

# POSTĘPY FIZYKI



CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO  
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

**Cząstki Janusa, syntetyczne płytki i materia aktywna w mikroskali**  
Maciej Lisicki

**Fermionowe dywany kwantowe** Piotr T.Grochowski

**Niezwykły wodór** Andrzej Wiśniewski

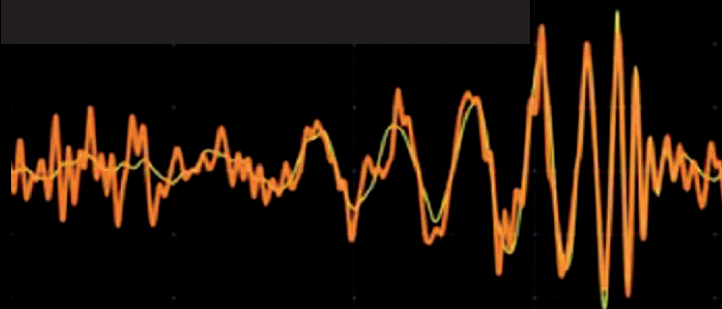
**Zderzenia elektronowe w spektroskopii stanów wzbudzonych cząsteczek**  
Mariusz Zubek

3 / 2020  
TOM 71

**PIERWSZE WYKRESY**

**DOWODZĄCE ISTNIENIA**

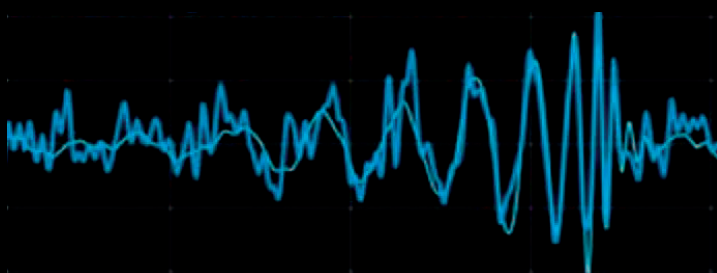
**FAL GRAWITACYJNYCH**



**PRZEKAZANE**

**CZŁONKOM LIGO SCIENTIFIC**

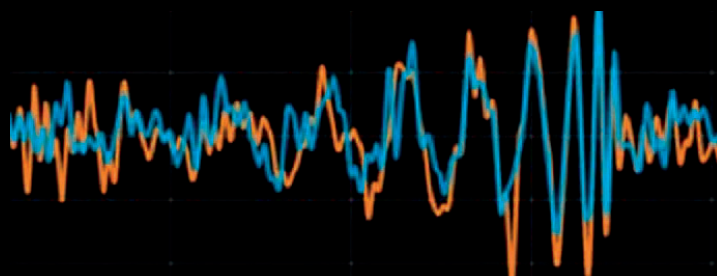
**COLLABORATION**



**TUŻ PO ZAREJESTROWANIU**

**ZDARZENIA PRZEZ**

**ZAAWANSOWANY DETEKTOR LIGO**



nr indeksu 369721





## POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE (PTF)

[www.ptf.net.pl](http://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 Maška  
Beata Agnieszka Pietrewicz  
Józef Spałek  
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](mailto:biuro@ptf.net.pl)

### PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW

Krzysztof Szymański (Białystok)  
Adam Gadomski (Bydgoszcz)  
Ewa Mandowska (Częstochowa)  
Jarosław Rybicki (Gdańsk)  
Adam Michczyński (Gliwice)  
Janusz Gluza (Katowice)  
Małgorzata Wysocka-Kunisz (Kielce)  
Józef Spałek (Kraków)  
Jerzy Żuk (Lublin)  
Stanisław Bednarek (Łódź)  
Ewa Pawelec (Opole)  
Henryk Drozdowski (Poznań)  
Gaweł Żyła (Rzeszów)  
Mirostaw Brozis (Słupsk)  
Mariusz P. Dąbrowski (Szczecin)  
Michał Pawlak (Toruń)  
Andrzej Wysmołek (Warszawa)  
Ewa Dębowska (Wrocław)  
Van Cao Long (Zielona Góra)

## POSTĘPY FIZYKI (PF)

CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO  
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

[www.ptf.net.pl](http://www.ptf.net.pl)

czasopismo ukazuje się od 1949 roku

### RADA REDAKCYJNA

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

### KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

Wojciech Olszewski (Białystok)  
Beata A. Pietrewicz (Bydgoszcz)  
Piotr Gębara (Częstochowa)  
Tomasz Wąsowicz (Gdańsk)  
Lucyna Grządział (Gliwice)  
Aleksandra Piórkowska-Kurpas (Katowice)  
Maciej Rybczyński (Kielce)  
Witold Zawadzki (Kraków)  
Janusz Filiks (Lublin)  
Janusz Kuliński (Łódź)  
Katarzyna Książek (Opole)  
Sławomir Mamica (Poznań)  
Jacek Fal (Rzeszów)  
Agnieszka Włodarkiewicz (Słupsk)  
Janusz Typek (Szczecin)  
Michał Pawlak (Toruń)  
Grzegorz Siudem (Warszawa)  
Bernard Jancewicz (Wrocław)  
Lidia Najder-Kozdrowska (Zielona Góra)

### REDAKCJA

Anna Szemberg (redaktor naczelna)  
Krzysztof Turzyński

### ADRES

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

### INFORMACJE DLA AUTORÓW

Przyjmujemy do publikacji przystępnie napisane artykuły przeglądowe i monograficzne w języku polskim i angielskim, które otrzymają pozytywne recenzje wydawnicze. Teksty należy przysyłać e-mailem na adres: [postepy.fizyki@gmail.com](mailto:postepy.fizyki@gmail.com) w formie przyjętej w czasopiśmie [www.ptf.net.pl/pl/postepy-fizyki/](http://www.ptf.net.pl/pl/postepy-fizyki/) w systemie LATEX (plik źródłowy + pdf) lub w programie Word; tekst powinien zawierać afiliację i nr ORCID autora, streszczenie i słowa kluczowe w j. polskim oraz j. angielskim, bibliografię wyłączenie załącznikową, podpisy do ilustracji; **ilustracje** mogą być zamieszczone w tekście, ale **należy** je również **przysłać w osobnych plikach** o rozdzielczości co najmniej 300 dpi; **w przypadku ilustracji zapożyczonych** z innych źródeł, podpis musi zawierać źródło pochodzenia ilustracji, przy czym na autorze spoczywa obowiązek uzyskania zgody na jej publikację w jego artykule w *Postęпах Fizyki*. 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 na podstawie licencji Creative Commons.

### PRENUMERATA

W 2020 roku **cena brutto pojedynczego numeru PF wynosi 29,70 PLN** (w tym 8% VAT), **rocznika (4 numery) (z 9% bonifikatą) – 108,00 PLN** (w tym 8% VAT). Wpłatę na konto należy powiększyć o koszty przesyłki, które wynoszą dla jednego zeszytu 7,00 PLN (w tym 23% VAT). Przy zamawianiu większej liczby egzemplarzy prosimy koszty wysyłki skonsultować e-mailowo z wydawcą. **Cena pojedynczego archiwalnego numeru PF** pozostaje bez zmian – **12,00 PLN brutto** + koszty wysyłki. Szczegółowe warunki prenumeraty PF znaleźć można na stronie internetowej PTF ([www.ptf.net.pl/](http://www.ptf.net.pl/)).

ISSN 0032-5430, ISSN 2658-2422 (online)

© Copyright by Polskie Towarzystwo Fizyczne

Wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne

Skład i łamanie: Fixpoint Krzysztof Rudnik

Szanowni Czytelnicy,

trzeci tegoroczny numer PF jest nieco obszerniejszy niż zazwyczaj, a to dlatego, że zamieściliśmy dodatkowo dwa bardzo interesujące artykuły nagrodzone w Konkursie na najlepszy artykuł zgłoszony do PF. Komunikat o wynikach Konkursu znajdą Państwo na następnej stronie, a ja w tym miejscu pragnę w imieniu PTF, Jurorów Konkursu oraz Redakcji PF serdecznie pogratulować nagrodzonym i wyróżnionym autorom.

Czytelników zainteresowanych ochroną środowiska zapraszam do lektury artykułu prof. Andrzeja Wiśniewskiego o niezwykłym wodorze, który może przyczynić się do zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub>. Profesor Mariusz Zubek wprowadza nas w tajniki spektroskopii stanów wzbudzonych cząsteczek. Publikujemy także polski przekład kolejnego wykładu noblowskiego dotyczącego fal grawitacyjnych. Pewną niespodzianką są recenzje autorstwa prof. Ludwika Komorowskiego dwóch książek wydanych przez PWN, które stanowią małe rozprawki polemiczne wykraczające nieco poza materię recenzowanych publikacji. Zachęcam Państwa do lektury tych tekstów, a także do polemiki z ich autorem.

W dniach 16–18.10.2020, w trybie dopuszczanym przez przepisy dotyczące epidemii, odbędzie się Jubileuszowy 46. Zjazd Fizyków Polskich z okazji setnej rocznicy powstania Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Szczegóły znaleźć można na ostatniej stronie niniejszego numeru czasopisma.

redaktor naczelna PF

UWAGA:

- PF są dostępne w wersji elektronicznej bezpłatnie na stronie internetowej PTF numery bieżące <http://www.ptf.net.pl/pl/postepy-fizyki/> numery archiwalne <http://www.ptf.net.pl/pl/towarzystwo/dzialalnosc/postepy-fizyki/roczniki/>
- Aktualne informacje dla potencjalnych autorów PF znaleźć można na stronie internetowej PTF: [http://www.ptf.net.pl/media/cms\\_page\\_media/1544/Wskazowki.pdf](http://www.ptf.net.pl/media/cms_page_media/1544/Wskazowki.pdf)

Wyniki konkursu PTF na najlepszy artykuł zgłoszony do publikacji w czasopiśmie „Postępy Fizyki”	2
Cząstki Janusa, syntetyczne pływaki i materia aktywna w mikroskali M. Lisicki	3
Fermionowe dywany kwantowe P. T. Grochowski	12
Niezwykły wodór A. Wiśniewski	19
Zderzenia elektronowe w spektroskopii stanów wzbudzonych cząsteczek M. Zubek	26
LIGO i fale grawitacyjne II B. C. Barisch	34
Naukowy marketing czyli kurs promowania <i>ego</i> L. Komorowski	54
Sekrety naukowego języka czyli jak zabłysnąć w informacyjnej chmurze L. Komorowski	57
46. Nadzwyczajny Zjazd Fizyków Polskich	60



Pierwsze wykresy dowodzące zarejestrowania fal grawitacyjnych (ryc. 1 w: Barry C. Barish: *LIGO i fale grawitacyjne II*)

# POSTĘPY FIZYKI



CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO  
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

## WYNIKI KONKURSU PTF NA NAJLEPSZY ARTYKUŁ zgłoszony do publikacji w czasopiśmie „Postępy Fizyki”

W dniu 09.06.2020 odbyło się posiedzenie Jury Konkursu w składzie:  
prof. dr hab. Katarzyna Chałasińska-Macukow - przewodnicząca  
prof. dr hab. Bogdan Cichocki  
dr hab. Krzysztof Turzyński, prof. UW  
prof. dr hab. inż. Arkadiusz Wójs  
prof. dr hab. Andrzej Wysmołek

Zapoznawszy się z 12 artykułami nadesłanymi na Konkurs Jury przydzieliło:

**dwie równorzędne nagrody**, w wysokości 4 000 PLN każda, autorom następujących prac konkursowych:

- Piotr T. Grochowski *Fermionowe dywany kwantowe*
- Maciej Lisicki *Cząstki Janusa, syntetyczne pływaki i materia aktywna w mikroskali*

**trzy równorzędne wyróżnienia**, w wysokości 1 000 PLN każde, autorom następujących prac konkursowych:

- Krzysztof M. Czajkowski *„Ostry metal”, czyli od piorunochronu do oddziaływania światło – materia w pikownikach*
- Agata Kotulska *Försterowski Rezonansowy Transfer Energii (FRET) – podstawy fizyczne i zastosowania*
- Anna Krzyżewska *Dziedzictwo Edwina Halla*



Nagrody i wyróżnienia w Konkursie finansowane są przez Fundację Pro-Physica na podstawie porozumienia zawartego z Polskim Towarzystwem Fizycznym.

**Nagrodzone i wyróżnione artykuły zostaną opublikowane na łamach kwartalnika „Postępy Fizyki”** po wprowadzeniu przez autorów zmian i poprawek sugerowanych przez Jurorów Konkursu, spełnieniu wymogów Redakcji PF: [http://www.ptf.net.pl/media/cms\\_page\\_media/1544/Wskazowki.pdf](http://www.ptf.net.pl/media/cms_page_media/1544/Wskazowki.pdf) i standardowym opracowaniu redakcyjnym.

# Cząstki Janusa, syntetyczne pływaki i materia aktywna w mikroskali

Maciej Lisicki

Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego\*

---

**Streszczenie.** Materia aktywna to układy złożone z wielu elementów, które poruszają się czerpiąc energię z otoczenia. Jednym z przykładów są orzęski – jednokomórkowe mikroorganizmy, poruszające się poprzez wytworzenie na swojej powierzchni przepływu za pomocą setek drobnych rzęsek pokrywających ich komórki. Mechanizm ten zainspirował prace nad sztucznymi mikroplywakami, które poruszają się wykorzystując wytwarzane przez siebie gradienty odpowiednich wielkości fizycznych, takich jak temperatura, stężenie produktów reakcji chemicznej albo pole elektryczne. W poniższym artykule omawiam krótko mechanizmy fizyczne rządzące ruchem syntetycznych mikroplywaków i podsumowuję dotychczasowe próby wykorzystania wspomnianych zjawisk do napędzania aktywnych mikrocząstek. Wskazuję niektóre kierunki rozwoju i wyzwania stojące przed bionaśladowczą mikroinżynierią, takie jak kontrola ruchu cząstek przy użyciu zewnętrznych bodźców, i prezentuję potencjalne rozwiązania.

**Słowa kluczowe:** materia aktywna, materia miękka, mikroplywaki, lepkość, hydrodynamika, biologiczna mechanika płynów, nanoroboty, pływanie, dyfuzjoforeza

**Abstract.** Active matter are systems comprising of many elements which move by drawing the energy from their environment. An example are ciliates – unicellular microorganisms which move by generating flow on their surfaces using hundreds of tiny cilia covering their cell bodies. This mechanism has inspired works on artificial microswimmers which move in response to self-generated gradients of various physical quantities, such as temperature, concentration of chemical species, or electric field. In this article, I briefly review the basic physical mechanisms governing the motion of synthetic microswimmers and summarise previous implementations using the above mentioned phenomena to propel microparticles. I highlight possible developments and challenges of biomimetic microengineering, such as the control of motion of particles using external stimuli, and present potential solutions.

**Keywords:** active matter, soft matter, microswimmers, viscosity, hydrodynamics, biological fluid mechanics, nanorobots, swimming, diffusiophoresis

---

## Wprowadzenie

*Tam na dole jest mnóstwo miejsca! Zaproszenie do wejścia na nowe pole fizyki.* Tak Richard Feynman zatytułował swój wykład w 1959 r. na zjeździe Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego. Późniejszy noblista narysował w nim ekscytujące perspektywy, jakie niosą ze sobą miniaturyzacja i możliwość manipulacji materią w mikro- i nanoskali. Wykład ten, wydany później drukiem [1], uznawany jest dziś za pierwszy manifest nanotechnologii, będącej wówczas bardziej wizją i marzeniem. Z perspektywy czasu możemy jedynie docenić precyzję i błyskotliwość Feynmana, który określił wyzwania i kierunki rozwoju technologii wymagające głębszego zrozumienia fizyki procesów w mikroskali niedostrzegalnej gołym okiem, ale wciąż znacznie większej niż rozmiary atomów. W toku wykładu rozważał on możliwość konstrukcji małych maszyn, które dzięki

zjawisku lubrykacji i dominującej roli lepkości w mikroświecie nie wymagałyby smarowania. Puszczając wodze fantazji, opisał mechanicznego chirurga, tak małego, że może zostać wprowadzony do naczynia krwionośnego, powędrować nim do serca i tam od wewnątrz naprawić wadliwą zastawkę. Mimo że jego opis zajmuje tylko kilka zdań, od lat rozpala wyobraźnię badaczy i lekarzy perspektywą potencjalnych zastosowań. Dziś, sześćdziesiąt lat później, dysponujemy technikami interwencji medycznej, o których prawdopodobnie nie śnili nawet uczestnicy tamtego zjazdu, a dziedzina manipulacji materią w skali mikro rozrosła się na pograniczu fizyki, biologii, inżynierii materiałowej, informatyki i wielu innych nauk, stawiając i rozwiązując prawdziwie interdyscyplinarne problemy badawcze. Rozwinięte w międzyczasie techniki doświadczalne i diagnostyczne znacząco przybliżyły nas do futurystycznego celu, jakim jest kontrola i programowanie ruchu mikro-

---

\*ORCID: 0000-0002-6976-0281; mklis@fuw.edu.pl

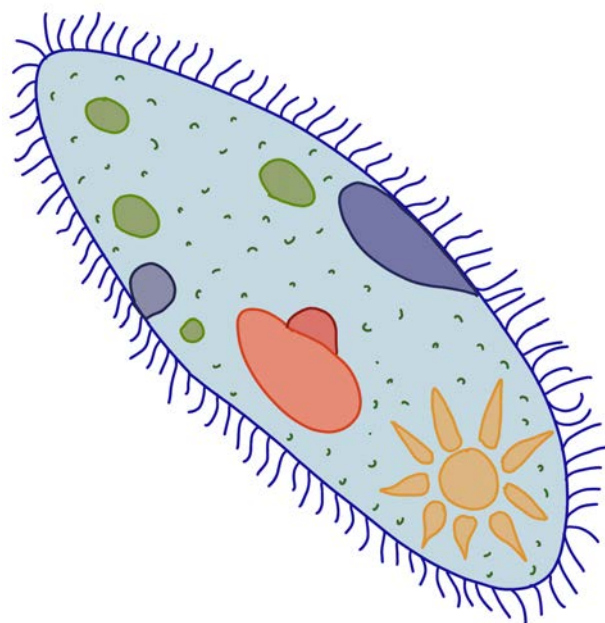


obiektów w zastosowaniach medycznych czy technologicznych.

Badania materii aktywnej – jak nazwano układy, których elementy mogą samoistnie poruszać się czerpiąc energię ze swojego otoczenia i przekształcając ją w energię kinetyczną – rozwinęły się dziś w osobną i bardzo żywotną dziedzinę. Obejmuje ona wiele skal czasowych i przestrzennych, m.in. zachowania ptaków w stadach (np. szpaków, tworzących na wieczornym niebie dynamicznie ewoluujące wzory), ryb w ławicach (jako forma ochrony przed drapieżnikami), ale również bakterii w biofilmach i innych mikroorganizmów w środowisku wodnym [2, 3]. Jej przedmiotem są zarówno badania indywidualnych elementów składowych i zrozumienie mechanizmów konwersji energii, szczegółów oddziaływania i sprzężenia z otoczeniem, tak ważnych np. dla przeżycia mikroorganizmów, jak również prace nad efektami kolektywnymi i emergencją nowych zjawisk w dużych populacjach. Jedne i drugie mogą być z powodzeniem opisywane na różnych poziomach dokładności, począwszy od minimalistycznych modeli gruboziarnistych, a skończywszy na wyrafinowanych symulacjach numerycznych. Obecne trendy i szczególnie ciekawe kierunki badań nakreśla publikowana co roku „mapa drogowa” badań nad materią aktywną, redagowana przez zespół czołowych światowych badaczy [4]. W dalszej części artykułu skupię się na materii aktywnej w skali mikro, reprezentowanej przez biologiczne i syntetyczne pływaki.

Odwiecznym źródłem inspiracji w tego typu badaniach jest otaczająca nas natura. Wiele urządzeń mechanicznych sprytnie naśladuje mechanizmy obserwowane w przyrodzie, wykorzystując te same efekty fizyczne. Poniżej przedstawię zjawisko dyfuzjoforezy i pokażę, w jaki sposób może ono zostać wykorzystane do syntezy mikrocząstek, które potrafią przekształcać energię chemiczną otaczającego je płynu w energię kinetyczną swojego ruchu, a zatem są zdolne do pływania. Co więcej, mechanizm ich ruchu wzorowany jest na jednokomórkowych protistach – orzęskach, o których prawdopodobnie każdy słyszał w szkole za sprawą ich czołowego przedstawiciela – pantofelka (*Paramecium caudatum*, rys. 1).

O różnorodności pływających jednokomórkowców wspominałem już w *Postęпах Fizyki* w kontekście ruchu bakterii [5]. Wiele mikroorganizmów porusza się za pomocą rzęsek lub wici, jednak „reguły gry”, które rządzą światem wokół nich pozostają niezmiennicze. Przy ich małych rozmiarach (rzędu mikrometrów) i prędkościach poruszania się rzędu nawet dziesiątek długości komórki na sekundę, liczba Reynoldsa określająca stosunek wielkości sił bezwładności do sił lepkości pozostaje dużo mniejsza od jedności. Przypomnijmy, że jest



Rys. 1. Pantofelek (*Paramecium caudatum*) jest przedstawicielem typu orzęsków w królestwie protistów. Powierzchnia jego komórki pokryta jest rzęskami, które poruszając się w skoordynowany sposób wytwarzają przepływ płynu względem powierzchni komórki, wprowadzając ją w ruch. Wewnątrz zilustrowane są organelle komórkowe zawieszane w cytoplazmie

ona zdefiniowana jako

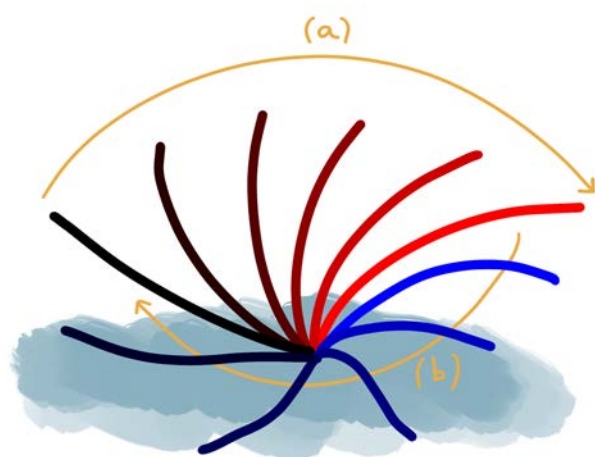
$$\text{Re} = \frac{\rho UL}{\mu}, \quad (1)$$

gdzie  $U$  i  $L$  to typowe prędkość i rozmiar pływaka, zaś  $\rho$  i  $\mu$  są (odpowiednio) gęstością i lepkością dynamiczną ośrodka. A zatem warunek  $\text{Re} \ll 1$  oznacza, że mamy do czynienia ze światem kompletnie zdominowanym przez efekty lepkie, w którym siły bezwładności odgrywają bardzo małą rolę. Mikroorganizmy świetnie zaadaptowały się do tych warunków, rozwijając efektywne strategie lokomocji [6].

### Inspiracje biologiczne

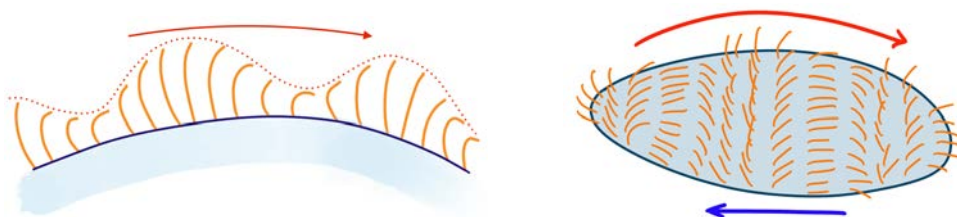
Uniwersalność opisu hydrodynamiki w mikroskali znacząco upraszcza analizę pływania mikroorganizmów. Istota trudności tkwi jednak w geometrii i warunkach brzegowych, które narzuca na płyn obecność zawieszono pływaka i sposób, w jaki porusza on swoim ciałem. Najważniejszym rozróżnieniem z perspektywy biologii jest podział mikroorganizmów na organizmy prokariotyczne (nie posiadające jądra komórkowego) oraz eukariotyczne (które posiadają jądro). Bakterie należą do tej pierwszej kategorii, a wspomniane już orzęski – do drugiej. Przynależność do tych grup ma fundamentalne konsekwencje dla mechaniki ich ruchu. Prokarioty mają wici (często helikalne), które wprawiane są w ruch obrotowy oraz wykorzystują opór hydrodynamiczny płynu i swoją geometrię do wytworzenia siły napędowej. Wici

te są sprężyste, ale nie deformują się znacząco pod wpływem zewnętrznego przepływu. Wici eukariotów, nazywane również rzęskami, są znacznie bardziej skomplikowane. Wewnątrz zbudowane są one z wiązki mikrotubul, tworzących rusztowanie, wzdłuż którego poruszają się białka motoryczne, które przemieszczając się, wytwarzają tzw. aktywne naprężenia na całej długości wici. Ich efektem jest kontrolowana, lokalna deformacja wici, która może wykonywać bardzo skomplikowany ruch. W przyrodzie obserwowano fale płaskie, helikoidalne, fale biegnące zarówno od nasady do końca, jak i w przeciwną stronę, jak również rozmaite formy ruchu dwu- i trójwymiarowego [7].



Rys. 2. Cykl ruchu pojedynczej rzęski na powierzchni komórki, przedstawiony tu jako nałożenie sekwencji klatek, składa się z dwóch faz. Położenie początkowe oznaczono na czarno. (a) Ruch napędowy, oznaczony kolorem czerwonym o rosnącej jasności, zachodzi głównie w płaszczyźnie prostopadłej do ściany komórki i powoduje pompowanie płynu. (b) Ruch powrotny, oznaczony odcieniami niebieskiego, polega na powrocie rzęski do położenia początkowego i w dużej mierze zachodzi w płaszczyźnie równoległej do powierzchni

Orzęski, takie jak wspomniany pantofelek z rys. 1, mają stosunkowo duże komórki, o rozmiarach nawet do 1 mm. Ich wici (rzęski) o długości rzędu kilkunastu mikronów, wyglądają więc jak włoski porastające powierzchnię komórki. Jeden z powszechnie obserwowanych mechanizmów ruchu rzęsek polega na powtarzaniu sekwencji napęd–powrót (ang. *power stroke–recovery stroke*), nieco przypominającej ruch rąk przy pływaniu żabką. Jego schemat przedstawiony jest na



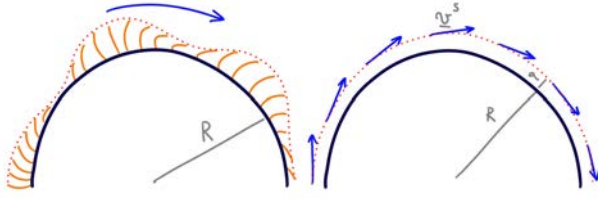
Rys. 3. Fala metachronalna na powierzchni komórki orzęska w wybranej chwili czasu. Na lewym rysunku sąsiadujące rzęski są w różnych fazach swojego cyklu ruchu, powodując skoordynowany ruch płynu w kierunku oznaczonym strzałką. Obwiednia rzęsek (krzywa łącząca ich końce) ma kształt biegnącej fali. Na prawym rysunku „dywan” rzęsek pokrywa ciało komórki eukariotycznej. Górna, czerwona strzałka pokazuje kierunek ruchu fal metachronalnych. Dolna, niebieska strzałka pokazuje kierunek ruchu komórki w wyniku transportu płynu wzdłuż jej powierzchni

rys. 2. Pierwszy ruch, napędzający (*power stroke*, oznaczony na rysunku jako (a)), zachodzi w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni komórki. Drugi, regeneracyjny bądź powrotny (*recovery stroke*, oznaczony jako (b)), polega na przemieszczeniu rzęski w płaszczyźnie równoległej do powierzchni komórki do punktu początkowego kolejnej sekwencji. W ten sposób pojedyncza rzęska (średnio rzecz biorąc) porusza płyn w kierunku równoległym do powierzchni. Warto jednak dodać, że komórkę typowego orzęska pokrywa od kilkuset do kilku tysięcy rzęsek, a więc poruszają się one w niewielkiej odległości od siebie. Okazuje się, że rzęski synchronizują swój ruch i poruszają się w sposób zorganizowany tworząc tzw. fale metachronalne – bardzo podobne do efektu „meksykańskiej fali” widzianego na stadionach, a zilustrowane na rys. 3. W skali komórki widzimy „dywan” rzęsek, które przemieszczają w ten sposób płyn wzdłuż jej powierzchni. Ruch ten prowadzi do efektywnego pływania jednokomórkowców, ale jest wykorzystywany również do pompowania płynu w komórkach wyższych organizmów. Analogiczny mechanizm tzw. klirensu śluzowo-rzęskowego u ssaków prowadzi do oczyszczania płuc z nadmiaru zgromadzonej wydzieliny i ciał obcych za pomocą rzęsek wyściełających ściany płuc i oskrzeli [8]. Rzęski pełnią również istotną rolę w transporcie śluzu, komórek jajowych i nasienia w jajowodach, a więc ich ruch jest istotny również z punktu widzenia rozmnażania [9].

