współpracowały ze sobą nad tym zagadnieniem. Sojusz ten, nazwany *Binary Black Hole Grand Challenge Alliance*, koordynował Richard Matzner z Uniwersytetu w Austin w Teksasie, a ja byłem przewodniczącym jego komitetu doradczego. W roku 1995, aby wytworzyć więź



Ryc. 8. Wykład Johna Wheelera na temat geometrodynamiki i pokrewnych zagadnień z okazji sześćdziesiątych urodzin Willy'ego Fowlera w sierpniu 1971 roku w angielskim Cambrige. Połyskująca łysiną głowa laureata nagrody Nobla Fowlera jest widoczna w pierwszym rzędzie. [Ze zbiorów własnych autora.]



Ryc. 9. Charles W. Misner, Richard Lindquist, Bryce DeWitt oraz Kenneth Eppley i Larry Smarr. Nie zdołałem znaleźć fotografii Susan Hahn. [Kolejno zdjęcia dzięki uprzejmości: C. Misnera, Specjalnych Zbiorów i Archiwum Uniwersyteckiej Biblioteki im Wesleya, ze zbiorów własnych autora i L. Smarra.]

i przyspieszyć sprawy założyłem się z wieloma członkami Sojuszu, że detektor LIGO zaobserwuje fale grawitacyjne ze zlewania się czarnych dziur wcześniej niż numeryczni relatywiści zdołają dokonać symulacji takiego zlewania się. Miałem gorącą nadzieję przegrać, gdyż symulacje miały być niezwykle istotne przy odczytywaniu informacji niesionej przez rejestrowane fale.

Do początku roku 2002 Sojusz dokonał sporego postępu, ale nadal nie był w stanie symulować kompletnej orbity dwóch krążących, jedna wokół drugiej, czarnych dziur. Programy komputerowe łałamywały się, nim dochodziły do końca orbity i zacząłem się martwić, że mogę zakładać jednak wygrać.

Zaalarmowany porzuciłem codzienne obowiązki przy projekcie LIGO i skupiłem się na tym, by pomóc popchnąć numeryczną teorię względności naprzód. Razem z Lee Lindblomem stworzyliśmy na Caltechu badawczą grupę numerycznej teorii względności jako przedłużenie grupy, którą najbardziej poważałem, tj. grupy Saula Teukolskiego z Cornell. Z pomocą pieniędzy

pozyskanych z prywatnej Sherman Fairchild Foundation rozwinęliśmy wspólny, Caltechu i uniwersytetu w Cornell, *Program Symulowania Ekstremalnych Czasoprzestrzeni* (SXS - od *Program to Simulate eXtreme Spacetimes*) doprowadzając go do rozmiarów, jakie wydawały się nam konieczne, by osiągnąć sukces: około 30 badaczy.

Pierwszy wielki tryumf programu SXS nie był jednak efektem pracy zespołowej grupy SXS. Był on raczej indywidualnym tryumfem postdoka w tej grupie, Franza Pretoriusa. W czerwcu 2005 roku Franz scalił różne techniki i narzędzia obliczeniowe w jeden kod komputerowy, któremu udało się wysymulować zderzenie i zlanie się poruszającego się po spiralnej orbicie układu podwójnego identycznych, nieobrcających się czarnych dziur (Pretorius, 2005). Sześć miesięcy później dwie inne niewielkie grupy badawcze osiągnęły ten sam cel używając dość odmiennych technik i narzędzi: jedna kierowana przez Joan Centrellę z Centrum Lotów Kosmicznych im. Goddarda w NASA oraz druga



Niniejszym Kip Thorne stwierdza, iż Ligo w sposób przekonujący odkryje fale grawitacyjne wytwarzane przez zlewające się czarne dziury, zanim numeryczni relatywiści stworzą kod komputerowy mogący postać profilu takich fal pochodzących ze zlewania się dziur o dowolnie skierowanych momentach pędu i stosunku mas w zakresie od 1:1 do 10:1 obliczyć z dziesięcioprocentową dokładnością, ustaloną na podstawie wewnętrznej zgodności rachunkowej. Niżej podpisani twierdzą, że Kip nie ma racji.


Przegrany (przegran) stawia(ją) butelkę wina o wartości nie mniej niż 100 dolarów, które ma być wypite wspólnie przez zwycięzcę (zwycięzców) i przegranych (przegranego).

Umowę sporządzono 17 dnia lipca, 1995 roku w Austin w Teksasie przez

**Kip S. Thorne**

Richard Matzner  
Wai-Mo Suen  
Ed Seidel  
Mark Scheel  
Lawrence E. Kidder  
Gregory B. Cook  
Luciano Rezzolla  
Mark Miller  
Larry Shepley  
Shyamal Mitra  
Manoj Maharaj  
Daniel Holz  
Pablo Laguna  
Roberto Gomez

Jörg Frauendiener  
Dierdre Shoemaker  
Bernd Brügmann  
Béla Szilágyi  
Nigel Bishop  
Sascha Husa  
Jeff Winicour  
Mijan Huq  
Luis Lehner  
Robert Marsa  
Scott Klasky  
Marcus Berg  
Juan F. Lara  
Ethan Honda



Richard Matzner

Ryc. 10. Mój zakład z Richardem Matznerem (na fotografii) i członkami jego Binary Black Hole Grand Challenge Alliance.



Ryc. 11. Franz Pretorius, Manuela Campanelli, Joan Centrella i Saul A. Teukolsky. [Dzięki uprzejmości, kolejno: Nowojorskiej Akademii Nauk, A. Sue Weisler/RIT, Dwighta Allena i S. Teukolsky'ego.]

kierowana przez Manuę Campanelli, z teksańskiego uniwersytetu w Bronsville (Baker i inni, 2006; Campanelli i inni, 2006). Odetchnąłem z ulgą: realnym stało się, że przegram zakład!

Byliśmy jednak wciąż daleko od zaspokojenia potrzeb LIGO. Konieczne było symulowanie układów podwójnych czarnych dziur o masach różniących się o czynnik rzędu 10, wirujących z różnymi prędkościami kątowymi i mającymi różne kierunki. Obliczenia takie powinny były być wykonywane przez kody komputerowe wystarczająco stabilne i odporne, mające dobrze określoną dokładność odpowiadającą wymaganiom LIGO. Niezbędne było też wykonanie dużego zestawu symulacji pokrywających cały zakres parametrów charakteryzujących źródła, których sygnały mógł zarejestrować detektor LIGO. Takich istotnych parametrów jest siedem: stosunek mas czarnych dziur i po trzy składowe wektora momentu pędu każdej z nich. Oszacowaliśmy, by przygotować LIGO do pierwszych obserwacji sygnałów z układów czarnych dziur, że konieczne będzie wykonanie około tysiąca symulacji.

Aby zrealizować ten cel, Teukolsky pokierował zespołem SXS przy konstruowaniu komputerowego programu opartego na silnie hiperbolicznym sformułowaniu równań Einsteina, które wykorzystuje metody spektralne – jest to szczegół techniczny, który gwarantuje, że dokładność programu numerycznego wzrasta *eksponencjalnie*, gdy sieć punktów jest zagęszczana. Powstały program grupy SXS zwany jest SpEC od Spektralnego Kodu Einsteina.<sup>4</sup>

Napisanie programu SpEC było znacznie trudniejsze, a jego działanie jest znacznie doskonalsze od programów Pretoriusa, Centrelli, Campanelli, a także od innych programów stworzonych przez wiele innych grup zajmujących się numeryczną teorią względności (np. grupy Berndta Brugmana z Jeny w Niemczech, czy Pabla Laguny z Politechniki w stanie Georgia, które wyrosły z działań teksaskiej grupy Matznera). Te inne programy były gotowe kilka lat przed ukończeniem programu

4. <http://www.black-holes.org/SpEC.html>.

SpEC i dokonały ważnych odkryć dotyczących geometrodynamiki w czasie, gdy program SpEC był jeszcze dopracowywany. SpEC osiągnął jednak doskonałość na kilka lat przed zarejestrowaniem przez detektor LIGO pierwszego sygnału i od początku został użyty do tworzenia dużego katalogu profili fal pochodzących z układów podwójnych czarnych dziur, który stanowił podstawę analizy danych zbieranych przez detektor LIGO.<sup>5</sup> Teraz, gdy jesteśmy w epoce zbierania przez LIGO danych, tylko program SpEC ma wystarczającą szybkość i dokładność pozwalające sprostać bieżącym wymaganiom LIGO (Hinderer i in. 2014). Z wielką ulgą uznałem, że moi koledzy zajmujący się numeryczną teorią względności zakład wygrali.

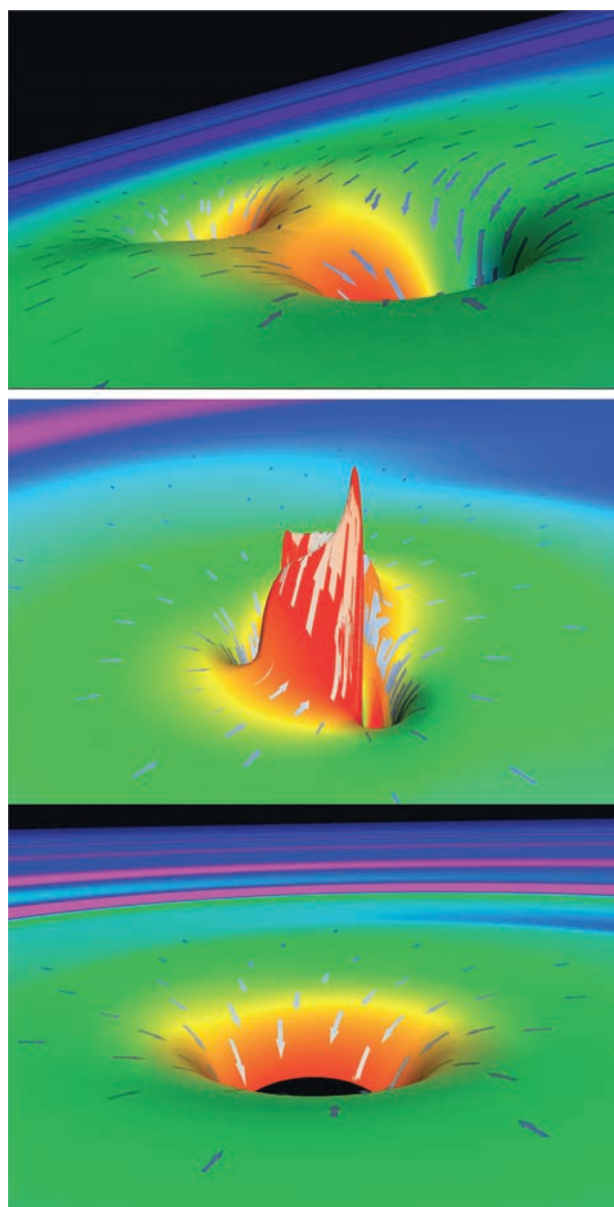
Wielkim wyzwaniem było też połączenie wyników programów numerycznych z analizą zbieranych przez detektor LIGO danych. Połączenie to zostało zrealizowane za pomocą podanego przez Alessandrę Buonanno i Thibault Damoura (Buonanno i Damour, 1999) i nazywanego Efektywnym Formalizmem Jednociałowym (EOB od *Effective One Body Formalism*), quasi-analitycznego modelu profilu fali emitowanej przez układ podwójny, a także z pomocą quasi-analitycznego Formalizmu Fenomenologicznego podanego przez Parameswarana Ajitha i jego kolegów (Ajith i inni, 2007). Oparte na numerycznej teorii względności symulacje profilu fali zostały wykorzystane do dobrania wartości parametrów w tych formalizmach, te zaś zostały użyte w algorytmach analizujących dane LIGO, które odkryły fale emitowane przez układy podwójne czarnych dziur i dokonały pierwszych cięć przy wydobywaniu z nich informacji. Końcowe uzyskiwanie informacji jest najdokładniej dokonywane przez bezpośrednie porównanie z symulacjami wykorzystującymi program SpEC.

#### D. Geometrodynamika i zlewanie się podwójnych czarnych dziur

Tak jak nie odegrałem większej roli w eksperymentalnej stronie przygotowania detektora LIGO, nie odegrałem również większej roli w formułowaniu i dopracowywaniu przez zespół SXS programu SpEC. W obu tych przedsięwzięciach moja rola sprowadzała się w zasadzie do wizjonerstwa. W przypadku programu SpEC znaczna część tej wizji była oddziedziczona po Wheelerze: wykorzystać symulacje układów podwójnych czarnych dziur, by przewidzieć geometrodynamiczne wzbudzenia zakrzywionej czasoprzestrzeni wywołwane zderzeniem się dwóch czarnych dziur, a następnie użyć danych zebranych przez detektor LIGO do sprawdzenia tych przewidywań.

Okolo roku 2011 program SpEC dojrzał już na tyle, że mógł zacząć badać geometrodynamikę. Aby towarzyszyć mu w tych badaniach zaprojektowaliśmy szereg narzędzi umożliwiających wizualizację jego wyników.

Pierwszym z nich był *diagram pseudozanurzenia* (ryc. 12) zaprojektowany przez członka grupy SXS Harald Pfeiffera. Pfeiffer bierze płaszczyznę orbity układu czarnych dziur (która jest dwuwymiarową zakrzywioną powierzchnią) i uwidocznia na takim diagramie jej odkształcenia (w języku fizyków – jej krzywiznę), przedstawiając ją zanurzoną w fikcyjnej płaskiej trójwymiarowej przestrzeni. Barwy otrzymanej w ten sposób zakrzywionej powierzchni uwidaczniają spowolnienie upływu czasu: w obszarach zielonych czas płynie mniej więcej tak samo, jak bardzo daleko od dziur, a w obszarach



Ryc. 12. Klatki (diagramy pseudozanurzenia) z filmu obrazującego geometrię czasoprzestrzeni w otoczeniu układu podwójnego czarnych dziur GW150914 na 60 milisekund przed zderzeniem, w momencie zderzenia i 12 milisekund po nim. [Dzięki uprzejmości Kolaboracji SXS.]

5. <https://www.black-holes.org/for-researchers/waveform-catalog>.



czerwonych płynie znacznie wolniej; obszary czarne (rzadko widoczne) znajdują się już wewnątrz czarnej dziury, gdzie czas płynie w dół. Srebrne strzałki wskazują ruch przestrzeni.<sup>6</sup>

Z ciągu takich diagramów (wykorzystujących wyniki symulacji programu SXS) Pfeiffer tworzy film<sup>7</sup> pokazujący ewoluującą geometrię czasoprzestrzeni w otoczeniu układu podwójnego czarnych dziur. Na ryc. 12 pokazano trzy klatki z takiego filmu obrazującego ewolucję układu, którego parametry odpowiadają pierwszemu rozbłyskowi fal grawitacyjnych zarejestrowanemu przez LIGO, oznaczonego jako GW150914:

- Na pierwszej klatce filmu widać układ czarnych dziur na 60 milisekund przed zderzeniem. Przestrzeń wokół każdej z dwu czarnych dziur zaczyna tworzyć zagłębienie, podobnie jak powierzchnia wody nad wirami; w miarę przesuwania się w głąb leja kolor z zielonego przechodzi w czerwony (czas spowalnia).
- Na drugiej klatce widzimy układ w momencie zderzenia. Zderzenie wytwarza prawdziwy sztorm w ukształtowaniu czasoprzestrzeni. Przestrzeń marszczy się jak powierzchnia oceanu w czasie sztormu, a tempo upływu czasu zmienia się gwałtownie.
- Trzecia klatka obrazuje układ, gdy sztorm przemiana i utworzyła się już spokojna sklejona z dwóch, pojedyncza czarna dziura. Daleko od niej rozbłysk fali grawitacyjnej (zaznaczony symbolicznie jako zmarszczki podobne do fali wodnej) rozchodzi się w głąb Wszechświata.

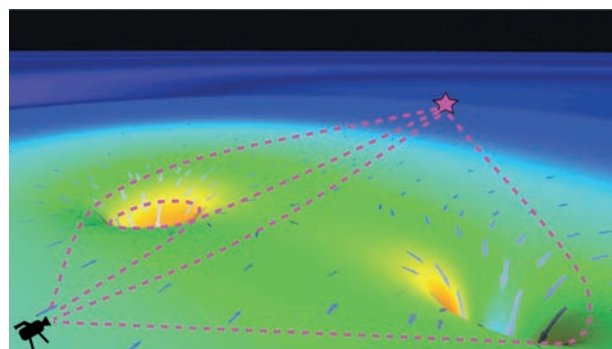
Diagram pseudozanurzenia i film mają swoje poważne ograniczenia. Pokazują one jedynie płaszczyznę równikową układu podwójnego, ale nie pokazują trzeciego wymiaru przestrzeni Wszechświata. Fale grawitacyjne nie są dobrze oddane, ponieważ z istoty swojej są one trójwymiarowe. Ponadto całkowicie zgubione zostają niektóre istotne zjawiska, np. dwa wiry skracające się przestrzeni (jeden mający skręcenie zgodne z ruchem wskazówek zegara i drugi o skręceniu przeciwnym), które wynurzają się z każdej z czarnych dziur, lub ciąg naprężeń i skurczów zakrzywionej czasoprzestrzeni nazywanych *ścięgnami* (Owen i inni, 2011).

Symulacje zespołu SXS ujawniają całe bogactwo geometrodynamiki czasoprzestrzeni w otoczeniu układów

podwójnych czarnych dziur, jej wiry i ścięgna. Wspierała zaś zgodność profili falowych zarejestrowanych przez detektor LIGO z przewidywanymi przez symulacje wykonane przez SXS (zob. np. rys. 6 w części II Barisha tego wykładu), przekonują nas, że sztormy geometrodynamiki rzeczywiście mają profile takie, jak przewidują symulacje, tj. że są one takie, jak przewidują równania einsteinowskiej Ogólnej Teorii Względności.

Gdyby Czytelnicy i ja mieli obserwować na własne oczy lub za pomocą kamery, jak dwie czarne dziury zbliżają się do siebie po spiralnej orbicie, zderzają i w końcu zlewają, zobaczylibyśmy coś zupełnie odmiennego od pseudozanurzeń zilustrowanych na ryc. 12 klatkami z filmu i tego co pokazałby cały film, z którego one pochodzą. Daleko za czarnymi dziurami rozciągałoby się pole gwiazd. Światło z każdej gwiazdy biegłoby do naszych oczu kilkoma różnymi drogami (ryc. 13), z których niektóre byłyby niemal prostymi, inne zaś kilkakrotnie obiegałyby czarne dziury. W rezultacie widzielibyśmy po kilka obrazów każdej z gwiazd. (Efekt taki nazywa się *soczewkowaniem grawitacyjnym*.) Obrazy te poruszałyby się ruchem wirowym wokół dwu cieni czarnych dziur, w miarę obracania się dziur jedna wokół drugiej.

Doktoranci Teukolsky'ego: Andy Bohn, Francois Hébert i Will Thorne, wykorzystując wykonane przy użyciu programu SXS symulacje pierwszego zaobser-



Ryc. 13. Bieg promieni światła od gwiazdy do kamery przez zakrzywioną przez układ GW150914 czasoprzestrzeń. Rycina zaadaptowana z tego samego filmu (zob. przypis 5), z którego pochodzą klatki na ryc. 12. [Dzięki uprzejmości Kolaboracji SXS.]



Ryc. 14. Układ podwójny czarnych dziur GW150914 widziany okiem, z bliska. [Dzięki uprzejmości Kolaboracji SXS.]

6. W bardziej technicznym języku, kształt powierzchni, jej barwa i strzałki uwioczniają dwuwymiarową geometrię „płaszczyzny” orbity, funkcję spowolnienia (*lapse function*) i funkcję przesunięcia (*shift function*).

7. <https://www.youtube.com/watch?v=YsZFRkzLGew>.

wowanego przez detektor LIGO układu czarnych dziur, GW150914, stworzyli filmowy obraz takiego ruchu wirowego<sup>8</sup> (Bohn i in., 2015). Klatkę z tego filmu pokazuje ryc. 14.

Ryciny 12, 14 i związane z geometrodynamiką zjawiska, które tu przedstawiłem dają przedsmak fascynującej fizyki, jaką będzie można w przyszłości wydobyć z fal grawitacyjnych. Do tej przyszłej fizyki jeszcze powrócę. Na razie jednak zagłębię się ponownie w przeszłość i przypomnę pokrótce, jak teoretycy przyczynili się do eksperymentalnej strony budowy interferometru LIGO.

## V. Wkład teoretyków w zrozumienie i kontrolę szumu w interferometrach LIGO

Jednym z ważniejszych aspektów eksperymentu LIGO jest zrozumienie i zapanowanie nad szerokim zakresem zjawisk wytwarzających szum, który mógłby zagłuszyć sygnał pochodzący od fal grawitacyjnych. Do wyodrębnienia niektórych z tych zjawisk przyczynili się teoretycy. Było to bardzo zajmujące i poszerzyło horyzonty studiujących teorię. Podam tu kilka interesujących przykładów.

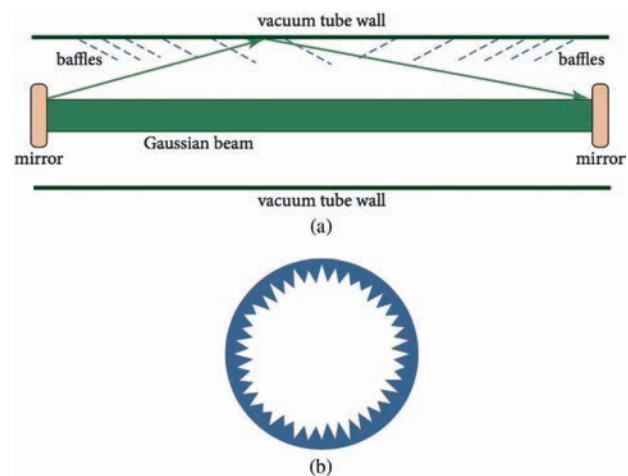
### A. Szum generowany przez rozproszenie światła w interferometrze

W każdym z ramion interferometru LIGO wiązka światła odbija się tam i z powrotem pomiędzy lustrami. Mała część tego światła rozprasza się na jednym z lusterek i następnie rozprasza lub odbija od wewnętrznej ścianki próżniowej rury zamykającej w sobie wiązkę. Dalej podróżuje do drugiego lustra i tam na powrót rozprasza się trafiając znów do wiązki światła (zob. górna część ryc. 15). W porównaniu z wpływem jaki wywoływałyby fala grawitacyjna, amplituda drgań powierzchni rury jest olbrzymia i drgania te nakładają na rozpraszane światło olbrzymie oscylujące przesunięcie fazy. To olbrzymie przesunięcie fazy drobnej części światła wiązki może dawać w sumie przesunięcie fazowe wiązki światła większe niż powodowane wpływem fali grawitacyjnej.

Taki spowodowany rozpraszaniem światła szum może być kontrolowany przez umieszczenie w rurze przegródek (zaznaczonych na ryc. 15 liniami przerywanymi), które nie pozwalają rozproszonemu światłu dotrzeć do oddalonego lustra. Jednak pewna drobna część rozprzonego światła nadal może do niego docierać wskutek dyfrakcji na krawędziach przegródek.

Przegródki i dyfrakcja światła na ich krawędziach są to standardowe problemy w teleskopach optycznych i innych urządzeniach. Niestandardowe i występujące

tylko w interferometrach grawitacyjnych jest niebezpieczeństwo powstawania *koherentnej* superpozycji oscylujących przesunięć fazowych części światła, podróżujących od jednego lustra do drugiego po różnych drogach; koherencja taka znacznie zwiększałaby szum. W roku 1988 Rai Weiss najął mnie i moich studentów teoretyków, byśmy rozpatrzyli ten problem, stwierdzili, jak bardzo jest on poważny i wymyślili jakiś sposób opanowania go. Dokonałiśmy tego wspólnie z Eannem Flanaganem. Aby zapobiec koherencji dodaliśmy przegródkom głębokie piłoksztatne ząbkowania o przypadkowej wysokości (pokazane na dole ryc. 15), a w celu zredukowania szumu jeszcze bardziej, znaleźliśmy optymalny układ zębów i zoptymalizowaliśmy rozmieszczenie przegródek w rurze (Flanagan i Thorne, 1995). Segment jednej z naszych przegródek o przypadkowym układzie piłoksztatnych zębów jest moim podarkiem dla Muzeum Noblowskiego w Sztokholmie.



Ryc. 15. Górny rysunek: mała część światła wiązki odbija się od lustra LIGO, potem od ściany rury, podróżuje do drugiego lustra i następnie odbiwszy się odeń ponownie trafia do wiązki. Dolny rysunek: przegródka redukująca szum i niszcząca koherencję rozprzonego światła. Z artykułu Thorna i Blandforda (2017)

### B. Szum grawitacyjny

Ludzie pracujący w pobliżu lusterek interferometru LIGO wytwarzają oscylujące siły grawitacyjne, które mogą przemieścić lustro bardziej niż fala grawitacyjna. Moja żona Carolee Winstein jest biokinezyjologiem (tj. ekspertem od ludzkich ruchów). Korzystając ze zgromadzonych przez jej kolegów eksperymentalnych danych dotyczących ludzkich ruchów obliczyliśmy wielkość tego szumu i ustaliliśmy, że jeśli ludzie będą się trzymać w odległości większej niż 10 metrów od lusterek LIGO, szum będzie na tyle mały, że można go zaakceptować (Thorn i Winstein, 1999). Nasze ustalenia zostały wykorzystane jako wymaganie techniczne przy rozplanowaniu budynków, w których mieszczą się lustra detektora LIGO. Studenci teoretycy oszacowali z kolei szum wytwarzany

8. <https://www.black-holes.org/gw150914>.

przez siły grawitacyjne pochodzące od fal sejsmicznych w Ziemi (Hughes i Thorn, 1998) i od obiektów przemieszczających się w powietrzu, takich jak chwasty biegnące (Creighton, 2008).

### C. Szum termiczny

Drgania termiczne (będące skutkiem niezerowej temperatury) powodują „skakanie” luster LIGO. Drgania te mogą powstawać na wiele różnych sposobów. Student teoretyk Yuri Levin wymyślił nową metodę obliczania wielkości takiego szumu termicznego oraz identyfikowania jego licznych źródeł (Levin, 1998). I co najważniejsze, wykorzystując swoją metodę wykrył, że drgania termiczne w pokrywających lustra LIGO warstwach optycznych (zwiększających współczynnik odbicia) mogą być szczególnie groźne (możliwość taka została wcześniej przeoczona). Okazało się to prawdą: w Zaawansowanych Interferometriach LIGO i przypuszczalnie także w interferometriach grawitacyjnych następnej generacji szum termiczny w warstwach powłok optycznych na lustrach jest jednym z dwóch najpoważniejszych źródeł szumu; drugim jest szum kwantowy.

### D. Szum kwantowy i standardowe kwantowe ograniczenia czułości interferometru grawitacyjnego

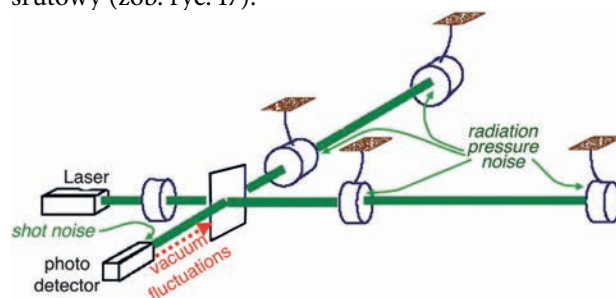
Szum kwantowy jest to szum powodowany przypadkowością rozkładu fotonów w wiązce światła w interferometrze. W każdym z pierwotnych interferometrów LIGO (zob. części I i II tego wykładu) szum kwantowy miał dwie składowe: *fotonowy szum śrutowy*, którego źródłem jest przypadkowość przybywania fotonów do detektora fotonów (stanowiącego wyjście interferometru) i *szum ciśnienia promieniowania*, powodowany przez przypadkowość odbijania się fotonów od luster interferometru – ten powoduje skoki luster.



Ryc. 16. Carlton M. Caves. [Dzięki uprzejmości Cavesa.]

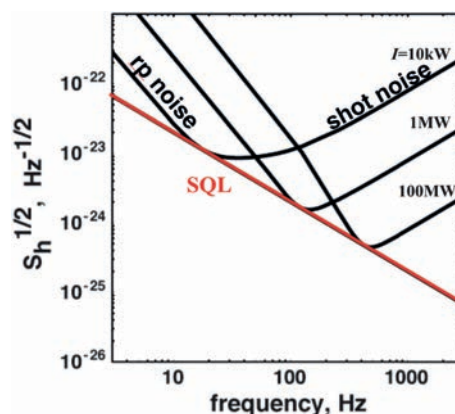
Obie te formy szumu kwantowego biorą się z różnic wiązek światła w dwu ramionach interferometru, gdyż sygnał, jaki daje interferometr, zależy tylko od ich różnic.

Fizyczne przyczyny tych różnic były w końcu lat siedemdziesiątych przedmiotem wielu dyskusji uczonych zajmujących się falami grawitacyjnymi. Carlton Caves, postdoc-teoretyk, znalazł zaskakującą odpowiedź (Caves, 1981): zarówno szum ciśnienia promieniowania, jak i szum śrutowy pochodzą z elektromagnetycznych (tj. z *kwantowoelektrodynamicznych*) fluktuacji próżniowych, które dostają się do interferometru od tyłu, od strony stanowiących jego wyjście detektorów fotonów. Fluktuacje te zaburzają światło laserowe w obu ramionach powodując: 1. fluktuacje ciśnienia promieniowania (szum), które są przeciwne w obu ramionach interferometru, oraz 2. fluktuacje natężenia, które również są przeciwne i dlatego przedostają się z interferometru do wyjściowego detektora fotonów jako szum śrutowy (zob. ryc. 17).



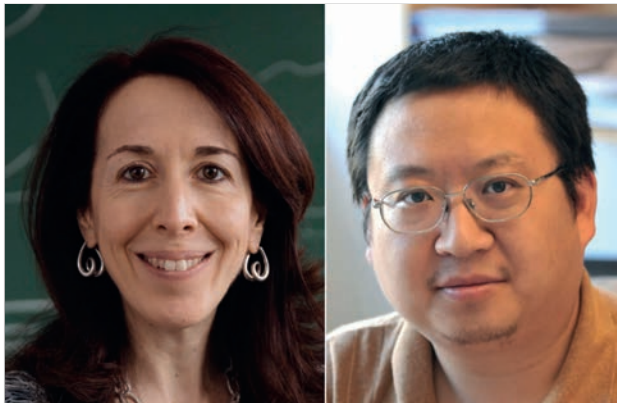
Ryc. 17. Fluktuacje próżniowe, dostające się na wyjście grawitacyjnego interferometru, zderzają się ze światłem lasera wytwarzając szum śrutowy w wyjściowym detektorze fotonów oraz szum ciśnienia promieniowania działającego na lustra

Zrozumiawszy to, Caves zauważył dość oczywisty fakt, że gdy zwiększa się natężenie  $I$  światła lasera, szum śrutowy maleje proporcjonalnie do  $1/\sqrt{I}$ , a ciśnienie promieniowania rośnie proporcjonalnie do  $\sqrt{I}$ . Stąd krzywa szumu kwantowego ( $h$  jako funkcja częstotliwości  $f$ ) schodzi do linii wyznaczającej dolne ograniczenie i następnie idzie do góry tak jak to pokazuje ryc. 18.



Ryc. 18. Krzywe szumu śrutowego i szumu ciśnienia promieniowania dla różnych mocy  $I$  światła w ramionach pierwotnych interferometrów LIGO





Ryc. 19. Alessandra Buonanno i Yanbei Chen. [Dzięki uprzejmości S. Döringa z Towarzystwa im. Maxa Plancka i Caltechu.]

Linia wyznaczająca dolne ograniczenie jest nazywana *standardowym ograniczeniem kwantowym* (SQL) interferometru i jest dana prostym wzorem Cavesa:

$$S_h^{1/2} = (8\hbar/mL^2\omega^2)^{1/2}. \quad (1)$$

$S_h$  jest tu gęstością spektralną szumu nałożonego na sygnał fali grawitacyjnej;  $\hbar$  jest stałą Plancka,  $m$  – masą każdego z lusterek interferometru,  $L$  – długością ramion interferometru, a  $\omega$  kołową częstotliwością fali grawitacyjnej.

W końcu lat osiemdziesiątych Brian Meers z Uniwersytetu w Glasgow (korzystając z pomysłu Rona Drevera) zaproponował dodanie do interferometrów grawitacyjnych, w celu uczynienia ich bardziej wszechstronnymi, lustro działające jako recyding sygnału (zob. części I Weissa i II Barisha tego wykładu). W końcu lat dziewięćdziesiątych takie lustra zostały włączone do projektu przyszłych Zaawansowanych Interferometrów LIGO. Aby oszacować szumy: śrutowy i ciśnienia promieniowania w Zaawansowanych Interferometrach LIGO, Strain i inni skorzystali z teorii półklasycznej (nie w pełni kwantowej). Budziło to wątpliwości, gdyż Zaawansowany Interferometr LIGO miał działać bardzo blisko standardowego ograniczenia kwantowego (SQL), tj. w reżimie, w którym analiza półklasyczna może nie być słuszna. W związku z tym postdoc-teoretyk Alessandra Buonanno i doktorant Yanbei Chen przeprowadzili w pełni kwantomechaniczną analizę takiego szumu. Ich analiza przyniosła niespodzianki (Buonanno i Chen, 2001, 2003):

- Przewidywania szumu oparte na analizie półklasycznej były błędne, w związku z czym trzeba było zmodyfikować plany Zaawansowanego Interferometru LIGO; modyfikacje te nie były jednak znaczne.
- Lustro działające jak recyding sygnału powoduje, że ciśnienie promieniowania wiązek w każdym z ramion działa jak zależna od częstotliwości

sprężyna odpychająca lustra powodując ich optomechaniczne, oscylacyjne zachowanie.

- Lustro działające jak recyding sygnału jest także źródłem kwantowych korelacji szumu śrutowego i szumu ciśnienia promieniowania. Nie można więc już mówić o oddzielnych szumach: ciśnienia promieniowania i śrutowym; trzeba zająć się jednolitym szumem kwantowym.
- Korelacje te umożliwiają także zejście Zaawansowanego Interferometru LIGO poniżej ograniczenia SQL Cavesa o czynnik tak duży, jak 2, w zakresie częstotliwości odpowiadających, co do rzędu wielkości, częstotliwościom możliwych fal grawitacyjnych.

#### E. Fluktuacje kwantowe, niewystępowanie kwantowej destrukcji i ściśnięta próżnia

Zgodnie z teorią kwantową wszystko przypadkowo fluktuuje. Przynajmniej trochę.



Ryc. 20. Władimir Bragiński. (Copyright: Uspekhi Fizycznych Nauk, 2012.)

Pół wieku temu rosyjski fizyk Władimir Bragiński uzasadniał, że (to wynikało z jego argumentów) w detektorach fal monitorujących ciało, na które działa fala grawitacyjna, może przyjść mierzyć przemieszczenia tak małe, że mogą one być zakryte przez kwantowe fluktuacje tego ciała (Bragiński, 1968). Później, w połowie lat siedemdziesiątych, Bragiński zdał sobie sprawę (Bragiński i Vorontsov, 1975) z tego, że powinno być możliwe stworzenie technologii nie powodującej kwantowej destrukcji (QND), umożliwiającej przewyżczenie takich kwantowych fluktuacji.<sup>9</sup>

9. Z własnym Bragińskiego retrospektywnym spojrzeniem na tę pracę i późniejszym, aż do roku 1996, rozwojem tych idei można się zapoznać w artykule przeglądowym Bragińskiego i Khalila, 1996.

W roku 1980 Caves zrozumiał, że choć otrzymał standardowe kwantowe ograniczenia (wzór (1)) czułości interferometru analizując jego oddziaływanie ze światłem, ograniczenie to (SQL) ma w rzeczywistości głębsze źródło: wynika ono z kwantowych fluktuacji położenia środków masy luster interferometru. Wyzwaniem stało się więc wynalezienie niepowodującej kwantowej destrukcji sygnału technologii QND, umożliwiającej przechytrzenie takich fluktuacji i zejście poniżej wynikającego z nich standardowego kwantowego ograniczenia SQL.