Zaniedbywalna wartość liczby Reynoldsa, zdefiniowanej równaniem (1), oznacza, że możemy całkowicie pominąć nieliniowe człony w równaniach Naviera-Stokesa opisujących ruch płynu, zastępując je równaniami Stokesa, które dla nieściśliwego płynu opisanego polem prędkości  $v$  i ciśnienia  $p$  mają postać

$$\nabla p = \mu \nabla^2 v, \quad \nabla \cdot v = 0. \quad (2)$$

Opis hydrodynamiki pojedynczych rzęsek z uwzględnieniem ich deformacji oraz wzajemnych oddziaływań hydrodynamicznych wymaga zaawansowanego modelowania numerycznego i uciekania się do symulacji komputerowych. Możliwe jest jednak również inne podejście, zaproponowane przez Johna Blake’a w 1971 r.



Rys. 4. Fale metachronalne na powierzchni sferycznej komórki o promieniu  $R$ , przedstawione po lewej stronie wraz z kierunkiem ich propagacji, można reprezentować w uproszczony sposób, jak na prawym rysunku, poprzez uśredniony przepływ  $v^s$  na sferze o promieniu  $R + a$  w kierunku stycznym do powierzchni komórki. Opis transportu płynu wzdłuż powierzchni sprowadza się wówczas do określenia pola prędkości stycznej, bez potrzeby analizy szczegółowego oddziaływania poszczególnych rzęsek.

[10] dla sferycznej powierzchni komórki o promieniu  $R$ , jak na rys. 4. Na powierzchni widzimy skomplikowany wzór utworzony przez fale metachronalne wici. Żeby zbudować model matematyczny indukowanego przepływu, zastąpmy je przez ich obwiednię (powierzchnię chwilowo utworzoną przez końce licznych rzęsek), którą następnie przybliżymy przez sferyczną powierzchnię otaczającą komórkę w odległości  $R + a$ . Efekt pompowania płynu przez rzęski możemy teraz łatwo uwzględnić zakładając pewien rozkład prędkości blisko powierzchni. Zapominamy w ten sposób o strukturze rzęsek, a interesuje nas wyłącznie związek między wypadkową prędkością pływania (ang. *swimming speed*) komórki  $U$  a rozkładem prędkości na powierzchni sfery o promieniu  $R + a$ , który reprezentujemy w odpowiedniej bazie rozwiązań równań Stokesa (2) [11]. Kluczową obserwacją jest jednak spojrzenie na ruch organizmu (np. orzęska) jako obiektu zanurzonego w płynie, na powierzchni którego występuje wytwarzany przez ten obiekt przepływ płynu.

### Bionaśladownictwo

Powyższy wniosek zainspirował inżynierów i fizyków do wykorzystania innych sposobów generacji przepływu i ostatecznie do syntezy sztucznych pływaków o bardzo podobnym mechanizmie poruszania się. Jedną z możliwości jest wykorzystanie zjawiska dyfuzjoforezy, opisanego np. w artykule przeglądowym J. Andersona [12]. Dla jego ilustracji (i przy pewnych uproszczeniach), rozważmy powierzchnię zanurzoną w cieczy, w której rozpuszczona jest pewna substancja o lokalnym stężeniu  $C$  (rys. 5). Powierzchnia ta oddziałuje z cząstkami substancji rozpuszczonej poprzez potencjał oddziaływania  $\Phi(y)$ , gdzie  $y$  jest odległością od powierzchni, a jego charakterystyczny zasięg wynosi  $\delta$  i jest mały w porównaniu z innymi skalami przestrzennymi w układzie (oznaczonymi przez  $R$ ). Potencjał ten obejmuje oddziaływania van der Waalsa, dipolowe, efekty wykluczonej objętości itp. Na element płynu działa zatem w pobliżu powierzchni siła równa  $-C\nabla\Phi$ . W równowadze w temperaturze  $T$  zależność stężenia w odległości  $y$  od po-

wierzchni dana jest rozkładem Boltzmanna

$$C(y) = C^s \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right), \quad (3)$$

gdzie  $k$  jest stałą Boltzmanna,  $C^s(x)$  jest stężeniem substancji rozpuszczonej blisko powierzchni, zaś  $x$  jest współrzędną wzdłuż powierzchni. Wówczas równania Stokesa w granicy  $\delta/R \rightarrow 0$  można zapisać jako

$$\frac{\partial p}{\partial y} + C \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

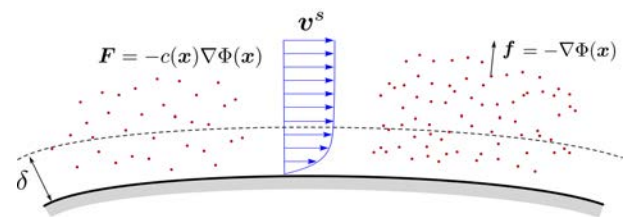
$$\mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} - \frac{\partial p}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

Rozwiązaniem tych równań w granicy  $y \rightarrow \infty$  (a zatem daleko od powierzchni) jest stała prędkość

$$v^s(x) = \mathcal{M} \frac{dC^s}{dx}, \quad (6)$$

w kierunku równoległym do powierzchni, która jest proporcjonalna do równoległej składowej gradientu stężenia substancji rozpuszczonej blisko powierzchni. Współczynnik  $\mathcal{M}$  nazywany jest mobilnością i zależy od szczególnej postaci potencjału oddziaływania<sup>1</sup>. Wynik ten wyprowadził Derjaguin w 1947 r. Obszerne omówienie powyższego szkicowego wyprowadzenia można znaleźć w pracy Andersona [12].

Kluczowym wynikiem jest zależność (6), która wiąże styczne gradienty stężenia substancji rozpuszczonej przy powierzchni z prędkością płynu w dużej odległości od niej. Gdybyśmy rozważali sytuację odwrotną, tzn. powierzchnię, która może poruszać się w nieruchomym płynie, taka sama byłaby właśnie prędkość płynu

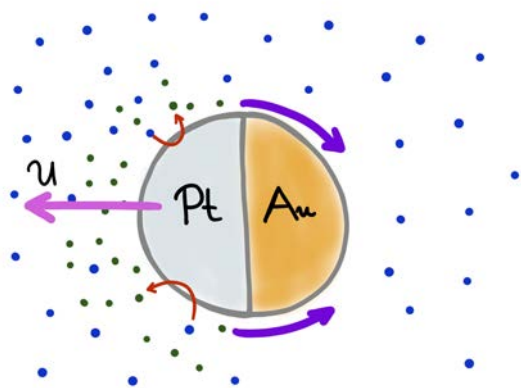


Rys. 5. Mechanizm powstawania przepływu wzdłuż powierzchni spowodowanego różnicą stężeń substancji rozpuszczonej w cieczy. Niejednorodna aktywność chemiczna powierzchni prowadzi do powstania obszarów o wyższym stężeniu  $c(x)$  reagenta. Ze względu na oddziaływanie produktów reakcji z powierzchnią, scharakteryzowane potencjałem  $\Phi(x)$ , na element płynu lokalnie działa siła  $F = -c(x)\nabla\Phi(x)$ , powodując powstanie przepływu  $v^s$ , którego profil naszkicowany jest w środkowej części rysunku. Pomijając ciekłą warstwę o grubości  $\delta$  przy powierzchni, przepływ ten jest jednorodny i zależy, poza potencjałem oddziaływania, wyłącznie od lokalnego gradientu stężenia reagenta wzdłuż powierzchni. Na odległościach znacznie większych od  $\delta$ , obserwujemy zatem powstanie przepływu powierzchniowego podobnego do tego, który wytwarzają kolektywne ruchy rzęsek.

1. Jego szczegółowa postać to

$$\mathcal{M} = -\frac{kT}{\mu} \int_0^\infty y \left[ \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right) - 1 \right] dy.$$





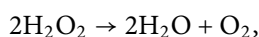
Rys. 6. Cząstka Janusa o dwóch „twarzach”. Klasyczna realizacja to półkule ze złota i platyny umieszczone w roztworze wody utlenionej  $\text{H}_2\text{O}_2$ , oznaczonej schematycznie jako niebieskie kropki. Platyna katalizuje rozkład wody utlenionej do wody i tlenu, powodując zwiększone stężenie produktów reakcji, oznaczonych zielonymi kropkami, w stosunku do stężeń po stronie pokrytej złotem. Powoduje to powstanie przepływu wokół cząstki, oznaczonego strzałkami wzdłuż jej powierzchni, a w efekcie cząstka zaczyna poruszać się z prędkością  $U$  w kierunku wyznaczonym przez platynową półkulę.

względem powierzchni, a więc zgodnie z ideą, której Blake użył do opisu ruchu płynu wokół orzęsków, obserwowalibyśmy rozkład powierzchniowej prędkości cieczy. Wówczas łatwo pokazać, że prędkość  $U$  poruszania się cząstki obdarzonej takim rozkładem prędkości powierzchniowej  $v^s(\mathbf{x})$ , dana jest przez średnią jej wartość na powierzchni

$$U = - \langle v^s \rangle. \quad (7)$$

Pozostaje jedno wyzwanie techniczne – jak wytworzyć gradient stężenia wzdłuż powierzchni? W tym celu można wykorzystać aktywność chemiczną powierzchni, np. poprzez pokrycie jej warstwą katalizatora. Jeśli pokrycie będzie niejednorodne, to wystarczy do powstania gradientów substancji rozpuszczonej wzdłuż powierzchni, a zatem doprowadzi do wytworzenia przepływu, a więc potencjalnie ruchu cząstki.

Klasycznym przykładem takiego rozwiązania są tzw. cząstki Janusa (rys. 6). Janus był rzymskim bogiem o dwóch twarzach. Cząstki nazwane jego imieniem mają powierzchnie o różniących się charakterystykach fizycznych. Powszechnie używane są sferyczne cząstki o półkulach pokrytych złotem i platyną, zanurzone w roztworze wody utlenionej. Platynowa półkula katalizuje rozkład



który prowadzi do wzrostu stężenia rozpuszczonego tlenu po jednej stronie cząstki. Powstały gradient stężenia wywołuje przepływ dyfuzjoforetyczny, którego mechanizm opisaliśmy powyżej. W ten sposób poprzez sprzężenie efektów chemicznych i hydrodynamicznych cząstka zaczyna się poruszać w kierunku wyznaczonym przez złotą półkulę.

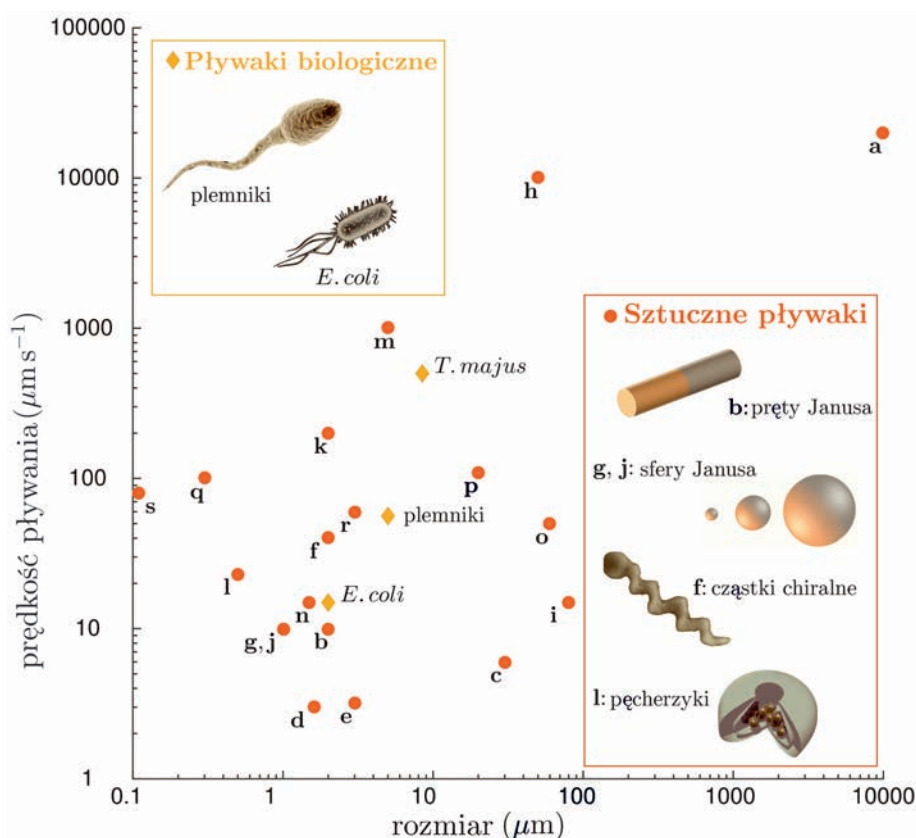
Słowo *foreza*, pochodzące z greki, oznacza m.in. uniesienie. W przypadku dyfuzjoforezy mówimy o ruchu spowodowanym obecnością gradientu stężenia rozpuszczonej substancji. Jeśli efektem jest ruch cząstki, która ten gradient wywołuje, zjawisko to nazywane jest również samodyfuzjoforezą. Mechanizm opisany powyżej jest uniwersalny, jego niezbędnym elementem jest niejednorodny rozkład gradientu stężenia produktów reakcji chemicznej na powierzchni. Co więcej, możemy zastąpić go np. niejednorodnym rozkładem temperatury – wówczas mamy do czynienia z samotermoforezą albo rozkładem potencjału elektrostatycznego, prowadzącym do samelektroforezy. W każdym przypadku związek między prędkością płynu na powierzchni a stycznym do niej gradientem odpowiedniej wielkości jest liniowy.

### Syntetyczne pływaki w laboratorium

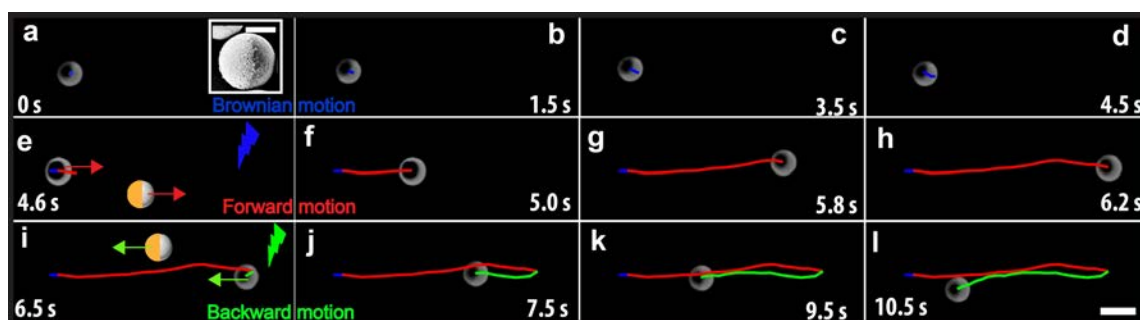
Inspiracja zjawiskiem dyfuzjoforezy doprowadziła do całego szeregu interesujących implementacji i wdrożeń, również w przypadku gdy cząstki nie są sferyczne, ale mają kształt pręcików albo strukturę chiralną. Kilkanaście najważniejszych przykładów sztucznych mikropływaków zawiera rys. 7. Poszczególne realizacje eksperymentalne, oznaczone pomarańczowymi kropkami, są opisane szczegółowo w tabeli, wraz z podaniem mechanizmu napędowego. Rysunek 7 i tabela 1 zostały zaczerpnięte z pracy [13] (tłum. autor artykułu).

Na wykresie 7 przedstawiono również trzy przykłady pływaków biologicznych. Pierwszym jest bakteria *Escherichia coli*, będąca koniem roboczym fizyki pływających mikroorganizmów i czołowym przykładem pływającego prokariota o cechach charakterystycznych wspólnych dla wielu przedstawicieli swojego królestwa. Drugi to *Thiovulum majus*, która jest najszybszą znaną nam pływającą bakterią. Dla uzupełnienia dodano również plemniki jako przykład komórek eukariotycznych, jednak należy pamiętać, że i w tej grupie występuje ogromna różnorodność form i sposobów poruszania się, więc punkt na wykresie reprezentuje raczej typowe, charakterystyczne wartości parametrów. Szczegółową dyskusję statystyki rozmiarów i prędkości pływających eukariotów zawiera praca [14].

Fakt, że rozmiary i prędkości sztucznych pływaków są porównywalne z układami biologicznymi, które je zainspirowały, to bardzo dobra wiadomość. Oznacza to, że uzyskujemy wgląd do świata pływających mikroorganizmów przy pominięciu ich ogromnej biologicznej złożoności. Dzięki temu możliwe staje się badanie fizyki ich mechanizmów lokomocji w oderwaniu od aspektu chemicznego i wrażliwości komórek na drobne zmiany warunków otoczenia. Oczywiście tylko niektóre cechy ruchu można w ten sposób odtworzyć, pomijając



Rys. 7. Samonapędzające się mikrocząstki zarówno żywe i występujące naturalnie w przyrodzie, jak i te wytworzone sztucznie, czerpią energię ze swojego otoczenia i przekształcają ją w określony ruch; ich rozmiary są mikro- bądź nanoskopowe, zaś typowe prędkości poruszania się dochodzą do ułamków milimetrów na sekundę. Litery odpowiadają sztucznym realizacjom eksperymentalnym z tab. 1. W ramkach przedstawione są przykłady biologicznych i sztucznych pływaków. Wśród nich ważne miejsce zajmują cząstki Janusa zarówno sferyczne, jak i w formie prętów. Rysunek zaczerpnięty z pracy [13] za zgodą (tłum. autor artykułu)



Rys. 8. Podwójny katalityczny mechanizm napędowy cząstek Janusa nowego typu [15]. Cząstki składają się z anatazu (mineralnej formy dwutlenku tytanu) i mają jedną (jaśniejszą) półkulę pokrytą złotem – jak widać na obrazie (a) z mikroskopu elektronowego. Obraz mikroskopowy zawiera klatki z filmu, na którym początkowo (a-d) cząstka wykonuje swobodne ruchy Browna. Znak błyskawicy symbolizuje włączenie oświetlenia. Na rysunkach e-h pływak porusza się, gdy światło UV aktywuje pierwszy mechanizm katalityczny. Na schematycznym obrazie cząstki (e, i) złoty kolor reprezentuje półkulę pokrytą złotem. Zmiana barwy światła na zieloną powoduje odwrócenie kierunku poruszania się cząstki, jak widać na rys. i-l. Skala na rys. l odpowiada długości  $5 \mu\text{m}$

niezwykle istotne zagadnienia sygnalizacji biologicznej i reakcji pływaków na bodźce zewnętrzne, jednak zyskujemy dodatkowe okno, przez które możemy zajrzeć do pływającego mikroświata.

Ponad jedną trzecia przedstawionych w tab. 1 wdrożeń wykorzystuje mechanizmy katalityczne i samodyfuzjoforezę potwierdzając, że jest to jeden z dominujących kierunków rozwoju fizyki materii aktywnej. Nie-równomierny rozkład stężenia substancji rozpuszczonej wokół cząstki osiągnąć można na różne sposoby:

poprzez anizotropowy kształt jednorodnej powierzchni katalitycznej lub niejednorodne pokrycie katalizatorem cząstki o wysokiej symetrii (jak w przypadku sferycznych cząstek Janusa). W zależności od geometrii, oprócz ruchu translacyjnego możliwe jest również wywołanie ruchu obrotowego cząstki, w wyniku czego trajektorie ruchu stają się helikalne. Dodatkową reorientację cząstek o tak małych rozmiarach wywołują również ruchy Browna i dyfuzja rotacyjna, która jest ważnym mechanizmem w ruchu żywych mikroorganizmów.

Tabela 1: Przykłady realizacji eksperymentalnych mikropływaków i mechanizmów napędowych w mikroskali. Litera w pierwszej kolumnie odpowiada punktom na wykresie 7. Przedrukowane i przetłumaczone z [13] za zgodą.

Mikropływak	Mechanizm napędowy	Ośrodek	Rozmiary	Prędkość
a Płytki PDMS pokryte Pt [16]	Bąbelki wytwarzane w wodnym roztworze H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> w wyniku asymetrycznego pokrycia płytki platyną Pt	Roztwór wodny H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + menisk	1 cm	2 cm s <sup>-1</sup>
b Pręciki składające się z segmentów Au i Pt [17]	Kataliza tlenu na pokrytym platyną Pt końcu pręta	Roztwór wodny H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> przy ściance	2 μm (dł.), 370 nm (szer.)	10 μm s <sup>-1</sup>
c Liniowe łańcuchy cząstek koloidalnych połączonych DNA przyłączone do czerwonych krwinek [18]	Zewnętrzne wzbudzenie elastycznych sztucznych wici przez oscylujące pole magnetyczne	Roztwór wodny	30 μm	6 μm s <sup>-1</sup>
d Sferyczne cząstki Janusa z katalitycznymi łatkami Pt [19]	Samodiffuzjoforeza katalizowana reakcją chemiczną na powierzchni Pt	Roztwór wodny H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1.6 μm	3 μm s <sup>-1</sup>
e Pary anizotropowych, paramagnetycznych cząstek koloidalnych połączonych DNA [20]	Rotacja wzbudzona wirującym polem magnetycznym	Roztwór wodny przy ściance	3 μm	3.2 μm s <sup>-1</sup>
f Chiralne koloidalne śmigła [21]	Wzbudzenie zewnętrznym polem magnetycznym	Roztwór wodny	2 μm (dł.), 0.25 μm (szer.)	40 μm s <sup>-1</sup>
g Cząstki Janusa z półkulą Au [22]	Samotermoforeza spowodowana lokalnym podgrzaniem półkuli Au	Roztwór wodny	1 μm	10 μm s <sup>-1</sup>
h Katalityczne mikrodrzutowce [23]	Kataliza H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> na wewnętrznej powierzchni mikrodrzutowca	Roztwór wodny H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	50 μm (dł.), 1 μm (szer.)	10 mm s <sup>-1</sup>
i Kropelki wody zawierające brom [24]	Przepływ Marangoniego spowodowany samopodtrzymującym się gradientem bromowania wzdłuż powierzchni kropli	Faza olejowa z surfaktantem	80 μm	15 μm s <sup>-1</sup>
j Cząstki Janusa z łatkami absorbującymi światło [25, 26, 27]	Lokalne odmieszanie (ang. <i>demixing</i> ) mieszaniny krytycznej spowodowane zlokalizowaną absorpcją światła	Mieszanina krytyczna (np. woda-2,6-lutydyna)	0.1 do 10 μm	10 μm s <sup>-1</sup>
k Pręciki składające się z segmentów Au i Pt (lub Au i Ru) [28]	Samoakustoforeza w stojącej fali ultradźwiękowej	Roztwór wodny	1-3 μm (dł.), 0.3 μm (szer.)	200 μm s <sup>-1</sup>
l Stomatocyty wypełnione Pt [29]	Bąbelki w wodnym roztworze H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> wytwarzane przez uwięzione nanocząstki Pt	Roztwór wodny H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.5 μm	23 μm s <sup>-1</sup>
m Koloidalne cząstki PMMA wykonujące ruch toczny [30]	Spontaniczne złamanie symetrii ładunku, prowadzące do powstania elektrostatycznego momentu siły	Przewodzący płyn (roztwór heksadekanu)	5 μm	1 mm s <sup>-1</sup>
n Polimerowe sfery z częściowo zatopioną antyferromagnetyczną kostką [31]	Samoforetyczny ruch przy ściance związany z rozkładem H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> przez hematytowe kostki oświetlone światłem ultrafioletowym	Przy ściance w wodnym roztworze H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1.5 μm	15 μm s <sup>-1</sup>
o Kropelki wody [32]	Solubilizacja wody przez roztwór odwróconych miceli	Faza olejowa z surfaktantami powyżej krytycznego stężenia micelizacji	60 μm	50 μm s <sup>-1</sup>
p Mikrosfery Janusa o rdzeniu Mg, nanocząstki Au, oraz powłoka z warstwy TiO <sub>2</sub> [33]	Napęd przez bąbelki wytwarzane w reakcji Mg-woda	Roztwór wodny	20 μm	110 μm s <sup>-1</sup>
q Wydrążone mezoporowate krzemionkowe cząstki Janusa [34, 35, 36]	Kataliza pod wpływem Pt lub trzech różnych enzymów (katalazy, ureazy, oksydazy glukozowej)	Roztwór wodny	50 do 500 nm	100 μm s <sup>-1</sup>
r Cząstki Janusa w połowie pokryte Cr [37]	Zmienne pole elektryczne	Roztwór wodny	3 μm	60 μm s <sup>-1</sup>
s Polimerowe pęcherzyki wypełnione enzymami [38]	Kataliza glukozy zasilana katalazą i oksydazą glukozową	Roztwór wodny	0.1 μm	80 μm s <sup>-1</sup>

### Kontrola ruchu cząstek

Artykuł rozpocząłem od przywołania wypowiedzi Feynmana o miniaturowym chirurgu wymagającym dwóch elementów do skutecznego działania. Pierwszym z nich jest lokalny mechanizm napędowy, którego wiele przykładów przedstawiliśmy powyżej. Jednak nie mniej ważnym wyzwaniem jest kontrola jego ruchu pozwalająca „zaprogramować” go tak, by dotarł w określone miejsce i np. dostarczył lek do wybranego obszaru ciała pacjenta. Alternatywnie mógłby on być sterowany przez zewnętrznego operatora za pomocą określonych bodźców.

Jedną z propozycji na ten temat zawiera nowa praca badaczy z Wydziału Fizyki UW, ETH w Zurychu i Uniwersytetu w Cambridge [15]. Prezentujemy w niej zmodyfikowane mikrocząstki Janusa, poruszające się w płynie pod wpływem zewnętrznego oświetlenia, których kierunek ruchu zależy od długości fali padającego światła. Cząstki o średnicy  $3,5 \mu\text{m}$  zostały wykonane z anatazu – jednej z odmian polimorficznych dwutlenku tytanu  $\text{TiO}_2$ , z jedną półkulą pokrytą złotem. Oświetlone zielonym światłem widzialnym poruszają się one w kierunku złotej „czapki”, zaś oświetlone światłem ultrafioletowym płyną w przeciwną stronę (rys. 8). Przez zmianę długości fali światła aktywujemy różne mechanizmy katalityczne na powierzchni cząstek, dzięki czemu możemy bardzo szybko i w kontrolowany sposób sterować ich ruchem. Ponadto widzimy ciekawą dynamikę kolektywną, opisaną szczegółowo w pracy [15]: cząstki tego typu potrafią wzajemnie się przyciągać lub odpychać, w zależności od wzajemnej orientacji i koloru oświetlenia. Obserwujemy w ten sposób gwałtowne procesy fuzji i rozszczepienia, których dynamiką możemy sterować. Wierzymy, że nowy, odwracalny i kontrolowany mechanizm poruszania się cząstek Janusa, jest krokiem na drodze do konstrukcji bardziej złożonych mikrorobotów, które będą w stanie transportować ładunki w skali komórkowej.

### Podsumowanie

Celem niniejszego artykułu było pokazanie i zilustrowanie niektórych podejść do problemu produkcji i kontroli mikrorobotów i sztucznych układów, których zachowaniem możemy sterować i dopasowywać je do różnych potrzeb. Inspiracją do stworzenia mikrorobotów są powszechnie występujące w przyrodzie jednokomórkowe organizmy eukariotyczne, których mechanizm pływania polega na wytworzeniu powierzchniowego przepływu płynu względem komórki. Syntetyczne mechanizmy wykorzystują tę ideę, jednak wytwarzają przepływ nie mechanicznie przy użyciu rzęsek, ale wykorzystując lokalnie indukowane gradienty (np. stęże-

nia, temperatury, potencjału elektrycznego) i wynikające z ich istnienia prądy w cieczy. Chociaż poziom lokalnej kontroli pokazany w serialu animowanym *Było sobie życie* Alberta Barillého pozostaje w sferze wyobraźni, nowe i innowacyjne mechanizmy są wciąż odkrywane i przybliżają nas do celu. Wiedza o hydrodynamicie mikroświata, która znacznie różni się od naszej codziennej intuicji, jest konieczna do rozwoju technik manipulacji mikromaterią.

### Podziękowania

Autor dziękuje Madeleine Habeli za wsparcie przy tworzeniu materiałów graficznych i uwagi do tekstu.

### Literatura

- [1] R. P. Feynman. There's plenty of room at the bottom. *Engineering and Science* 2, 22–36, 1960.
- [2] S. J. Decamp. What is Active Matter? <http://www.stephenjdecamp.com/what-is-active-matter.html>
- [3] S. Ramaswamy. The Mechanics and Statistics of Active Matter. *Annu. Rev. Cond. Matt. Phys.* 1, 323–345, 2010.
- [4] G. Gompper *et al.* The 2020 motile active matter roadmap. *Journal of Physics: Condensed Matter* 32, 193001, 2020.
- [5] M. Lisicki. W lepkiem mikroświecie: krótka lekcja pływania w miodzie. *Postępy Fizyki* 70 (1), 29 (2019).
- [6] E. Lauga i T. R. Powers. The hydrodynamics of swimming microorganisms. *Rep. Prog. Phys.* 72, 096601, 2009.
- [7] T. L. Jahn i J. J. Votta. Locomotion of protozoa. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 4, 93–116, 1972.
- [8] G.R. Fulford i J.R. Blake. Muco-ciliary transport in the lung. *J. Theo. Biol.* 121, 381 – 402, 1986.
- [9] M. Ezzati, O. Djahanbakhch, S. Arian, B. R. Carr. Tubal transport of gametes and embryos: a review of physiology and pathophysiology. *J. Assist. Reprod. and Genet.* 31, 1337–1347, 2014.
- [10] J. R. Blake. A spherical envelope approach to ciliary propulsion. *J. Fluid Mech.* 46, 199–208, 1971.
- [11] M. J. Lighthill. On the squirming motion of nearly spherical deformable bodies through liquids at very small reynolds numbers. *Comm. Pure Appl. Math.* 5, 109–118, 1952.
- [12] J. L. Anderson. Colloid transport by interfacial forces. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 21, 61–99, 1989.
- [13] C. Bechinger, R. Di Leonardo, H. Löwen, C. Reichhardt, G. Volpe(1), G. Volpe(2). Active particles in complex and crowded environments. *Rev. Mod. Phys.* 88, 045006, 2016.
- [14] M. Lisicki, M. F. Velho Rodrigues, R. E. Goldstein, E. Lauga. Swimming eukaryotic microorganisms



- exhibit a universal speed distribution. *eLife* **8**, e44907, 2019.
- [15] H.R. Vutukuri, M. Lisicki, E. Lauga, J. Vermant. Light-switchable active particles: Fast and reversible fission and fusion. *Nat. Commun.* **11**, 2628, 2020.
- [16] R. F. Ismagilov, A. Schwartz, N. Bowden, G. M. Whitesides. Autonomous movement and self-assembly. *Angew. Chem. Int. Ed.* **41**, 652–654, 2002.
- [17] W. F. Paxton, *et al.* Catalytic nanomotors: Autonomous movement of striped nanorods. *J. Am. Chem. Soc.* **126**, 13424–13431, 2004.
- [18] R. Dreyfus, J. Baudry, M. L. Roper, M. Fermigier, H. A. Stone, J. Bibette. Microscopic artificial swimmers. *Nature* **437**, 862–865, 2005.
- [19] J. R. Howse, R. A. L. Jones, A. J. Ryan, T. Gough, R. Vafabakhsh, R. Golestanian. Self-motile colloidal particles: From directed propulsion to random walk. *Phys. Rev. Lett.* **99**, 048102, 2007.
- [20] P. Tierno, R. Golestanian, I. Pagonabarraga, F. Sagués. Controlled swimming in confined fluids of magnetically actuated colloidal rotors. *Phys. Rev. Lett.* **101**, 218304, 2008.
- [21] A. Ghosh i P. Fischer. Controlled propulsion of artificial magnetic nanostructured propellers. *Nano Letters* **9**, 2243–2245, 2009.
- [22] H.-R. Jiang, N. Yoshinaga, M. Sano. Active motion of a Janus particle by self-thermophoresis in a defocused laser beam. *Phys. Rev. Lett.* **105**, 268302, 2010.
- [23] S. Sanchez, A. N. Ananth, V. M. Fomin, M. Viehrig, O. G. Schmidt. Superfast motion of catalytic microjet engines at physiological temperature. *J. Am. Chem. Soc.* **133**, 14860–14863, 2011.
- [24] S. Thutupalli, R. Seemann, S. Herminghaus. Swarming behavior of simple model squirmers. *New J. Phys.* **13**, 073021, 2011.
- [25] G. Volpe, I. Buttinoni, D. Vogt, H.-J. Kümmerer, C. Bechinger. Microswimmers in patterned environments. *Soft Matter* **7**, 8810–8815, 2011.
- [26] I. Buttinoni, G. Volpe, F. Kümmel, G. Volpe, C. Bechinger. Active Brownian motion tunable by light. *J. Phys.: Cond. Matt.* **24**, 284129, 2012.
- [27] F. Kümmel, B. ten Hagen, R. Wittkowski, I. Buttinoni, R. Eichhorn, G. Volpe, H. Löwen, C. Bechinger. Circular motion of asymmetric self-propelling particles. *Phys. Rev. Lett.* **110**, 198302, 2013.
- [28] W. Wang, L. A. Castro, M. Hoyos, T. E. Mallouk. Autonomous motion of metallic microrods propelled by ultrasound. *ACS Nano* **6**, 6122–6132, 2012.
- [29] D. A. Wilson, R. J. M. Nolte, J. C. M. van Hest. Autonomous movement of platinum-loaded stomatocytes. *Nature Chemistry* **4**, 268–274, 2012.
- [30] A. Bricard, J.-B. Caussin, N. Desreumaux, O. Dauchot, D. Bartolo. Emergence of macroscopic directed motion in populations of motile colloids. *Nature* **503**, 95–98, 2013.
- [31] J. Palacci, S. Sacanna, A. P. Steinberg, D. J. Pine, P. M. Chaikin. Living crystals of light-activated colloidal surfers. *Science* **339**, 936–940, 2013.
- [32] Z. Izri, M. N. van der Linden, S. Michelin, O. Dauchot. Self-propulsion of pure water droplets by spontaneous marangoni-stress-driven motion. *Phys. Rev. Lett.* **113**, 248302, 2014.
- [33] J. Li, *et al.* Water-driven micromotors for rapid photocatalytic degradation of biological and chemical warfare agents. *ACS Nano* **8**, 11118–11125, 2014.
- [34] X. Ma, A. Jannasch, U.-R. Albrecht, K. Hahn, A. Miguel-López, E. Schäffer, S. Sánchez. Enzyme-powered hollow mesoporous Janus nanomotors. *Nano Letters* **15**, 7043–7050, 2015.
- [35] X. Ma, K. Hahn, S. Sanchez. Catalytic mesoporous Janus nanomotors for active cargo delivery. *J. Am. Chem. Soc.* **137**, 4976–4979, 2015.
- [36] X. Ma, A. Jannasch, U.-R. Albrecht, K. Hahn, A. Miguel-López, E. Schäffer, S. Sánchez. Correction to enzyme-powered hollow mesoporous Janus nanomotors. *Nano Letters* **15**, 7779–7779, 2015.
- [37] D. Nishiguchi i M. Sano, Mesoscopic turbulence and local order in Janus particles self-propelling under an ac electric field. *Phys. Rev. E* **92**, 052309, 2015.
- [38] A. Joseph, *et al.*, Chemotactic synthetic vesicles: Design and applications in blood-brain barrier crossing. *Science Advances* **3**, 2017.

## Fermionowe dywany kwantowe

Piotr T. Grochowski\*

Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk

---

**Streszczenie.** Przestrzenna okresowość występująca w układach fizycznych wykazujących zachowania falowe znana była już na początku XIX wieku, kiedy Henry Fox Talbot odkrył zapomniany na wiele lat efekt, nazywany dziś jego imieniem, który doczekał się drugiej młodości wraz z nastaniem mechaniki kwantowej. W jej ramach interferencja fal materii przynosi powtarzalność, tym razem w w czasie, doprowadzając do tzw. kwantowych odrodzeń. Odkrycie tego zjawiska, niespotykanego w fizyce klasycznej, zapoczątkowało szereg badań, których jednym z owoców są dywany kwantowe. Są to czasoprzestrzenne struktury wyłaniające się z analizy gęstości prawdopodobieństwa cząstki kwantowej. Okazuje się, że gdy rozważyć te struktury w układzie kwantowym wielu ciał, stają się one jeszcze wyraźniejsze i zaczynają przypominać znane z nieliniowej fizyki solitony.

**Słowa kluczowe:** mechanika kwantowa, ultrazimne gazy atomowe, dywany kwantowe, kwantowe odrodzenia

**Abstract.** Spatial periodicity in physical systems that manifest wave properties has been known since the early 1800s, when Henry Fox Talbot discovered the effect now bearing his name. Forgotten for many years, it has been rejuvenated with the advent of quantum mechanics. Within the quantum paradigm, interference between matter waves gives rise to similar periodicity, however in time domain, resulting in so called quantum revivals. Exploration of this phenomenon, absent in classical physics, initiated many studies, among which quantum carpets are one of the most striking examples. They are spatiotemporal structures which appear in the analysis of probability density of a single quantum particle. Moreover, if one considers them in the many body system, they become sharper, starting to resemble solitons known from nonlinear physics.

**Keywords:** quantum mechanics, ultracold atomic gases, quantum carpets, quantum revivals

---

### Efekt Talbota

Od czasu ukształtowania się konsensusu naukowego w sprawie falowej natury światła na początku XIX wieku, doświadczenia wykorzystujące dyfrakcję światła zaczęły stanowić jeden z najchętniej wybieranych kierunków badań. Wraz ze stopniowym polepszaniem się technik eksperymentalnych, w tym wykorzystaniem zaawansowanych przyrządów optycznych, obrazy dyfrakcyjne mogły być analizowane w coraz to subtelniejszy sposób. W roku 1836 Henry Fox Talbot [1], angielski prekursor nowoczesnej fotografii, opublikował wyniki doświadczeń z siatką dyfrakcyjną, które wcześniej przeprowadził podczas spotkania British Association for the Advancement of Science (Brytyjskiego Stowarzyszenia Uczonych) w Bristolu.

*It was very curious to observe that though the grating was greatly out of the focus of the lens, yet the appearance of the bands was perfectly distinct and well defined. (...) which can be compared to nothing so well as to tissues woven with threads of various colours. (...) They seem to*

*vary ad infinitum, and in whatever position the plate is placed, they appear always as distinct as if they were in the focus of the lens.*<sup>1</sup>

*H. F. Talbot, Philos. Mag. 9, 401 (1836)*

Talbot oświetlał wiązką promieni słonecznych skonstruowaną dekadę wcześniej przez Fraunhofera siatkę dyfrakcyjną – układ równoległych i równo odległych drutów, które pozwalają na rozdzielenie padającego nań światła na wiązki, które następnie interferują ze sobą. Obserwowana przez lupę z bliskiej odległości siatka była, zgodnie z przewidywaniami, widoczna ostro. Przy zwiększaniu dystansu w taki sposób, że siatka już nie znajdowała się w ognisku soczewki, co powinno powodować rozmycie obrazu, dostrzegane struktury pozo-

---

1. Niezwykle interesującą zdała mi się obserwacja, że pomimo iż siatka była z dala od ogniska soczewki, struktury pozostawały wyraźne i dobrze rozróżnialne (...) mogły być porównane chyba jedynie do tkaniny uplecionej za pomocą różnokolorowych nici (...) Zdawały się rozciągać bez końca i niezależnie w którym miejscu umieszczony był ekran, pozostawały tak wyraźne, jakby były w ognisku soczewki (tłum. autor artykułu).

---

\*ORCID: 0000-0002-9654-4824

stawały wyraźne. Ponadto, obraz był na przemian czerwony i zielony, wykazując swoistą powtarzalność na przestrzeni kilku metrów. Talbot powtórzył doświadczenie także dla światła monochromatycznego. Okazało się, że obraz siatki dyfrakcyjnej wraz ze zwiększaniem odległości pozostawał rozmyty, tak jak powinien. Stawał się jednak bardzo wyraźny w miejscach będących wielokrotnościami pewnego dystansu, zwanego dziś odległością Talbota.

Efekt Talbota, czyli powtarzające się w przestrzeni ostre odwzorowania siatki dyfrakcyjnej, został zapomniany na następne 50 lat, aż do czasów lorda Rayleigha i jego pracy z 1881 roku [2]. Pokazał on ściśle, w jaki sposób odległość Talbota zależy od dystansu pomiędzy szczelinami i długości padającej fali. Zaproponował także wykorzystanie efektu Talbota do konstruowania kopii siatek dyfrakcyjnych, jednakże przez następne stulecie zjawisko to było uważane jedynie za optyczną ciekawostkę.

Co więc sprawiło, że naukowcy przypomnieli sobie o tym efekcie? Wykorzystuje on bardzo spójną interferencję fal, która przez wiele lat stanowiła standardowo badane zjawisko w ramach optyki i innych teorii opisywanych równaniem falowym. Jednakże początek XX wieku był świadkiem narodzin nowej, przełomowej teorii opartej na tymże równaniu, która odnosi się do falowej natury nie tylko światła, ale też samej materii. Analizując matematyczną strukturę efektu Talbota, nie jest zaskoczeniem, że istnieje jego kwantowomechaniczny odpowiednik.

### Kwantowe odrodzenia – *quantum revivals*

W fizyce klasycznej cząstki opisywane są za pomocą punktów, które poruszają się po dobrze zdefiniowanych trajektoriach. Stoi to w znacznym kontraście do opisu znanego z mechaniki kwantowej, w której cząstka jest reprezentowana przez zlokalizowaną przestrzennie, ale jednak rozmytą funkcję falową. Kwadrat modułu tej funkcji, obliczony w danym punkcie przestrzeni, interpretowany jest następnie jako prawdopodobieństwo tego, czy pomiar w tym właśnie punkcie wykaże obecność cząstki. Już u samych początków mechaniki kwantowej, naukowcy zastanawiali się, czy ewolucja tak zlokalizowanych rozkładów prawdopodobieństwa (czyli paczek falowych) może odbywać się w sposób klasyczny, tj. po klasycznej trajektorii. Mieli nadzieję, że tak właśnie będzie, co pozwoliłoby na znalezienie pomostu pomiędzy fizyką klasyczną a kwantową. W jednej z wczesnych prac Schrödinger pisał [3]

*Es läßt sich mit Bestimmtheit voraussehen, dab man auf ganz ähnliche Weise auch die Wellengruppen konstruieren kann, welche auf hochquantigen Keplerellipsen*

*umlaufen und das undulationsmechanische Bild des Wasserstoffelektrons stud.*<sup>2</sup>

*E. Schrödinger, Naturwissenschaften 14, 664 (1926)*

Miał nadzieję, że opisywane przez jego równanie pakiety falowe będą zachowywały swój kształt podczas poruszania się po skwantowanych, wysokich orbitach, na podobieństwo klasycznych elektronów obiegających jądro atomowe po keplerowskich trajektoriach. Jednak wyniki teoretyczne szybko pokazały, że naturalnym zjawiskiem dla tego typu problemu kwantowego jest rozmywanie się paczki falowej, czyli poszerzanie w trakcie ewolucji w czasie. Faktycznie, zlokalizowana funkcja falowa, umieszczona na orbicie odpowiadającej klasycznemu elektronowi, rozmywa się na całą trajektorię, wypełniając ją w sposób prawie jednorodny, zgodnie z twierdzeniem Liouville'a. Kwantowe obiekty, które poruszają się po klasycznych orbitach, wytworzono i zrealizowano doświadczalnie dopiero wiele lat później, wraz z wytworzeniem tzw. atomów Rydberga.

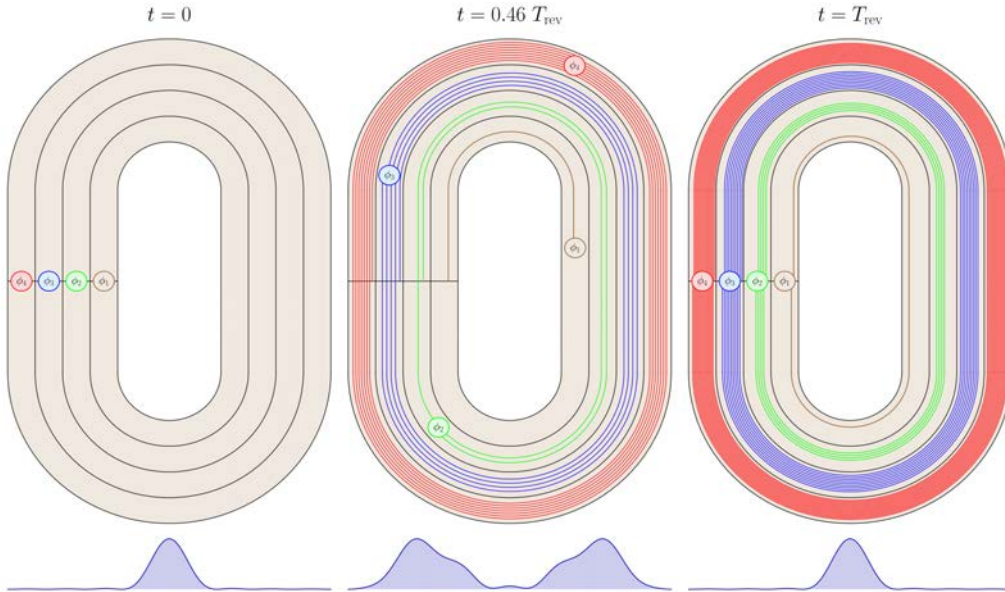
Okazuje się jednak, że wyżej opisany problem ewolucji paczki falowej posiada swoistego rodzaju zwrot akcji – jeśliby czekać wystarczająco długo, z jednorodnego rozkładu prawdopodobieństwa zacznie wyłaniać się bardzo szeroki kształt, który po pewnym czasie „ściśnie się”, odtwarzając prawie idealnie stan początkowy. Taki powrót do sytuacji startowej nazywamy kwantowym odrodzeniem (lub kwantowym ożywieniem – ang. *quantum revival*), a czas po którym to następuje – czasem odrodzenia  $T_{\text{rev}}$  [4]. Nasuwa się od razu skojarzenie z efektem Talbota, jednakże zamiast powtarzających się w przestrzeni obrazów siatki dyfrakcyjnej dostajemy powtarzające się w czasie obrazy stanu początkowego.

Przykład ewolucji początkowo zlokalizowanej paczki falowej wokół jądra atomowego stanowi jeden z wielu modeli, w których występuje kwantowe odrodzenie. Nie trzeba jednak rozważać skomplikowanych sytuacji, aby zrozumieć sedno takiego zachowania – już elementarny przykład cząstki kwantowej w nieskończonej studni potencjału wykazuje ten efekt. Rozważmy więc stan początkowy cząstki w pudle o szerokości  $L = 1$  będący superpozycją czterech stanów własnych studni:

$$\psi(x) = \sum_{n=1}^4 a_n \phi_n(x).$$

Używamy jednostek, w których masa cząstki  $m=1$ , a także stała Diraca  $\hbar = 1$ . Indeks  $n$ , przebiegający od 1 do 4, numeruje cztery najniższe symetryczne stany

2. Można z całą pewnością przewidzieć, że możliwym jest skonstruowanie pakietów falowych, które krążą po wysoko skwantowanych orbitach keplerowskich i są wyrażone przez rozwiązania elektronowe w atomie wodoru; (tłum. autor artykułu).



Rys. 1. Ewolucja pełnego stanu kwantowego będącego superpozycją stanów własnych pudła jest zadana przez zmianę w czasie relatywnych wag pomiędzy składnikami tej superpozycji. Jednym z popularnych przedstawięń ich ewolucji jest porównanie do wyścigu biegaczy – każde pełne okrążenie to powrót do początkowej wartości wagi dla danego składnika. Każdy ze składników, czyli stanów własnych, jest reprezentowany przez biegacza poruszającego się z różną prędkością –  $\phi_1$  jest najwolniejszy, pokonując jeden stadion szesnaście razy wolniej niż  $\phi_4$ . W chwili początkowej wszyscy zawodnicy są na mecie, a odpowiadni stan kwantowy jest zlokalizowany, co widać na pierwszej od lewej części rysunku. W dowolnej chwili czasu, przedstawionej w środkowej części, biegacze nie są już ustawieni w linii, a odpowiednia funkcja falowa przyjmuje skomplikowany kształt. Okazuje się, że po pewnym czasie, tzw. czasie odrodzenia, kiedy wszyscy zawodnicy znów znajdują się w pozycjach startowych, kształt początkowy funkcji falowej zostaje odtworzony sygnalizując kwantowe odrodzenie

własne. Współczynniki  $a_n$ , czyli wagi, z którymi każdy stan własny wchodzi do superpozycji, zostały tak dobrane, aby stan układu był zlokalizowany (rys. 1) w chwili początkowej. Ewolucja w czasie takiej paczki falowej jest dana przez dopisanie do każdego elementu sumy czynnika eksponencjalnego, zależnego od energii stanu własnego  $\phi_n$ :

$$\psi(x, t) = \sum_{n=1}^4 a_n \phi_n(x) e^{-i2n^2\pi^2 t}.$$

Na pierwszy rzut oka widać, że względne wagi kolejnych stanów własnych zmieniają się w czasie, co powoduje, że kwadrat modułu funkcji falowej,  $|\psi(x, t)|^2$ , ewoluje w nieoczywisty sposób. Aby zilustrować tę zmianę, posłużymy się przykładem biegaczy poruszających się po bieżni z różnymi prędkościami (rys. 1), danymi przez wykładniki funkcji eksponencjalnych mnożących początkowe wagi. Jedno pełne okrążenie odpowiadać będzie zmianie wykładnika o wartość  $2\pi$ , co dla danego stanu własnego oznacza powrót do początkowej wagi, jako że  $e^{i2\pi}=1$ . I tak, pierwszy stan własny  $\phi_1$  jest najwolniejszy – podczas jego jednego okrążenia, drugi stan  $\phi_2$ , który jest czterokrotnie szybszy, cztery razy obiegnie stadion, stan  $\phi_3$  – dziewięć razy, a  $\phi_4$  – szesnaście.

W danej chwili stan całego układu może być opisany przez położenia biegaczy na bieżni. W chwili początkowej wszyscy znajdują się na linii startu, a gdy czas zaczyna płynąć a biegacze zaczynają obiegać stadion, to przestają być ustawieni w tej samej linii. Ich „roz-

rzucenie” po stadionie obrazuje właśnie kwantowomechaniczne rozplątanie się początkowo zlokalizowanej paczki falowej. Kolejne stany własne wchodzi do superpozycji z praktycznie losowymi wagami, co wyraża się stanem paczki falowej zupełnie odmiennym od startowego. Łatwo zauważyć skąd się bierze kwantowe odrodzenie – w naszym przykładzie jest to równoczesny powrót wszystkich zawodników na metę, czyli odtworzenie początkowego układu wag w superpozycji.

Od razu widać też, jak ważna jest współmierność prędkości poszczególnych biegaczy – gdyby tak nie było, tj. gdyby były one równe na przykład  $1, \sqrt{10}, \pi^2, 10\sqrt{2}$  zamiast  $1, 4, 9, 16$ , to pełnego kwantowego odrodzenia byśmy nie zaobserwowali – biegacze nigdy nie spotkaliby się z powrotem na linii mety. Przykład kwantowego pudła jest bardzo specyficzny – wartości energii kolejnych stanów własnych są dane przez kwadraty kolejnych liczb naturalnych, więc współmierność jest zapewniona. Innym elementarnym przykładem pełnego kwantowego odrodzenia, jest kwantowy oscylator harmoniczny, w którym energie kolejnych stanów własnych są proporcjonalne do liczb całkowitych.

W przyrodzie rzadko zdarzają się tak wyidealizowane układy, a widmo energetyczne potrafi być bardzo skomplikowane. Warto jednak zauważyć, że nawet jeśli kolejne energie stanów własnych nie są idealnie współmierne, to kwantowe odrodzenie może zajść, chociaż w sposób niedoskonały. Nic więc dziwnego, że przez lata zjawisko to pozostawało niezauważone w bardziej skom-



plikowanych układach. Dopiero w latach 70. XX w. Joe Eberly razem ze współpracownikami pokazali, że kwantowe odrodzenie pojawia się w powszechnie używanym w fizyce atomowej modelu Jaynesa-Cummingsa<sup>3</sup> [5].

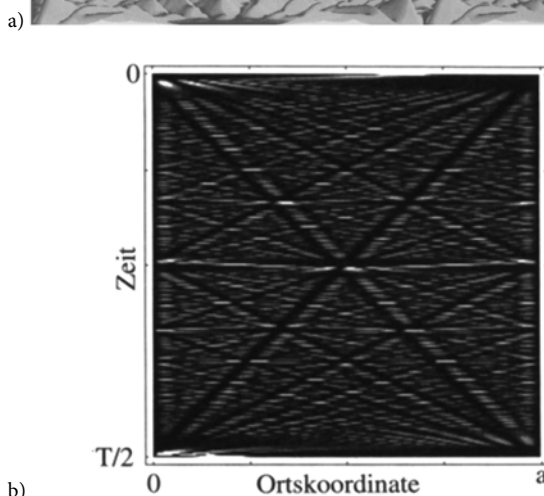
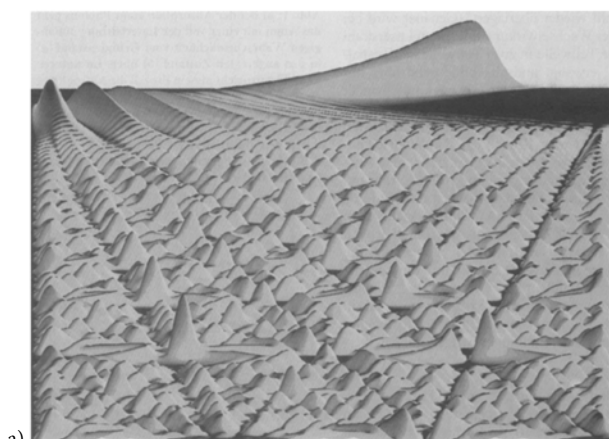
Ich praca spowodowała gwałtowny wzrost zainteresowania tematem periodycznego zachowania układów kwantowych w czasie, pośrednio przywracając efekt Talbota do łask. Znalaziono wiele cech wspólnych tych dwóch zjawisk, wynikających z podobnej struktury matematycznej, którą badał już Carl Friedrich Gauss na początku XIX w., a dziś ją nazywamy sumami Gaussa. Szybki przyrost liczby prac na temat kwantowych odrodzeń zaowocował nie tylko znacznym przyrostem wiedzy na ich temat, ale też wyodrębnieniem się kilku gałęzi-córek, np. kwantowe echa [6], kwantowe bliźny [7] czy kwantowe bity [8].

Okazało się także, że wraz z odrodzeniami, czy to w przestrzeni, jak w przypadku efektu Talbota, czy to w czasie, jak w przypadku kwantowym, pojawia się struktura fraktalna w funkcji autokorelacji<sup>4</sup>. W szczególności wyraźnie jest ona widoczna w stosunkowo atrakcyjnym wizualnie obiekcie, jakim są dywany kwantowe, którym się teraz bliżej przyjrzymy.

### Dywany kwantowe

W 1995 roku Wolfgang Kinzel zaprezentował w niemieckojęzycznym czasopiśmie *Physikalische Blätter* krótki artykuł, w którym rozważał opisaną wyżej sytuację pojedynczej kwantowej cząstki w pudle, która początkowo jest opisana dobrze zlokalizowaną paczką falową [9]. Jednakże zamiast zwrócić uwagę na kwantowe odrodzenia, wyrysował on trójwymiarowy wykres, w którym na jednej osi znajduje się położenie w pudle, na drugiej czas, a wysokość oznacza wartość gęstości prawdopodobieństwa. Widok, który otrzymał przedstawia rys. 2.

Nie nazwał on jednak tego efektu kwantowym dywanem, a kwantowymi górami, co zresztą odzwierciedlił w prezentacji jego wyniku. Zgodnie ze swoim nazewnictwem, proste linie praktycznie zerowej wartości gęstości prawdopodobieństwa nazwał dolinami (albo później kanałami), a odpowiednie linie maksimum – graniami czy grzbietami. Wielka majestatyczna góra, która majaczy w oddali na horyzoncie, to nic innego jak właśnie kwantowe odrodzenie – paczka falowa, która zaczyna się kurczyć, aby odtworzyć w czasie odrodzenia swoją początkową formę. Nazwę dywanu kwantowego zapro-



Rys. 2 [9]

ponował z kolei Wolfgang Schleich [10], zainspirowany dwuwymiarową prezentacją tego wyniku, którą możemy zobaczyć na rys. 2b.

Przy takim przedstawieniu, doliny i grzbiety widoczne są jeszcze wyraźniej i w większej liczbie – łatwo rozróżnialne stają się linie o coraz to większym nachyleniu, reprezentujące albo maksima, albo minima gęstości prawdopodobieństwa. Analiza tych struktur została przeprowadzona na wiele sposobów, w tym za pomocą funkcji Wignera czy jawnym rozkładzie gęstości prawdopodobieństwa na składowe o konkretnej wartości prędkości [11]. Okazuje się, że prędkości dolin i grzbietów nie mają nic wspólnego z prędkością, którą charakteryzowałaby się klasyczna trajektoria paczki falowej. Narastają one tylko w wyniku samointerferencji paczki falowej, która w pewnym momencie zaczyna odbijać się od ścianek pudła. Grzbiety oznaczają miejsca konstruktywnej, a kanały – destruktywnej interferencji. Dostrzegane prędkości tych struktur są więc związane nie tyle z kwantowomechanicznym rozplywaniem się początkowej paczki falowej, a raczej z samą geometrią nieskończonej studni.

Czy kwantowe dywany są jednak tylko fizyczną ciekawostką? Okazuje się, że ich matematyczna struktura, wykorzystująca sumy Gaussa, wykazuje głębokie po-

3. Wieść niesie, że kwantowe odrodzenia były otrzymywane już we wcześniejszych pracach, jednak uznane zostały za błędy numeryczne i nigdy nieopublikowane.

4. Funkcja autokorelacji to kwadrat modułu iloczynu skalarnego funkcji falowej w chwili  $t$  i w chwili  $t_0$ .

wiązania z teorią liczb, odkrywając wewnętrzną fraktalną strukturę zarówno w efekcie Talbota, jak i w dywanach kwantowych. Ponadto pokazano, że układ linii, po których bieżą doliny i grzbiety dywanu kwantowego może być wykorzystany w pewnych problemach stawianych przez teorię informacji kwantowej, a także do rozkładu dużych liczb całkowitych na czynniki pierwsze [12].

Przestrzenne odrodzenia w efekcie Talbota, i ich czasowe kwantowe odpowiedniki zostały wielokrotnie zrealizowane w różnego rodzaju doświadczeniach. Od dyfrakcyjnych eksperymentów bazujących na wcześniejszych, XIX-wiecznych próbach, przez układy zawierające atomy, molekuly czy ultrazimne<sup>5</sup> gazy, a kończąc na stanach Rydberga i jądrowych paczkach falowych, samoodtworzające się w czasie i przestrzeni struktury zostały bardzo dokładnie zbadane i opisane. Punktem wyjścia do tytułowych *fermionowych dywanów kwantowych* są jednak układy, które zawierają znaczną liczbę cząstek kwantowych.