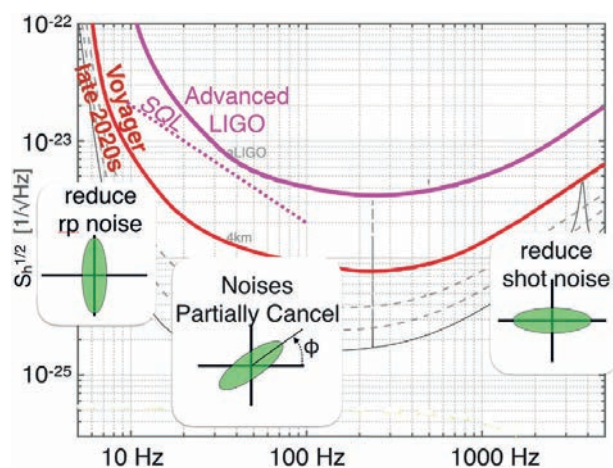
Caves zdał sobie sprawę z tego, że skoro ograniczenie to jest skutkiem próżniowych fluktuacji elektromagnetycznych, które oddziałują na wyjście detektora, kluczowym narzędziem technologii QND może być zmodyfikowanie tych próżniowych fluktuacji i tym samym, poprzez wpływ, jaki one wywierają na lustra za pośrednictwem ciśnienia promieniowania, zmodyfikowanie fluktuacji samych luster.

Ściślej rzecz ujmując, Caves (Caves, 1981) zaproponował zredukowanie próżniowych fluktuacji elektromagnetycznych w jednym kwadrancie każdej z fluktuacyjnych częstości, np. w kwadrancie  $\cos \omega t$ , kosztem ich zwiększenia w innym kwadrancie, np. w kwadrancie  $\sin \omega t$ . (Zasada nieoznaczoności mówi tylko, że iloczyn amplitud fluktuacji w obu kwadrantach nie może zostać zredukowany; jeśli więc jedna amplituda zostanie zmniejszona, druga musi wzrosnąć.)

Jak pokazał Caves, jeden kwadrant jest odpowiedzialny za szum śrutowy, a drugi za szum ciśnienia promieniowania. Zatem *ściskając* próżnię w zaproponowany sposób można zredukować szum śrutowy kosztem zwiększenia szumu ciśnienia promieniowania – to samo osiąga się zwiększając natężenie światła lasera. (Takie zastosowanie ściśniętej próżni stało się odtąd bardzo ważne: pierwotnie planowany sposób doprowadzenia Zaawansowanego Interferometru LIGO do osiągnięcia przezeń planowanej czułości wymagał, by światło biegające tam i z powrotem w każdym z ramion interferometru miało moc dochodzącą do 800 kW; tak duża moc światła powoduje jednak nieprzyjemne efekty uboczne, z którymi nie radzą sobie lustra. Obecny, nowy plan wdrażany w interferometrze LIGO przed następną rundą zbierania przezeń danych, która ma się rozpocząć w końcu 2018 roku, przewiduje, zamiast zwiększania mocy światła, wpuszczenie ściśniętej próżni na wyjście detektora w dokładnie taki sposób, jak to wymyślił Caves.)

W Zaawansowanym Interferometrze LIGO przy wysokich (dobrze powyżej 200 Hz) częstotliwościach fal grawitacyjnych dominuje fotonowy szum śrutowy, a przy niskich (znacznie poniżej 200 Hz) – szum ciś-

nia promieniowania. Jest zatem korzystne wpuszczenie takiej próżni, która jest ściśnięta w zależnym od częstości kwadrancie  $\cos[\omega t - \varphi(\omega)]$ , co powoduje redukcję ( $\varphi = 0$ ) przy wysokich częstościach szumu śrutowego i redukcję ( $\varphi = \pi/2$ ) przy niskich częstościach szumu ciśnienia promieniowania. W zakresie częstotliwości pośrednich zachodzi niesamowita rzecz: jak odkrył Bill Unruh w roku 1981 (Unruh, 1982), *dwa szumy, szum śrutowy i szum ciśnienia promieniowania, częściowo znoszą się nawzajem!* (zob. ryc. 21). W rezultacie, interferometr schodzi poniżej standardowego kwantowego ograniczenia SQL (tj. kwantowa destrukcja przestaje występować) i przy odpowiednim ściśnięciu próżni może zejść poniżej tego ograniczenia dowolnie daleko, przynajmniej w zasadzie, bo nie w praktyce.



Ryc. 21. Krzywe szumu w Zaawansowanym Interferometrze LIGO przy przewidywanej jego czułości i w proponowanym interferometrze Voyager. Linia kropkowana pokazuje standardowe ograniczenie kwantowe (SQL). Zielone elipsy reprezentują wpuszczone na wyjście ściśnięte próżnie przy wysokiej, pośredniej i niskiej częstotliwości, które umożliwią Voyagerowi zejście poniżej ograniczenia SQL

Choć o niewystępowaniu w takiej sytuacji kwantowej destrukcji wiedzieliśmy już od roku 1983, w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych nie były jeszcze znane praktyczne metody wytworzenia zależnej od częstości wymaganej fazy  $\varphi(\omega)$  ściśnięcia.

W roku 1999 rozpatrywałem dogłębnie ten problem wraz z moim kolegą Jimem Kimblem (czołowym w zakresie ściskania i innych technik związanych z kwantową informacją doświadczalnikiem z Caltechu). Znalazł on takie rozwiązanie: ściśnij próżnię tak, by miała fazę niezależną od częstości, następnie prześlij ją przed wpuszczeniem na wyjście interferometru przez jedną lub dwie odpowiednio dostrojone wnęki (filtry optyczne) Fabry'ego-Perota (Kimble, 2002).

Wśród wielu różnych technik zapewniających brak kwantowej destrukcji, które zaprojektowano dla interferometrów LIGO (zob. przegląd Danilishina i Khalila z 2012 r.) otrzymywanie zależnego od częstości ściśnięcia za pomocą *filtrujących wnęk Kimble'a* wydaje

się obecnie najbardziej obiecujące, gdy chodzi o wykorzystanie w interferometrach grawitacyjnych LIGO A+, Voyager, Cosmic Explorer i w Teleskopie Einsteina (zobacz część II Barisha tego wykładu). W LIGO A+ technika unikania kwantowej destrukcji konieczna będzie tylko w niewielkim zakresie; w kolejnych interferometrach będzie ona znacznie bardziej istotna.

## VI. Przyszłość: cztery zakresy grawitacyjnych częstotliwości

Astronomia elektromagnetyczna była ograniczona do częstotliwości optycznych i podczerwieni aż do końca lat trzydziestych XX w., kiedy to Karl Jansky odkrył kosmiczne fale radiowe. Później, dzięki teleskopom umieszczanym ponad atmosferą Ziemi, dostępne stały się inne zakresy częstości: astronomia ultrafioletowa pojawiła się w latach pięćdziesiątych XX w., astronomia promieni X i promieni gamma w latach sześćdziesiątych. W ciągu dziesięcioleci, które upłynęły od tego czasu otwarły się jeszcze szersze zakresy częstotliwości. Po wszechnie mówi się o elektromagnetycznych „oknach” na Wszechświat, z których każde jest zakresem częstotliwości, na jakich pracują astronomowie; są to okna: optyczne, podczerwone, radiowe, ultrafioletowe, promieni X i okno promieni gamma.

Podobnie rzecz ma się z falami grawitacyjnymi. Oczekujemy, że w ciągu następnych dwóch dekad otworzą się trzy następne okna grawitacyjne i będziemy mieli:

- *Wysokoczęstotliwościowe (HF) okno grawitacyjne* (od  $\sim 10$  Hz do  $\sim 10\,000$  Hz, okresy fal od  $\sim 100$  milisekund do  $\sim 0.1$  milisekundy), w którym działają LIGO, VIRGO i inne naziemne interferometry.
- *Niskoczęstotliwościowe (LF) okno grawitacyjne* (okresy od minut do godzin), w którym operować będą poruszające się w stanie nieważkości pojazdy kosmiczne namierzające jeden drugiego wiązkami światła laserowego, przede wszystkim satelity LISA (od Laser Interferometer Space Antenna) Europejskiej Agencji Kosmicznej,<sup>10</sup> które zostaną umieszczone na orbitach w roku 2030, lub trochę później.
- *Bardzo niskoczęstotliwościowe (VLF) okno grawitacyjne* (okresy od kilku do kilkudziesięciu lat), w którym obecnie przy szukaniu fal grawitacyjnych prowadzi się *chronometraż grup pulsarów* (PTA, od *Pulsar Timing Arrays*).<sup>11</sup>

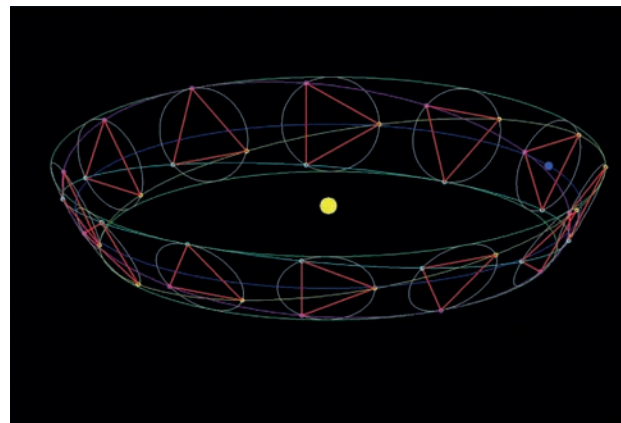
- *Ultra niskoczęstotliwościowe (ULF) okno grawitacyjne* (okresy od setek do milionów lat), w którym, jak przewiduje teoria, pierwotne fale grawitacyjne pozostawiły na kosmicznym mikrofalowym promieniowaniu tła specyficzny, potencjalnie obserwowalny ślad w postaci polaryzacji [rozd. 20.4 monografii Maggiore (2018)].

Omówię teraz trochę bardziej szczegółowo interferometrię LISA, chronometraż pulsarów (PTA) i polaryzację kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła (CMB).

### A. LISA: laserowa przestrzenna antena interferencyjna

Interferometr LISA ma się składać z trzech pojazdów kosmicznych namierzających się wzajemnie wiązkami laserowymi. Pojazdy te mają być rozmieszczone w wierzchołkach równoramiennego trójkąta odległych jeden od drugiego o kilka milionów kilometrów. Trójkątny ten układ ma się poruszać wokół Słońca po tej samej orbicie, co Ziemia około 20 stopni za nią. Każdy z pojazdów ma osłaniać od zewnętrznych zaburzeń *masę testową* (będącą analogiem luster interferometru LIGO) i używać odrzutowych mikrosilniczków, by pojazd pozostawał ześrodkowany na masie testowej. Trzy masy testowe w każdym z pojazdów przemieszczają się względem siebie w odpowiedzi na grawitacyjne siły pływowe wywierane na nie przez Słońce i planety oraz na fale grawitacyjne. Ich względne przemieszczenie ma być monitorowane przez wiązki światła laserowego z wykorzystaniem techniki zwanej *interferometrią heterodynową* (odbijanie wiązki przybywającej z odległego pojazdu od wiązki wysyłanej przez dany pojazd). Różni się to dość znacznie od interferometrii wykorzystanej w LIGO.

Pomysł misji takiej jak LISA był omawiany już od roku 1974 przez Petera Bendera, Ronalda Drevera,



Ryc. 22. Orbits trzech pojazdów misji LISA. Każdy z nich spada swobodnie po orbicie (geodezyjnej) wokół Słońca, a ich układ tworzy niemal równoramienny trójkąt. [Dzięki uprzejmości HEPL, Uniwersytet Stanforda.]

10. <http://wsi.esa.int/lisa/>

11. <http://www/ipta4gw.org>





Ryc. 23. Peter Bender (z prawej) podczas dyskusji z Ronaldem Dreverem (z lewej) i Stanem Whitcombem (pośrodku) nad misją LISA w Padwie (Włochy) w roku 1983. [Dzięki uprzejmości P. Bendera.]

Jima Fallera, Rainera Weissa i innych. Planowana obecnie geometria orbity (zob. ryc. 22) została zaproponowana w wystąpieniach Fallera i Bendera w latach 1981 i 1984 (Faller, Bender i inni, 1985). Później, w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych Bender niemal w pojedynkę doprowadził koncepcję interferometru LISA do postaci możliwej do wykonania, co pozwoliło NASA i ESA nakreślić wstępny plan realizacji tego projektu jako wspólnej misji kosmicznej. Agencja NASA wycofała się z niego w roku 2011 głównie z powodu znacznego wzrostu kosztów Kosmicznego Teleskopu Jamesa Webba, pozostawiając agencji ESA prowadzenie samodzielnie dalszych studiów nad projektem interferometru LISA; studia te doprowadziły w roku 2016 do znacznego sukcesu, jakim było przetestowanie w ramach LISA Pathfinder Mission niektórych z najbardziej skomplikowanych technologii (Armano i inni, 2018). Obecnie, w roku 2018, wydaje się, że agencja NASA może znów włączyć się do projektu LISA jako mniejszościowy partner agencji ESA oraz że uruchomienie misji może nastąpić już w roku 2030.

### B. Chronometraż grup pulsarów (PTA)

Grupa pulsarów (PTA) składa się z kilku pulsarów, których okresy pulsacji są monitorowane z bardzo dużą dokładnością przez jeden lub więcej radioteleskopów (zob. ryc. 24). Mówiąc heurystycznie, gdy fala grawitacyjna omiata Ziemię, powoduje, że zegary na Ziemi to przyspieszają, to zwalniają w rytm oscylacji fali; mierzone więc według ziemskich zegarów pulsary zdają się synchronicznie to zwalniać, to przyspieszać.

Dokładniejsze wytłumaczenie działania układu pulsarów jako detektora fal grawitacyjnych jest następu-

jące.<sup>12</sup> Fala grawitacyjna powoduje, że przestrzeń, przez którą biegają radiowe fale pulsarów charakteryzuje się efektywnym anizotropowym współczynnikiem załamania. Współczynnik ten powoduje, że pulsary zdają się synchronicznie spowalniać i przyspieszać w stopniu zależnym od kątów pomiędzy kierunkiem do pulsara, kierunkiem do źródła fali grawitacyjnej i osią polaryzacji fali.

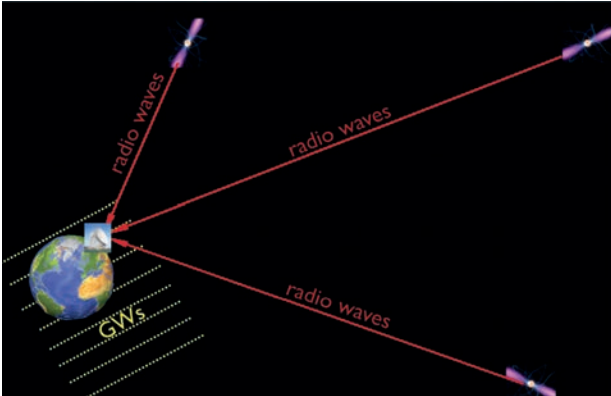
Pomysł wykorzystania rytmu pulsarów do wykrywania fal grawitacyjnych rzucili w końcu lat siedemdziesiątych niezależnie M.V Sazhin oraz Steven Detweiler (Sazhin, 1978; Detweiler, 1979). Obecnie wykryć fale grawitacyjne wykorzystując w ten sposób układy pulsarów próbują trzy zespoły radioastronomów: Kolaboracja NANOGrav w Ameryce Północnej, Europejski zespół PTA oraz grupa PTA wykorzystująca teleskop w Parkes w Australii; wszystkie trzy współpracują w ramach luźnej ogólnoświatowej współpracy zwanej Międzynarodową Grupą PTA.

Podstawowym celem tych kolaboracji są fale grawitacyjne pochodzące z układów podwójnych gigantycznych czarnych dziur, ważących od  $\sim 10^8$  do  $\sim 10^{10}$  razy więcej niż Słońce. Obecna czułość tej metody jest odpowiednia, by wykryć fale na poziomie, jaki przewidują optymistyczne oszacowania. Sukces może więc nadejść nawet już w przyszłym dziesięcioleciu.

### C. Polaryzacja kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła

Intensywnie badane przez astronomów kosmiczne mikrofalowe promieniowanie tła (CMB) po raz ostatni uległo rozproszeniu, gdy Wszechświat miał ok. 380000 lat, w epoce, w której w wyniku rekombinacji pierwotnej plazmy powstawał elektrycznie obojętny wodór. W latach dziewięćdziesiątych kilku astrofizyków teoretyków (Seljak i Zaldarriaga, 1997; Kamionkowski, Kosowsky i Stebbins, 1997) zdało sobie sprawę z tego, iż pierwotne fale grawitacyjne (fale powstałe w najwcześniejszych momentach istnienia Wszechświata), oddziałując z rekombinującą plazmą, powinny być wytworzyć w promieniowaniu tła pewien mod polaryzacji, tzw. *mod B*. Ponieważ może on ujawnić szczegóły pierwotnych fal grawitacyjnych, poszukiwanie śladów tego modu na niebie stało się dla astronomów zajmujących się promieniowaniem tła poszukiwaniem „świętego Graala”. Występowanie tego modu zostało stwierdzone, jednak mikrofalowe promieniowanie tak spolaryzowane emitują

12. Jest to jeden z możliwych sposobów otrzymania odpowiedzi układu pulsarów, jako detektora, na falę grawitacyjną. (Jest on naskikowany, trochę zbyt skrótowo, np. w ćwiczeniu 27.20 podręcznika Thorna i Blandforda (2017).)



Ryc. 24. Układ pulsarów: rejestrowane czasy wysłania w kierunku Ziemi impulsów fal radiowych przez trzy pulsary są w sposób synchroniczny modulowane przez omiatające Ziemię fale grawitacyjne

także cząstki pyłu kosmicznego; taka jest też polaryzacja mikrofalowego promieniowania synchrotronowego emitowanego przez elektrony poruszające się po spiralnych trajektoriach w międzygwiazdnych polach magnetycznych. Wyzwaniem jest więc teraz oddzielenie promieniowania o polaryzacji typu B, wytworzonego przez te występujące na pierwszym planie procesy, od promieniowania, którego taka polaryzacja została wytworzona przez fale grawitacyjne (zob. rozdz. 20.4 monografii Maggiore (2018)). Możliwe wydaje się zrealizowanie tego celu w nadchodzącym dziesięcioleciu.

## VII. Przyszłość: badanie Wszechświata za pomocą fal grawitacyjnych

Zakończę ten wykład uwagami na temat fizyki, jaką być może w nadchodzących dziesięcioleciach da się odczytać z fal grawitacyjnych. Omówię fale emitowane przez źródła materialne (astronomia oparta na różnorodnych sygnałach), następnie grawitacyjne badanie czarnych dziur i wreszcie poznawanie pierwszej sekundy istnienia Wszechświata. Do zagadnień, które tu omawiam, polecam jako uzupełnienie monografię Michele Maggiore (Maggiore, 2018).

### A. Astronomia oparta na różnorodnych sygnałach

Pierwsza zarejestrowana przez interferometry LIGO/Virgo podwójna gwiazda neutronowa (BNS), GW170817 (zob. część II Barisha tego wykładu), daje przedsmak wspaniałych odkryć, jakie zostaną dokonane w wysokoczęstotliwościowym zakresie dzięki astronomii opartej na różnorodnych sygnałach. Gdy naziemne interferometry zostaną ulepszone, wówczas:

- Liczba sygnałów przychodzących z podwójnych gwiazd neutronowych prawdopodobnie wzrośnie z rejestrowanego obecnie jednego na rok do około jednego na miesiąc przy planowanej jako docelowa czułości interferometru LIGO (2020), poprzez jeden sygnał na dzień rejestrowany przez

Voyagera (który miałby działać w końcu lat dwudziestych – zob. część II Barisha tego wykładu), aż po wiele sygnałów na dzień rejestrowanych przez Cosmic Explorer i Teleskop Einsteina (które mogą już działać w latach trzydziestych tego wieku – zob. część II Barisha tego wykładu). Odpowiednio wzrośnie też bogactwo i szczegółowość możliwych do uzyskania danych.

- Niemal napewno będziemy również obserwować wiele układów podwójnych, w których czarna dziura rozrywa swojego towarzysza - gwiazdę neutronową. Dzięki rejestrowaniu różnych sygnałów, obserwując takie zdarzenia będziemy zapewne mogli lepiej niż na podstawie samych układów BNS badać fizykę gwiazd neutronowych.
- Bardzo prawdopodobne, że zarejestrujemy także emisję różnych sygnałów z szerokiej gamy wirujących, zdeformowanych gwiazd neutronowych, także z pulsarów i magnetarów w tym, być może, także emisję promieniowania X z układów podwójnych o małej masie.
- Jeśli będziemy mieć szczęście, zobaczymy fale grawitacyjne powstające przy narodzinach gwiazd neutronowych w wybuchach supernowych i łącząc obserwacje grawitacyjne, neutrinowe i elektromagnetyczne odkryjemy mechanizm inicjujący wybuch supernowej.
- I jeśli będziemy mieć szczęście, zobaczymy emisję promieniowania elektromagnetycznego z układów podwójnych zlewających się czarnych dziur powodowaną oddziaływaniem czarnej dziury ze znajdującą się blisko niej materią i w ten sposób będziemy mogli badać najbliższe otoczenie czarnej dziury.

Interferometr LISA i inne rozmieszczone w przestrzeni kosmicznej interferometry niskoczęstotliwościowe będą uczestniczyć w rejestrowaniu różnorodnych sygnałów pochodzących z całej gamy astronomicznych obiektów i zjawisk, włączając w to:

- układy podwójne białych karłów i wzajemne oddziaływanie dwu tego rodzaju gwiazd, gdy znajdują się one blisko siebie,
- układy gwiazd oznaczane <sup>13</sup> AM CV (w których zachodzi akrecja materii z helowej gwiazdy o małej masie na jej towarzysza – białego karła),

13. Od pierwszego układu tego typu, AM Canum Venaticorum



- olbrzymią liczbę innych układów podwójnych gwiazd wytwarzających fale grawitacyjne o częstościach powyżej mniej więcej 0.1 mHz; w zakresie częstości od  $\sim 0.1$  mHz do  $\sim 2$  mHz będzie ich tyle, że będą one wytwarzać stochastyczne tło dominujące w aparaturowym szumie interferometru LISA,
- być może prowadzące do powstania czarnej dziury zapadanie się (kolaps grawitacyjny) kilku supermasywnych gwiazd w jądrach galaktyk.

Są też inne, najbardziej ekscytujące ze wszystkich możliwości, czyli wielkie nieoczekiwane niespodzianki, jakie może przynieść obserwacja wielu różnych sygnałów emitowanych z jednego źródła.

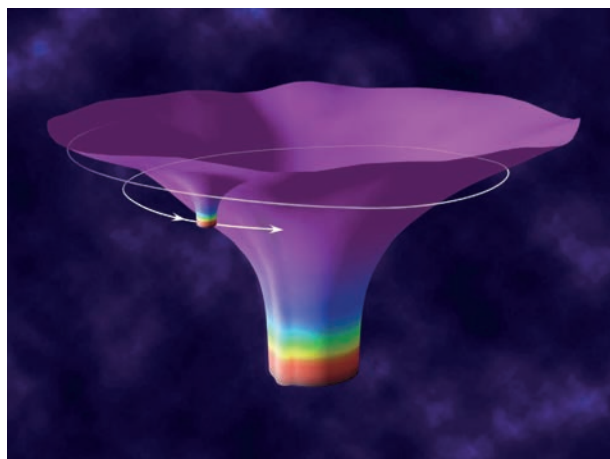
### B. Badanie czarnych dziur i geometrodynamiki za pomocą fal grawitacyjnych

Zakresy wysokich, niskich i bardzo niskich częstości obejmują fale emitowane przez poruszające się po spiralnych torach układy podwójne czarnych dziur (BBH) o masach w całym znanym zakresie: od kilku do  $\sim 2 \times 10^{10}$  mas Słońca (Flanagan i Hughes, 1998).

Układy BBH o całkowitej masie aż do około 1000 mas Słońca mogą być obserwowane w zakresie wysokoczęstotliwościowym pokrywanym przez interferometry naziemne. Gdy interferometry te zostaną ulepszone, liczba rejestrowanych układów BBH powinna wzrosnąć od z grubsza jednego na miesiąc w roku 2017 przez kilka na tydzień przy planowanej czułości Zaawansowanego Interferometru LIGO (około roku 2020), aż do jednego na godzinę przez Voyagera (w końcu lat dwudziestych). Wreszcie, sygnał każdego podwójnego układu czarnych dziur emitującego fale w zakresie wysokich częstości będzie (koło roku 2030) rejestrowany przez Cosmic Explorer i Teleskop Einsteina (lata trzydzieste). Przy zwiększonej czułości maksymalny stosunek sygnału fal grawitacyjnych z podwójnych czarnych dziur do szumu może wzrosnąć od równego dziś 24 aż do 1000 w dwu ostatnich detektorach. Odpowiednio wzrośnie też dokładność, z jaką można będzie badać fizykę czarnych dziur.

W zakresie niskich częstości interferometr LISA powinien zarejestrować zlewanie się bardzo masywnych czarnych dziur (o masach od  $\sim 10^3$  do  $\sim 10^8$  mas Słońca) przy wysokim, rzędu  $\sim 100000$ , stosunku sygnału do szumu. Odpowiednio wysoka dokładność umożliwi badanie geometrodynamiki i testowanie Ogólnej Teorii Względności.

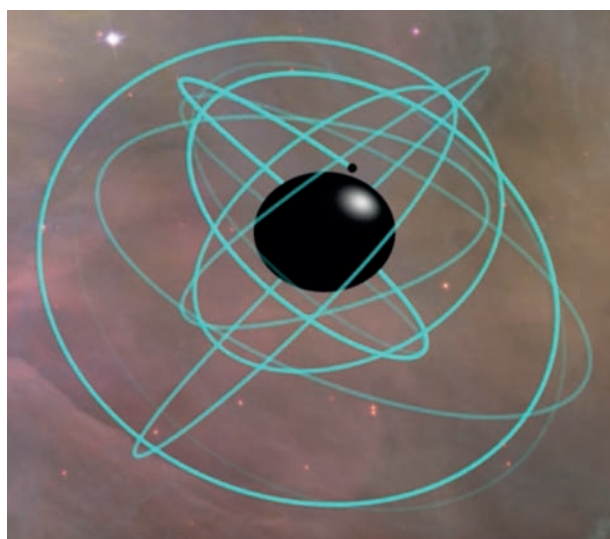
Przypuszczalnie interferometr LISA „zobaczy” także wiele zacieśniających się układów podwójnych o ekstremalnych stosunkach mas (EMRI), tj. takich



Ryc. 25. Diagram zanurzenia pokazujący geometrię czasoprzestrzeni małej czarnej dziury krążącej wokół dużej w płaszczyźnie równikowej tejże. [Dzięki uprzejmości NASA/JPL-Caltech.]

układów, w których mała czarna dziura, gwiazda neutronowa lub biały karzeł porusza się wokół bardzo masywnej czarnej dziury po skomplikowanej orbicie, stopniowo zbliżając się do niej z powodu reakcji promieniowania i w końcu pograżając się w niej. Rycina 25 obrazuje geometrię czasoprzestrzeni wokół dwu czarnych dziur w szczególnym przypadku, gdy mała czarna dziura porusza się w płaszczyźnie równikowej dużej. Na ryc. 26 (pochodzącej z filmu-symulacji zrobionego przez Drasco (2016)) pokazano wycinek typowej orbity małej czarnej dziury, gdy duża czarna dziura bardzo szybko wiruje.

Złożoność typowej orbity wynika z nakładania się wpływu bardzo silnego grawitacyjnego przyciągania przez masywną czarną dziurę (bardzo duże *relatywistyczne przesunięcie punktu perigwiedzdnego* – analogiczne do przesunięcia perihelium Merkurego), krzywizny przestrzeni wokół niej (nie pokazanej na rycinie)



Ryc. 26. Fragment typowej orbity małej czarnej dziury krążącej wokół szybko obracającej się dużej czarnej dziury. [Dzięki uprzejmości Stevena Drasco.]

i wirowania przestrzeni (wleczenia układu inercjalnego) spowodowanego momentem pędu czarnej dziury. W trakcie ruchu trwającego wiele miesięcy, orbita mniejszego ciała przebiega dużą część przestrzeni wokół masywnej czarnej dziury i skomplikowany profil fal emitowanych przez taki układ koduje w sobie bardzo dokładną „mapę” geometrii czasoprzestrzeni masywnej czarnej dziury (Ryan, 1995). Głównym celem misji interferometru LISA jest monitorowanie fal pochodzących z takich ekstremalnych układów EMRI, odczytywanie zakodowanych w nich „map” i stwierdzenie w ten sposób z wysoką dokładnością, czy geometria masywnej czarnej dziury jest przewidywaną przez Ogólną Teorię Względności geometrią Kerrą.

Walka o zrozumienie kwantowomechanicznego zjawiska ginięcia informacji w czarnej dziurze przyniosła przypuszczenie, że zamiast horyzontu, pod który obiekty mogą wpadać, czarną dziurę otacza *zapora ogniowa* (Almheiri i inni, 2013), a także hipotezę, że taka zapora ogniowa powoduje, iż tuż za nią, na zewnątrz, geometria czasoprzestrzeni odbiega od geometrii Kerrą (zob. np. Giddings, 2016). Celem odczytywania map czasoprzestrzeni z danych zebranych przez interferometr LISA jest też poszukiwanie takich modyfikacji. W ramach tego projektu będzie można także poszukiwać innych – nieoczekiwanych typów zwartych masywnych obiektów, wokół których czasoprzestrzeń odbiega od czasoprzestrzeni Kerrą, np. tzw. „nagich” osobliwości, wokół których orbitują znacznie mniejsze ciała.

### C. Poznanie pierwszej sekundy życia naszego Wszechświata

Jak przewiduje teoria, każdy rodzaj cząstek lub promieniowania z wyjątkiem fal grawitacyjnych został uwięziony przez gorącą plazmę wypełniającą Wszechświat w pierwszej sekundzie jego istnienia. W związku z tym, naszą jedyną nadzieją, by zaobserwować bezpośrednio to, co zdarzyło się w tym właśnie okresie, są fale grawitacyjne.

Jednym z teoretycznych przewidywań, które mogą zweryfikować obserwacje fal grawitacyjnych, jest pochodzenie oddziaływania elektromagnetycznego – jednego z czterech fundamentalnych oddziaływań w przyrodzie. Teoria mówi, że gdy Wszechświat był młody i bardzo gorący, siły elektromagnetyczne nie istniały. Zamiast nich była *siła elektroslaba*. Po upływie ok.  $10^{-11}$  sekundy, gdy Wszechświat rozszerzył się i ochłodził do temperatury  $\sim 10^{15}$  K, zaszła, zgodnie z teorią, *przemiana fazowa*, w wyniku której oddzieliły się siły elektromagnetyczne – pojawiły się dwa nowe oddziaływania: siły elektromagnetyczne i jądrowe oddziaływania słabe.

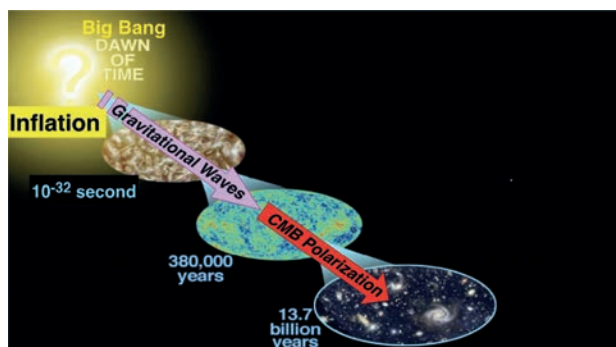
Jeśli była to tzw. przemiana pierwszego rodzaju (co jest mało prawdopodobne), to zgodnie z przewidywaniami była ona podobna do przemiany pary wodnej w ciekłą wodę zachodzącej, gdy para zostanie schłodzona do temperatury poniżej  $100^\circ$  C. Taka przemiana powinna zachodzić poprzez powstawanie bąbli analogicznych do kropli wody: wewnątrz każdego bąbla istniały już siły elektromagnetyczne, na zewnątrz zaś jeszcze nie istniały. Teoria przewiduje, że bąble takie szybko się rozszerzają, zderzają się jedne z drugimi i w takich zderzeniach wytwarzają się stochastyczne fale grawitacyjne. W trakcie rozszerzania się Wszechświata fale te ulegają rozciągnięciu, ich długość aż do chwili obecnej wzrasta i oczekuje się, że dziś, 13.8 miliarda lat później, ich częstotliwość powinna być w zakresie interferometru LISA (zob. paragraf 22.4 monografii Maggiore (2018)). Jednym z celów tego urządzenia jest właśnie poszukiwanie takich stochastycznych fal grawitacyjnych wytworzonych przy narodzinach sił elektromagnetycznych.

Interferometr LIGO mógłby zarejestrować fale grawitacyjne wytworzone w podobnej przemianie fazowej pierwszego rodzaju, zachodzącej gdy Wszechświat był znacznie młodszy, tj. po ok.  $10^{-22}$  sekundach jego życia, i znacznie gorętszy (o temperaturze ok.  $10^{22}$  K). W skali logarytmicznej ta chwila i temperatura znajdują się w połowie drogi pomiędzy elektroslabą przemianą fazową a przemianą związaną z wielką unifikacją oddziaływań fundamentalnych. Niestety na podstawie naszego obecnego zrozumienia praw fizyki nie przewidujemy zachodzenia żadnej przemiany fazowej w tej epoce.

Fale grawitacyjne są tak przenikliwe – tak odporne na pochłanianie, czy rozpraszanie przez materię – że nawet te, które mogły zostać wytworzone przy narodzinach naszego Wszechświata w Wielkim Wybuchu, mogłyby dziś, nierozproszone przez materię, dotrzeć do Ziemi i przynieść ze sobą obraz Wielkiego Wybuchu.

Według przewidywań obraz ten został jednak zniekształcony przez inflację, czyli eksponencjalnie szybkie rozszerzanie się Wszechświata, które, jak się (ze sporą dozą pewności) ocenia, zaszło, gdy wiek Wszechświata był pomiędzy  $\sim 10^{-36}$ , a  $\sim 10^{-33}$  sekundy. Mówiąc dokładniej, inflacja powinna była *parametrycznie wzmocnić* każdą falę grawitacyjną, jaka zostałaby wytworzona w chwili Wielkiego Wybuchu. Wzmocnienie to mogło uczynić takie fale wystarczająco silnymi, by je zarejestrować, ale zarazem zniekształcić je tak, że ich widmo rejestrowane przez ludzi byłoby *splotem* (kombinacją) tego, co powstało w Wielkim Wybuchu i wpływu inflacji.

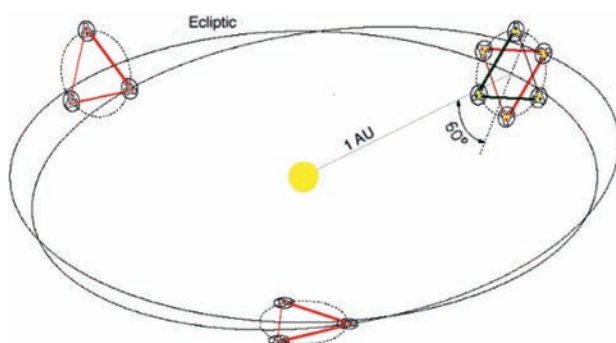
Co interesujące, będziemy mieli możliwość zaobserwowania około połowy XXI wieku tych pierwotnych



Ryc. 27. Wzmocnione przez inflację pierwotne fale grawitacyjne powstałe, gdy wiek Wszechświata wynosił od  $\sim 10^{-36}$  do  $\sim 10^{-33}$  sekundy oddziałują z pierwotną plazmą, gdy Wszechświat ma 380 000 lat, pozostawiając w polaryzacji kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła ślad, który jest rejestrowany dziś, gdy Wszechświat liczy sobie 13,8 miliarda lat. [Ilustracja zaadaptowana z WMAP # 020622/NASA/WMAP.]

fal grawitacyjnych w dwu różnych zakresach częstotliwości:

- W zakresie bardzo niskich częstotliwości, dzięki śladowi w postaci polaryzacji typu B, jaki fale te powinny były odcisnąć na kosmicznym mikrofalowym promieniowaniu tła (CMB) – była już o tym mowa wyżej (zob. także ryc. 27).
- W paśmie okresów sekundowych, pomiędzy zakresem wysokich i niskich częstotliwości, wykorzystując proponowany jako następcę interferometru LISA detektor Big Bang Observer (Phinney i inni., 2004), mający być układem połączonych wiązkami światła pojazdów kosmicznych rozmieszczonych w przestrzeni międzyplanetarnej (zob. ryc. 28).