Oczywiście takie układy istnieją w przyrodzie, zostały zresztą bardzo dokładnie zbadane i z sukcesem wykorzystane, co potwierdza np. powszechność tranzystorów. Jednakże dopiero w 1995 roku, wraz z pierwszym wytworzeniem tzw. kondensatu Bosego–Einsteina, została stworzona platforma doświadczalna, która pozwala na bardzo dokładną kontrolę układów zawierających wiele oddziałujących ze sobą cząstek kwantowych [13]. Mowa tutaj o ultrazimnych gazach atomowych, w których uwięzione za pomocą silnej wiązki światła ekstremalnie rozrzedzone pary jakiegoś lekkiego atomu, np. litu, mogą być bardzo dokładnie przygotowane w pożądanej geometrii, a ich własności następnie bardzo precyzyjnie mierzone. W szczególności możliwym stało się wytworzenie nieskończonej studni potencjału, która przez dziesięciolecia była jedynie elementarnym przykładem dla pierwszorocznych studentów fizyki.

Wyróżniającą cechą takich układów jest także możliwość swobodnego sterowania siłą oddziaływania pomiędzy atomami. Odbywa się to za pomocą odpowiednio dobranego pola magnetycznego, a nosi nazwę rezonansu Feshbacha [14]. W szczególności wytworzyć można kwantowy gaz, który nie oddziałuje – co w pierwszej chwili może wydawać się trywialnie łatwe, ale po chwili namysłu stwierdzić można, że to nie jest takie oczywiste – w końcu wszystkie atomy oddziałują z atomami w swoim otoczeniu, np. siłami van der Waalsa i zniwelowanie wpływu tych sił jest doświadczalnie nie-

oczywiste. Podążając tym tropem, zachęćeni możliwością jego doświadczalnego zbadania, rozważmy nieoddziałujący gaz fermionów w pudle.

### Fermionowe dywany kwantowe

Zacznijmy najpierw od wyjaśnienia, czym różnią się fermiony i bozony w przypadku ultrazimnego gazu umieszczonego w pudle. Gdy mamy do czynienia z pojedynczą cząstką w stanie podstawowym, mówimy, że jest ona w stanie własnym pudła o najniższej energii. Jeśli umieścimy w pudle więcej atomów, to naturalnym wydaje się, że stan podstawowy będzie zrealizowany przez obsadzenie tego najniższego stanu przez wszystkie cząstki. Jest to prawda – tak zachowują się nieoddziałujące bozony. Wszystkie gromadzą się w tym samym, najniższym stanie własnym pudła. Taki wielociałowy stan nazywamy kondensatem Bosego–Einsteina.

Fermiony zachowują się inaczej ze względu na zakaz Pauliego, który mówi, że jeśli jeden fermion obsadza już jakiś stan własny pudła, to inny nie może go już zająć. Trzymając się tej zasady, skonstruowanie stanu podstawowego też jest dość naturalne. Każdy kolejny atom zaczyna obsadzać kolejny stan własny pudła, zgodnie z rosnącą wartością energii. Widać od razu, że stan podstawowy fermionów jest diametralnie inny od bozonowego, w szczególności charakteryzuje się znacznie większą energią całkowitą.

Zastanówmy się teraz, czy istnieje jakiś odpowiednik gęstości prawdopodobieństwa dla układu wielu atomów. Oczywiście możemy rozważać pełen rozkład prawdopodobieństwa, w którym zmienne losowe odpowiadają każdej cząstce, ale już na pierwszy rzut oka wydaje się to bardzo skomplikowane. Chcielibyśmy badać wielkość, która posiada podobne właściwości pomiarowe, tzn. taką, która mówi nam, z jakim prawdopodobieństwem będzie kliknął detektor cząstek ustawiony w danym punkcie przestrzeni, informując nas, ile średnio atomów znajduje się w danym miejscu. Okazuje się, że taki obiekt da się zdefiniować i na dodatek jest do niego łatwy dostęp w warunkach doświadczalnych. Nazywany jest jednocząstkową gęstością i dla nieoddziałującego gazu bozonów przyjmuje postać:

$$n_B(x, t) = N|\phi_B(x, t)|^2,$$

gdzie  $N$  to liczba bozonów w pudle, a  $\phi_B(x, t)$  to funkcja falowa, nazywana orbitalem, którą jednocześnie obsadzają wszystkie atomy. Podstawiając za  $\phi_B(x, t)$  superpozycję stanów własnych, o których była mowa w dwóch poprzednich sekcjach, także otrzymamy dywan kwantowy, tym razem wielociałowy, który jednak nie będzie różnił się od przypadku jednej cząstki – będzie jedynie przemnożony przez liczbę atomów w układzie.

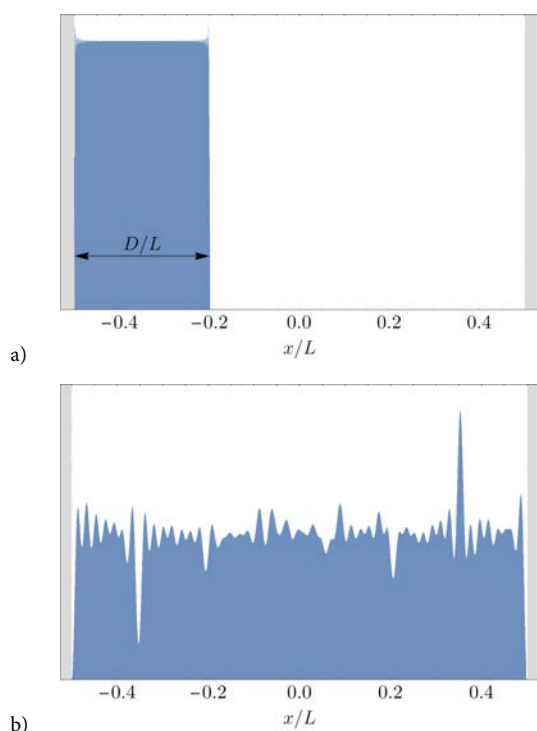
5. Ultrazimne gazy to są gazy tak mocno schłodzone, że przejawiają cechy kwantowe.

Z kolei w przypadku fermionowym, jednocząstkowa gęstość dla nieoddziałującego gazu przyjmuje postać

$$n_F(x, t) = \sum_{k=1}^N |\phi_k(x, t)|^2,$$

gdzie  $N$  to liczba fermionów w pudle, a  $\phi_k(x, t)$  to ortogonalne względem siebie orbitale, które są zajmowane przez kolejne fermiony. Widać od razu, że fermionowy dywan kwantowy będzie się różnił od bozonowego – każdy składnik tej sumy jest inny i każdy odpowiada innemu jednocząstkowemu dywanowi kwantowemu.

Nasza przygoda z dywanami rozpoczęła się od prostego zadania, po którym nie spodziewaliśmy się żadnych nadzwyczajnych wyników, a rozwiązanie którego potrzebne nam było w kontekście innego eksperymentu. Konkretniej, badaliśmy w jaki sposób nieoddziałujący gaz fermionowy zamknięty początkowo w pudle o szerokości  $D$ , a następnie wypuszczony do większego pudła o szerokości  $L > D$ , będzie dyfundował (sytuacja początkowa przedstawiona jest na rys. 3a.). Odkryliśmy bardzo zaskakującą rzecz (rys. 3b) – w trakcie ewolucji zaczęły pojawiać się wąskie struktury, które przypominały solitony będące rozwiązaniami równań nieliniowych – posiadały stałą wysokość, kształt i poruszały się ze stałą prędkością [15].

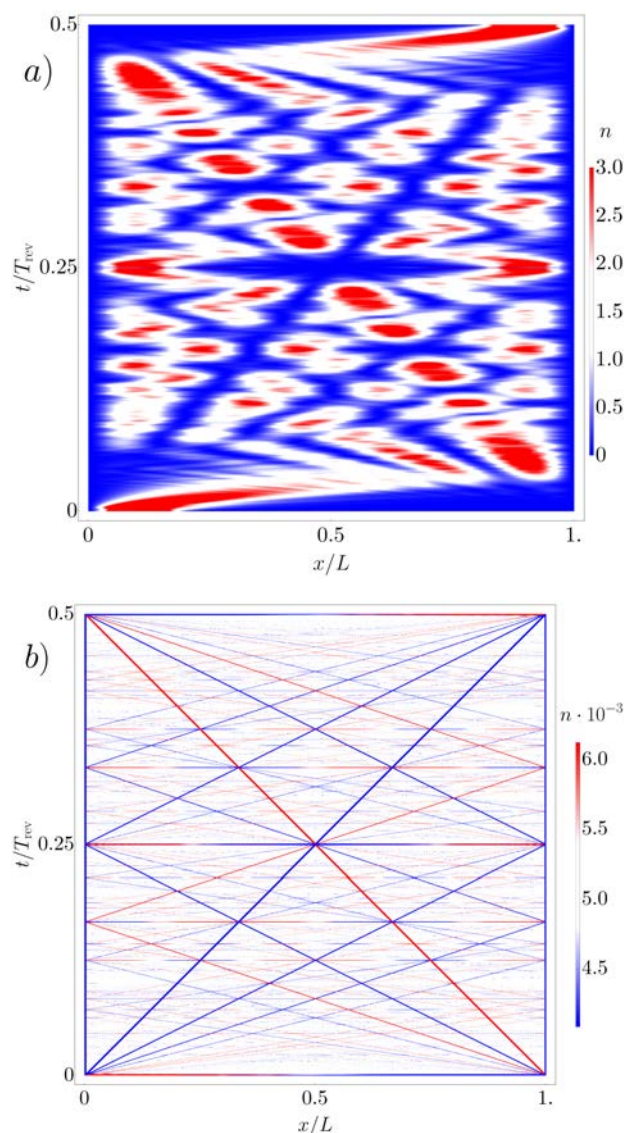


Rys. 3. a) Przedstawia jednocząstkową gęstość nieoddziałującego gazu fermionowego w chwili początkowej – atomy znajdują się w stanie podstawowym pudła o szerokości  $D < L$ . Następnie, gaz jest wypuszczony, aby swobodnie ewoluował w większym pudle o szerokości  $L$ . b) Przedstawia późniejszą chwilę czasu. Wąskie struktury solitonowe są wyraźnie widoczne – w lewej części pudła widzimy wyraźne minimum gęstości, a w prawej – maksimum. Te minima i maksima poruszają się ze stałą prędkością i zachowują kształt w trakcie ewolucji w czasie

Dlaczego było to tak zaskakujące? Do istnienia solitonów, czyli wzbudzeń jakiegoś pola opisującego czy to gaz, czy to światło, niezbędne są nieliniowe człony w równaniach dynamiki, które w przypadku atomowym związane są z obecnością oddziaływań. W gazie nieoddziałującym takie solitonopodobne struktury nie powinny się tworzyć.

Po przeanalizowaniu dostępnej literatury, okazało się, że to, co obserwujemy, to doliny i grzbiety znane z dywanów kwantowych, jednak znacznie uwypuklone i dużo wyraźniejsze. To uwypuklenie wynika bezpośrednio z nałożenia na siebie jednocząstkowych dywanów w taki sposób, że każda cząstka zajmuje inny stan początkowy odpowiadający kolejnym stanom własnym małego pudła. Wyłaniające się w wyniku takiego nałożenia struktury dywanowe znacznie bardziej wyróżniają doliny i granie przedstawione na rys. 4.

Analityczna analiza wyrażenia na jednocząstkową gęstość pozwoliła określić kilka ciekawych własności



Rys. 4. a) Jednocząstkowy dywan kwantowy. b) Fermionowy dywan kwantowy



tych solitonopodobnych struktur. Po pierwsze, nie znikają one w granicy coraz to większej liczby atomów – ich relatywna głębokość pozostaje niezmienna. Co ciekawe, nie jest to prawda dla innych geometrii – w przypadku bardzo dużej liczby fermionów uwięzionych początkowo w jakiegokolwiek innej pułapce, np. harmoniczej, tak wyraźne struktury nie pojawiają się, a jednocząstkowa gęstość fluktuuje w wizualnie losowy sposób w trakcie ewolucji.

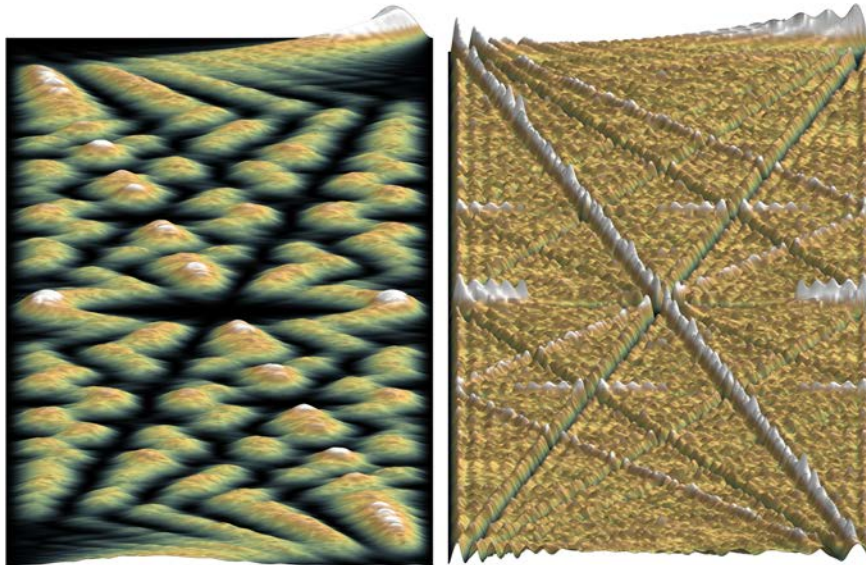
Udało się także pokazać, jakie prędkości i kształty przyjmują kolejne kanały i grzbiety. Prędkości, z którymi się poruszają, są dane przez wielokrotności pewnej podstawowej prędkości  $v_0$ , która zależy tylko od wielkości dużego pudła i nie zmieniają się wraz z liczbą cząstek. Z kolei głębokość danej struktury  $d_v$  w trakcie ewolucji zależy zarówno od jej prędkości  $v$ , jak i szerokości pudła, w którym początkowo umieszczony był gaz:

$$d_v = \text{sinc} \left( \frac{v}{v_0} \frac{D}{L} \pi \right).$$

Kształt tych struktur jest inny niż solitonów znanych z oddziałującego gazu atomowego, standardowo przy-

bierający formę kwadratu tangensa hiperbolicznego. W przypadku fermionowego dywanu jest to funkcja *sinc*, a szerokość struktury zależy zarówno od liczby cząstek, jak i początkowego ściśnięcia gazu – im więcej atomów, tym struktura staje się węższa, podobnie jak przy zmniejszaniu szerokości startowego pudła. Kilka innych własności wartych jest podkreślenia – fermionowe dywany kwantowe nie znikają w wysokiej temperaturze, a rachunki przeprowadzone dla bliskiej doświadczeniu rzeczywistości trójwymiarowej geometrii sugerują, że one mogą być zaobserwowane w obecnych doświadczeniach.

Podsumowując, udało nam się odkryć zjawisko, które z jednej strony ma dobrze ugruntowane podstawy teoretyczne, sięgające jeszcze XIX w., z drugiej dzięki platformie doświadczalnej w postaci ultrazimnych gazów atomowych może obecnie zostać zbadane w laboratorium. Porównując jednak nasz wynik do analizowanych przez wiele lat dywanów kwantowych, jedna różnica jest szczególnie uderzająca – tak jak Wolfgang Kinzel zobaczył w swoich wykresach kwantowe góry, tak my ujrzeliśmy kwantowe Himalaje:



Rys. 5. Po lewej – kwantowe góry Kinzela, po prawej – fermionowe kwantowe Himalaje

## Literatura

- [1] H. F. Talbot, *Philos. Mag.* **9**, 401 (1836).
- [2] L. Rayleigh, *Philos. Mag.* **11**, 196 (1881).
- [3] E. Schrödinger, *Naturwissenschaften* **14**, 664 (1926).
- [4] R. W. Robinett, *Phys. Rep.* **392**, 1 (2004).
- [5] E. T. Jaynes F. W. Cummings, *Proc. IEEE* **51**, 89 (1963).
- [6] F. B. J. Buchkremer, R. Dumke, H. Levsen, G. Birkl, and W. Ertmer, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3121 (2000).
- [7] E. J. Heller, *Phys. Rev. Lett.* **53**, 1515 (1984).
- [8] A. T. Forrester, R. A. Gudmundsen, and P. O. Johnson, *Phys. Rev.* **99**, 1691 (1955).
- [9] W. Kinzel, *Phys. Bl.* **51**, 1190 (1995).
- [10] P. Stifter, C. Leichtie, W. P. Schleich, and J. Marklof, *Zeitschr. Naturforsch. A* **52**, 377 (1997).
- [11] I. Marzoli, F. Saif, I. Bialynicki-Birula, O. M. Friesch, A. E. Kaplan, and W. P. Schleich, *Acta Phys. Slov.* **48**, 323 (1998).
- [12] M. Berry, I. Marzoli, and W. Schleich, *Phys. World* **14**, 39 (2001).
- [13] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, *Science* **269**, 198 (1995).
- [14] C. Chin, R. Grimm, P. Julienne, and E. Tiesinga, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1225 (2010).
- [15] P. T. Grochowski, T. Karpiuk, M. Brewczyk, and K. Rzążewski, *Phys. Rev. Research* **2**, 013119 (2020).



---

# Niezwykły wodór

Andrzej Wiśniewski

Instytut Fizyki PAN

---

**Streszczenie.** Wodór i jego związki są bardzo atrakcyjnym obiektem badań podstawowych. W ostatnich latach ukazały się prace pokazujące, iż proste związki wodoru pod ogromnymi ciśnieniami wykazują nadprzewodnictwo w rekordowo wysokich temperaturach. Wodór od wielu lat jest wykorzystywany w przemyśle, ciągle rozwijane są nowe technologie jego produkcji. W artykule omówiono podstawowe właściwości wodoru oraz jego wykorzystanie w różnych gałęziach przemysłu. Podkreślono rolę jaką może odegrać jako element systemu elektroenergetycznego, szczególnie w połączeniu z odnawialnymi źródłami energii. Opisano również realizowane w Polsce programy i projekty bazujące na wykorzystaniu wodoru.

**Słowa kluczowe:** wodór, nadprzewodnictwo związków wodoru, system elektroenergetyczny, paliwa alternatywne, produkcja wodoru

**Abstract.** Hydrogen and its compounds are a very attractive object of basic research. In recent years, a number of papers have been published showing that simple hydrogen compounds under extremely high pressure exhibit superconductivity at record high temperatures. On the other hand, hydrogen has been used in industry for many years, new hydrogen production technologies are being developed. The article discusses the basic properties of hydrogen and its use in various industries. The role it can play as a component of the power system is emphasized, especially in connection with renewable energy sources. Programs and projects based on the use of hydrogen implemented in Poland are also briefly discussed.

**Keywords:** hydrogen, superconductivity of hydrogen compounds, power system, alternative fuels, hydrogen production

---

## Podstawowe właściwości

Wodór jest najprostszym, a jednocześnie najczęściej występującym we Wszechświecie pierwiastkiem (drugim jest hel) i jednym z trzech pierwiastków najczęściej spotykanych na Ziemi, gdzie jednak w stanie wolnym występuje bardzo rzadko. W małych ilościach jest obecny w gazach wulkanicznych i w ilościach śladowych w atmosferze ziemskiej. Gaz ten jest bardzo aktywny, dlatego jest składnikiem bardzo wielu związków chemicznych, w tym związków organicznych. Oczywiście najobfitszym źródłem wodoru na Ziemi jest woda. Wodór w stanie wolnym występuje w postaci cząsteczkowej. Jest gazem bezbarwnym, o temperaturze wrzenia pod ciśnieniem normalnym 20,3 K (niższą temperaturę wrzenia ma jedynie hel: 4,2 K) i temperaturze krzepnięcia 14 K. Po raz pierwszy ciekły i stały wodór otrzymał James Dewar pod koniec XIX wieku. Jest to najlżejszy ze wszystkich gazów, jego gęstość w każdym ze stanów skupienia jest najmniejsza w porównaniu z innymi substancjami, w szczególności zestalony wodór jest ciałem stałym o najmniejszej gęstości (88 kg/m<sup>3</sup>). Wodór posiada dwa stabilne izotopy: wodór H o liczbie masowej  $A = 1$ , deuter D o  $A = 2$  oraz niestabilny izotop tryt T o  $A = 3$  (czas połowicznego rozpadu 12 lat).

Ciągle odkrywamy jakieś nowe właściwości prostych związków wodoru, np. nadprzewodnictwo pod ciśnieniem z rekordowo wysokimi temperaturami kry-

tycznymi. Najciekawsze jednak jest to, jak ogromną rolę wodór może odegrać w energetyce, co przez długi czas nie było dostrzeżone. Dopiero w czasach, gdy wszystkie państwa, w większym lub mniejszym stopniu, podjęły starania, żeby podczas wytwarzania energii elektrycznej, jak i wszystkich innych dóbr przemysłowych, zmniejszyć emisję dwutlenku węgla do atmosfery, zaczęto interesować się wodorem jako między innymi:

- magazynem energii (zastępującym w tej roli elektrownie szczytowo-pompowe czy baterie litowo-jonowe);
- paliwem wykorzystywanym w:
  - ogniwach paliwowych stacjonarnych czy mobilnych (napęd pojazdów),
  - „klasycznych” turbinach gazowych (gdzie wodór jest domieszką);
- chłodziwem dla:
  - nadprzewodzących kabli przesyłowych prądu stałego,
  - turbin w elektrowniach.

Wszystkie wyżej wymienione zastosowania wodoru są niezbędne, jeśli myśli się o stworzeniu systemu energetycznego, w którym istotną rolę mają spełniać odnawialne źródła energii (OZE), takie jak farmy wiatrowe (na morzu i na lądzie) czy farmy fotowoltaiczne. Dzięki wysiłkom, między innymi polskiego rządu, od

2019 roku częścią niskoemisyjnego miks energetycznego jest energetyka jądrowa. Jej rozwój pozwoli również zwiększyć produkcję wodoru metodą reformingu parowego. Zatem w świecie, w którym kluczową rolę mają pełnić OZE oraz elektrownie jądrowe, wodór, produkowany dzięki nim na masową skalę odegra bardzo istotną rolę. Będzie stabilizował system energetyczny (jako magazyn energii) i pełnił rolę generatora prądu (awaryjne generatory do 3 MW dla szpitali czy innych miejsc użyteczności publicznej). Uzasadnione jest więc nazywanie wodoru paliwem przyszłości.

Wszelkie powyżej wspomniane możliwości wykorzystania wodoru, szczególnie w nowoczesnej niskoemisyjnej gospodarce oraz związane z nimi zagadnienia fizyczne omówione są w dalszej części. Ze względu na objętość artykułu świadomie pominięto szereg zagadnień, między innymi:

- rolę wodoru we wczesnych stadiach powstawania Wszechświata po Wielkim Wybuchu;
- wykorzystanie izotopów wodoru: deuteru („ciężkiej wody”) jako moderatora w reaktorach jądrowych spalającego prędkie neutrony oraz trytu (w mieszaninie z deuterem stosuje się go jako paliwo w reaktorach kontrolowanej syntezy jądrowej oraz jako wskaźnik izotopowy do określania wieku minerałów);
- militarne zastosowania wodoru: bomba termojądrowa (wodorowa), w której głównym źródłem energii wybuchu jest niekontrolowana i samopodtrzymująca się reakcja łańcuchowa, podczas której izotopy wodoru łączą się pod wpływem bardzo wysokiej temperatury, tworząc w procesie fuzji jądrowej hel (niezbędna do zapoczątkowania fuzji temperatura uzyskiwana jest poprzez detonację ładunku jądrowego);
- edukacyjną rolę wodoru na wykładach z mechaniki kwantowej, np. analityczne rozwiązanie równania Schrödingera.

### Nadprzewodnictwo związków wodoru

Zgodnie z klasyczną teorią nadprzewodnictwa BCS<sup>1</sup>, wysokie częstotliwości drgań, silne oddziaływanie elektron-fonon i duża gęstość stanów na poziomie Fermiego są czynnikami, które mogą prowadzić do wysokich temperatur krytycznych  $T_c$ . Wysokie częstotliwości drgań sieci krystalicznej i silne oddziaływanie elektron-fonon cechują metaliczny wodór oraz związki wodoru z wiązaniami kowalencyjnymi. Biorąc to pod uwagę, Ashcroft [1] przewidywał, że pod bardzo wysokim ciśnieniem wodór

w stanie metalicznym będzie wykazywał nadprzewodnictwo w rekordowo wysokich temperaturach. Późniejsze obliczenia [2] pokazały, że metaliczny cząsteczkowy wodór wykazywałby przy skrajnie wysokich ciśnieniach nadprzewodnictwo o  $T_c = 100 - 240$  K, a wodór w postaci atomowej pod ciśnieniem rzędu 500 GPa (ciśnienie we wnętrzu Ziemi to ok. 360 GPa) miałby temperaturę krytyczną nawet wyższą od temperatury pokojowej. Jak na razie nie ma eksperymentu, który jednoznacznie potwierdziłby te przewidywania. Natomiast niedawno stwierdzono, że siarkowodór  $H_2S$  przy ciśnieniach rzędu 90 GPa przechodzi w stan metaliczny, a przy 150 GPa ulega najprawdopodobniej dekompozycji do  $H_3S$  i wykazuje nadprzewodnictwo o temperaturze krytycznej ok. 200 K [3]. Zauważono również wyraźne występowanie efektu izotopowego:  $D_xS$  wykazywał pod takim samym ciśnieniem  $T_c$  o 30-45 K niższą, co potwierdza klasyczny, zgodny z teorią BCS, fononowy mechanizm nadprzewodnictwa. Rok temu ukazała się praca tej samej grupy donosząca o rekordowo wysokiej  $T_c \approx 250$  K dla  $LaH_{10}$  pod ciśnieniem 170 GPa [4]. Obecnie jest to najwyższa temperatura, przy której obserwuje się nadprzewodnictwo (najwyższą temperaturę krytyczną pod ciśnieniem normalnym  $T_c \approx 136$  K wykazuje nadprzewodnik rtęciowy  $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$  [5]).

### Produkcja wodoru

Wodór praktycznie nie występuje w stanie wolnym, zatem rozważania na temat sposobów jego wykorzystania w gospodarce warto poprzedzić omówieniem sposobów jego wytwarzania. Pozyskanie wodoru wymaga nakładu energii. W jego produkcji przemysłowej wykorzystuje się różne metody:

1. Zdecydowanie dominującą metodą jest reforming parą wodną: gazu ziemnego, ropy naftowej i węgla (ok. 96% całej produkcji).
  - a) Podstawową (ok. 48% całej produkcji) i najtańszą (ok. 5-6 zł/kg) metodą otrzymywania wodoru jest reforming gazu ziemnego (związającego ponad 90% metanu) parą wodną. W pierwszym etapie gaz podgrzewany jest do temperatury 700-1100 °C w obecności pary wodnej i katalizatora niklowego. W wyniku rozpadu cząstek metanu powstaje CO i  $H_2$  ( $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$ ). W drugim etapie gaz będący mieszaniną tlenku węgla i wodoru poddaje się dalszemu działaniu pary wodnej i uzyskuje dalszy wzrost ilości wodoru ( $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ ). Minusem tej metody jest powstawanie, jako produktów ubocznych CO i  $CO_2$ , wyprodukowanie 1 tony wodoru wiąże się z wytworzeniem 9-12 ton  $CO_2$ .

1. Teoria BCS - mikroskopowa teoria nadprzewodnictwa ogłoszona w 1957 roku przez Johna Bardeena, Leona Coopera i Roberta Shriefera. Nazwa teorii pochodzi od inicjałów jej twórców. Za stworzenie tej teorii otrzymali oni w 1972 roku Nagrodę Nobla z fizyki (przyp. red.).

- b) Reforming ropy naftowej (ok. 30% całej produkcji).
  - c) Reforming węgla (najstarsza metoda, ok. 18% całej produkcji). Metoda ta polega na podgrzaniu węgla do temperatury ok. 900 °C, w której węgiel zamienia się w gaz i następnie jest mieszany z parą wodną w obecności katalizatora, najczęściej niklu ( $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ ).
2. Elektroliza wody (ok. 4% produkcji, cena > 12 zł/kg) pozwalająca na otrzymanie wodoru najwyższej czystości (> 99,9%), nie wymaga wysokich temperatur (temp. 50–80°C), ma dużą wydajność (70–90%) i może być realizowana za pomocą urządzeń małej skali.

Rozważane są także inne metody, m. in.: fotodysocjacja wody (pod wpływem światła słonecznego) z różnymi modyfikacjami np. metoda fotokatalityczna wykorzystująca światło słoneczne do rozpadu wody na tlen i wodór. W pierwszym etapie woda jest utleniana do nadtlenu wodoru ( $H_2O_2$ ), który jest rozkładany w wyniku niedrogiego procesu katalizy chemicznej. Wodór może być produkowany także przez najróżniejsze mikroorganizmy jako produkt uboczny procesu fotosyntezy np. przez algi.