Ryc. 28. Układ statków kosmicznych Obserwatora Wielkiego Wybuchu poruszających się wokół Słońca po tej samej orbicie, co Ziemia. [Dzięki uprzejmości Stevena Phinneya.]

Standardowa mądrość teoretyków mówi, że to, co wyszło z Wielkiego Wybuchu było najsłabszymi falami grawitacyjnymi na jakie pozwalają prawa przyrody: próżniowymi fluktuacjami pola grawitacyjnego. Parametryczne wzmocnienie przez inflację było na tyle duże, iż nawet biorące swój początek tylko z próżniowych fluktuacji pierwotne fale grawitacyjne mają szansę być

wystarczająco silne, by możliwe było ich zarejestrowanie przez oba te detektory w obu zakresach - zakresach, których częstotliwości i okresy fal różnią się o czynnik rzędu  $10^{15}$ .

Jestem sceptycznie nastawiony do standardowej mądrości teoretyków, gdyż w mojej karierze już widziałem w różnych sytuacjach jej spektakularne porażki. Myślę z nadzieją o możliwości, w istocie dość prawdopodobnej, że to co zaobserwujemy będzie odbiegać, w jednym lub w obu zakresach częstotliwości, od owej standardowej mądrości i że obserwacje ujawnią nam wystarczająco dużo o narodzinach Wszechświata, by dać kluczowe wskazówki fizykom próbującym odkryć prawa kwantowej grawitacji, prawa, które rządzą narodzinami Wszechświata w Wielkim Wybuchu.

### VIII. Zakończenie

Czterysta lat temu Galileusz zbudował mały optyczny teleskop i kierując go w stronę Jowisza, odkrył cztery największe jego księżycy, a kierując go na nasz Księżyc odkrył na nim krater. Były to narodziny astronomii elektromagnetycznej.

Dwa lata temu uczeni z zespołu LIGO uruchomili swój Zaawansowany Interferometr LIGO i wsparci przy analizie danych przez uczonych z zespołu Virgo odkryli fale grawitacyjne wytworzone przy zderzeniu dwóch czarnych dziur odległych od Ziemi o 1.3 miliarda lat świetlnych.

Gdy podziwiamy niebywałą rewolucję, jaka zaszła w naszym rozumieniu Wszechświata, dzięki astronomii elektromagnetycznej w ciągu tych czterystu lat, które upłynęły od czasów Galileusza, zmuszeni jesteśmy także zastanowić się, jaką rewolucję w nadchodzących czterystu latach spowoduje astronomia grawitacyjna wsparta astronomią wykorzystującą różnorodne sygnały.

### PODZIĘKOWANIA

Jestem wdzięczny amerykańskiej Narodowej Fundacji Nauki (NSF) i Fundacji Fairchild Shermana za finansowanie badań mojego zespołu nad falami grawitacyjnymi.

### LITERATURA

- Ajith, P., *et al.*, 2007, "Phenomenological Template Family for Black-Hole Coalescence Waveforms," *Classical Quantum Gravity* **24**, S689–S700.
- Almheiri, A., D. Marolf, J. Polchinski, and J. Sully, 2013, "Black Holes: Complementarity or Firewalls?" *J. High Energy Phys.* **02**, 062.
- Armano, M., *et al.*, 2018, "Beyond the Required LISA Free-Fall Performance: New LISA Pathfinder Results Down to 20  $\mu\text{Hz}$ ," *Phys. Rev. Lett.* **120**, 061101.

- Arnowitt, R., S. Deser, and C. W. Misner, 1962, “The Dynamics of General Relativity,” *Gravitation: An Introduction to Current Research*, edited by L. Witten (Wiley, New York), Chap. 7.
- Baker, J. G., J. Centrella, D.-I. Choi, M. Koppitz, and J. van Meter, 2006, “Gravitational-Wave Extraction from an Inspiring Configuration of Merging Black Holes,” *Phys. Rev. Lett.* **96**, 111102.
- Blanchet, L., 2014, “Gravitational Radiation from Post-Newtonian Sources and Inspiring Compact Binaries,” *Living Rev. Relativity* **17**, 2.
- Bohn, A., *et al.*, 2015, “What Does a Binary Black Hole Merger Look Like?” *Classical Quantum Gravity* **32**, 065002.
- Braginsky, V. B., 1968, “Classical and Quantum Restrictions on the Detection of Weak Disturbances of a Macroscopic Oscillator,” *Sov. Phys. JETP* **26**, 831–834.
- Braginsky, V. B., and Yu. I. Vorontsov, 1975, “Quantum-Mechanical Limitations in Macroscopic Experiments and Modern Experimental Technique,” *Sov. Phys. Usp.* **17**, 644–650.
- Braginsky, V. B., and F. Ya. Khalili, 1996, “Quantum Non-demolition Measurements: The Route from Toys to Tools,” *Rev. Mod. Phys.* **68**, 1–11.
- Buonanno, A., and Y. Chen, 2001, “Quantum Noise in Second Generation, Signal-Recycled Interferometric Gravitational-Wave Detectors,” *Phys. Rev. D* **64**, 042006.
- Buonanno, A., and Y. Chen, 2003, “Scaling Law in Signal-Recycled Laser-Interferometer Gravitational-Wave Detectors,” *Phys. Rev. D* **67**, 062002.
- Buonanno, A., and T. Damour, 1999, “Effective One-Body Approach to General Relativistic Two-Body Dynamics,” *Phys. Rev. D* **59**, 084006.
- Campanelli, M., C. O. Lousto, P. Marronetti, and Y. Zlochower, 2006, “Accurate Evolutions of Orbiting Black-Hole Binaries Without Excision,” *Phys. Rev. Lett.* **96**, 111101.
- Caves, C. M., 1981, “Quantum-Mechanical Noise in an Interferometer,” *Phys. Rev. D* **23**, 1693–1708.
- Clark, J. P. A., Van den Heuvel, E. P. J., and W. Sutantyo, 1979, *Astron. Astrophys.* **72**, 120.
- Creighton, T., 2008, “Tumbleweeds and Airborne Gravitational Noise Sources for LIGO,” *Classical Quantum Gravity* **25**, 125011.
- Cutler, C., *et al.*, 1993, “The Last Three Minutes: Issues in Gravitational Wave Measurements of Coalescing Compact Binaries,” *Phys. Rev. Lett.* **70**, 2984–2987.
- Cutler, C., and K. S. Thorne, 2002, “An Overview of Gravitational Wave Sources,” *General Relativity and Gravitation, Proceedings of the 16th International Conference*, edited by N. Bishop and S. D. Maharaj (World Scientific, Singapore), pp. 72–111.
- Danilishin, S. L., and F. Ya. Khalili, 2012, “Quantum measurement theory in gravitational-wave detectors,” *Living Rev. Relativity* **15**, 5.
- Detweiler, S. L., 1979, “Pulsar Timing Measurements and the Search for Gravitational Waves,” *Astrophys. J.* **234**, 1100–1104.
- Drasco, S., 2016, “Binary Black Hole Inspiral at Natural Speed,” <https://www.youtube.com/watch?v=1VJU50dFhfc>.
- Epstein, R., and J. P. A. Clark, 1979, “Discussion Session II: Notes and Summary,” in *Sources of Gravitational Radiation*, edited by Larry Smarr (Cambridge University Press, Cambridge, England), pp. 477–497.
- Faller, J. E. and P. L. Bender, 1984, “A Possible Laser Gravitational Wave Antenna in Space,” in *Precision Measurements and Fundamental Constants II*, edited by B. N. Taylor, and W. D. Phillips, NBS Spec. Publ. Vol. 617, pp. 689–690.
- Faller, J. E., *et al.*, 1985, “Space Antenna for Gravitational Wave Astronomy,” *Proceedings of the Colloquium on Kilometric Optical Arrays in Space*, ESA SP-226, pp. 157–163.
- Flanagan, E. E., and S. A. Hughes, 1998, “Measuring Gravitational Waves from Binary Black Hole Coalescences: I. Signal to Noise for Inspiral, Merger, and Ring-down,” *Phys. Rev. D* **57**, 4535–4565.
- Flanagan, E. E. and K. S. Thorne, 1995, “Light Scattering and Baffle Configuration for LIGO,” LIGO Technical Report No. LIGO-T950101-00-R [<https://dcc.ligo.org/DocDB/0028/T950101/000/T950101-00.pdf>].
- Gertsenshtein, M. E., and V. I. Pustovoi, 1963, “On the Detection of Low-Frequency Gravitational Waves,” *Sov. Phys. JETP* **16**, 433–435.
- Giddings, S. B., 2016, “Gravitational Wave Tests of Quantum Modifications to Black Hole Structure—with Post-GW150914 Update,” *Classical Quantum Gravity* **33**, 235010.
- Hahn, S. G., and R. W. Lindquist, 1964, “The Two-Body Problem in Geometrodynamics,” *Ann. Phys. (N.Y.)* **29**, 304–331.
- Hinderer, I., *et al.*, 2014, “Error-analysis and Comparison to Analytical Models of Numerical Waveforms Produced by the NRAR Collaboration,” *Classical Quantum Gravity* **31**, 025012.
- Hughes, S. A. and K. S. Thorne, 1998, “Seismic Gravity-Gradient Noise in Interferometric Gravitational-Wave Detectors,” *Phys. Rev. D* **58**, 122002.

- Kamionkowski, M., A. Kosowsky, and A. Stebbins, 1997, "A Probe of Primordial Gravity Waves and Vorticity," *Phys. Rev. Lett.* **78**, 2058–2061.
- Kimble, H. J., *et al.*, 2002, "Conversion of Conventional Gravitational-Wave Interferometers into QND Interferometers by Modifying their Input and/or Output Optics," *Phys. Rev. D* **65**, 022002.
- Levin, Y., 1998, "Internal Thermal Noise for LIGO Test Masses: A Direct Approach," *Phys. Rev. D* **57**, 659.
- LIGO/Virgo, 2010, "Predictions for the Rates of Compact Binary Coalescences by Ground-Based Gravitational-Wave Detectors," *Classical Quantum Gravity* **27**, 173001.
- LIGO/Virgo, 2016, "Tests of General Relativity with GW150914," *Phys. Rev. Lett.* **116**, 221101.
- Maggiore, M., 2018, *Gravitational Waves, Volume 2: Astrophysics and Cosmology* (Oxford University Press, Oxford).
- Misner, C. W., 1960, "Wormhole Initial Conditions," *Phys. Rev.* **118**, 1110–1111.
- Misner, C. W., K. S. Thorne, and J. A. Wheeler, 1973, *Gravitation* (W. H. Freeman, San Francisco).
- Owen, R., *et al.*, 2011, "Frame-Dragging Vortexes and Tidal Tendexes Attached to Colliding Black Holes: Visualizing the Curvature of Spacetime," *Phys. Rev. Lett.* **106**, 151101.
- Phinney, S., *et al.*, 2004, "The Big Bang Observer: Direct Detection of Gravitational Waves from the Birth of the Universe to the Present," NASA Mission Concept Study.
- Press, W. H., and K. S. Thorne, 1972, "Gravitational-Wave Astronomy," *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **10**, 335–374.
- Pretorius, F., 2005, "Evolution of Binary Black-Hole Spacetimes," *Phys. Rev. Lett.* **95**, 121101.
- Ryan, F. D., 1995, "Gravitational Waves from the Inspiral of a Compact Object into a Massive, Axisymmetric Body with Arbitrary Multipole Moments," *Phys. Rev. D* **52**, 5707.
- Sazhin, M. V., 1978, "Opportunities for Detecting Ultra-long Gravitational Waves," *Sov. Astron.* **22**, 36–38.
- Schutz, B. F., 1986, "Determining the Hubble Constant from Gravitational Wave Observations," *Nature (London)* **323**, 310.
- Schutz, B. F., 1989, Ed., "Gravitational Wave Data Analysis," *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop held at St. Nicholas, Cardiff, Wales, July 6–9, 1987* (Kluwer, Dordrecht).
- Seljak, U., and M. Zaldarriaga, 1997, "Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background," *Phys. Rev. Lett.* **78**, 2054–2058.
- Smarr, L., 1979, Ed., "Gauge Conditions, Radiation Formulae and the Two Black Hole Collision," in *Sources of Gravitational Waves* (Cambridge University Press, Cambridge, England), pp. 245–274.
- Thorne, K. S., and R. D. Blandford, 2017, *Modern Classical Physics* (Princeton University Press, Princeton, NJ).
- Thorne, K. S. and C. J. Winstein, 1999, "Human Gravity-Gradient Noise in Interferometric Gravitational-Wave Detectors," *Phys. Rev. D* **60**, 082001.
- Thorne, K. S., *et al.*, 2001, "The Scientific Case for Advanced LIGO Interferometers," LIGO Technical Report LIGO-P000024- A-R, Caltech/MIT, January, <https://dcc.ligo.org/LIGO-P000024/public>.
- Unruh, W. G., 1982, "Quantum Noise in the Interferometer Detector," in *Quantum Optics, Experimental Gravity, and Quantum Measurement Theory*, edited by P. Meystre and M. O. Scully (Plenum, New York), pp. 647–660.
- Vogt, R. E., R. W. P. Drever, F. J. Raab, K. S. Thorne, and R. Weiss, 1989, Proposal to the National Science Foundation for the Construction, Operation, and Supporting Research and Development of a Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (California Institute of Technology), <https://dcc.ligo.org/LIGO-M890001/public>.
- Weiss, R., 1972, "Electromagnetically Coupled Broadband Gravitational Antenna," Quarterly Progress Report No. 105, MIT Research Laboratory of Electronics, pp. 54–76.



---

# Wspomnienie o profesorze Adamie Sobiczewskim

Zygmunt Patyk

Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Profesor Adam Sobiczewski urodził się 21 sierpnia 1931 w Skierniewicach. Rodzina przeprowadziła się do Siedlec, gdzie ukończył Gimnazjum im. B. Prusa, a następnie Liceum im. S. Żółkiewskiego. W 1955 uzyskał magisterium z matematyki na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu Warszawskiego, a rok później zakończył studia na Wydziale Łączności Politechniki Warszawskiej, specjalizując się w dziedzinie techniki fal ultrakrótkich.

Doktorat w zakresie nauk matematyczno-fizycznych obronił w 1964 na Uniwersytecie Warszawskim. Od roku 1962 pracował w Instytucie Badań Jądrowych (obecnie - Narodowe Centrum Badań Jądrowych). To w tym Instytucie uzyskał habilitację w 1969 roku, a kilka lat później tytuły profesora nadzwyczajnego (1976) i profesora zwyczajnego (1989).

Profesora Adama Sobiczewskiego po raz pierwszy spotkałem na początku lat 80. Ubiegłego wieku podczas egzaminu na Studium Doktoranckie przy Instytucie Badań Jądrowych w Świerku. Pamiętam, że zadał mi pytanie – dlaczego jedne jądra atomowe są stabilne, a inne podlegają rozpadowi. Dzisiaj wiem, że odpowiedzi na to pytanie pan Adam, tak go nazywaliśmy, szukał przez całe życie.

Wiosną 1985 w Zakopanym odbywała się Szkoła poświęcona fizyce jądrowej. W czasie jednej z wybieczek do Doliny Strążyskiej pan Adam opowiedział mi o możliwości współpracy z grupą profesora Petera Armbrustera z Instytutu Badań Ciężkich Jonów (GSI) w Darmstadt. Instytut ten był wówczas wiodącym ośrodkiem wytwarzającym pierwiastki ciężkie. Po zakończeniu Szkoły Profesor został kilka dni w schronisku w Dolinie Chochołowskiej dokąd wiele razy, najczęściej jesienią, powracał.

W ciągu następnych kilku miesięcy, wspólnie z Adamem Sobiczewskim, Karolem Boeningiem i Stefanem Ćwiokiem wykonaliśmy obliczenia czasów życia na spontaniczne rozszczepienie i rozpad alpha dla jąder atomowych cięższych od fermu. Rok później praca została

opublikowana w niemieckim czasopiśmie *Zeitschrift für Physik*. Jednak czasy życia były obliczone za pomocą bardzo przybliżonych modeli.

Po raz pierwszy do GSI, do grupy profesora Armbrustera, wyjechałem z panem Adamem we wrześniu 1987 roku z zadaniem zbadania stabilności jąder atomowych cięższych od fermu. Modele struktury jądra atomowego były wówczas intensywnie rozwijane w Warszawie. W następnych latach, korzystając z gościnności GSI oraz mocy obliczeniowej tamtejszego komputera, z Adamem Sobiczewskim, Stefanem Ćwiokem, Piotrem Rozmejem i Januszem Skalskim szczegółowo zbadaliśmy stabilność dużego obszaru jąder atomowych.

Wyniki badań były zaskakujące. Okazało się, że pomiędzy fermem a postulowaną w latach 60. XX w. przez A. Sobiczewskiego, F.A. Gareeva i B.N. Kalinkina wyspą stabilności, w okolicy liczby protonów  $Z=114$  i liczby neutronów  $N=184$ , istnieje wyspa jąder o niesferycznych kształtach i podwyższonej stabilności w okolicy liczby protonów  $Z=108$  i liczby neutronów  $N=162$ . Wyniki obliczeń zostały opublikowane w *Nuclear Physics A* w 1991 roku. Podwyższoną stabilność tych jąder, określanych jako „zdeformowane jądra magiczne”, zaobserwowano doświadczalnie kilka lat później. Należy podkreślić, że również prognozy prof. Sobiczewskiego z lat 60. okazały się bardzo owocne. W ostatnich latach, w grupie prof. Oganessiana z Dubnej, wytworzono jądra właśnie w okolicy najcięższego, podwójnie magicznego jądra ( $Z=114$  i  $N=184$ ), a podwyższona stabilność wytworzonych jąder pochodzi od efektów powłokowych, szczególnie przedyskutowanych 50 lat wcześniej przez profesora Adama Sobiczewskiego. Za prace dotyczące badania stabilności jąder najcięższych Profesor otrzymał Nagrodę Fundacji Nauki Polskiej za rok 1995 – bardzo się z tej nagrody cieszył.

Po roku 1992 rzadziej pracowałem z panem Adamem. Jednak często dyskutowaliśmy. Opowiadał o swoich planach i nowych pomysłach, pytał czym się zajmuję. Każdego roku w Wigilię Bożego Narodzenia, w dniu

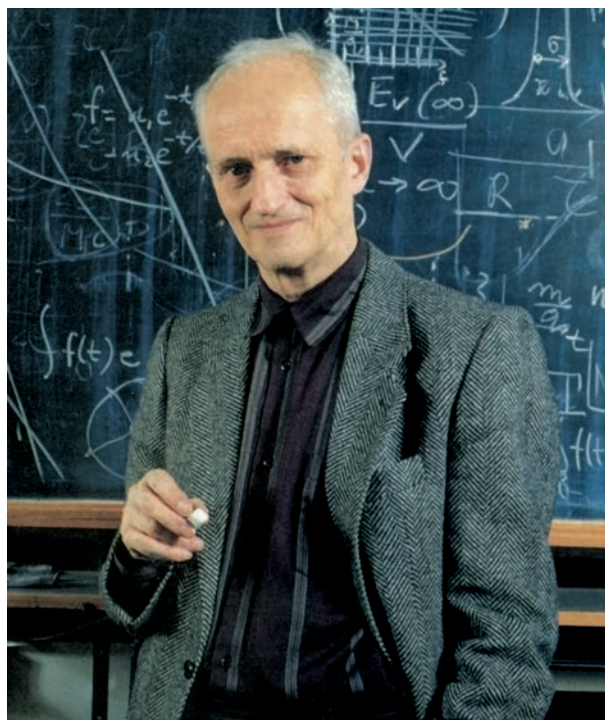
Jego imienin, składałem mu życzenia. On się odwzajemniał, składając życzenia w dniu moich imienin. W maju 2017 roku też dzwonił. Okazało się, że po raz ostatni...

Wśród przyjaciół z Lublina, Bożeny i Krzysztofa Pomorskich, Andrzeja Barana, Andrzeja Staszczaka czuł się jak w rodzinie. W roku 2002, podczas szkoły w Kazimierzu Dolnym, organizowanej przez środowisko lubelskie, świętowaliśmy Jego 70. urodziny. Uniwersytet Marii-Curie Skłodowskiej w Lublinie uhonorował go honorowym doktoratem.

Adam Sobiczewski był przykładem fizyka teoretyka bardzo ceniącego kontakt z doświadczeniem. W licznych rozmowach z Peterem Armbrusterem, Sigurdem Hoffmanem i Gottfriedem Münzenbergiem dyskutował możliwości i ograniczenia na wytwarzanie najcięższych pierwiastków. Cenił też kontakty z grupą doświadczalną prof. Yurija Oganessiana z Dubnej, gdzie był częstym gościem. Lubił pracować wieczorami, do późna w nocy.

Dla pełności krótkiego szkicu należy dodać, że Profesor Sobiczewski wypromował 10 doktorów. Międzynarodowe uznanie, jakim się cieszył, spowodowało, że otrzymał szereg prestiżowych nagród i wyróżnień: Nagrodę im. G. N. Florowa (zespołowa) Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych w Dubnej, Rosja (1997) oraz Nagrodę Fundacji Alfreda Jurzykowskiego (Nowy Jork, USA, 1997). Od 1989 r. był członkiem korespondentem PAN, a od 2013 r. członkiem rzeczywistym PAN. Od 1997 r. był członkiem Polskiej Akademii Umiejętności. W latach 1977-2003 był redaktorem naczelnym *Postępów Fizyki*, pisma Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Po roku 2003 pozostał jego honorowym redaktorem.

Ostatni raz do GSI-Darmstadt wyjechał latem 2017 roku. 21 sierpnia obchodził tam 86 urodziny. Dwa tygodnie później doznał, wydawało się, niegroźnego wypadku rowerowego. Jednak późniejsze komplikacje spowodowały, że 20 października 2017 roku Adam Sobiczewski odszedł. Zwykle w październiku wybierał się do Doliny Chochołowskiej, do swojego ulubionego schroniska, by w ciszy i w skupieniu podziwiać niezmienną i majestat gór.



---

# Wspomnienie o profesorze Moiselu Isaakowiczu Kaganowie

w imieniu przyjaciół Profesora Jacek Kowalski i Tadeusz Paszkiewicz

W dniu 31 sierpnia 2019 w Waltham w pobliżu Bostonu zmarł profesor Moisei Isaakowicz Kaganow. Urodzony w 1921 w Łubnach (Ukraina), syn literaturoznawcy Isaaka Jakowlewicza Kaganowa i Diny Dawidownej Kaganowej, która była pediatrą.

W 1994 prof. Kaganow przeszedł na emeryturę i wyemigrował do Stanów Zjednoczonych. Zamieszkał w Belmont w stanie Massachusetts, a następnie z rodziną córki w pobliskim Waltham, gdzie, jak mówił „oczekiwał gości”. Miał dwie córki, pięcioro wnuków i wnuczek oraz ośmioro prawnuków.

W 1939 Moisei I. Kaganow został przyjęty na studia na Fizyczno-Matematycznym Wydziale Uniwersytetu Charkowskiego. W końcu tego roku został powołany do Armii Czerwonej. Służbę wojskową zakończył w 1945. Został odznaczony dwoma orderami: Orderem Wielkiej Wojny Ojczyźnianej i Orderem Czerwonej Gwiazdy oraz medalem Za obronę Kaukazu. W 1946 powrócił na studia na Uniwersytecie Charkowskim i ukończył je w 1949.

W latach 1949-1970 pracował w charkowskim Ukraińskim Instytucie Fizyczno-Technicznym. W latach 60. ub. wieku kierował tamtejszym oddziałem fizyki teoretycznej. Był bliskim współpracownikiem prof. Ilii Michajłowicza Lifszycy. W 1970 rozpoczął pracę w moskiewskim Instytucie Problemów Fizycznych Akademii Nauk ZSRR i jednocześnie na Państwowym Uniwersytecie Moskiewskim.

W 1954 uzyskał stopień doktora na podstawie rozprawy *Взаимо действие заряженных частиц с медленными волнами в анизотропных диэлектриках* (*Oddziaływanie naładowanych cząstek z powolnymi falami w anizotropowych dielektrykach*), a w 1958 stopień doktora habilitowanego za pracę *Некоторые задачи кинематической теории твердого тела* (*Niektóre zagadnienia kinetycznej teorii ciał stałych*).

Profesor Kaganow jest autorem i współautorem ponad 200 prac naukowych i książek poświęconych

kwantowej fizyce ciała stałego, w szczególności magnetyzmowi i elektronowej teorii metali. Jest też współautorem obszernej przeglądowej pracy poświęconej falam spinowym w ferromagnetykach opublikowanej w 1960 w czasopiśmie *Успехи физических наук* (*Uspiechi Fizycznych Nauk*). W ZSRR elektronową teorię metali rozwijał I.M. Lifszyc i jego uczniowie, m.in. M.I. Kaganow; tematyka ta obejmuje teorię anormalnego efektu spinowego w normalnych metalach, związek oporu takich metali w silnych polach magnetycznych i efektu Halla z topologią powierzchni Fermiego, a także pochłanianie ultradźwięków przez elektrony.

Współtworzył dwie monografie: И.М. Лифшиц, М.Я. Азбель, М.И. Каганов *Электронная теория металлов* (I.M. Lifszic, M.Ja. Azbel, M.I. Kaganov, *Elektronnaja teoria metalłow*), Москва, Наука 1971, M.I. Kaganov, V.G. Peschansky, *Galvano-magnetic Phenomena Today and Forty Years Ago*, Elsevier 2002 oraz podręcznik M. I. Kaganov, E. Jäger, *Grundlagen der Festkörperphysik*, John Wiley & Sons, 1998.

Razem z V.S. Edelmanem współredagował naukowo monografię zbiorową: М.И.Каганов, В.С. Эдельман (ред.) *Электроны проводимости* (*Elektrony przewodimosti*), Москва, Наука 1985 i jednocześnie był autorem dwóch artykułów w niej opublikowanych.

Profesor Kaganow był także redaktorem naukowym przekładu na język rosyjski obszernego podręcznika N.W. Ashcrofta i N.D. Mermina *Solid state physics* pt. *Физика твердого тела*, Москва, Мир 1979).

Wspólnie z prof. G.Ja. Lubariskim (Г.Я. Любарский) w 2005 opublikował książkę zatytułowaną *Абстракция в математике и физике* (*Abstrakcija w matematikie i fizykie*), Москва, Физматлит 2005. W 1998 opublikował zbiór artykułów, w których opisał fenomen szkoły naukowej Lwa Dawidowicza Landaua: *Школа Ландау: что я о ней думаю* (*Szkoła Landau: chto ja o niej dumaju*), Троицк, Трoвант 1998.

Opublikował także dwie autobiografie – naukową *Эпизоды из жизни физика теоретика* (*Epizody iz żizni fizyka teoretika, Epizody z życia fizyka teoretyka*), nakładem autora, Waltham 2012 i obszerną *Длинная жизнь* (*Dlinnaja żizń, Długie życie*), nakładem autora, Waltham 2013.

Poświęcał dużo uwagi popularyzacji fizyki. Był członkiem kolegium redakcyjnego czasopisma *Квант* (*Kwant*). Napisał cztery książki wydane w serii Biblioteka Kwanta. Nakładem moskiewskiego wydawnictwa Nauka ukazała się w 1979 książka *Электронны, фононы, магнорны* (*Elektrony, fonony, magnony*), Москва, Наука. W 1978 Państwowe Wydawnictwo Naukowe wydało w języku polskim książkę Kaganowa pod tym samym tytułem, przy czym to polskie wydanie istotnie różni się od rosyjskiego. W 1993 Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego opublikowało *Етиуды о физыце ciała сталего*. Profesor Kaganow zamieścił w nim kilkanaście swoich artykułów popularnonaukowych. Większość z nich została opublikowana wcześniej w języku rosyjskim.

Profesor był człowiekiem towarzyskim. Poświęcał dużo czasu na dyskusje z młodzieżą naukową. Dla przyjaciół był Musikiem. W czasach, gdy kontakty z obcokrajowcami były reglamentowane i aby gościć ich należało uzyskać na to zgodę URZĘDU, drzwi moskiewskiego mieszkania Musika były zawsze otwarte. Za obficie zastawionym stołem, co było wynikiem starań żony Ełły Mironowny – dla przyjaciół Ełłoczki – prowadzone były otwarte rozmowy na wiele tematów, także politycznych. Musik lubił poezję i przyjaźnił się z kilkoma poetami. Interesował się także malarstwem. Przez swego zięcia Le-

onida Lityńskiego związany był z Andriejem D. Sacharowem.

Moisei I. Kaganow był częstym gościem w Polsce i miał tu licznych przyjaciół, nie tylko fizyków. Był wykładowcą czterech Szkół Fizyki Teoretycznej w Karpaczu, organizowanych przez fizyków z Uniwersytetu Wrocławskiego. Uczestniczył w pracach Laboratorium Wysokich Pól Magnetycznych Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu. Kilka razy wygłaszał w języku rosyjskim cykle wykładów. Były to znakomite wykłady – emocjonalne, obrazowe i pełne głębokich treści naukowych.

W roku 1998 Politechnika Wrocławska nadała prof. M.I. Kaganowowi akademicki tytuł honorowy *Doctor honoris causa*.



(fot. Krzysztof Mazur)

Profesor Kaganow przeżył długie i twórcze życie. Z żalem żegnamy wybitnego uczonego i przyjaciela.



# Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego

opracowana na podstawie wiadomości nadesłanych przez korespondentów oddziałów PTF oraz informacje ze strony PTF ([www.ptf.net.pl](http://www.ptf.net.pl)).

MAJ 2019

**Poznań.** 10 maja w ramach cyklu seminariów Modern Trends in Physics Research na UAM prof. Maciej Kozak z Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza wygłosił referat zatytułowany: *SOLCRYS – new XRD/SAXS beamline for NCPS “Solaris” synchrotron*.

**Poznań.** 10 maja w Collegium Physicum Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, na kampusie UAM Morasko, w auli im. Arkadiusza Piekary odbyła się specjalna sesja poświęcona historii Wydziału Fizyki w Poznaniu. Sesję uroczyste otworzył Dziekan Wydziału Fizyki prof. Antoni Wójcik, a następnie były rektor UAM, prof. Stefan Jurga (Centrum NanoBio-Medyczne) wygłosił pierwszy referat zatytułowany *Obchody setnej rocznicy powołania Uniwersytetu*. Historię przedwojennej fizyki poznańskiej w latach 1919–1939 przedstawił prof. Henryk Drozdowski, a historię wydziału po II Wojnie Światowej przedstawili prof. Tadeusz Hilczer (fizyka doświadczalna) i prof. Leon Kowalewski (fizyka teoretyczna). Na sesji nie zabrakło także przedstawicieli Instytutu Akustyki (prof. Rufin Makarewicz poprowadził seminarium: *Historia Instytutu Akustyki*) oraz Instytutu Obserwatorium Astronomiczne (dr Władysław Naskręcki wygłosił referat *Historia Obserwatorium Astronomicznego w latach 1919–2018*). W drugiej części przedstawiono historię Wydziału Fizyki w okresie największego rozwoju, począwszy od końca lat pięćdziesiątych ub. wieku po dzień dzisiejszy. Profesor Andrzej Dobek przedstawił historie związane z organizacją kierunku biofizyka oraz fizyki doświadczalnej po 1969 roku, a profesorowie Zbigniew Jacyna-Onyszkiewicz i Ryszard Tanaś przybliżyli rozwój fizyki teoretycznej. Dzieje Wydziału nieodłącznie związane są z tworzącym się od 1977 roku kampusem UAM w dzielnicy Morasko oraz miasteczkiem uniwersyteckim dla pracowników Uniwersytetu. Dzięki



Fot. 1. Dziekan Wydziału Fizyki UAM prof. Antoni Wójcik otwiera uroczyste Sesję Historyczną (fot. Leszek Wołejko)



Fot. 2. Prof. Zbigniew Jacyna-Onyszkiewicz pokazuje dokument potwierdzający nadanie przez UAM akademickiego tytułu honorowego *Doctor honoris causa* profesorowi Szczepanowi Szczeniowskiemu (fot. Leszek Wołejko)



Fot. 3. Profesorowie Tadeusz Lulek (od lewej) i Andrzej Dobek rozmawiają podczas poczęstunku (fot. Leszek Wołejko)

prof. Grzegorzowi Musiałowi uczestnicy sesji mieli okazję poznać „kamienie milowe” prac budowlanych, które bardzo dobrze odwzorowują ówczesne trudności. Ostatnim prelegentem był prof. Wojciech Nawrocki, który przedstawił historię Wydziału po 1993 roku, czyli od momentu, kiedy Wydział Fizyki stał się samodzielną jednostką UAM (do 1977 roku istniał Wydział Matematyczno-Fizyczno-Chemiczny, a później Wydział Matematyczno-Fizyczny).

**Warszawa.** 13 maja odbyło się konwersatorium im. Jerzego Pniewskiego i Leopolda Infelda na UW, na którym prof. Pavel Kroupe (Uniwersytet w Bonn i Uniwersytet Karola w Pradze) wygłosił wykład *Detecting dark matter*. Profesor znany jest ze swoich badań nad dynamiką planet, gwiazd i galaktyk, a przede wszystkim nad naturą ciemnej materii i w tej ostatniej dziedzinie rozwija hipotezę M. Milgroma o koniecznej modyfikacji praw Newtona w odniesieniu do dynamiki odległych galaktyk, z czego, jak się wydaje, wynika zbędność pojęcia ciemnej materii.

**Poznań.** 15 maja w ramach cyklu seminariów Modern Trends in Physics Research na UAM dr Nicholas Sedlmayr z Department of Physics and Medical Engineering, University of Technology, Rzeszów, wygłosił referat: *The Superconductivity of Topologically Protected Surface States*.

**Poznań.** 20 maja w ramach cyklu seminariów Modern Trends in Physics Research na UAM prof. Shinichiro Sakikawa z International Relations Center, Kochi University of Technology, Tosa Yamada, Kochi, Japonia wygłosił referat: *Research cooperation with Kochi University of Technology*. Drugi z zaproszonych gości, prof. Taksu Cheon z Laboratory of Physics, Kochi University of Technology, Tosa Yamada, Kochi, Japonia przedstawił swoją pracę: *Some aspects of quantum graph theory*.

**Warszawa.** 28 maja z cyklu Zapytaj Fizyka na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, odbyło się seminarium: *Fizyka a Internet – 30 lat www*, które wygłosili dr Maciej Kozłowski i dr hab. Roman Szwed. Relację ze spotkania można znaleźć pod adresem: [zapytajfizyka.fuw.edu.pl/](http://zapytajfizyka.fuw.edu.pl/)

**Poznań.** 31 maja w ramach cyklu seminariów Modern Trends in Physics Research na UAM prof. Maciej Kozak z Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza wygłosił referat: *NCPS Solaris and current status of SOLCRYS beamline*. (O synchrotronie Solaris pisaliśmy niedawno w *Postępkach Fizyki* 70, 2/2019.)

#### CZERWIEC 2019

**Warszawa.** 3 czerwca odbyło się konwersatorium im. Jerzego Pniewskiego i Leopolda Infelda na UW, podczas którego prof. John Gregg z Uniwersytetu w Oxfordzie, UK wygłosił wykład: *Magnon-inspired novel computing paradigms*. Profesor Gregg wprowadził słuchaczyw relatywnie młodą dziedzinę fizyki, zwaną magnoniką. Magnonika zajmuje się kolektywnymi wzbudzeniami spinów w kryształach. Opowiedział o nadziejach związanych z wykorzystaniem zjawiska fal spinowych w konstrukcji nowego typu urządzeń elektronicznych. Urządzenia takie oferowałyby większą prędkość przetwarzania informacji i mniejsze zużycie energii w porównaniu ze stosowanymi obecnie krzemowymi układami elektronicznymi. Tradycyjnie, przed konwersatorium organizatorzy zaprosili na nieformalne dyskusje przy kawie i ciastkach.