Oczywiście ceny wodoru otrzymanego różnymi metodami zależą od aktualnych cen gazu, ropy, węgla i energii elektrycznej. Warto mieć świadomość, że zgodnie z danymi zawartymi w raporcie *Wodorowa alternatywa* [6] łączna roczna produkcja wodoru w Polsce wynosi ok. miliona ton. Stanowi to 14 % europejskiej produkcji. Według *Nature Energy* [7] aktualne ceny kształtują się następująco: przy produkcji wodoru z paliw kopalnych w dużych instalacjach przemysłowych: 1,5–2,5 euro/kg w Niemczech i 1,8–2,9 USD/kg w USA. Granica opłacalności produkcji wodoru z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii wynosi odpowiednio 3,23 euro/kg i 3,53 USD/kg.

Jeśli chodzi o produkcję wodoru, to należy pamiętać, że w swojej strategii energetycznej Unia Europejska rozróżnia wodór produkowany z surowców kopalnych – zwany „szarym” i wodór powstający z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii – zwany „zielonym”. W Europie i Polsce, póki co, produkowany jest głównie wodór „szary” – technologie jego produkcji są obecnie wydajniejsze i ekonomicznie bardziej opłacalne.

Zwrócić należy uwagę, że Komisja Europejska traktuje pozyskanie wodoru metodami elektrolizy z wykorzystaniem prądu wytwarzanego przez OZE, jako niskiemisyjną produkcję wodoru. Przy takim podejściu reforming parowy, w którym energia cieplna wytwarzana jest w sposób dotychczas stosowany w Polsce, nie jest właściwą metodą. W tej chwili rząd polski doprowadził

do zaakceptowania energetyki jądrowej jako „zielonego” źródła energii, zatem reforming parowy, dla którego źródłem ciepła byłyby reaktory jądrowe, mógłby stać się w Polsce i w Europie pełnoprawną metodą produkcji „zielonego” wodoru.

### Wodór jako ciecz kriogeniczna

Ostatnio pojawiły się prace, w których proponuje się wykorzystanie ciekłego wodoru ( $LH_2$ ) do chłodzenia nadprzewodników. Nadprzewodniki wysokotemperaturowe z powodzeniem mogą pracować w temperaturach helowych. Jeśli jednak chcemy ich w miarę powszechnie używać w sposób ekonomicznie opłacalny, to powinny być chłodzone ciekłym azotem ( $LN_2$ ). Ciekły azot ma wiele zalet: jest tani, łatwo dostępny, łatwy do przechowywania i przelewania (jego ciepło parowania jest 33 razy większe niż ciepło parowania helu i 6 razy większe niż ciepło parowania wodoru). Spośród nadprzewodników wysokotemperaturowych w praktyce realne jest wykorzystywanie związków  $REBa_2Cu_3O_{7-x}$  (RE – ziemia rzadka lub Y) lub  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ , o temperaturach krytycznych odpowiednio 92–96 K i 110 K. Testuje się np. magnesy nadprzewodzące lub kable nadprzewodzące pracujące w temperaturze ciekłego azotu (77 K). Jeśli te materiały zostałyby schłodzone do niższej temperatury, szereg ich istotnych parametrów, np. wartości prądów krytycznych, uległoby istotnej poprawie. Z punktu widzenia zastosowań atrakcyjnym nadprzewodnikiem jest dwuborek magnezu  $MgB_2$  o temperaturze krytycznej 39 K. Warto podkreślić, że związek ten nie zawiera pierwiastków ziem rzadkich, ani pierwiastków szkodliwych dla środowiska. Dwuborek magnezu w postaci ceramiki, w przeciwieństwie do nadprzewodników wysokotemperaturowych z miedzią, nie stwarza problemów związanych ze znacznym osłabieniem wartości prądów krytycznych na granicach ziaren. Z tego materiału łatwiej jest wytwarzać długie odcinki taśm i drutów nadprzewodzących o wysokich wartościach prądów krytycznych. Możliwość chłodzenia do temperatury ciekłego wodoru, a nie ciekłego helu, jest więc w przypadku tego materiału niezwykle atrakcyjna. Na przykład grupa japońskich naukowców [8] z sukcesem przetestowała krótkie odcinki nadprzewodzącego drutu z  $MgB_2$  zanurzone w  $LH_2$ . Drutami tymi płynął prąd o natężeniu 500 A w zewnętrznym polu magnetycznym do 5,5 T. Wykorzystanie  $LH_2$  w nadprzewodnictwie jest ciągle na etapie wstępnych prac badawczych, lecz ze względu na ograniczone zasoby helu, być może w niedalekiej przyszłości ciekły wodór zacznie z powodzeniem zastępować ciekły hel.

### Chłodzenie wodorem

Chłodzenie gazowym wodorem stosuje się w wielu dużych elektrowniach. Podczas pracy generatorów wytwarzane jest ciepło, które musi być wydajnie odprowadzane, inaczej wzrost temperatury może doprowadzić do awarii. Z reguły wirniki generatorów mniejszych mocy są chłodzone powietrzem. Przy większych mocach (powyżej 100 MW) stosuje się wodór, który ma ponad 14 razy większą zdolność odbierania ciepła niż powietrze i znacznie od niego niższą lepkość. Wodór stosowany do chłodzenia musi być bardzo czysty. Należy również pamiętać, że wodór, szczególnie w mieszaninie z tlenem, jest bardzo łatwopalny i ma bardzo niską energię zapłonu (12 razy mniejszą niż metan), stwarza więc zagrożenie pożarem i wybuchem<sup>2</sup>. Koszty jego wytwarzania są stosunkowo wysokie, a sposób transportowania i użytkowania jest obwarowany rygorystycznymi przepisami, co nie zmienia faktu, że przy odpowiedniej konstrukcji instalacji, zabezpieczeniach oraz produkcji w miejscu wykorzystania, wodór jest optymalnym chłodziwem generatorów dużej mocy.

### Zastosowanie wodoru w przemyśle

Wodór znajduje zastosowanie głównie w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, hutniczym i spożywczym. Wykorzystuje się go m. in. do otrzymywania amoniaku używanego do produkcji nawozów sztucznych. W petrochemii jest niezbędny w procesach: hydorafinacji (w celu obniżenia zawartości związków siarki, azotu i tlenu w produktach i półproduktach przeróbki ropy naftowej), hydrokrakingu (w celu przerobu ciężkich frakcji ropy naftowej na benzynę i oleje) i reformingu (w celu podwyższenia liczby oktanowej benzyny). Hutnictwo stosuje go do reakcji redukcji rudy żelaza dla otrzymania surowego żelaza do produkcji stali. W przemyśle spożywczym (ozn. symbolem E-949) używany jest do utwardzania (uwodorniania) nienasyconych tłuszczów roślinnych czyli np. do produkcji margaryny.

### Magazynowanie i przesyłanie wodoru

Wodór, podobnie jak gaz ziemny, może być przesyłany systemem gazociągów lub w postaci ciekłej pod znacznie większym ciśnieniem transportowany cysternami.

---

2. Przekonali się też o tym wybitni polscy fizycy. W 1938 roku Jan Błaton, Szczepan Szczeniowski, Mieczysław Wolfke i Stanisław Ziemecki podjęli próbę wypuszczenia balonu o nazwie Gwiazda Polski z aparaturą fizyczną w celu prowadzenia badań stratosfery i promieniowania kosmicznego. Balon napelniony wodorem w czasie przygotowań do startu w Dolinie Chochołowskiej zapalił się. Uratowano większość powłoki, zakupiono hel i zaplanowano wykonanie następnego lotu w okolicy Stryja we wrześniu 1939 roku (na podstawie: <https://www.fizyka.pw.edu.pl/index.php/pl/wydzial/historia-wydzialu-fizyki/item/195>)

Przechowywanie i transportowanie wodoru ciekłego jest łatwiejsze, gdyż ciekły wodór zajmuje ok. 1/800 objętości tej samej ilości wodoru gazowego. Ciekły wodór cechuje również wysoka czystość, jednak jego skraplanie jest procesem kosztownym.

Ciekawą propozycją jest rozwijana w Japonii metoda skraplania wodoru z wykorzystaniem materiałów wykazujących duży efekt magnetokaloryczny. Zjawisko magnetokaloryczne polega na zmianie temperatury magnetyka przy zmianie natężenia lub kierunku zewnętrznego pola magnetycznego. Mechanizm jest następujący: przyłożenie, w warunkach adiabatycznych, zewnętrznego pola magnetycznego do materiału ferromagnetycznego, porządkuje jego momenty magnetyczne, a przez to zmniejszona zostaje magnetyczna część entropii całkowitej układu. W odwrotnym procesie adiabatycznego zmniejszenia natężenia pola magnetycznego następuje obniżenie temperatury ferromagnetyka. Kluczowe dla tej metody jest znalezienie materiałów magnetycznych, które obniżą temperaturę wodoru od temperatury ciekłego azotu (77 K) do temperatury 20 K. Jak na razie, nieznany jest materiał, który zapewniłby tak duże obniżenie temperatury. Dysponujemy jednak związkami, które zapewniają obniżenie temperatury o ok. 20 K. Konieczne jest więc zastosowanie w skraplarce, wykorzystującej zjawisko magnetokaloryczne, kilku różnych magnetyków i chłodzenie w kilku etapach. Poza doborem składu optymalnych materiałów, istotny jest także kształt magnetyka. Pożądana jest jak największa powierzchnia zapewniająca dużą intensywność wymiany ciepła pomiędzy chłodzonym medium i magnetykiem, np. sferyczne cząstki magnetyka o średnicy 0,3–0,5 mm.

W Polsce analizowane są możliwości magazynowania wodoru w kawernach solnych (pusta przestrzeń w skałach, powstała w wyniku naturalnych procesów ługowania), które służą dzisiaj do utrzymywania zapasów gazu ziemnego.

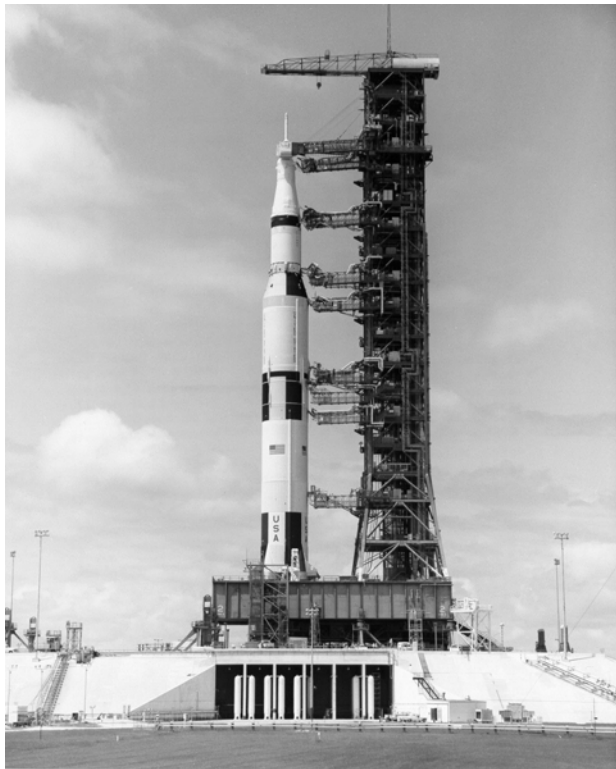
Warto wspomnieć, że w Polsce realizowany jest program *Magazynowanie wodoru* finansowany przez NCBiR, którego celem jest opracowanie technologii magazynowania wodoru oraz zamówienie prototypu zasobnika wodorowego do zastosowań mobilnych. Ze względu na małe rozmiary, cząsteczki wodoru łatwo przenikają nawet przez drobne szczeliny – zbiornik na wodór musi być bardzo szczelny, a jednocześnie przy zastosowaniach mobilnych lekki (np. wykonany z włókna węglowego pokrytego warstwą polimerową). Program ma wspierać nowe źródła energii dla pojazdów, które mogłyby być wykorzystywane zamiast benzyny lub oleju napędowego, czy nawet energii elektrycznej. Zmagazynowany wodór może być także wykorzystywany do zasilania ogniwo paliwowych, wytwarzających prąd elektryczny. Wodór może napędzać nie tylko



samochody osobowe, ale także cięższe pojazdy – ciężarówki, autobusy lub pociągi.

### Wodór jako paliwo konwencjonalne

Pod względem energii ze spalania, w przeliczeniu na jednostkę masy, wodór przewyższa każde inne paliwo. Wartość opałowa wodoru i ciepło spalania to odpowiednio 120 MJ/kg i 142 MJ/kg. Wielkości te przewyższają znacznie wartość opałową i ciepło spalania benzyny, propanu czy metanu, odpowiednio: 44–50 MJ/kg i 47–56 MJ/kg. Oczywiście trzeba pamiętać, że ze względu na bardzo małą gęstość wodoru w stanie lotnym potrzebna jest dużo większa objętość tego gazu, aby otrzymać określoną ilość energii. W przeciwieństwie do paliw węglowych podczas spalania wodoru nie powstają szkodliwe produkty uboczne. Jako paliwo konwencjonalne wodór stosowany jest głównie w raketach. Pierwszy raz NASA użyła silnika o napędzie wodorowo-tlenowym pod koniec roku 1963 (rakietę typu Atlas). Ciekły wodór został użyty w rakiecie Saturn-Apollo 5 (ryc. 1) podczas misji księżycowych, a także w wahadłowcach. Również europejskie cywilne rakiety typu Ariane są wynoszone na orbitę za pomocą silników napędzanych ciekłym wodorem.



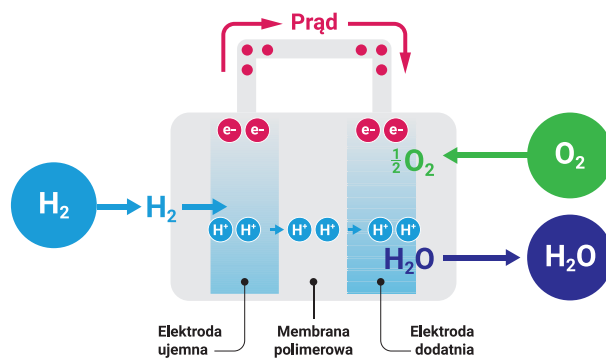
Ryc. 1. Rakietę Saturn-Apollo 5, napęd II członu korzystał z 6 silników na ciekły wodór i ciekły tlen (dzięki uprzejmości NASA)

Kilka firm samochodowych (przede wszystkim BMW i Mazda), wyprodukowało też modele samochodów wykorzystujących wodorowy silnik spaliny.

### Ogniwa paliwowe

Ogniwa paliwowe jako źródła energii elektrycznej mają swoją oczywistą zaletę w porównaniu z ogniwami galwanicznymi (baterie, akumulatory) – nie trzeba ich wcześniej ładować (dostarczać energii), a jedynie wystarczyć dostarczać paliwo. Większość ogniw paliwowych to ogniwa wodorowe, wykorzystujące wodór w obszarze anody oraz tlen w obszarze katody, które jako produkt uboczny wytwarzają tylko parę wodną. Zasada działania ogniw paliwowych, w których wodór reaguje z tlenem, w wyniku czego powstaje prąd elektryczny i woda, jest procesem odwrotnym do procesu elektrolizy, podczas którego pod wpływem prądu elektrycznego woda rozdziela się na tlen i wodór.

Najczęściej spotykane są ogniwa wodorowo-tlenowe z membraną do wymiany protonów, która jest cienką warstwą polimeru przewodzącego protony, rozdzielającą anodę i katodę. Gazowy wodór zostaje utleniony w obszarze porowatej anody, w wyniku czego powstają protony:  $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ . W obszarze katody tlen reaguje z elektronami:  $\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}^{2-}$ . Membrana pozwala tylko na ruch protonów (przepływ od anody do katody), nie przepuszcza natomiast innych jonów, w tym anionów tlenkowych  $\text{O}_2^-$  (ruch od katody do anody). Kationy wodorowe po dotarciu do przestrzeni katodowej reagują z anionami tlenkowymi, tworząc wodę lub parę wodną. Elektrony z anody docierają do katody poprzez obwód elektryczny, wytwarzając prąd, którym można zasilać urządzenia. Schemat ogniwa pokazany jest na ryc. 2.



Ryc. 2. Schemat wodorowo-tlenowego ogniwa paliwowego

Istnieją także ogniwa paliwowe, w których zamiast wodoru wykorzystuje się np. metan. Sprawność takich ogniw jest mniejsza i oprócz pary wodnej powstaje w nich także dwutlenek węgla.

Wodór jest także wykorzystywany w najstarszym typie ogniw, w ogniwach paliwowych ze stałym elektrolitem tlenkowym (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC), w których elektrolit ciekły zastąpiony jest przez ceramiczną membranę będącą dobrym przewodnikiem jonów tlenu. Elektrolitem jest np. warstwa ceramiczna

z tlenku cyrkonu  $ZrO_2$  stabilizowanego tlenkiem itru  $Y_2O_3$ , która w temperaturze  $1000^\circ C$  jest doskonałym przewodnikiem anionów tlenowych. W ogniwie tego typu mogą być stosowane różne paliwa: oprócz wodoru także CO lub bardziej złożone gazy, jak metan, propan czy etan.

Ogniwa paliwowe są coraz częściej stosowane w samochodach osobowych, głównie produkcji japońskiej (Toyota, Honda, Nissan, Lexus) i koreańskiej (Hyundai). W Japonii produkuje się także autobus (Toyota FC Bus) napędzany wodorowymi ogniwami paliwowymi. W 2016 na targach motoryzacyjnych w Hanowerze pokazano również polski miejski autobus Ursus City Smile Fuel Cell Electric Bus (ryc. 3) napędzany przez wodorowe ogniwa paliwowe, o zasięgu między tankowaniami 400 km. Niedawno w Niemczech pierwszy na świecie pociąg pasażerski z wodorowymi ogniwami paliwowymi (Coradia iLint) uzyskał zezwolenie Niemieckiego Urzędu Transportu Kolejowego na przewożenie pasażerów.



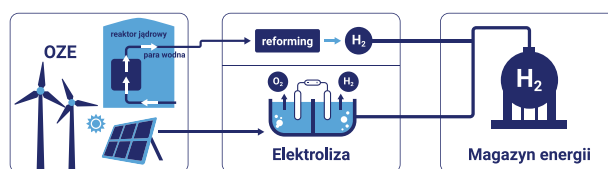
Ryc. 3. Polski miejski autobus Ursus City Smile Fuel Cell Electric Bus napędzany przez wodorowe ogniwa paliwowe (dzięki uprzejmości Ursus SA)

Szereg informacji o ogniwach paliwowych można znaleźć np. na stronie [www.ogniwa-paliwowe.com/](http://www.ogniwa-paliwowe.com/)

### Wodór jako element systemu elektroenergetycznego

Bardzo istotną kwestią prawidłowego działania sieci elektroenergetycznej jest możliwość magazynowania energii elektrycznej, gdy jej produkcja jest większa niż aktualne zapotrzebowanie, oraz jej wykorzystanie w okresach zwiększonego zapotrzebowania. Dzięki temu praca elektrowni nie musi być dostosowywana do chwilowych potrzeb. Obecnie jako magazyny energii zdecydowanie dominują elektrownie szczytowo-pompowe. Efektywność odzyskiwania energii w takich elektrowniach jest rzędu 80%. Ich pewną wadą jest konieczność wykorzystania dwóch zbiorników wody o dużej różnicy wysokości, co jest trudne do osiągnięcia na terenach nizinnych.

Wodór może odegrać bardzo ważną rolę w magazynowaniu energii oraz zapewnieniu stabilności systemu elektroenergetycznego. Ciągłe rośnie udział tzw. odnawialnych źródeł energii (zwłaszcza energii wiatrowej i słonecznej) w produkcji energii, w Polsce jest on obecnie na poziomie 11-12% (w skali światowej to ok. 24%). Nie dyskutując z argumentami zwolenników i krytyków (głównie opłacalność ekonomiczna i np. energochłonność wytworzenia aluminium, z którego wyprodukowany jest wiatrak) obecność takich źródeł energii trzeba przyjąć jako niepodważalny fakt. Dostępność energii słonecznej i energii wiatru nie jest stabilna w czasie, potrzebne są więc efektywne metody magazynowania energii elektrycznej i udostępniania jej w chwilach zwiększonego zapotrzebowania. Wodór zapewnia taką możliwość.



Ryc. 4. Schemat systemu energetycznego wykorzystującego wodór pozyskiwany z odnawialnych źródeł energii i elektrowni jądrowej

Okresowe nadmiary energii elektrycznej produkowane przez baterie słoneczne lub wiatraki mogą być w bardzo prosty sposób wykorzystane do produkcji wodoru poprzez elektrolizę wody (ryc. 4). Jeśli z ogniwem paliwowym połączy się baterie słoneczne, to w takim układzie wodór jest produkowany w ciągu dnia z energii słonecznej, a w nocy wykorzystywany jest w ogniwie. Sprawność takiego procesu wynosi około 30–40%. Analogiczne rozwiązanie, zrealizowane w praktyce w Holandii, można zastosować w połączeniu z elektrownią wiatrową. Wytworzony i zmagazynowany wodór może być wykorzystany jako źródło energii nawet po długim czasie.

### Wodór w Polsce

PKN Orlen jest jednym z największych producentów wodoru na świecie. W produkcję i wykorzystanie wodoru inwestują również Grupa Lotos, Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo (PGNiG) i Jastrzębska Spółka Węglowa (JSW). Orlen prowadzi już sprzedaż wodoru dla aut osobowych na dwóch stacjach w Niemczech i planuje uruchomić taką sprzedaż w Czechach. Grupa Lotos intensywnie pracuje nad projektem dwóch stacji tankowania wodoru – w Warszawie oraz w Gdańsku. PGNiG rozpoczęło prace nad projektami wykorzystania wodoru w energetyce i sektorze motoryzacyjnym (nawiązując współpracę z Toyotą Motor Poland). Spółka sprawdzi także możliwości magazynowania i transportu wodoru siecią gazową. W tym roku

Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ogłosiło projekt pod hasłem e-Van, który ma doprowadzić do stworzenia nowych elektrycznych i wodorowych samochodów dostawczych. Samochód zasilany wodorem powinien na paliwie dostarczoną w trakcie jednego tankowania pokonywać co najmniej 400 km i mieć ładowność minimum 1000 kg. Orlen i bydgoska Pesa podpisały list intencyjny i rozpoczęły testy pojazdów szynowych zasilanych wodorem, mając za cel wdrożenie ich w komercyjnych rozwiązaniach w lokomotywach towarowych i pojazdach szynowych do przewozu osób. Możliwość zastosowania wodoru w ciepłownictwie poprzez wprowadzenie ok. 10% wodoru do sieci przesyłających gaz ziemny zachęciło JSW do rozpoczęcia prac nad pozyskiwaniem wodoru z gazu koksowniczego; tak pozyskany wodór byłby wykorzystywany w transporcie.

Obecnie Orlen w procesie produkcyjnym wytwarza na godzinę blisko 45 ton wysokiej jakości „szarego” wodoru, Lotos – 13 ton. Orlen i Lotos planują, po uruchomieniu farm wiatrowych na morzu, wykorzystanie nadwyżki energii elektrycznej pochodzącej z farm wiatrowych do produkcji „zielonego” wodoru metodą elektrolizy. PGNiG uruchomiło projekt badawczy związany z wytwarzaniem wodoru metodą elektrolizy z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. Bada także możliwości magazynowania wodoru w magazynach kawernowych, wykorzystywanych dotychczas do magazynowania gazu. Dodatkowo pod koniec 2019 ogłoszono program Pomorska Dolina Wodorowa, której celem jest wdrożenie na Pomorzu transportu wykorzystującego „zielony” wodór, m.in. realizowany ma być projekt *Hy-way to Hel*, czyli organizacja transportu szynowego i morskiego na Helu zasilanego wodorem oraz program umożliwiający dostarczenie minimum 2000 ton „zielonego” wodoru rocznie na potrzeby transportu publicznego.

Jak widać, wodór powinien stanowić istotny element systemu energetycznego w Polsce i przyczynić się do redukcji emisji CO<sub>2</sub>. Może również odegrać kluczową rolę w magazynowaniu energii i bilansowaniu systemu elek-

troenergetycznego wykorzystującego odnawialne źródła energii. Problemem fundamentalnym wydaje się być strona ekonomiczna – w jaki sposób obniżyć koszty wytwarzania, przechowywania i dystrybucji wodoru – i tu rozwiązaniem powinny być programy badawcze realizowane w polskich ośrodkach naukowych.

## Literatura

- [1] N. W. Ashcroft “Metallic Hydrogen: A High-Temperature Superconductor?” *Phys. Rev. Lett.* **21**, 1748 (1968).
- [2] J. M. McMahon, M. A. Morales, C. Pierleoni and D. M. Ceperley “The properties of hydrogen and helium under extreme conditions” *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1607 (2012).
- [3] A. P. Drozdov, M. I. Eremets, I. A. Troyan, V. Ksenofontov, S. I. Shylin “Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system” *Nature* **525**, 73 (2015).
- [4] A. P. Drozdov, P. P. Kong, V.S. Minkov, S. P. Besedin, M. A. Kuzovnikov, S. Mozaffari, L. Balicas, F. F. Balakirev, D. E. Graf, V. B. Prakapenka, E. Greenberg, D. A. Knyazev, M. Tkacz, M. I. Eremets “Superconductivity at 250 K in Lanthanum Hydride under High Pressures” *Nature* **569**, 528 (2019).
- [5] E. V. Antipov, A. M. Abakumov and S. N. Putilin “Chemistry and structure of Hg-based superconducting Cu mixed oxides” *Supercond. Sci. Technol.* **15**, R31 (2002).
- [6] [http://static.300gospodarka.pl/media/2019/04/alternatywa\\_wodorowa\\_raport.pdf](http://static.300gospodarka.pl/media/2019/04/alternatywa_wodorowa_raport.pdf)
- [7] G. Glenk and S. Reichelstein “Economics of converting renewable power to hydrogen” *Nature Energy* **4**, 216 (2019).
- [8] Y. Shirai, M. Shiotsu, H. Tatsumoto, H. Kobayashi, Y. Naruo, S. Nonaka, Y. Inatani “Critical Current Test of Liquid Hydrogen Cooled HTC Superconductors under External Magnetic Field” *Physics Procedia* **81**, 158 (2016).

---

# Zderzenia elektronowe w spektroskopii stanów wzbudzonych cząsteczek

Mariusz Zubek\*

Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechnika Gdańska

---

**Streszczenie.** W spektroskopii, stany wzbudzone cząsteczek zwykle bada się metodami optycznymi, które pozwalają rejestrować stany dozwolone optycznymi regułami wyboru (stany singletowe). Wykorzystanie własności zderzeń elektronów z cząsteczkami, badanych za pomocą wiązkowych spektrometrów elektronowych, umożliwia obserwację stanów wzbudzonych, do których przejścia optyczne są wzbronione (stany trypletowe). W artykule przedstawiono elektronową spektroskopię zderzeniową oraz przykładowe badania cząsteczek azotu i pirydazyny.

**Słowa kluczowe:** stany wzbudzone, spektroskopia zderzeniowa, zderzenia elektronowe

**Abstract.** An excited states of molecules are usually studied using optical methods, which enable observation of the excited states allowed by the optical selection rules (singlet states). An electron collisions with molecules, investigated using crossed-beam electron spectrometers, permit to investigate excited states that are optically-forbidden (triplet states). In this article, an electron collision spectroscopy is presented and illustrated by results obtained for nitrogen and pyridazine molecules.

**Keywords:** excited states, energy-loss spectroscopy, electronic collisions

---

## 1. Wstęp

Powstanie elektronowej spektroskopii zderzeniowej, która wykorzystuje zderzenia elektronów do badania atomów i cząsteczek, można datować od momentu zidentyfikowania elektronu przez Thomsona [1] jako cząstki obdarzonej masą i ładunkiem w 1897 roku. W 1903 roku pojawiła się pierwsza praca, opublikowana przez Lenarda [2], w której przedstawiono badania „absorpcji” wiązki elektronów w gazie, znajdującym się pod obniżonym ciśnieniem. Elektron uważano za podlegający absorpcji, gdy był odchylany z wiązki pierwotnej lub tracił część swojej energii pod wpływem zderzenia z drobinami gazu. Lenard [2] zauważył, że transmisja elektronów w gazie silnie zależy od ich prędkości. Do pomiaru przekrojów czynnych na zderzenia, zwłaszcza dla powolnych elektronów, często stosowane było urządzenie zbudowane przez Ramsauera<sup>1</sup> [3]. Zastosowano w nim układ elektrod ze szczelinami oraz pole magnetyczne do wytworzenia wiązki elektronów o określonej energii. Pierwszym doświadczeniem rejestrującym proces wzbudzenia w wyniku zderzeń z elektronami było klasyczne doświadczenie Francka i Hertza [4], przeprowadzone w 1914 roku w parach rtęci. Ukazało ono kwantową naturę stanów elektronowych materii. W latach 20.