**Poznań.** 5 czerwca w ramach cyklu seminariów Modern Trends in Physics Research na UAM, dr Hong-Bin Chen z Department of Physics, National Cheng Kung University, Taiwan wygłosił referat: *Process nonclassicality: Characterization, canonical Hamiltonian ensemble representation, and quantification*.

**Zakopane.** W dniach 9–14 czerwca Polskie Towarzystwo Promieniowania Synchrotronowego zorganizowało The 14th International School and Symposium on Synchrotron Radiation in Natural Science (IS-SRNS'2019). Problematyka poruszana na konferencji dotyczyła wykorzystania promieniowania synchrotronowego oraz laserów w badaniach strukturalnych nowych materiałów (katalizatorów, półprzewodników, nanostruktur magnetycznych, polimerów, ciekłych kryształów itp.) oraz układów biologicznych (struktur białek, kwasów nukleinowych, lipidów, biokompatybilnych nośników do leków itp.). Szeroko zaprezentowano także

możliwości badawcze polskiego synchrotronu NCPS Solaris, a zwłaszcza obecnie działające już linie badawcze (UARPEs, XAS, PEEM) oraz linie w budowie (XPS, XMCD czy XRD/SAXS). Konferencja została zorganizowana przez zespół koordynowany przez prof. dr. hab. Macieję Kozaka. Więcej informacji na stronie: [issrns14.home.amu.edu.pl/](http://issrns14.home.amu.edu.pl/) (O synchrotronie Solaris pisaliśmy niedawno w *Postęпах Fizyki* 70, 2/2019.)

**Poznań.** W dniach 5–8 czerwca w Centrum NanoBioMedycznym UAM odbyła się Konferencja NaoTech Poland. Wykłady konferencyjne odbywały się w Auditorium Maximum im. prof. F. Kaczmarska, Auditorium B im. prof. A. Piekary i oraz Auditorium C im. prof. Sz. Szczeniowskiego na Wydziale Fizyki UAM. Tematyka poruszana przez wielu znamienitych wykładowców oraz młodych badaczy dotyczyła zaawansowanych nanomateriałów, nanoinżynierii, nanobiomedycyny – zarówno zagadnień teoretycznych, jak i aplikacji.

Więcej informacji można znaleźć na stronie [www.ifmpan.poznan.pl](http://www.ifmpan.poznan.pl)

**Poznań.** 12 czerwca w ramach cyklu seminariów Modern Trends in Physics Research na UAM, dr Thomas Vasileiadis z Fritz Haber Institute of the Max Planck Society, Berlin wygłosił referat: *Ultrafast Energy Flow and Structural Changes in Nanoscale Heterostructures*.

#### LIPIEC 2019

**Zabrze.** 5 lipca odbyła się XVII Konferencja Roboty Medyczne 2019, z sesjami: roboty rehabilitacyjne, usługowe/socjalne, chirurgiczne ..., w siedzibie Fundacji Rozwoju Kardiologii w Zabrzu im. prof. Zbigniewa Religi. Zaproszenie zostało skierowane do wszystkich naukowców i użytkowników, wynalazców i producentów, potencjalnych użytkowników i fanów tej niezwykle rozwijającej się dziedziny. Spotkanie było bardzo ważnym dniem dla robotyki medycznej w Polsce. Dla gości i uczestników zorganizowano w tym dniu również pierwszy w Polsce panel informacyjny dotyczący projektu europejskiego, którego celem jest wspieranie przedsiębiorstw związanych z robotyką medyczną oraz Forum Robotyki Medycznej – panel dyskusyjny wszystkich zaangażowanych w rozwój i wdrożenia robotów w usługach zdrowotnych.

Ponadto ramowy plan spotkań obejmował: Info Day Hero Digital Innovation Hub Robotics in Healthcare, podczas którego przedstawiono plany związane z projektem europejskim; pokazy robotów; panele dyskusyjne: wynalazców/badaczy robotów medycznych (Research), przedsiębiorców/producentów robotów medycznych (Market), użytkowników robotów me-

dycznych (Users), panel menedżerów wdrażających roboty (Business), konfrontacyjny (Confrontation); ofertę Kłastrów Biomedycznych – Klaster Life Science Kraków, Klaster Med Silesia Gliwice.

W czasie Konferencji, jak co roku, przyznana została nagroda publiczności Strzała Robina oraz Statuetka Robina dla najlepszej pracy młodego naukowca. Artykuł dotyczący tej dziedziny, autorstwa prof. Zbigniewa Nawrata został opublikowany w *Postęпах Fizyki* 69, 1–6/2018.

[www.ptf.net.pl/pl/towarzystwo/dzialalnosc/postepy-fizyki/roczniki/roczniki-2010-2018/](http://www.ptf.net.pl/pl/towarzystwo/dzialalnosc/postepy-fizyki/roczniki/roczniki-2010-2018/)

**Świerk.** W dniach 3–5 lipca w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku odbyła się Konferencja FENS 2019-10: Polskie Sympozjum Fizyka w Ekonomii i Naukach Społecznych.

Celem konferencji było ukazanie możliwości, jakie daje zastosowanie w ekonomii i naukach społecznych narzędzi tradycyjnie używanych dotychczas w fizyce. To spowodowało powstanie nowych dziedzin naukowych: ekonofizyki i socjofizyki, co świadczy o zaskakującej otwartości i multidyscyplinarnych możliwościach fizyki. Jest to bezpośrednie i realne zaangażowanie potencjału badawczego nauk podstawowych w rozwój gospodarki i społeczny kraju przez rozwiązywanie konkretnych problemów społeczno-ekonomicznych. Badania prowadzone w tym obszarze mają istotne znaczenie społeczne otwierając nowe możliwości opisu oraz zrozumienia zjawisk społecznych i ekonomicznych.

Badania ekonofizyczne i socjofizyczne rozwijają się w Polsce bardzo intensywnie. Polskie środowisko zajmujące się tymi zagadnieniami jest bardzo wysoko oceniane na świecie, czego dowodem jest międzynarodowy charakter cyklicznych konferencji FENS odbywających się w naszym kraju. Tematyka konferencji nie tylko przerzuca pomost pomiędzy badaniami podstawowymi a ich zastosowaniami w praktycznej działalności ekonomiczno-społecznej, ale także wzmacnia multidyscyplinarny charakter badań i propagowanie dorobku i narzędzi wypracowywanych w środowisku fizyków do nauk społecznych. Podczas konferencji świetni wykładowcy pochodzący ze stojących na najwyższym poziomie naukowym międzynarodowych i krajowych ośrodków badawczych dokonali przeglądu tematów socjofizycznych i ekonofizycznych uprawianych aktualnie na świecie, w tym w Polsce. Prace przedstawione na konferencji dotyczyły takich tematów jak: metodologie, teorie, modele, metody i techniki oraz konkretne zastosowania, rozwijane przede wszystkim w ramach fizyki (zwłaszcza fizyki statystycznej oraz fizyki materii skondensowanej), matematyki (a zwłaszcza matematyki finansowej), a także informatyki stosowanej



(przede wszystkim modelowanie numeryczne i agentowe), które są lub mogą być stosowane do opisu zjawisk i procesów ekonomiczno-społecznych. Odbędą się też dyskusje panelowe dające ogromną szansę nawiązania bezpośrednich kontaktów z najwybitniejszymi naukowcami ze światowej elity.

Znaczenie konferencji FENS 2019, dla polskiego środowiska naukowego, w tym przede wszystkim dla młodych naukowców, doktorantów i studentów jest tym większe, że była to już dziesiąta edycja sympozjum, organizowanego przez Sekcję Polskiego Towarzystwa Fizycznego systematycznie, średnio co półtora roku począwszy od 2004. To dzięki zachowaniu ciągłości udało się osiągnąć wysoki, światowy poziom badań w tej dziedzinie, a przy tym młodzi polscy badacze mogą systematycznie rozwijać swoje kariery naukowe. Przekłada się to na wzrost zainteresowania studiowaniem nauk ścisłych i buduje innowacyjny kapitał ludzki, stanowiący jeden z najistotniejszych składników społecznego i gospodarczego rozwoju kraju.

**UWAGA:** Z okazji setnej rocznicy powstania Polskiego Towarzystwa Fizycznego odbędzie się morski rejs fizyków i sympatyków fizyki żagłowcem STS *Fryderyk Chopin* – rozpoczęto kompletowanie załogi. Koordynatorem przedsięwzięcia jest dr Jan Grabski z Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej. Więcej informacji na stronie [www.ptf.net.pl](http://www.ptf.net.pl)

#### WRZESIEŃ 2019

**Kraków.** W dniach 4–6 września na Uniwersytecie Jagiellońskim w historycznym budynku Collegium Medicum w samym centrum Krakowa, odbyła się pierwsza światowa konferencja na temat kryształów czasowych.

Kryształy czasowe to układy kwantowe, które wykazują zachowanie znane z fizyki ciała stałego, ale w domenie czasu. Celem warsztatów *Time Crystals and Related Phenomena* było zgromadzenie ekspertów oraz młodych naukowców pracujących nad kryształami czasowymi i układami napędzanymi periodycznie, w celu wymiany wiedzy i doświadczeń.

**Olsztyn.** We wrześniu na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim odbył się 39. Zjazd Polskiego Towarzystwa Astronomicznego. Warto tutaj dodać, że Zjazdy Polskiego Towarzystwa Astronomicznego (PTA) to duże konferencje naukowe organizowane co dwa lata w różnych ośrodkach astronomicznych w kraju. Stanowią przegląd bieżących badań astronomicznych prowadzonych w Polsce oraz przez polskich naukowców w ramach międzynarodowych projektów badaw-

czych. Poprzedni 38. Zjazd PTA miał miejsce we wrześniu 2017 roku w Zielonej Górze (więcej na [www.pta.edu.pl/prasa/pta1806](http://www.pta.edu.pl/prasa/pta1806)).

W okresie od września do grudnia 2019 astronomowie będą odwiedzać szkoły różnego szczebla kształcenia. Zainteresowane placówki mogą zgłaszać chęć udziału w projekcie. Odwiedziny szkół są bezpłatne. Polskie Towarzystwo Astronomiczne (PTA) realizuje te spotkania w ramach akcji IAU100 na stulecie Międzynarodowej Unii Astronomicznej (IAU).

Szczegóły na stronie [www.pta.edu.pl/astromers-in-schools/](http://www.pta.edu.pl/astromers-in-schools/)

**Chorzów.** W dniach 19–20 września w chorzowskim Śląskim Międzyuczelnianym Centrum Edukacji i Badań Interdyscyplinarnych odbył się kongres naukowy *Pomiędzy Naukami – Science Beyond Disciplines* adresowany do młodych naukowców, a zaproszenie wystosowali członkowie Rady Samorządu Doktoranckiego Wydziału Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Jak co roku miejscem spotkania był Chorzów; tym razem wydarzenie miało charakter międzynarodowy. Zaprezentowane zostały badania obejmujące nauki ścisłe i przyrodnicze, inżynierijno-techniczne oraz medyczne.

**Kraków.** W dniach 13–18 września odbył się 45. Zjazd Fizyków Polskich, który zgromadził blisko 600 naukowców z różnych dziedzin fizyki, nauczycieli fizyki oraz przedstawicieli innych nauk. Uczestnicy pracujący na uczelniach wyższych, w szkołach, instytutach badawczych laboratoriach powiązanych z przemysłem i instytucjach certyfikujących zaprezentowali najważniejsze osiągnięcia naukowe ostatnich lat. Gośćmi Zjazdu byli czołowi polscy uczeni, laureaci nagród Polskiego Towarzystwa Fizycznego, nagród Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej i nagród Premiera oraz Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Szczególnego charakteru Zjazdowi nadała obecność znakomitych gości zagranicznych, w tym laureatów Nagrody Nobla i różnych innych nagród międzynarodowych.

45. Zjazd Fizyków Polskich miał również szczególny charakter ze względu na inaugurację obchodów 100-lecia Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Wkrótce po odzyskaniu przez nasz kraj niepodległości fizycy polscy utworzyli Polskie Towarzystwo Fizyczne, aby wzmocnić wkład tej grupy naukowców w rozwój odradzającej się Ojczyzny. Kontynuując działania założycieli Towarzystwa również w dzisiejszych czasach fizycy polscy czytują sobie za zaszczyt przyczyniać się do budowania silnej pozycji naszego kraju w świecie.



Zjazd organizowali wspólnie: Krakowski Oddział Polskiego Towarzystwa Fizycznego, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej, Wydział Fizyki, Matematyki i Informatyki Politechniki Krakowskiej, Wydział Matematyczno-Fizyczno-Techniczny Uniwersytetu Pedagogicznego oraz Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk. Ta wspólna organizacja była wyrazem silnej pozycji fizyki krakowskiej i różnorodności prowadzonych tu badań. Zjazd odbywał się w Auditorium Maximum UJ (13–15 września), w Akademii Górniczo-Hutniczej (16 września) oraz na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ (17–18 września).

Gwałtowny rozwój nauki w ostatnich latach sprawia, że powstające zespoły badawcze skupiają specjalistów z różnych dziedzin fizyki i nauk przyrodniczych.

Stąd w trakcie Zjazdu specjalne sesje poświęcone były badaniom interdyscyplinarnym łączącym fizykę z biologią, chemią, medycyną, elektroniką, nanotechnologią, inżynierią materiałową, informatyką i innymi dziedzinami. Badania naukowe powinny znajdować zastosowanie w różnych obszarach przemysłu, w związku z czym odbyła się specjalna sesja Fizyka-Przemysł-Innowacje poświęcona wspólnym działaniom naukowców i przedsiębiorców w zakresie badań i rozwoju nowych technologii. Sesja ta współorganizowana była przez Centra Transferu Technologii działające przy UJ i AGH. Równocześnie, w ramach Zjazdu odbyły się: Konferencja Dydaktyczna dla nauczycieli fizyki poświęcona metodyce nauczania oraz praktyczne warsztaty dydaktyczne połączone z demonstracjami doświadczeń fizycznych. Nauka służy całemu społeczeństwu, stąd Zjazdowi towarzyszyły także wydarzenia o charakterze popularnonaukowym, otwarte dla wszystkich zainteresowanych.

45. Zjazd Fizyków Polskich odbył się pod patronatem dr. J. Gowina, Wiceprezesa Rady Ministrów i Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz prof. dr. hab. J. Majchrowskiego, Prezydenta Miasta Krakowa, a także Rektorów i Dyrektorów uczelni i instytucji współorganizujących Zjazd. Wsparcia finansowego udzielili m.in. MNiSW w ramach umowy 933/P-DUN/2019 ze środków przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę, Komitet Fizyki PAN, Miasto Kraków oraz Małopolska Agencja Rozwoju Regionalnego S.A.



Ministerstwo Nauki  
i Szkolnictwa Wyższego



Kraków

**maRR**

Małopolska Agencja  
Rozwoju Regionalnego SA



## Magdalena Fikus

### O życiu na żywo

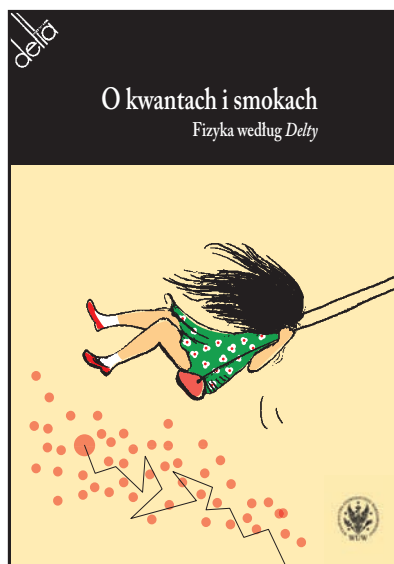
#### Biologia według Delt

Zbiór felietonów, pióra znakomitej popularyzarki nauki prof. Magdaleny Fikus, publikowanych na łamach miesięcznika Delta w latach 2010–2018. Autorka pisze m.in. o dzieciach trojga rodziców, inżynierii genetycznej, mikrobiomie, cudownych lekach, tajemnicach ewolucji, noblistach czy źródłach naukowej wyobraźni.

Publikacja zawiera celne komentarze do ważnych odkryć, wynalazków i wydarzeń naukowych w różnych dziedzinach biologii. Napisane barwnym i żywym językiem są znakomitą lekturą dla wszystkich zainteresowanych rozwojem nauk przyrodniczych oraz jego wpływem na nasze codzienne życie.



**Księgarnia  
internetowa  
Wydawnictw  
Uniwersytetu  
Warszawskiego**  
**www.wuw.pl**



## O kwantach i smokach

### Fizyka według Delt

Zebrane w jednym tomie teksty pochodzące z czasopisma Delta stanowią znakomity przegląd najważniejszych zagadnień współczesnej fizyki. Zarówno zagadnienia klasyczne, jak i najnowsze osiągnięcia i teorie opisywane są w formie przystępnej, a jednocześnie unikającej zbyt daleko idących uproszczeń.

Publikacja czerpie z niezwykle bogatego źródła, jakim jest wychodzący od z górą 40 lat miesięcznik dotyczący osiągnięć matematyki, fizyki, astronomii i informatyki. Choć fizyka rozwija się w ostatnich dziesięcioleciach bardzo szybko, jej fundamenty nie zmieniły się znacząco. Dlatego w książce można znaleźć obok artykułów z ostatnich lat nawet te sprzed lat kilkunastu czy kilkudziesięciu.