XX wieku odkrycie minimum Ramsauera–Townsenda w przekrojach czynnych gazów szlachetnych [5, 6] oraz pomiary rozkładów kątowych rozproszenia elektronów [7] stymulowały rozwój mechaniki kwantowej. W drugiej połowie XX wieku rozwój technologii i urządzeń wykorzystujących zjawiska fizyczne w plazmie, laserów gazowych, plazmowego wytrawiania w przemyśle elektronicznym czy lamp luminescencyjnych [8], stworzył potrzebę głębszego poznania procesów zderzeń elektronowych w ośrodkach gazowych. Rozpoczęto intensywne badania wzbudzenia oscylacyjnego i elektronowego cząsteczek oraz procesów tworzenia jonów dodatnich i ujemnych. Ważną rolę spełniło tu odkrywanie nowych zjawisk w górnych warstwach atmosfery Ziemi i innych planet, w astrofizyce gwiazd i obłoków materii międzygwiazdnej [9]. Czynniki te przyspieszały powstawanie nowych technik spektrometrii elektronowej, w tym konstrukcji spektrometrów elektronowych o wysokiej rozdzielczości energetycznej, metod analizy i detekcji elektronów i jonów [10]. Przyczyniały się one również do rozwoju metod teoretycznych opisu procesów zderzeniowych [11]. W ostatnich latach rozwinęły się nowe zastosowania wiązki elektronów jako narzędzia badawczego w inżynierii materiałowej, badaniach zjawisk powierzchniowych, nanolitografii FEBIP (Focused Electron Beam Ion Processing) [12], a zwłaszcza w badaniach biomedycznych. W związku z rozwojem radio-

---

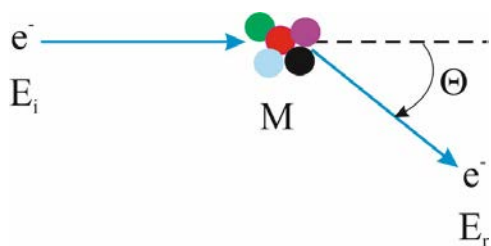
\*[orcid.org/0000-0003-4114-8012](https://orcid.org/0000-0003-4114-8012)

1. W latach 1921–1928 Carl Ramsauer był profesorem fizyki w Technische Hochschule Danzig, obecnie Politechnika Gdańska.



terapii w leczeniu chorób nowotworowych i poszukiwaniem bardziej efektywnych metod terapeutycznych, przedmiotem szczególnego zainteresowania są mechanizmy oddziaływania promieniowania jonizującego na materię biologiczną. Ponieważ ważną rolę w tych mechanizmach spełniają powolne elektrony wtórne licznie generowane w tkance biologicznej, metodami spektroskopii zderzeniowej bada się cząsteczki, które spełniają rolę biologicznych analogów fragmentów helisy DNA [13].

Metodyka pomiarów wykonywanych w elektronicznej spektroskopii zderzeniowej za pomocą wiązkowego spektrometru elektronowego przedstawiona jest schematycznie na rys.1. Wiązka elektronów o energii  $E_i$  wytworzona w źródle spektrometru zderza się z cząsteczkami  $M$  wprowadzanymi w wiązkę molekularnej (biegnącej prostopadle do płaszczyzny rysunku) do centrum zderzeń. Elektrony o energii końcowej  $E_r$  po zderzeniu niesprężystym, w którym wzbudzana jest cząsteczka  $M$  ( $E_r < E_i$ ), rejestrowane są pod kątem rozproszenia  $\Theta$  za pomocą analizatora elektronów rozproszonych. Różnica energii  $\Delta E = E_i - E_r$  jest energią straconą przez elektron w zderzeniu i jest ona równa energii wzbudzenia cząsteczki. Pomiar energii straconej  $\Delta E$  pozwala więc wyznaczyć energię wzbudzenia. Dla otrzymania widma wzbudzenia elektronowego badanych cząsteczek, to jest zależności liczby rozproszonych elektronów od energii wzbudzenia, w pomiarze zmienia się  $\Delta E$  poprzez zmianę albo energii końcowej  $E_r$  rejestrowanych elektronów przy stałym  $E_i$ , albo energii  $E_i$  elektronów padających przy stałym  $E_r$ . Pomiar wykonuje się przy ustalonym kącie rozproszenia  $\Theta$ .



Rys. 1. Schemat procesu zderzenia

Widmo wzbudzenia odzwierciedla pasma wzbudzenia stanów elektronowych cząsteczki. Natężenie elektronów rozproszonych jest proporcjonalne do różniczkowego przekroju czynnego na wzbudzenie, a zależność kątowa rozproszenia zależy od rodzaju oddziaływania elektron–cząsteczka i natury stanu wzbudzonego.

## 2. Oddziaływanie elektron–cząsteczka

W centrum zderzeń zachodzą pojedyncze zderzenia elektronów z cząsteczkami gazu. W oddziaływaniu elektronu z cząsteczką w procesie zderzenia można wyróżnić składnik statyczny, korelacyjno-polaryzacyjny, wy-

mienny i pochodzący od oddziaływania spin–orbita. Składnik statyczny opisuje oddziaływanie kulombowskie pomiędzy elektronem a ładunkami cząsteczki. Potencjał oddziaływania statycznego można wyznaczyć z dobrą dokładnością używając metod obliczeniowych chemii kwantowej. Rozwijając potencjał statyczny w szereg składników multipolowych wyodrębniamy oddziaływanie dipolowe, kwadrupolowe i składniki wyższych rzędów. Składnik korelacyjno-polaryzacyjny opisuje oddziaływanie pomiędzy padającym elektronem, a zaburzonym rozkładem ładunku cząsteczki, przy czym bierzemy pod uwagę jedynie wkład od deformacji polaryzacyjnej rozkładu ładunku. Dla niezbyt dużych energii elektronów, gdy indukowane zmiany w rozkładzie ładunku cząsteczki zachodzą dostatecznie szybko (przybliżenie adiabatyczne), składnik polaryzacyjny można z dobrym przybliżeniem wyrazić przez oddziaływanie elektronu z dipolem indukowanym w cząsteczce. Dla większych energii elektronów oddziaływanie polaryzacyjne jest słabsze od przewidzianego przez model indukowanego dipola (efekty nieadiabatyczne). Oddziaływanie wymienne jest krótkozasięgowe, nabiera znaczenia dla niskich energii elektronów i maleje wraz ze wzrostem energii. Dla ułatwienia rozwiązania równania opisującego rozproszenie elektronu wprowadza się zwykle modelowe potencjały wymienne, które odpowiadają za wymianę padającego elektronu z elektronami cząsteczki. Oddziaływanie spin–orbita jest oddziaływaniem magnetycznym spinu padającego elektronu z polem powstającym w ruchu orbitalnym elektronu w otoczeniu cząsteczki.

## 3. Elektronowa spektroskopia zderzeniowa

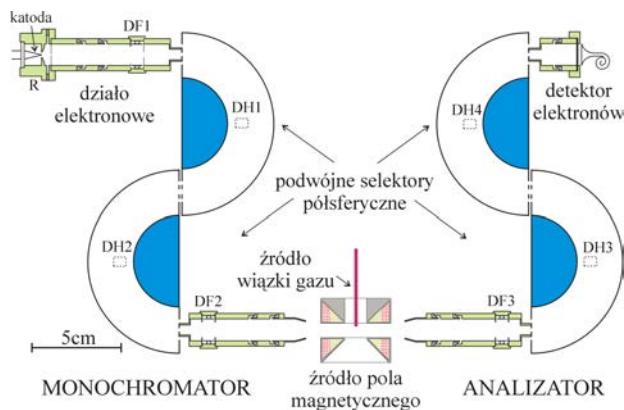
Wybór odpowiednich warunków pomiaru widm wzbudzenia elektronowego cząsteczek, energii elektronów padających  $E_i$  oraz kąta rozproszenia  $\Theta$  (rys. 1), stwarza możliwość selektywnej obserwacji stanów elektronowych. W pewnych warunkach pomiaru w widmach wzbudzenia rejestruje się stany, do których przejścia są dozwolone optycznymi regułami wyboru dla przejść dipolowych, podczas gdy w innych rejestruje się stany, do których przejścia są wzbronione tymi regułami [14–16]. Dla wysokich i pośrednich energii elektronów padających  $E_i$  ( $E_i > 20$  eV) i małych kątów rozproszenia  $\Theta$  ( $\Theta < 20^\circ$ ) w widmach dominują stany singletowe (jeśli stan podstawowy cząsteczki jest stanem singletowym) i widma są zgodne z widmami absorpcyjnymi cząsteczek. Taki kształt widm można wyjaśnić zakładając w klasycznym modelu zderzenia, że zachodzi ono dla większych parametrów zderzenia i padający elektron oddziałuje na cząsteczkę podobnie jak fala elektromagnetyczna. Z kolei wzbudzenie do stanów elektronowych

wzbronionych optycznymi regułami wyboru dla zmiany spinu, orbitalnego momentu pędu oraz symetrii termów przeważa w widmach mierzonych dla niższych energii elektronów padających  $E_i$  ( $E_i < 20$  eV) oraz większych kątów rozproszenia  $\Theta$  ( $\Theta > 90^\circ$ ). W tych warunkach, zderzenia elektronów zachodzą dla mniejszych parametrów zderzenia, gdzie pojawia się silne oddziaływanie kwadrupolowe oraz wymienne. Oddziaływanie wymienne nabiera szczególnego znaczenia dla przejść wzbronionych dla zmiany spinu, tj. dla wzbudzenia ze stanów singletowych do stanów trypletowych. Stany wzbronione optycznymi regułami wyboru obserwuje się zwłaszcza w widmach mierzonych dla rozproszenia wstecznego elektronów, tzn. dla kątów rozproszenia bliskich  $180^\circ$  [16]. W takich zderzeniach daje o sobie znać oddziaływanie polaryzacyjno-korelacyjne. Warto również zwrócić uwagę na wzbudzenie rezonansowe stanów elektronowych, które zwykle zachodzi dla energii elektronów z wąskiego zakresu powyżej progu wzbudzenia. W rozproszeniu rezonansowym padający elektron wychwytywany jest przez wzbudzoną cząsteczkę wewnątrz powstającej bariery potencjału, co prowadzi do utworzenia stanu rezonansowego jonu ujemnego (ang. *shape resonance*). Czas życia stanu rezonansowego jest rzędu  $10^{-15}$ – $10^{-13}$  sekundy i po nim jon ujemny rozpada się poprzez autoemisję elektronu. Wzbudzenie stanu elektronowego poprzez utworzenie stanu rezonansowego znacząco zwiększa natężenie jego pasma w widmie, co szczególnie dobrze widać w przypadku stanów trypletowych. Powyższe ogólne reguły obserwacji wzbudzenia elektronowego w spektroskopii zderzeniowej ukazują jej zalety w porównaniu ze spektroskopią optyczną.

#### 4. Spektrometr elektronowy

Widma wzbudzenia cząsteczek mierzy się za pomocą wiązkowych, elektrostatycznych spektrometrów elektronowych, które pozwalają rejestrować pasma wibronowe cząsteczek. Do wytworzenia wiązki elektronów padających i analizy elektronów rozproszonych, w spektrometrach używa się selektorów elektrostatycznych, powszechnie  $127^\circ$  selektora cylindrycznego oraz  $180^\circ$  selektora sferycznego [17, 18]. Selektory te zapewniają wysoką rozdzielczość energetyczną pomiarów, uzyskiwaną w wyniku generowania wiązki elektronów o małym rozmyciu energetycznym (10–50 meV) w źródle wiązki. Spektrometr elektronowy, w którym zastosowano cztery selektory półsferyczne, przedstawiony jest na rys. 2 [19]. Składa się on ze źródła wiązki elektronów padających (monochromator), analizatora rozproszonych elektronów (analizator) oraz źródła lokalnego pola magnetycznego służącego do rejestrowania rozproszenia wstecznego elektronów ( $\Theta = 90^\circ$ – $180^\circ$ ). Spektrometr

znajduje się w komorze próżniowej, w której w trakcie pomiarów utrzymuje się wysoką próżnię. W monochromatorze działo elektronowe wytwarza wiązkę elektronów, która jest ogniskowana na wejściu do podwójnego selektora półsferycznego. Elektrony opuszczające selektor z małym rozmyciem energetycznym ogniskowane są na wiązce molekularnej przez trójelementową soczewkę cylindryczną. Wiązka molekularna cząsteczek wprowadzana jest do centrum zderzeń poprzez efuzyjny wypływ badanego gazu z rurki o małej średnicy.



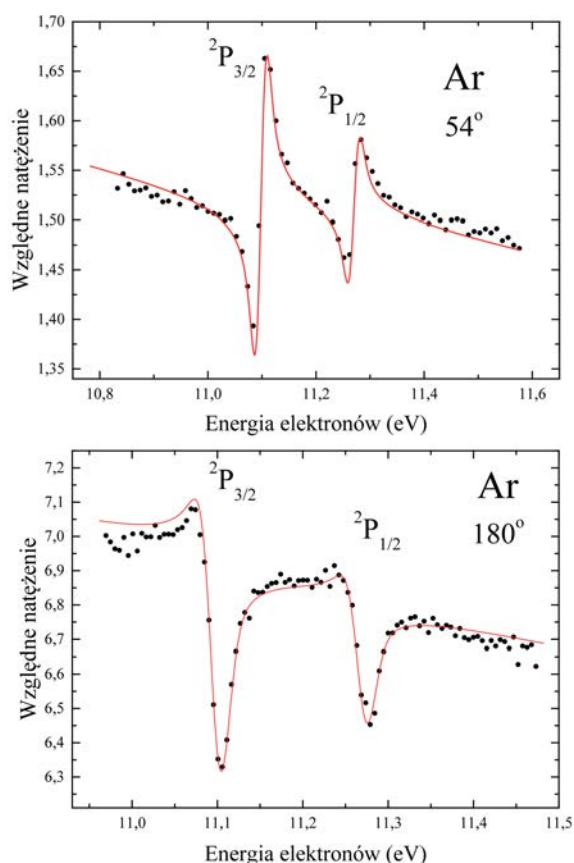
Rys. 2. Wiązkowy, elektrostatyczny spektrometr elektronowy [19]

Elektrony rozproszone pod kątem  $\Theta$  ogniskowane są w analizatorze na wejściu do selektora oraz spowalniane przez soczewkę cylindryczną do energii transmitowanej przez podwójny selektor półsferyczny. Po jego opuszczeniu rejestrowane są przez kanałowy powielacz elektronów. Analizator elektronów rozproszonych obraca się dookoła osi tworzonej przez wiązkę gazu, w zakresie kątów  $0^\circ$ – $90^\circ$  względem kierunku wiązki elektronów padających. Do przeprowadzenia pomiarów dla rozproszenia wstecznego elektronów ( $\Theta = 90^\circ$ – $180^\circ$ ) wykorzystuje się źródło lokalnego pola magnetycznego [20], które w centrum zderzeń ma niewielkie natężenie ( $\sim 1$  mT) i jest prostopadłe do płaszczyzny rozproszenia.



Rys. 3. Tory elektronów w źródle lokalnego pola magnetycznego [21]

Lokalne pole magnetyczne odchyła wiązkę elektronów padających i elektrony rozproszone. Rysunek 3 ilustruje tory elektronów dla rozproszenia sprężystego przy odchyleniu o kąt  $90^\circ$ . Pole magnetyczne rozdziela wiązkę elektronów padających i rozproszonych wstecznie pod kątem  $180^\circ$ , co umożliwia ich zarejestrowanie. Przy braku pola magnetycznego elektrony rozproszone wstecznie ( $\Theta = 180^\circ$ ) trafiają do źródła wiązki elektronów. Kąt odchylenia elektronów zależy od indukcji pola magnetycznego i zależność ta może być wykorzystana do wyboru określonego kąta rozproszenia. Lokalne pole magnetyczne jest wytwarzane przez dwie pary stożkowych cewek (rys. 2), przy czym natężenia prądów w nich płynących są tak dobrane, by magnetyczny moment dipolowy układu był równy zeru [20]. Ten warunek zapewnia szybkie zanikanie pola magnetycznego wraz z odległością od centrum zderzeń, przez co pole to nie wpływa na pracę źródła wiązki elektronów i analizatora elektronów rozproszonych.



Rys. 4. Struktury rezonansowe zarejestrowane w rozproszeniu sprężystym elektronów na atomach argonu [21]; linia ciągła przedstawia struktury wyznaczone z teoretycznych przesunięć fazowych [23]

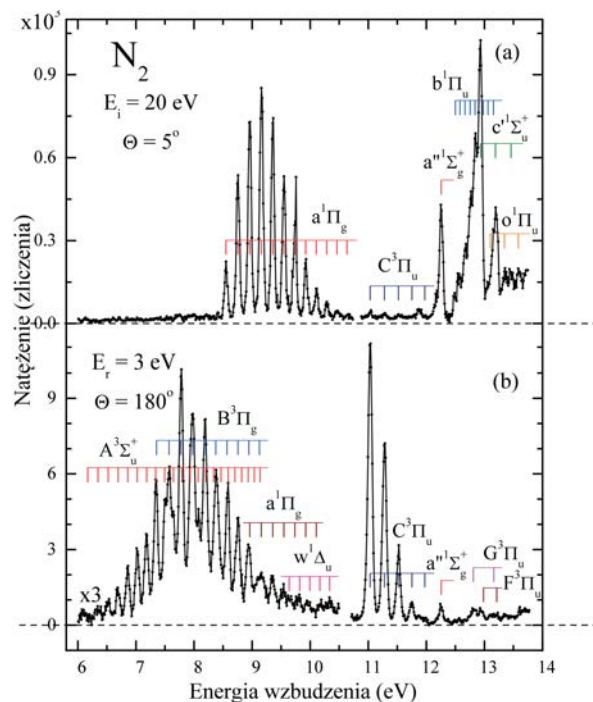
Zastosowanie podwójnego selektora półsferycznego w źródle wiązki elektronów oraz w analizatorze elektronów rozproszonych pozwala uzyskać wysoką rozdzielczość energetyczną spektrometru. Rozdzielczość ocenia się mierząc szerokości wąskich struktur rezonansowych obserwowanych w rozproszeniu elektronów. Na

rysunku 4 przedstawiono struktury rezonansowe stanów  $^2P_{3/2}$  i  $^2P_{1/2}$  obserwowane w rozproszeniu sprężystym elektronów na atomach argonu dla dwu kątów rozproszenia  $\Theta = 54^\circ$  i  $180^\circ$  [21]. Szerokość struktur jak i ich natężenie wskazują na rozdzielczość energetyczną wynoszącą 25 meV.

Soczewki elektronowe w spektrometrze (rys. 2) zostały zaprojektowane do pomiaru widm wzbudzenia w zakresie energii  $E_i$  do około 40 eV. Za pomocą spektrometru pomiary można wykonywać w dwóch modach jego pracy: przy stałej energii elektronów padających  $E_i$  lub przy stałej energii końcowej elektronów rozproszonych  $E_r$ . Energia  $E_r$  przyjmuje wartości mniejsze od  $E_i$ , a w szczególnych przypadkach może być  $E_r < 0,1$  eV. Stany elektronowe wzbudzone są wtedy dla energii tuż powyżej progów wzbudzenia i tak otrzymane widmo nosi nazwę widma wzbudzenia progowego. Do efektywnego pomiaru widm progowych dokonuje się modyfikacji soczewki analizatora poprzez wprowadzenie elektrody ekstrakcyjnej, w celu zastosowania metody penetrującego pola elektrostatycznego [22, 24, 25].

## 5. Widma wzbudzenia cząsteczek azotu

Widma wzbudzenia cząsteczek azotu są dobrym przykładem ilustrującym potencjalne możliwości obserwacji i identyfikacji stanów elektronowych w spektroskopii zderzeniowej. Wyniki otrzymane dla różnych warunków zderzeniowych [26] przedstawione są na rys. 5.



Rys. 5. Widma wzbudzenia cząsteczek azotu zmierzone dla podanych wartości energii elektronów  $E_i$  i  $E_r$  oraz kątów rozproszenia  $\Theta$  [26]

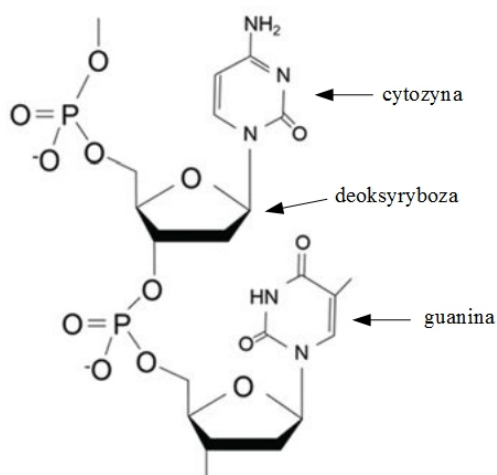
W widmie 5a otrzymanym przy energii elektronów  $E_i = 20$  eV i kącie rozproszenia  $\Theta = 5^\circ$  obserwowane jest



wzbudzenie do stanów singletowych  $a^1\Pi_g$ ,  $a''^1\Sigma_g^+$ ,  $b^1\Pi_u$  i  $c'^1\Sigma_u^+$ . Pasma stanu trypletowego  $C^3\Pi_u$  jest również rejestrowane w widmie, ma jednak znacznie mniejsze natężenie od pasm stanów singletowych. Wzbudzenie stanów  $b^1\Pi_u$  i  $c'^1\Sigma_u^+$  ze stanu podstawowego  $X^1\Sigma_g^+$  azotu jest dozwolone optycznymi regułami wyboru i ta część widma jest zgodna z widmem absorpcyjnym. Dwa pozostałe stany singletowe  $a^1\Pi_g$  i  $a''^1\Sigma_g^+$ , widoczne w widmie, są wzbronione dla przejść dipolowych ze stanu podstawowego. Pojawiają się one w pomiarach, w których  $E_i$  przybiera niezbyt wysokie wartości. W widmie 5b zmierzonym dla energii końcowej elektronów  $E_r = 3$  eV oraz dla rozproszenia wstecznego  $\Theta = 180^\circ$  dominują stany trypletowe  $A^3\Sigma_u^+$ ,  $B^3\Pi_g$  i  $C^3\Pi_u$ , wzbronione ze względu na zmianę spinu. Dużą rolę w tych procesach wzbudzenia odgrywa oddziaływanie wymienne.

## 6. Widma wzbudzenia cząsteczek pirydazyny

W procesie radioterapii w chorobach nowotworowych, pod wpływem pierwotnego promieniowania jonizującego w tkance biologicznej generowane są elektrony wtórne. Szacuje się, że powstaje ich około  $4 \times 10^4$  przy absorpcji 1 MeV promieniowania. Elektrony te oddziałując między innymi na helisę DNA powodują jej lokalne uszkodzenia w działaniu terapeutycznym. W celu poznania na poziomie molekularnym oddziaływania elektronów na helisę DNA, przeprowadza się badania zderzeń elektronów z prostymi analogami fragmentów nici DNA. Na przykład, jako analogi cytozyny i guaniny w szkielet DNA (rys. 6) wybiera się sześciocłonowe cząsteczki heterocykliczne pirymidyny i pirydazyny. Obie cząsteczki zawierają po dwa atomy azotu.



Rys. 6. Fragment helisy DNA ukazujący cytozynę, guaninę i deoksyrybozę

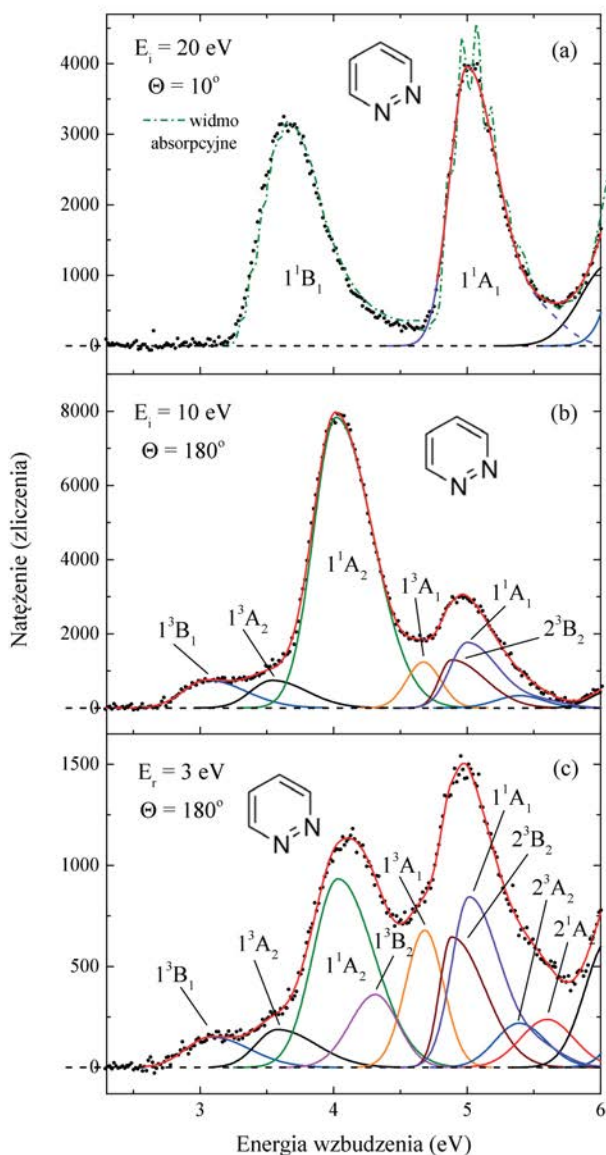
Cząsteczka pirydazyny ( $C_4H_4N_2$ ) posiada w swoim pierścieniu dwa atomy azotu, które znajdują się w sąsiednich położeniach (rys. 6). Jest ona cząsteczką izoelektronową w odniesieniu do benzenu (posiadającą taką

sama liczbę i konfigurację elektronów walencyjnych). Konfiguracja elektronowa zewnętrznych orbitali walencyjnych stanu podstawowego  $\tilde{X}^1A_1$  pirydazyny ma postać  $\dots(10a_1)^2(2b_1)^2(1a_2)^2(8b_2)^2$ . Orbitale  $2b_1$  i  $1a_2$  wiążą  $\pi$ , podczas gdy  $10a_1$  i  $8b_2$  są niewiążącymi orbitalami n wolnej pary elektronowej azotu. Najniższe nieobsadzone orbitale pirydazyny to antywiążące  $\pi^*$   $2a_2$ ,  $3b_1$ ,  $3a_2$ . Stąd walencyjne stany wzbudzone pirydazyny, leżące poniżej 6,5 eV, będą stanami  $n\pi^*$  i  $\pi\pi^*$ . Prace teoretyczne potwierdzają występowanie oddziaływania konfiguracyjnego oraz sprzężenia oscylacyjnego pomiędzy stanami walencyjnymi [27]. Doświadczalnie stany walencyjne badane były głównie w pomiarach absorpcyjnych, gdyż fluorescencja pirydazyny jak i innych związków heterocyklicznych wykazuje słabe natężenie.

Widma wzbudzenia pirydazyny zmierzone w różnych warunkach zderzeniowych [28] przedstawione są na rys. 7. W widmie z rys. 7a otrzymanym dla wyższej energii elektronów padających ( $E_i = 20$  eV) i małego kąta rozproszenia ( $\Theta = 10^\circ$ ) zarejestrowano, zgodnie z oczekiwaniem, pasma wzbudzenia do stanów singletowych. Kształt pasm i ich położenie jest w bardzo dobrej zgodności z widmami otrzymanymi w pomiarach absorpcyjnych, co przedstawia dokonane porównanie. Widma 7b i 7c otrzymane dla niższych energii  $E_i$  i  $E_r$  oraz kąta rozproszenia  $\Theta = 180^\circ$  są całkowicie odmienne od widma 7a. Wskazują one na wzbudzenie stanów elektronowych wzbronionych optycznymi regułami wyboru. Pasma tych stanów nie występują na rys. 7a. W celu wyodrębnienia pasm wibronowych stanów zarejestrowanych w trzech widmach, w pracy [28] dokonano ich analizy stosując metodę regresji i przybliżając kształt oczekiwanych pasm wzbudzenia funkcją Gaussa lub funkcją bi-Gaussa. Funkcja bi-Gaussa opisuje pasma wzbudzenia o niesymetrycznym kształcie (np. pasma na rys. 7a). W procesie iteracyjnej optymalizacji dopasowano zbiór funkcji opisujących oczekiwane pasma wzbudzenia jednocześnie do wszystkich widm uzyskanych w pomiarach [28]. Rysunki 7a, 7b i 7c przedstawiają pasma wzbudzenia wyznaczone w trzech widmach oraz końcowe krzywe dopasowania widm. W tabeli 1 zamieszczono wyznaczone wertykalne energie wzbudzenia stanów trypletowych i singletowych pirydazyny oraz porównano je z wynikami obliczeń teoretycznych [29, 30].

Widmo 7a wykazuje pasma wzbudzenia stanów singletowych  $n\pi^*$   $1^1B_1$  i  $\pi\pi^*$   $1^1A_1$ . Stan  $1^1B_1$  powstaje w przejściu elektronowym  $8b_2 \rightarrow 2a_2$  i zanika poprzez konwersję wewnętrzną energii wzbudzenia do stanu podstawowego [31]. Stan  $1^1A_1$  tworzy się z mieszania przejść  $1a_2 \rightarrow 2a_2$  i  $2b_1 \rightarrow 3b_1$ . Analiza





Rys. 7. Widma wzbudzenia pirydazyny zmierzone przy podanych warunkach zderzeniowych [28]. Zamieszczono wyznaczone pasma wzbudzenia wibronowego, ich identyfikacje oraz końcowe dopasowanie widm; dla porównania na rysunku (a) pokazano widmo absorpcyjne pirydazyny [28]

struktury oscylacyjnej widocznej w jego paśmie wzbudzenia w pomiarach absorpcyjnych wskazuje na sprzężenie wibronowe ze stanem  $1^1B_1$  lub stanem rydbergowskim  $3sa_1^1B_2$  [27].