*Obserwując postęp technologiczny, można by przypuszczać, że w przeciwieństwie do „niezmiennej” matematyki artykuły z fizyki sprzed 40 lat całkowicie straciły swoją aktualność i książka może mieć wymiar jedynie historyczny. Przypuszczenie to jest błędne – fizyka do dzisiaj wspiera się na dwóch fundamentalnych teoriach: ogólnej teorii względności Einsteina i mechanice kwantowej. Obydwie powstały przed pierwszym numerem Delt. Teoria względności, sformułowana w 1915 roku, opisująca wszystkie znane nam zjawiska związane z grawitacją, zyskała niedawno kolejne potwierdzenie w postaci odkrycia fal grawitacyjnych. Mechanika kwantowa, której emanacją opisującą wszystkie oddziaływania oprócz grawitacji jest powstały 50 lat temu Model Standardowy, dopiero kilka lat temu zyskała doświadczalne potwierdzenie ostatniego „brakującego ogniwa” tej teorii, czyli cząstki Higgsa.*

ze Wstępu



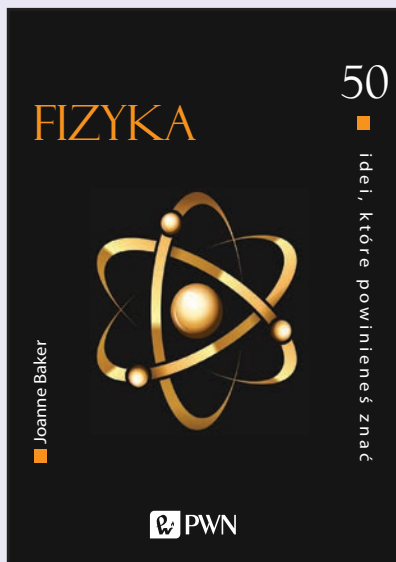
## O twierdzeniach i hipotezach

### Matematyka według Delt

Zbiór 44 artykułów, pochodzących z czasopisma Delta, adresowanych do szerokiego grona czytelników, którzy chcieliby poznać najciekawsze osiągnięcia królowej nauk. W sposób wolny od suchego formalizmu i naukowego żargonu, a jednocześnie ścisły i precyzyjny kilkudziesięciu autorów – profesjonalistów w swojej dziedzinie – opisuje te twierdzenia i hipotezy, które zdefiniowały współczesny obraz matematyki. Bogactwo tematów, żywy język i fakt, że informacje podawane są z pierwszej ręki, przez tych, którzy tworzą matematykę, sprawiają, że książka okazuje się nie lada gratką zarówno dla tych, którzy od zawsze pasjonowali się tą dziedziną wiedzy, jak i tych, którzy dopiero teraz mają szansę poznać jej prawdziwe, pasjonujące oblicze.

Przedstawiamy tu serię artykułów o słynnych twierdzeniach (prawo wielkich liczb, paradoksalny rozkład kuli Banacha-Tarskiego, twierdzenie o czterech barwach, twierdzenie Godla) i o fundamentalnych pojęciach (charakterystyka Eulera, wymiar, liczby rzeczywiste i zespolone, równowaga Nasha). O hipotezach, których nikt dotąd nie potrafił udowodnić (...), jak i o tych, które „na naszych oczach” stają się twierdzeniami.

ze Wstępu



Joanna Baker

## Fizyka

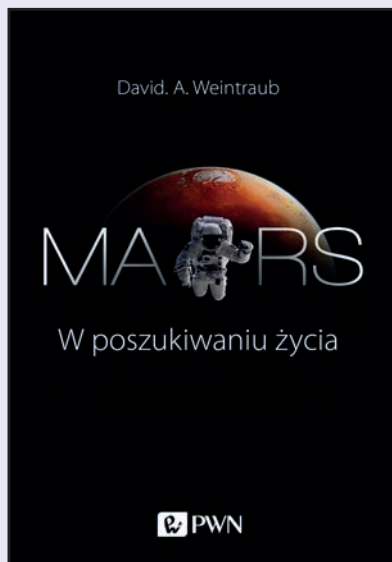
seria: 50 idei, które powinieneś znać

Publikacja z pasjonującej serii popularnonaukowej 50 IDEI, KTÓRE POWINIENEŚ ZNAĆ wprowadzającej Czytelnika w fascynujący świat pytań i zagadnień – tych trudnych oraz tych zupełnie podstawowych, które od dawna towarzyszą ludzkości w misji zrozumienia świata.

### To obowiązkowa lektura dla każdego początkującego erudyty!

**FIZYKA** zawiera 50 krótkich, świetnie napisanych esejów, w których Autorka prezentuje najważniejsze koncepcje w dziejach fizyki, słynne odkrycia naukowe, prawa fizyczne i zasady ich działania. W bardzo przystępny sposób, bez posługiwania się wzorami, opowiada o najważniejszych teoriach i odkryciach w dziedzinie fizyki. Wyjaśnia je odwołując się do zjawisk, z którymi spotykamy się na co dzień. Opisuje historyczne przełomy naukowe w rozumieniu fizycznego świata, takie jak prawo o ruchu planet Keplera czy prawo grawitacji Newtona. Przedstawia również złożoność współczesnych teorii – od prawa Plancka do zasady Pauli'ego oraz od paradoksu kota Schrödingera do teorii strun. Obala mit o niedostępności fizyki jako nauki dla przeciętnego człowieka. Tekst uzupełniają rozbudowane dodatki w postaci biogramów najśłynniejszych fizyków, kalendarium odkryć naukowych oraz wykresy i diagramy.

**PWN**  
poleca



David A. Weintraub

## Mars

W poszukiwaniu życia

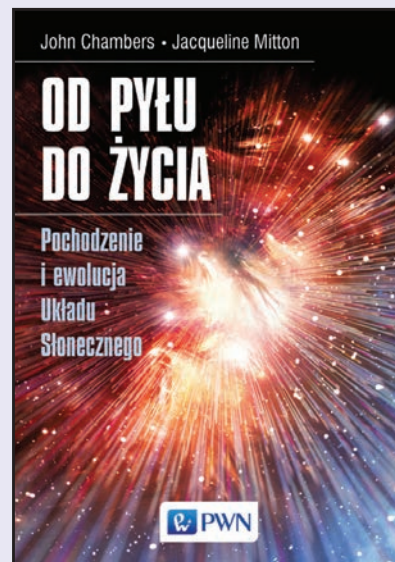
Publikacja unikatowa na polskim rynku wydawniczym obszernie i przekrojowo przedstawiająca historię badań Marsa oraz poszukiwania na nim śladów i dowodów istnienia życia. W trakcie tej podróży poznajemy badaczy Czerwonej Planety, ich motywacje, osiągnięcia oraz popełniane błędy. Czytelnik znajdzie tu uzasadnienie dla pojawiających się w okresie niemal dwóch stuleci twierdzeń o odkryciu inteligentnego życia na Marsie, a także kanałów, roślinności, porostów czy też metanu, który w przekonaniu wielu dowodzi istnienia procesów biologicznych na Marsie. Jednocześnie dowiadujemy się, jak te twierdzenia były weryfikowane i rewidowane na przestrzeni lat, doprowadzając nas w końcu o obecnego poziomu wiedzy.

*Książka mimo że pisana w formie narracji, bardzo rzetelnie oddaje stan najnowszych badań astronomicznych, odwołując się do oryginalnych prac naukowych. Zawiera mnóstwo szczegółów, które składają się na pasjonującą opowieść o badaniach astronomicznych.*

z opinii **prof. dr. hab. inż. Grzegorza Karwasza**  
(Zakład Dydaktyki Fizyki Uniwersytetu  
Mikołaja Kopernika w Toruniu)

*Czytając książkę, można wraz z autorem prześledzić chronologię powstawania i upadania teorii, dotyczących istnienia życia na Marsie, zwłaszcza od momentu, gdy okazało się, że ma on [Mars] prawie takie samo nachylenie swojej osi obrotu do płaszczyzny orbity, jak Ziemia i że długość marsjańskiej doby niewiele różni się od naszej. Rozpalilo to wyobraźnię ówczesnych astronomów, a także ich następców.*

z opinii **Ariela Majche**  
(Klub Astronomiczny Almuqantarar  
Polskie Towarzystwo Miłośników Astronomii)



John Chambers, Jacqueline Mitton

## Od pyłu do życia

Pochodzenie i ewolucja Układu Słonecznego

Narodziny i ewolucja Układu Słonecznego są tajemnicą, która pewnego dnia może dostarczyć odpowiedzi na pytanie o ludzkie pochodzenie. Autorzy opowiadają niezwykłą historię o tym, jak ciała niebieskie składające się na Układ Słoneczny powstały ze wspólnych początków miliardy lat temu oraz jak naukowcy i filozofowie przez wieki starali się rozwikłać tę tajemnicę, posługując się wskazówkami, które umożliwiły im wyciągnąć wnioski dotyczące budowy Układu Słonecznego, jego wieku i prawdopodobnego sposobu powstania.

*Jest to książka poświęcona naszemu układowi planetarnemu. A więc można chyba powiedzieć, że jest ona pewnym ewenementem, bo współcześnie większość literatury poświęconej astronomii czy astrofizyce dotyczy takich zagadnień jak Wielki Wybuch, inflacja Wszechświata, czarne dziury, pulsary itp. Przy tak ekscytujących i zarazem egzotycznych tematach historia układu planetarnego może wydawać się nieco nieefektywna. Tak jednak nie jest, jak również nie jest prawdą, że wszystko albo prawie wszystko na ten temat już wiemy. [...] wydaje mi się, że jest to książka jedyna w swoim rodzaju i tym samym wyjątkowa, bo prezentująca aktualny stan wiedzy, inne znane mi książki poświęcone Układowi Słonecznemu są raczej dość stare. Wielką jej zaletą jest utalentowany autorski tandem Chambers, Mitton. John Chambers jest uznanym autorytetem w dziedzinie budowy Układu Słonecznego, Jacqueline Mitton, również astronom, jest świetną popularyzatorką wiedzy o Wszechświecie. [...] Książka omawia różne drogi planetogenezy; [odpowiada na pytania] czemu jedne planety są skaliste, inne zaś płynne? Szczególnie pasjonujące są zagadnienia dotyczące Ziemi, od hadeiku do pojawienia się pierwszych organizmów żywych. Wartościowy jest także szkic przedstawiający historię poznawania naszego najbliższego planetarnego otoczenia.*

z opinii **dr. Krzysztofa Rejmera**, fizyka, poety,  
tłumacza literatury naukowej, autora książki  
*Zapomniana historia nauki, czyli fantazje i facecje  
naszych dziadków*, PWN, Warszawa 2017



# NAGRODY POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO

W 2019 roku Polskie Towarzystwo Fizyczne przyznało nagrody i wyróżnienia, których wręczenie odbyło się podczas otwarcia 45. Zjazdu Fizyków Polskich w Krakowie 13 września 2019. Serdecznie gratulujemy wszystkim nagrodzonym i wyróżnionym!

## 1. Medal Mariana Smoluchowskiego

został przyznany prof. dr. hab. Józefowi Spałkowi (Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego Uniwersytetu Jagiellońskiego) za wybitny wkład do teorii układów silnie skorelowanych elektronów oraz rozwoju fizyki fazy skondensowanej w Polsce.

2. Kapituła Nagród Naukowych PTF honoruje wybitne i twórcze prace naukowe polskich badaczy z zakresu fizyki. W 2019 prestiżową **Nagrodę Naukową im. Wojciecha Rubinowicza** otrzymał **prof. dr hab. Adam Miranowicz** (Wydział Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza) za *opracowanie nowych teoretycznych i doświadczalnych metod generacji, kontroli i detekcji stanów kwantowych pojedynczych fotonów*.

Kapituła Nagród Naukowych PTF postanowiła również jednogłośnie przyznać wyróżnienie **prof. dr. hab. Tadeuszowi Domańskiemu** (Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Marii Skłodowskiej Curie) za *zbadanie stabilności topologicznej fazy nadprzewodzącej oraz kwazi-cząstek Majorany w łańcuchach magnetycznych i strukturach hybrydowych z kropkami kwantowymi*.

3. **Nagrodę PTF za rozprawę doktorską** otrzymał **dr Maciej Klein** (Wydział Fizyki Technicznej i Materii Stosowanej Politechniki Gdańskiej) za rozprawę pt. *Magnetic field effects in dye-sensitized and organic solar cells*, wykonaną pod kierunkiem dr. hab. inż. Waldemara Stampora, prof. nadzw. Politechniki Gdańskiej.

4. **Nagrodę PTF za pracę magisterską im. Arkadiusza Piekary** otrzymał **mgr Mateusz Mazelanik** (Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego) za pracę pt.: *Interferometryczny procesor fal spinowych z odwracalnym interfejsem optycznym* (pod kierunkiem dr. hab. Wojciecha Wasilewskiego z Zakładu Optyki IFD UW).

**Wyróżnienia za pracę magisterską** otrzymali: **mgr Joanna Drabik** (Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN) za pracę pt: *Zbadanie wpływu rozmiaru ziaren oraz stężenia jonów domieszek na właściwości luminescencyjne granatów itrowo- glinowych współdomieszkowanych jonami  $Ti^{3+}$  i  $Eu^{3+}$  do zastosowań w termometrii luminescencyjnej*. (opiekun: dr hab. inż. Łukasz Marciniak, Politechnika Wrocławska),

**mgr Karolina Trejgis** (Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN) za pracę pt.: *Synteza i zbadanie właściwości luminescencyjnych nanokrystalicznych granatów itrowo- glinowych współdomieszkowanych jonami  $Mn^{4+}$  i  $Nd^{3+}$  do zastosowań termometrii luminescencyjnej*. (opiekun: dr hab. inż. Łukasz Marciniak, Politechnika Wrocławska), **mgr Mikhail Padniuk** (Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego) za pracę pt.: *Samokompensujący się magnetometr optyczny do poszukiwania niemagnetycznych sprzężeń spinowych* (opiekun: dr hab. Szymon Pustelny, Zakład Fotoniki IF UJ).

5. **Nagrodę PTF za Popularyzację Fizyki i medal im. Krzysztofa Ernsta** otrzymał **prof. dr hab. Grzegorz Karwasz** (Zakład Dydaktyki Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu) za długoletnią, wyróżniającą się działalność popularyzatorską, za bezpośrednie zaangażowanie oraz skalę prowadzonych działań, a zwłaszcza ich różnorodność (wykłady dla dzieci i młodzieży, wystawy interaktywne, książki i artykuły popularnonaukowe, audycje radiowe i filmy popularno-dydaktyczne, materiały internetowe, projekty unijne krajowe i międzynarodowe).

6. **Nagrodę PTF I stopnia im. Grzegorza Białkowskiego dla wyróżniających się nauczycieli i Medal im. Grzegorza Białkowskiego** otrzymała członkini PTF od 1976 **mgr Zuzanna Suwald** (Zespół Szkół Licealnych i Technicznych nr 1 w Warszawie), za szczególne zasługi w promowaniu nowatorskich rozwiązań dydaktycznych, m.in. przez współorganizowanie przez ponad 40 lat Ogólnopolskiego Seminarium Dydaktyki Fizyki *Najnowsze osiągnięcia fizyki i dydaktyki fizyki* (na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod patronatem PTF), jak również za liczne publikacje materiałów metodycznych wspomagających nauczanie fizyki oraz materiały wspierające uczniów i nauczycieli oraz za współautorstwo podręczników do fizyki dla różnych typów szkół, a także za wieloletnie aktywne, aż do dnia dzisiejszego, działania w Zarządzie Oddziału Warszawskiego PTF, jak też innych strukturach i przedsięwzięciach Towarzystwa na rzecz poprawy nauczania fizyki w Polsce.

7. **Nagrodę PTF II stopnia dla wyróżniających się nauczycieli** otrzymał **dr Adam Ogaza** (Akademicki Zespół Szkół Ogólnokształcących nr 2 w Chorzowie), za tworzenie, wprowadzanie do pracy z uczniami i propagowanie nowoczesnych, interdyscyplinarnych, niestandardowych metod nauczania i projektów edukacyjnych o zasięgu krajowym i międzynarodowym oraz za publikacje zbiorów zadań i podręczników dla szkół ponadgimnazjalnych i ponadpodstawowych.

8. **Nagrodę PTF III stopnia dla wyróżniających się nauczycieli** otrzymała **mgr Ilona Dybicz** (dyrektorka i nauczycielka fizyki w Młodzieżowym Ośrodku Wychowawczym dla Dziewcząt w Kruszwicy im. Polskich Olimpijczyków) za nowatorskie metody pracy z uczniami i rozbudzanie zainteresowania naukami przyrodniczymi a szczególnie astronomią i fizyką oraz za znaczące osiągnięcia w pracy z młodzieżą zainteresowaną fizyką i astronomią.

**Nagrodę PTF III stopnia dla wyróżniających się nauczycieli** otrzymał **dr inż. Dariusz Krzyżański** (nauczyciel fizyki w Zespole Szkół Politechniki Łódzkiej w Łodzi) za znaczące osiągnięcia w pracy z młodzieżą zainteresowaną fizyką oraz za publikację dwutomowego zbioru zadań z fizyki dla uczniów przygotowujących się do matury z fizyki na poziomie rozszerzonym.

**Wyróżnienia** otrzymali: **mgr Anna Federowicz** (nauczycielka fizyki w Prywatnej Szkole Podstawowej nr 6 Sióstr Niepokalanek w Warszawie) za wybitne osiągnięcia w pracy z uczniami zdolnymi w okresie nauczania w Gimnazjum nr 42 przy ul. Twardej, **mgr Tomasz Białkowski** (nauczyciel fizyki w Zespole Szkół Ogólnokształcących Białymstoku) za wprowadzanie innowacyjnych metod nauczania oraz popularyzację fizyki i astronomii, **mgr Wojciech Olszewski** (nauczyciel w Szkole Podstawowej nr 23 w Toruniu) za prowadzenie różnorodnych działań związanych z nauczaniem i popularyzacją fizyki i przyrody.

10. **Nagrodę Specjalną PTF w 2019** otrzymał **prof. dr hab. Piotr Kossacki** za zasługi w promowaniu młodych talentów fizycznych, w szczególności za wieloletnie przewodniczenie Komitetowi Głównemu Olimpiady Fizycznej.



Grzegorz Brona

## Forward Physics – a new window on high energy interactions

Results from Large Hadron Collider Run 1 data taking  
obtained with Compact Muon Solenoid experiment



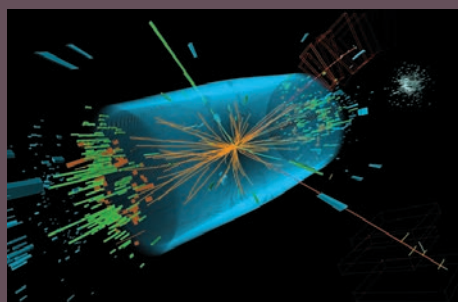
Marcin Stolarski

## Direct Measurement of the Gluon Polarisation in the Nucleon Using the All-pT Method at the COMPASS Experiment at CERN



Marcin Konecki

## The Muon Trigger of the CMS experiment – design, performance, upgrade



Katarzyna Grzelak

## Standard and Non-standard Neutrino Oscillations Involving Tau Neutrinos



Księgarnia internetowa  
Wydawnictw Uniwersytetu Warszawskiego

[www.wuw.pl](http://www.wuw.pl)