Widma 7b i 7c wykazują wzbudzenie stanów trypletowych oraz stanów wzbronionych ze względu na zmianę symetrii termu. Pasma o największym natężeniu w widmie 7b powstaje ze wzbudzenia pirydazyny do stanu  $1^1A_2$  w przejściu  $8b_2 \rightarrow 3b_1$ . Wertykalna energia wzbudzenia stanu wynosi 4,02 eV. Wzbudzenie ze stanu podstawowego  $\tilde{X}^1A_1$  pirydazyny do stanu  $1^1A_2$  jest wzbronione ze względu na zmianę termu dla przejść dipolowych i nie występuje w widmie 7a. Stan  $2^1A_2$  o tym samym termie, powstający z przejścia  $10a_1 \rightarrow 2a_2$ , leży przy energii 5,61 eV, a jego pasmo jest dobrze widoczne w widmie 7c.

Pasma dwóch najniżej leżących stanów trypletowych pirydazyny,  $n\pi^*1^3B_1$  i  $n\pi^*1^3A_2$  zarejestrowane są w widmach wzbudzenia 7b i 7c. Ich wertykalne energie wzbudzenia wynoszą odpowiednio 3,06 eV i 3,55 eV. Stan  $1^3B_1$ , podobnie jak stan singletowy  $1^1B_1$ , tworzy się przy przejściu elektronowym  $8b_2 \rightarrow 2a_2$ . Energie wzbudzenia stanów trypletowych  $1^3B_1$  i  $1^3A_2$  i odpowiadających im stanów singletowych (tab. 1) pozwalają wyznaczyć energie rozszczepienia singlet–tryplet dla termów  $n\pi^*1B_1$  i  $n\pi^*1A_2$ . Są one odpowiednio równe 0,57 eV i 0,47 eV i zgodnie z oczekiwaniem są porównywalne. W zakresie energii 4–5 eV, widmo 7c wskazuje wyraźnie na obecność trzech pasm wzbudzenia stanów trypletowych. Są to stany  $\pi\pi^*1^3B_2$ ,  $\pi\pi^*1^3A_1$  i  $\pi\pi^*2^3B_2$  o energiach odpowiednio równych 4,33 eV, 4,68 eV i 4,88 eV [28].

Obliczenia teoretyczne wertykalnych energii wzbudzenia stanów singletowych wykonywane są znacznie częściej niż energii stanów trypletowych [28]. Są na ogół w niezłej zgodności z wynikami doświadczalnymi. W tabeli 1 porównane są wyniki obliczeń otrzymanych metodą *ab initio* CASPT2 (Complete Active Space Second-order Perturbation) [29] z wynikami doświadczalnymi z pracy [28]. Energie stanów trypletowych wyznaczone teoretycznie wykazują zwykle gorszą zgodność z wynikami doświadczalnymi (tab. 1).

Tabela 1. Wertykalne energie wzbudzenia (w eV) stanów trypletowych i singletowych pirydazyny

Stan wzbudzony	Spektroskopia zderzeniowa	Teoria
Stany trypletowe		
$n\pi^*1^3B_1$	[28] 3,06	[30] 3,082
$n\pi^*1^3A_2$	3,55	3,929
$\pi\pi^*1^3B_2$	4,33	4,256
$\pi\pi^*1^3A_1$	4,68	5,080
$\pi\pi^*2^3B_2$	4,88	5,153
$n\pi^*2^3A_2$	5,38	5,592
Stany singletowe		
$n\pi^*1^1B_1$	[28] 3,63	[29] 3,71
$n\pi^*1^1A_2$	4,02	4,18
$\pi\pi^*1^1A_1$	5,01	5,06
$n\pi^*2^1A_2$	5,61	5,67

## 7. Zakończenie

W artykule przedstawiono elektronową spektroskopię zderzeniową, w której pomiary widm wzbudzenia cząsteczek wykonuje się za pomocą wiązkowych, elektrostatycznych spektrometrów elektronowych. Zalety spektroskopii opisano na przykładzie widm wzbudzenia otrzymanych dla: azotu (prostej cząsteczki dwuatomowej) oraz pirydazyny (sześciocząłonowej cząsteczki he-

terocyklicznej). Widma wzbudzenia pirydazyny wskazują na możliwość stosowania elektronowej spektroskopii zderzeniowej również w badaniach cząsteczek wieloatomowych. Dla takich cząsteczek (energie oraz kształt pasm wzbudzenia), zwłaszcza stanów trypletowych, są zwykle słabo poznane. Słabością spektroskopii zderzeniowej w porównaniu z metodami optycznymi jest jej mniejsza rozdzielczość, jednak stały rozwój technik wytwarzania wiązek elektronowych zmierza do uzyskania rutynowo szerokości energetycznej około 1 meV i będzie w stanie niwelować tę wadę. W obecnie konstruowanych fotoelektronowych źródłach wiązki elektronów uzyskuje się rozdzielczość około 5 meV [32]. Elektronowa spektroskopia zderzeniowa wykazuje unikalną zdolność do rejestrowania wzbudzenia do stanów trypletowych i wyznaczania ich energii wzbudzenia oraz kształtu pasm wzbudzenia z dobrą dokładnością. Pomiar energii wzbudzenia stanów trypletowych i singletowych cząsteczek dostarczają danych spektroskopowych przyczyniających się do doskonalenia kwantowych metod obliczeniowych.

#### Literatura

- [1] J. J. Thompson, Cathode rays, *Phil. Mag.* **44**, 293 (1987).
- [2] P. Lenard, Über die Absorption von Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit, *Ann. d. Phys.* **317**, 714 (1903).
- [3] C. Ramsauer, Über den Wirkungsquerschnitt der Gasmoleküle gegenüber langsamen Elektronen, *Ann. d. Phys.* **64**, 513 (1921).
- [4] J. Franck, G. Hertz, Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben, *Verh. d. D. Phys. Ges.* **16**, 457 (1914).
- [5] C. Ramsauer, Über den Wirkungsquerschnitt der Gasmoleküle gegenüber langsamen Elektronen, I. Fortsetzung, *Ann. d. Phys.* **66**, 546 (1921).
- [6] J. S. Townsend, V. A. Bailey, The motion of electrons in argon, *Phil. Mag.* **43**, 593 (1922).
- [7] C. Ramsauer, R. Kollath, Die Winkelverteilung bei der Streuung langsamer Elektronen an Gasmolekülen, *Ann. d. Phys.* **12**, 529 (1932).
- [8] L. G. Christophorou (Ed.), *Electron-Molecule Interactions and Their Applications*, Academic Press, New York, Vol. 1 i 2, 1984.
- [9] H. S. W. Massey, D. R. Bates (Eds.), *Atmospheric Physics and Chemistry, Applied Atomic Collision Physics*, Vol.1, Academic Press, New York, 1984.
- [10] F. B. Dunning, R. G. Hulet (Eds.), *Atomic, Molecular, and Optical Physics: Charged Particles*, Vol. 29A, 1995.
- [11] W. M. Huo, F. A. Gianturco (Eds.), *Computational Methods for Electron Molecule Collisions*, New York, Plenum Press, 1995.
- [12] I. Utke, P. Hoffmann, J. Melngailis, Gas-assisted focused electron beam and ion beam processing and fabrication, *J. Vac. Sci. Technol. B* **26**, 1197 (2008).
- [13] Y. Zheng, L. Sanche, Clustered DNA Damages Induced by 0.5 to 30 eV Electrons, *Int. J. Mol. Sci.* **20**, 3749 (2019).
- [14] S. Trajmar, J. K. Rice, A. Kuppermann, Electron-Impact Spectrometry, *Adv. Chem. Phys.* **18**, 15 (1970).
- [15] M. Allan, Study of triplet states and short-lived negative ions by means of electron impact spectroscopy, *J. Electron. Spectrosc. Rel. Phenom.* **48**, 219 (1989).
- [16] I. Linert, M. Zubek, A study of the electronic states of pyrimidine by the electron energy loss spectroscopy, *Chem. Phys. Lett.* **624**, 1 (2015).
- [17] K-H Kochem, W. Sohn, K. Jung, H. Ehrhardt, E. S. Chang, Direct and resonant excitation of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> by electron impact from 0 to 3.6 eV, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **18**, 1253 (1985).
- [18] M. Allan, Measurement of differential cross sections for excitation of helium by electron impact within the first 4 eV above threshold, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **25**, 1559 (1992).
- [19] I. Linert, M. Zubek, Differential cross sections for electron impact vibrational excitation of molecular oxygen in the angular range 15°–180°, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **39**, 4087 (2006).
- [20] I. Linert, G. C. King, M. Zubek. A study of electron impact excitation of molecular oxygen at a scattering angle of 180°, *J. Electr. Spectrosc. Rel. Phenom.* **134**, 1 (2004).
- [21] I. Linert, *Badania rozproszenia elektronów na cząsteczkach tlenu w szerokim zakresie kątów rozproszenia*, rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska (2006).
- [22] M. Zubek, M. Dampc, I. Linert, T. Neumann, Electronic states of tetrahydrofuran molecules studied by electron collisions, *J. Chem. Phys.* **135**, 134317 (2011).
- [23] H. P. Saha, Accurate ab initio calculations on elastic scattering of low-energy electrons by argon atoms, *Phys. Rev. A* **43**, 4712 (1991).
- [24] S. Cvejanović, and F. H. Read, A new technique for threshold excitation spectroscopy, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **7**, 1180 (1974).
- [25] M. Zubek, D. S. Newman D S, and G. C. King, Threshold electron impact excitation of mercury, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **24**, 495 (1991).
- [26] I. Linert, M. Zubek, wyniki niepublikowane.

- [27] D. M. P. Holland, D. A. Shaw, S. Coriani, M. Steiner, P. Decleva, A study of the valence shell electronic states of pyridazine by photoabsorption spectroscopy and time-dependent density functional theory calculations, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **46**, 175103 (2013).
- [28] I. Linert, M. Zubek, Electron energy-loss spectroscopy of excited states of the diazine molecules: Pyridazine, *J. Electr. Spectrosc. Rel. Phenom.* **233**, 69 (2019).
- [29] M. R. Silva-Junior, M. Schreiber, S. P. A. Sauer, W. Thiel, Benchmarks of electronically excited states: Basis set effects on CASPT2 results, *J. Chem. Phys.* **133**, 174318 (2010).
- [30] M. H. Palmer, I. C. Walker, The electronic states of the azines. V. Pyridazine, studied by VUV absorption, near threshold electron energy-loss spectroscopy and ab initio multi-reference configuration interaction calculations, *Chem. Phys.* **157**, 187 (1991).
- [31] Y. Matsumoto, S. K. Kim, T. Suzuki, Femtosecond photoelectron imaging of pyridazine: S-1 lifetime and (3s((n-1)), 3p((n-1))) Rydberg state energetics, *J. Chem. Phys.* **119**, 300 (2003).
- [32] A. Gopalan, J. Bömmels, S. Götze, A. Landwehr, K. Franz, M.-W. Ruf, H. Hotop, K. Bartschat, A novel electron scattering apparatus, *Eur. Phys. J. D* **22**, 17 (2003).



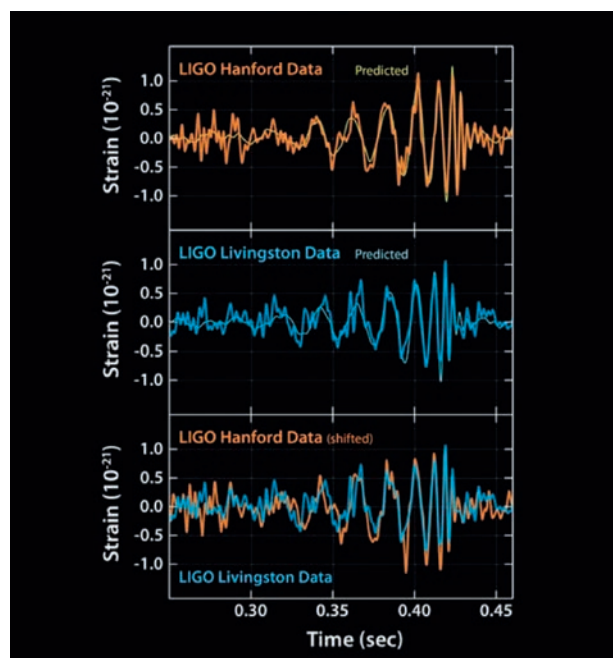
# LIGO i fale grawitacyjne II<sup>1</sup>

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

## Wstęp

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

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



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

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



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

### Laboratorium LIGO

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

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

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

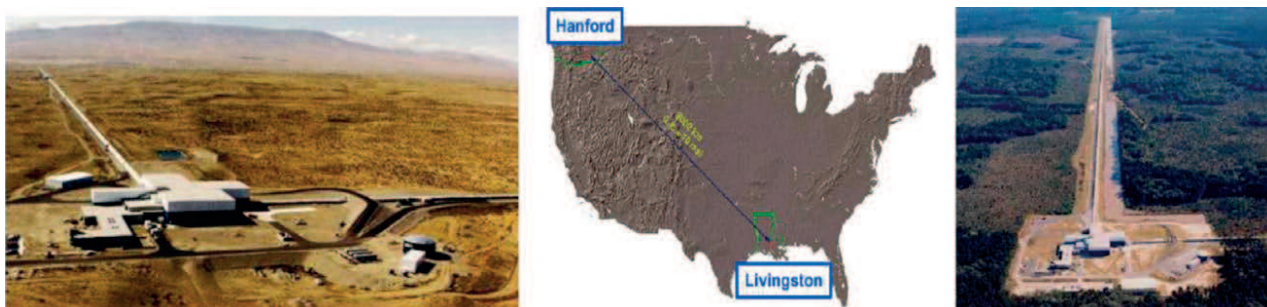
Zdecydowałem się nie przyłączać do eksperymentów w CERN, przynajmniej nie od razu. Chciałem zostawić sobie trochę czasu, by podjąć decyzję, co chcę dalej robić. W rzeczywistości byłem niezmiernie zajęty wszystkimi sprawami związanymi z zamykaniem przedsięwzięcia GEM i pomaganiem w znalezieniu pracy wielu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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Naukowa Kolaboracja LIGO (LSC)

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

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

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

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

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

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

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

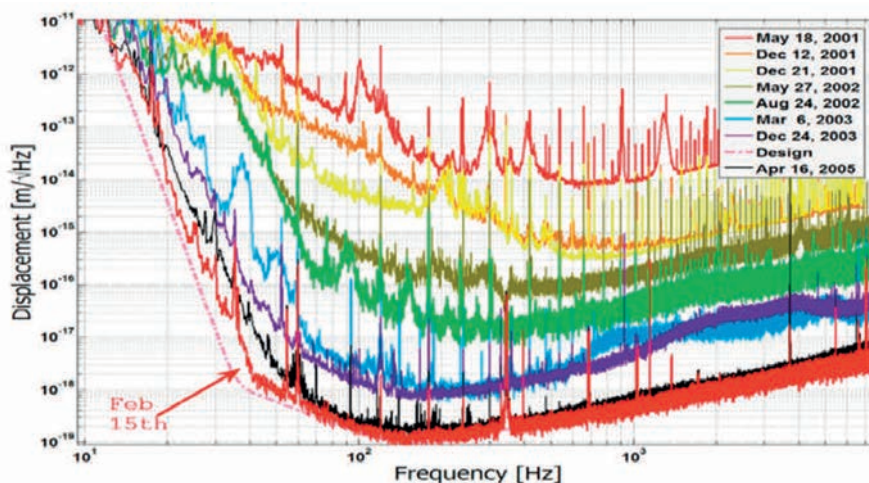


### Działanie i fizyka pierwszych detektorów LIGO

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

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

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



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

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

### Zaawansowane interferometry LIGO

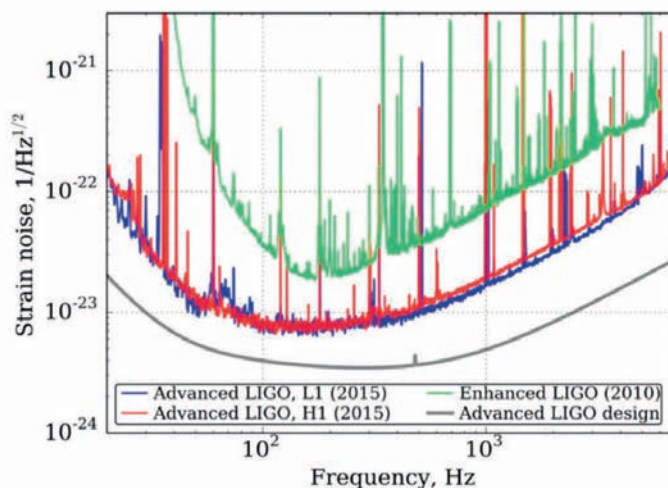
Około roku 2004 ulepszone technologie opracowane dla zaawansowanych detektorów LIGO [9] były na tyle rozwinięte, że można było zaproponować takie detektory Narodowej Fundacji Nauki. Po poddaniu tej propozycji ocenie, Fundacja podtrzymała wspieranie prac nad rozwojem technicznym prowadzonych równoległe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

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

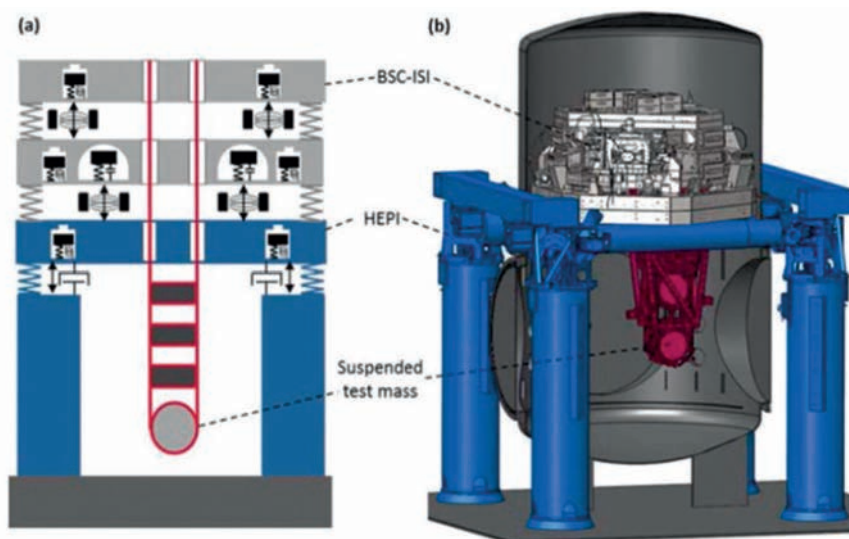
jako że rejestrowana jest amplituda fali, o taki sam czynnik przeszukiwaną odległość [do źródeł fal]. Zwiększa się tym samym tysiąckrotnie przeszukiwana objętość wszechświata (lub częstość wykrywania danego rodzaju źródeł - prawdopodobieństwo zarejestrowania jest w przypadku większości źródeł proporcjonalne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

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

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



Ryc. 4. Docelowa czułość zaawansowanych detektorów LIGO



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

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

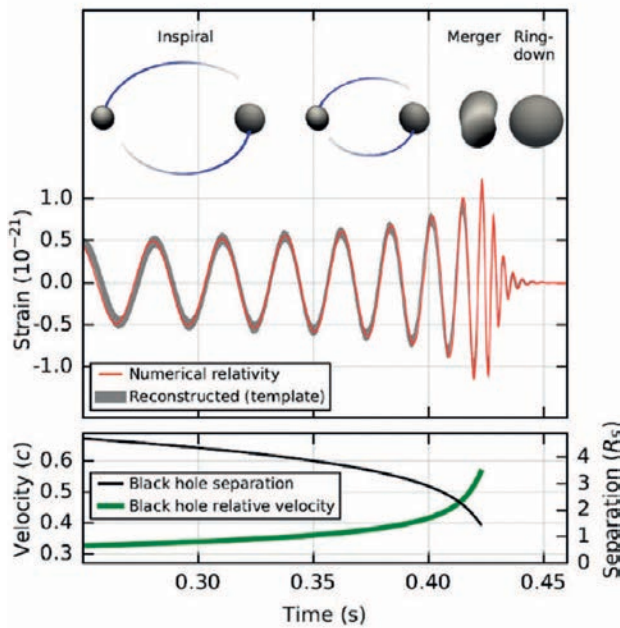
Kluczowym udoskonaleniem, którego wprowadzenie w zaawansowanych detektorach umożliwiło wykrycie fal emitowanych przy zlewaniu się dwóch czarnych dziur, była aktywna izolacja od szumów sejsmicznych i poczwórny układ zawieszenia (ryc. 5). W układzie tym wszystkie ruchome elementy zostały umieszczone poza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

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

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

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





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

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

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

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

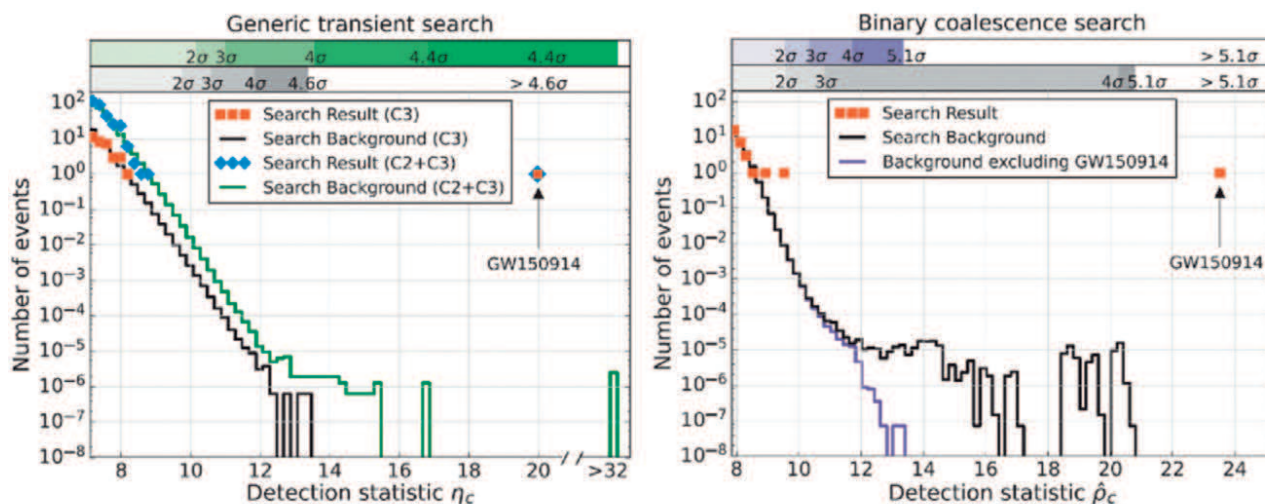
Dolna część ryc. 6 jest jeszcze bardziej pouczająca. Jednostką na skali na prawej osi jest z grubsza sto kilometrów. Wykres pokazuje więc, że wzajemna odległość dwu zlewających się obiektów wynosiła początkowo około 400 kilometrów, a na końcu około 100 km. Te dwa obiekty, każdy o masie około 30 Słońc,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

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

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

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





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

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

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

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

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

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

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

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

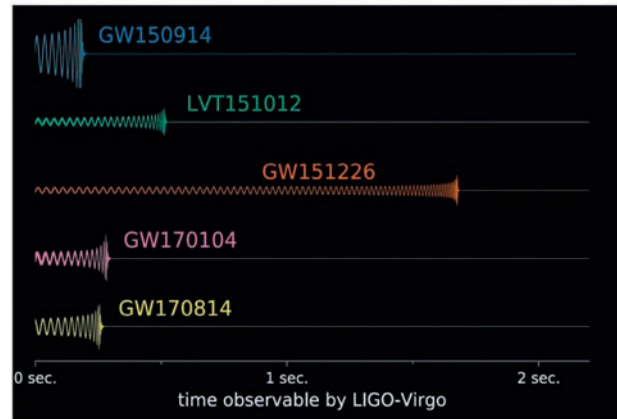
Mając tylko dwa detektory nie możemy dostatecznie dokładnie ustalić kierunku do układu, ale porównując czasy, amplitudy i fazy [sygnału rejestrowanego] przez detektory w Livingstone i w Hanford możemy umiejscowić źródło fali na południowej półkuli nieba w obszarze o kątowym rozmyciu około 600 stopni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

### Kolejne przypadki zlewania się czarnych dziur

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

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

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



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

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

Należy zauważyć, że długość trwania i liczba cykli oscylacji rejestrowanych przez detektory LIGO w przedstawionych na ryc. 8 przypadkach zlewania się układów czarnych dziur silnie zależy od masy takiego układu. Najcięższym z zarejestrowanych układów był pierwszy, przy którym zaobserwowaliśmy tylko kilka cykli; przy najlżejszym zaś (GW151226) – zaobserwowaliśmy ich wiele. Powtórzę jeszcze raz, że wszystkie charakterystyki kandydata na przypadek, zdarzenia LVT1512-12, są całkowicie zgodne z pozostałymi przypadkami, ale miał on miejsce niemal dwukrotnie dalej i z tej przyczyny ma znacznie niższą statystyczną istotność.

### Fizyczne konsekwencje zarejestrowanego zlewania się czarnych dziur

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

- „Gwiazdowe” czarne dziury istnieją.

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

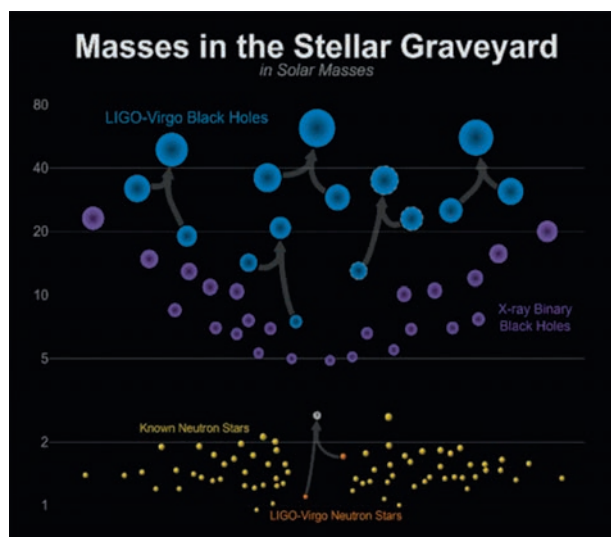
Fakt, że czarne dziury, których zlewanie się zarejestrowały detektory LIGO, są tak masywne, nasuwa pytanie, w jaki sposób obiekty te powstały. Wprawdzie detektory LIGO łatwiej wykrywają obiekty o większych masach, gdyż ich sygnały są silniejsze, co powoduje, że czułość detektorów wystarcza, by wykrywać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

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

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

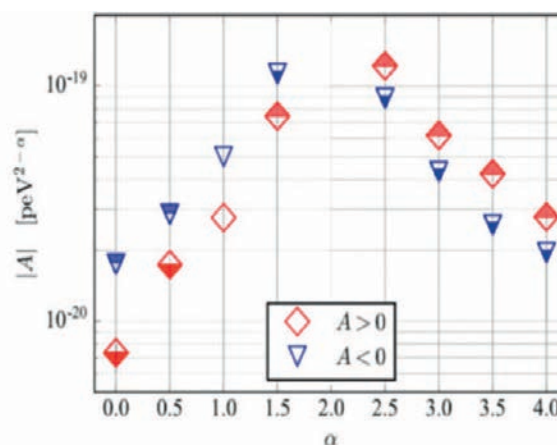
Pierwszym takim sprawdzianem jest to, jak dobrze ogólna teoria względności przewiduje szczegółowe cechy zebranych danych. Przy obecnym poziomie dokładności pomiarów wszystkie odstępstwa, jakie widzimy, dają się wyjaśnić szumem aparaturowym w naszych interferometrach.

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



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

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



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

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



### Detektor VIRGO wykrywa fale grawitacyjne

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



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

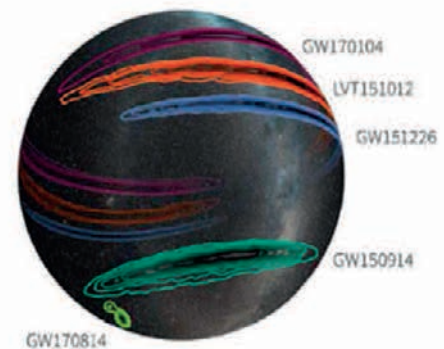
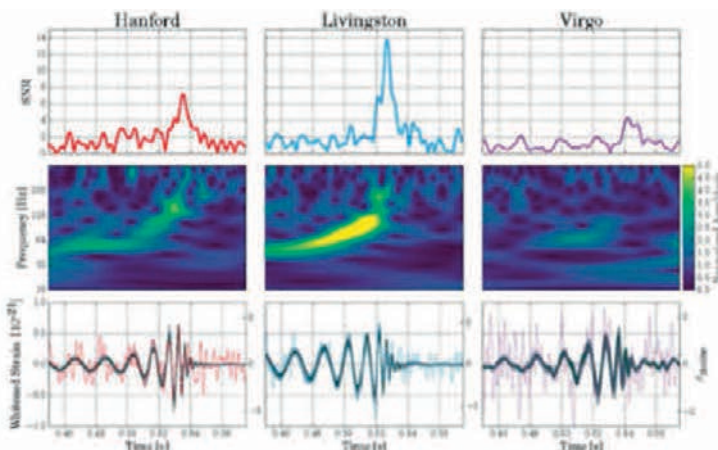
Zarejestrowanie wspomnianego przypadku także przez Virgo nie tylko daje niezależne potwierdzenie wykrycia przez LIGO tego zlewania się czarnych dziur, ale także wydatnie zwiększa możliwość jego lokalizacji na niebie metodą triangulacji. Stanowi to wstęp do możli-

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

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

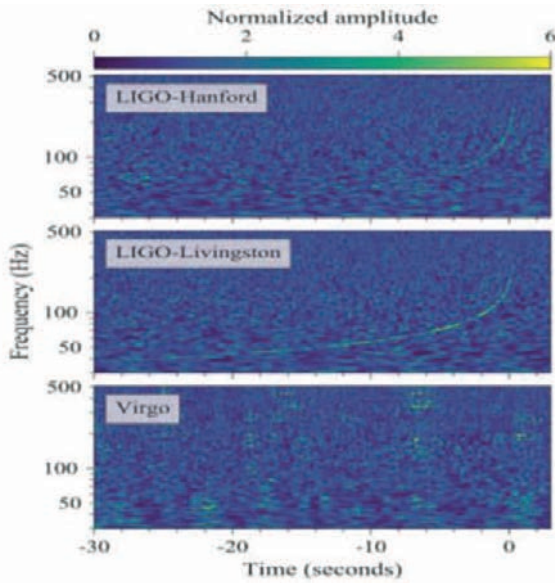
### Kolaps układu dwóch gwiazd neutronowych

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



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





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

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

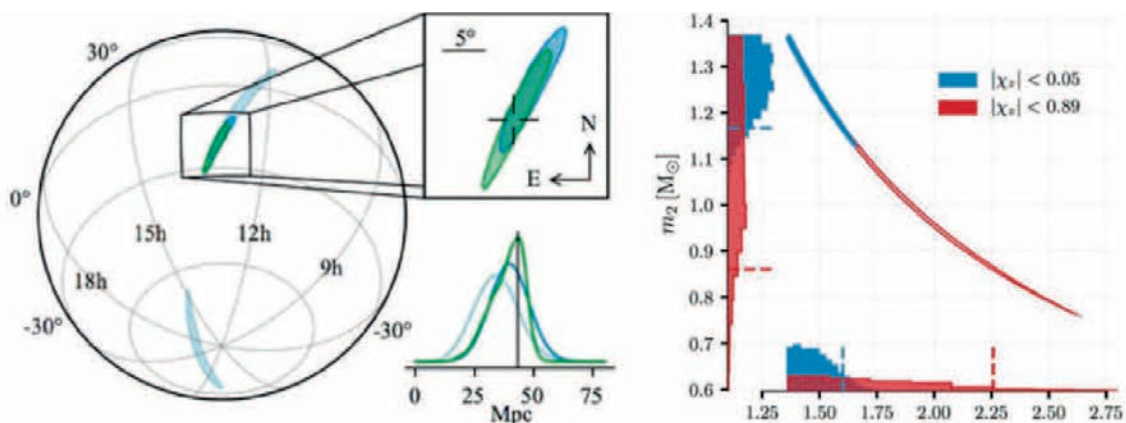
Gwiazdy neutronowe są zbudowane z bardzo gęstej materii jądrowej. Jednym z głównych celów ich badania jest wyznaczenie związku nazywanego „równaniem stanu” [takiej materii]. W układzie podwójnym masa gwiazdy neutronowej i równanie stanu determinują wielkość i powodowaną siłami pływowymi deformację drugiej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

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

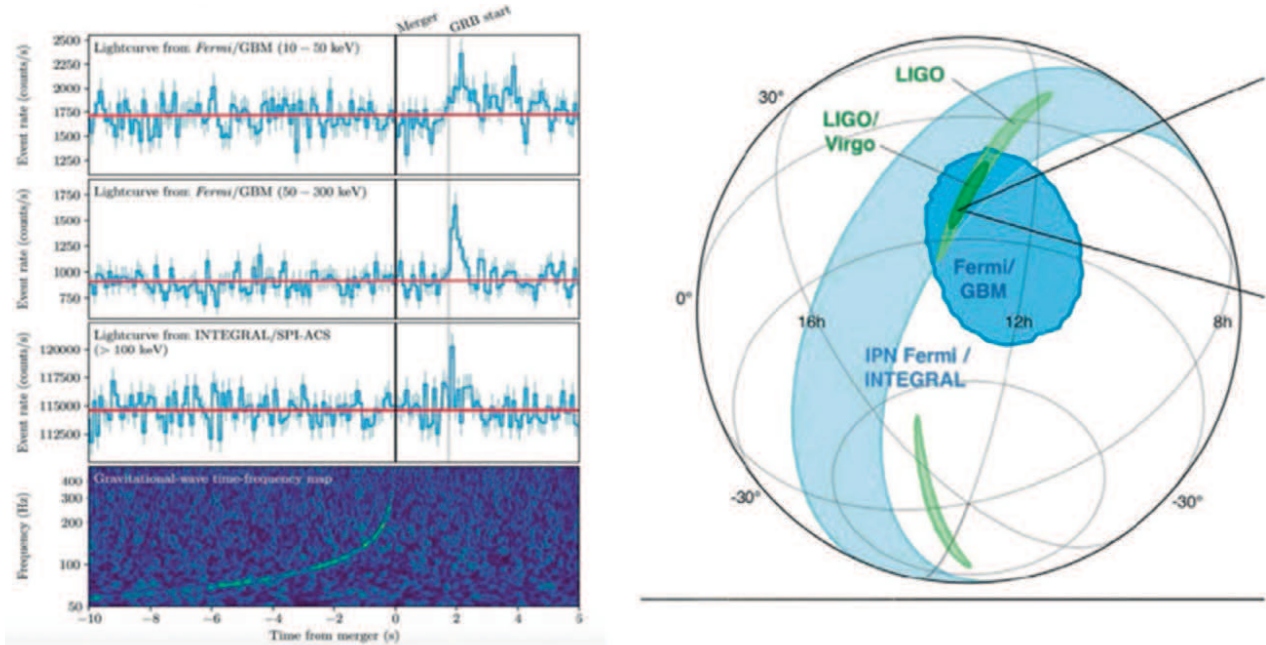
Zdarzenie to zostało zarejestrowane tylko kilka dni po dołączeniu się do sieci instrumentów wykrywających fale grawitacyjne detektora Virgo, co, jak już mówiłem, znacznie zwiększyło dokładność lokalizacji źródła. Wyznaczony przy udziale detektora Virgo obszar na niebie, z którego przybył ten sygnał,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

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

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

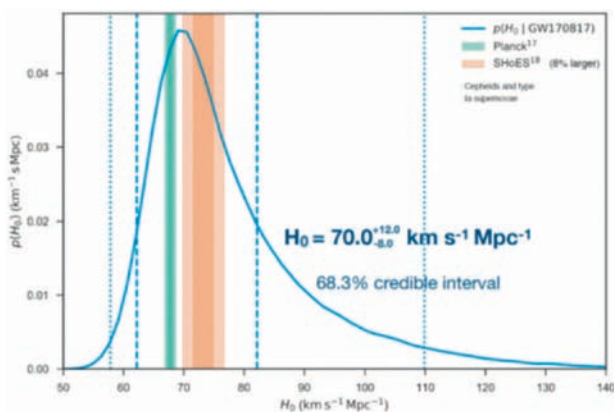


Ryc. 14. Podstawowe parametry przypadku GW170817



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

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



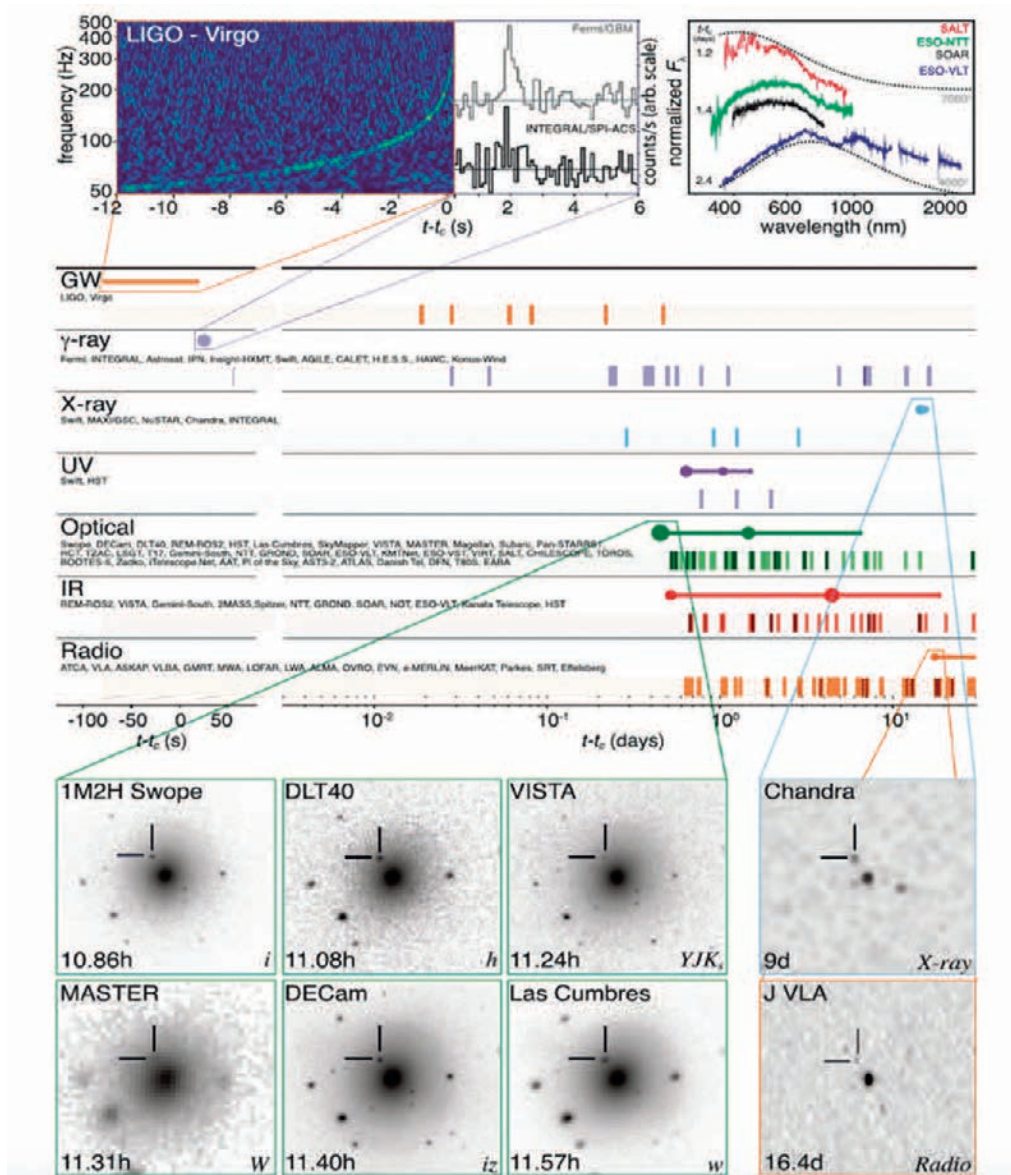
Ryc. 16. Wyznaczanie stałej Hubble'a  $H_0$  z danych dotyczących fal grawitacyjnych. Niebieska krzywa obrazuje względne prawdopodobieństwo różnych wartości  $H_0$ . Ma ona maksimum przy  $70 \text{ km/s/Mpc}$ . Przerywane i kropkowane niebieskie krzywe pionowe wyznaczają granice zakresów  $H_0$  odpowiadających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

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

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

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





Ryc. 17. Zarejestrowane sygnały elektromagnetyczne odpowiadające zdarzeniu GW170817

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

### Przyszły rozwój LIGO i badania fal grawitacyjnych

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

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

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

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

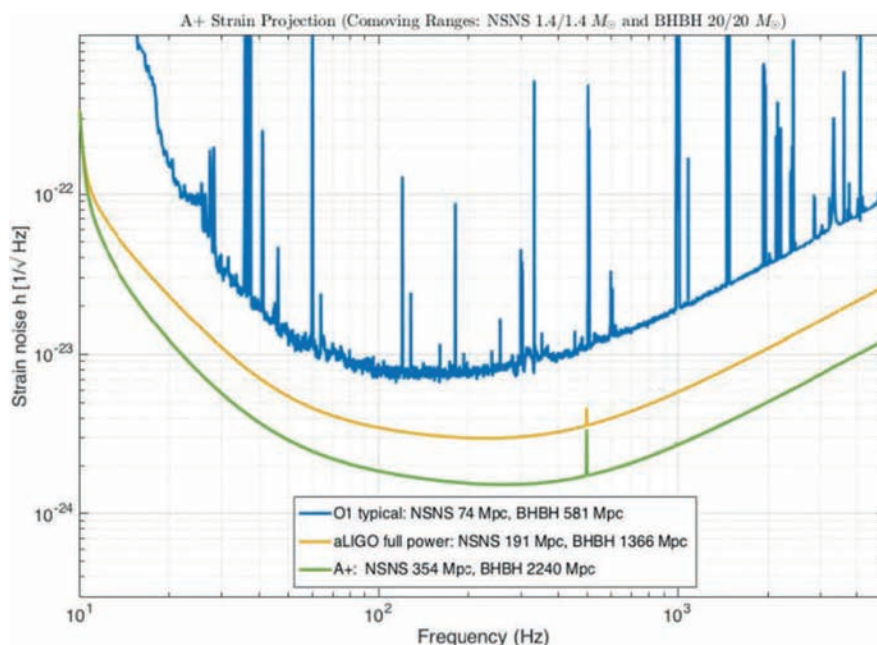
Podsumowując, tak jak to omówiłem wyżej, zarejestrowaliśmy po raz pierwszy fale grawitacyjne emitowane przy zlewaniu się gwiazd neutronowych. Łączne wykorzystanie sygnałów rejestrowanych przez detektory LIGO i Virgo umożliwiło znacznie dokładniejszą lokalizację ich źródła, co z kolei pozwoliło dokonać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

Przyszłość

### Przyszłość

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

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



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

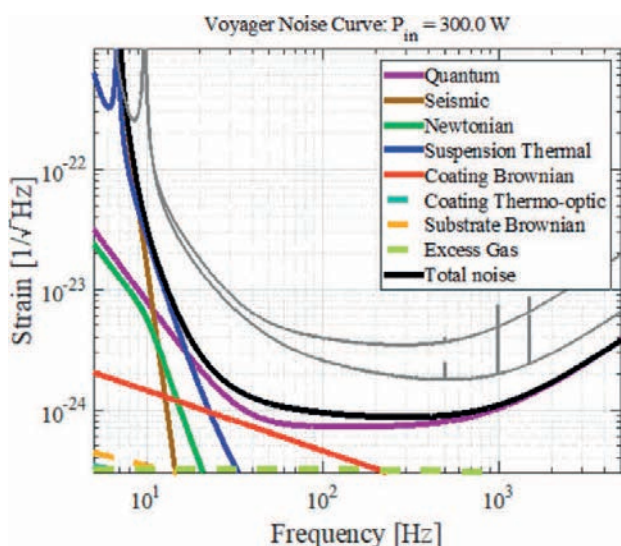
6. Zob. wykład Kipa Thorne'a – polski przekład opublikowany został w PF 70 (3), 18 (2019).



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

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

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



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

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

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

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

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

#### Uwagi końcowe i refleksje

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

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

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

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

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

### Kilku najważniejszych członków LIGO

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



### LITERATURA

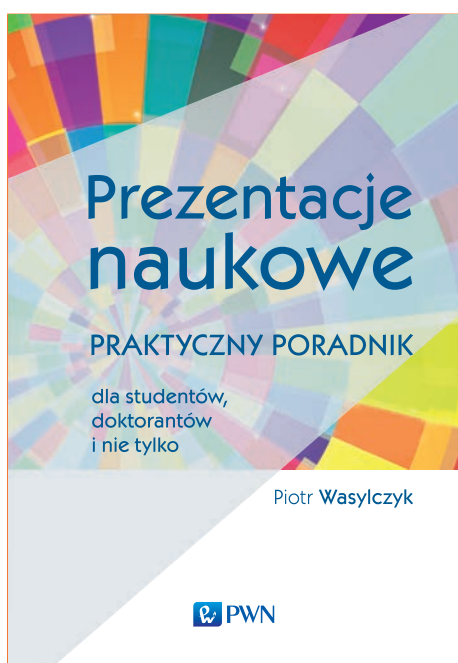
- [1] B.P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).
- [2] A. Einstein, *Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss.* **1**, 688 (1916).
- [3] A. Einstein, *Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss.* **1**, 154 (1918).
- [4] M. Riordan, L. Hoddeson, and A. Kolb. (2015). *Tunnel Visions: The Rise and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

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

## Naukowy marketing czyli kurs promowania ego

Ludwik Komorowski

Wydział Chemiczny, Politechnika Wrocławska, [www.komorowski.edu.pl](http://www.komorowski.edu.pl)



Z dużym opóźnieniem trafiła do moich rąk książeczka Piotra Wasylczyka wydana przez PWN w roku 2017 (czytam jej dodruk z 2020), której wielowarstwowy tytuł wart jest zacytowania: *Prezentacje naukowe. Praktyczny poradnik dla studentów, doktorantów i nie tylko*. Przesłanie potwierdza się w treści książki, która zapewne jest pomocną towarzyszką młodych na naukowych szlakach. Ostatnie dwa słowa tytułu zaintrygowały recenzenta, nie zapomniał o nich podczas lektury.

Któż z nas nie przeżywał wielokrotnie i na kolejnych etapach życia rozterek, przygotowując się do publicznych prezentacji owoców swojej pracy? Jeśli nawet, w szczęśliwszych przypadkach, samo naukowe rzemiosło bywa pasją wyzwającą moc pokonywania codziennych trudów, to wobec wyzwania jakim jest publiczne referowanie planów, decyzji, zakrętów, porażek i sukcesów nieodmiennie ogarniają nas wątpliwości. Czy to co zamierzam powiedzieć, zainteresuje słuchaczy? A może ważniejsze jest, jak o tym opowiem? Jak dostosować się do ich poziomu wiedzy, oczekiwań i nastroju? Na rozdące się w takich chwilach pytania znajdujemy w poradniku jasno wyłożone odpowiedzi. Autor ze swadą

objaśnia w kolejnych rozdziałach techniki przygotowania planu/projektu wystąpienia, udziela praktycznych porad, jak referować z pomocą techniki wizualnej (lub bez niej), a nawet jak przygotować efektowny plakat (poster).

Skupiony na szczegółowych poradach autor zapędza się również w zbędne detale, poza obszarem swoich kompetencji. Jego czytelnik nie jest prostym posiadaczem matury, ma za sobą lata studiowania na wysokim poziomie (skoro znalazł miejsce w nauce), a występowanie przed studentami stało się jego chlebem powszednim, zanim jeszcze skończył doktorat. Każdy z nas innymi ścieżkami dochodzi do wniosków, że efekt prezentacji zależy: ... *od twojego przygotowania, twoich gestów, charyzmy, głosu, stroju*... Drobiazgowe porady w technice komunikacji z publicznością, to nie więcej niż świadectwo własnej amatorskiej drogi piszącego, a wujek „dobra rada” na niewiele się tu przyda.<sup>1</sup>

Dla poradnika natomiast jest rzeczą fundamentalną wskazywać wprost drogę do celu. Tu nie popisał się wydawca. Mimo wyrazistego tytułu, w spisie treści widać wyłącznie siedem rozdziałów, nie wiadomo po co w kolorach, tymczasem wiele mówiące hasła licznych podrozdziałów czytelnik musi odkrywać strona po stronie. (Taki dydaktyczny przymus wobec czytelnika bywa zamierzony: *przeczytajże całość, nie wertuj!*..., o to jednak autora nie podejrzewam, doceniając swobodną narrację.)

Doświadczenie w obszarze, któremu poświęcił poradnik, autor-fizyk zdobywał przez liczne kontakty zagraniczne. Zainteresowała go też światowa literatura przedmiotu (pisana lub prezentowana w formie pokazów internetowych) – bibliografia jest cennym uzupeł-

---

1. Świeże wspomnienia o pisarzu Jerzym Pilchu dostarczają dosadnej ilustracji w tej materii. Pisarz, którego rzemiosło było i pozostaje wzorcem dla wielu, udzielał następujących rad konferencyjnych: „...baw się kolorową żabką do wieszania bielizny.(...) powiedz, że używaś tych żabek do spinania maszynopisów (...). Doskonałość i równoczesna ekstrawagancja twojego warsztatu zbulwersuje wszystkich.” (Za: W. Kot, *Mężczyzna wadliwy i z usterkami*, Przegląd nr 24/2020.)



nieniem praktycznych treści. Sam jest człowiekiem naukowego sukcesu, w młodym wieku zdobył uznanie dla wyników swoich badań o dalekim, lecz konkretnym wymiarze praktycznym. Korzystał z licznych okazji, by o nich opowiadać na wielu poziomach, od wnikliwie badawczych, do popularyzatorskich. Pociągającym elementem jego opowiadania jest osobisty ton i ujawniane przygód na naukowej drodze, o których pisze wyciągając pouczające wnioski. Jednak zamieszczając w formie ilustracji własne notatki z projektów prezentacji zgłolował w chaszcze, przed którymi czytelnika w innym miejscu przestrzega: nie są ani czytelne, ani efektowne, ani potrzebne!

Dla młodych adeptów nauki, poradnik będzie nie tylko pomocą w rozwiązywaniu problemów doraźnych. Dostarcza, mimochodem podawanych, wskazówek i porad w znacznie poważniejszym zakresie: Jak się odnaleźć w mechanizmach świata nauki? Jak przeżyć? I te właśnie rozproszone, jasno widoczne i nieprzypadkowe treści szczególnie zainteresowały recenzenta, zamiłowanego obserwatora akademickich obyczajów, świadomego, że ma przed sobą nie jeden z wielu poradników życia codziennego ozdabianych żargonem psychologicznym na łamach kolorowej prasy, lecz głos pochodzący z najświetniejszej polskiej uczelni, promowany przez oficynę dzieł naukowych z dużymi tradycjami. W oczach czytelnika to głos autorytetu. Obraz środowiska naukowego, jaki się wyłania z lektury, jest rzeczywisty, a czytelnik jest prowadzony bezpiecznym szlakiem do upragnionego celu: do naukowej kariery.

Młody autor rozbrajająco szczerze dzieli się doświadczeniami z licznych konferencji: *większość wystąpień okazywała się niezrozumiała (...) i nieciekawa, przez co trudno było dotrzeć do końca. (...) Z wielu prezentacji, które widziałem, jedynie 10% było jasnych i przejrzystych, 5% zostało przedstawionych zbyt prosto, a pozostałe pozostawiały pod względem klarowności wiele do życzenia.* W rozrywkowym konferencyjnym bingo pokazuje kolekcję zabawnych osobliwości konferencyjnych, lecz obca mu jest szersza refleksja. Nie zastanowił go obserwowany powszechnie brak rutyny lub choćby zwyczajnej poprawności ustnego przekazu wiedzy w szerokim, różnorodnym i poważnym naukowym środowisku.

Poradnik pozwala wysledzić przyczyny takiego stanu, skryte pośród gąszczy praktycznych wskazówek. Sednem sprawy są cele prezentacji, wymieniane w dwóch zestawach. Pierwszy reprezentuje listę typowych okoliczności różniących się stosownie do publiczności, a są to konferencje, seminaria, przesłuchania związane z zatrudnieniem, grantem badawczym czy współpracą, na koniec także popularyzacja badań. Za-

daniem mówiącego jest zaprezentowanie własnego potencjału, a przedmiot wystąpienia, na ogół samodzielnie sprecyzowany, jest tylko formalnym pretekstem do spotkania, okazją do zabrania głosu. Występy są realizacją potrzeby autora, nie oczekiwań słuchaczy.

Znacząca wydaje się okoliczność, że pracujący w murach uniwersytetu autor nie wspomina tu o podstawowej formie kontaktu ze słuchaczami, jaką w świecie akademickim powszechnie jest wykład. To sytuacja zgoła odmienna od prezentacji własnych badań, o sukcesie decydują oczekiwania słuchaczy w stosunku do wykładanej materii, a nie do osoby prezentera – wyzwaniem dla wykładowcy jest im sprostać, a testem jest przysły egzamin, nie oklaski.

Brak odniesienia do codziennej wykładowej rutyny wyjaśnia osobliwą listę mitów związanych z prezentacjami: nie informacja się tutaj liczy, nie wykresy i tabele, nie naukowe nowinki, nie wzorce podpatrywane u innych, lecz wysiłek włożony w przygotowanie do występu własnego. W konsekwencji celem realistycznym jest: *... by słuchacze wyszli ze spotkania z przekonaniem, że jesteś świetnym naukowcem...* Ponieważ: *... jak w każdym biznesie, tak i w nauce liczą się marka, renoma, rozpoznawalność na rynku.* Natomiast *... przedstawienie w spójny i strawny sposób więcej niż trzech wątków jakiegokolwiek opowieści (...) utrzymanie dłużej niż przez pięć minut uwagi widowni..., (...) sprawienie, by słuchacze po tygodniu pamiętali więcej niż trzy jakiegokolwiek wiadomości...* to wg autora litania celów nierealistycznych. Niecodzienna rada dla aplikujących o granty czy pracę wydaje się w takim kontekście naturalna: *Tu liczy się efekt – wszystkie chwytły są dozwolone.* Lecz wątplię, czy sam autor chciałby współpracować z doktorantami, praktykującymi na co dzień podobne zasady. Czy ufałby wynikom badań dostarczonym przez kierujących się taką wskazówką specjalistów?

Losy młodych adeptów wiedzy, docelowych czytelników poradnika, są autorowi doskonale znane: *Przydziela się im zadania, do których wykonywania muszą nauczyć się wielu nowych rzeczy (technik, języka) i oczekuje się od nich sprawnego dostarczania wyników. Taka sytuacja nie sprzyja spojrzeniu na swoje badania w szerszym kontekście, postrzeganiu ich jako fragmentu większej układanki – często po prostu nie ma na to czasu. [... doktorant] większość czasu spędza na mniej lub bardziej pasjonującej pracy nad swoją częścią badań... Pod koniec dochodzi do etapu opracowania wyników, po czym projekt albo jego część się kończy, na przykład uzyskaniem stopnia doktora czy opublikowaniem artykułu.* Zdumiewające, że w tym realistycznym oglądzie krajowej rzeczywistości nie widać miejsca (ani czasu) na... zdobywanie wiedzy! Inaczej niż w czołowych uczelniach

tradycji zachodniej, gdzie wyczerpujące studia niezbędnych przedmiotów są istotą kształcenia doktorów; ze wspomnień Petelena dowiemy się, że i w uczelniach polskich, nawet w trudnych czasach kultywowano podobne zwyczaje.<sup>2</sup>

Rzecz ma swoje głębokie konsekwencje, czego autor zauważyć nie potrafił, pisząc: *Jako naukowcy jesteśmy przyzwyczajeni do operowania informacją... Kiedy jednak informacje, dane, mają się stać treścią przekazu, komunikatu, a w takich kategoriach można (i warto) myśleć o wystąpieniu konferencyjnym, potrzebują tła – gdy bowiem wystąpią w odpowiednim kontekście, mogą nabrać znaczenia i mocy...* Teraz dopiero rozumiemy, dlaczego doświadczony autor nudził się na większości imprez, zalewany zbędnym informacyjnym nadmiarem. Bo sensem konferencji (seminariów, dyskusji), w których warto uczestniczyć, nie jest przekaz informacji, dziś łatwych do zdobywania zdalnego, lecz wymiana myśli czyli przekaz wiedzy. Tę zdobywa się z móżdżem, a jeszcze trudniej osiągnąć biegłość w jej stosowaniu, nie skończenie ważniejszą, niż umiejętności obsługi narzędzi pomiarowych czy obliczeniowych. A jej najdoskonalszym dowodem niezmiennie pozostaje ustny przekaz. Tu leży sekret, ujawniony w książeczce bez komentarza: *... najwybitniejsi naukowcy potrafią mówić (i najczęściej mówią) o swoich badaniach bardzo prosto. Zachęta do naśladowania ich stylu, bez niezbędnej do tego wiedzy kończy się katastrofą. Efekty widywali i młodzi, i starzy, dlatego wolą przezornie zalewać publiczność potokiem nadmiarowych informacji, bezpiecznie pokrywającym niedostatki ich wiedzy. Poradnik skłoni wielu do produkowania eleganckiej oprawy swoich przyszytych popisów, pod którą rozpoznanie pustej treści będzie trudne.*

Pożyteczna wydała mi się rada autora w sprawie abstraktu – streszczenia zapowiadającego temat, a zarazem szkicującego wnioski i wyniki każdego prezentowanego dzieła. *... dobry abstrakt musi się w jakiś sposób wyróżniać...*, ponieważ to na jego podstawie zapada decyzja, czy autora przyjmą na konferencję (lub czy jego wniosek o grant zostanie odrzucony w pierwszym czytaniu). Jeśli czytelniku sądziłeś, że liczy się coś więcej, byłeś w błę-

dzie... Dobrze to wiedzieć! Następnym razem zatrudnisz do pomocy sztukmistrza słowa i może się udać.

Autor wydaje się pamiętać, że fizyka choć ma ambicje być wzorcem wszelkich nauk, nie ma monopolu na wiedzę, a formy jej przekazywania w innych obszarach bywają odmienne. Lecz nie próbując dociekać ich sensu, dworuje z obyczajów humanistów, których troską w wypowiedziach bywa starannie szlifowany język, nie efekty specjalne. O tym jak wiele myśli i wiedzy można przekazać słuchaczom operując jedynie talentem mowy, przekonaliśmy się pod koniec 2019 roku, słuchając odczytu noblowskiego (nie żadnej prezentacji) Olgi Tokarczuk.

Warto na koniec zauważyć dwa istotne aspekty współczesnej akademickiej rzeczywistości, które autor przemilcza, choć są kluczowe dla poziomu prezentacji w tym środowisku. Pierwszy to ich wymiar międzynarodowy, dziś powszechny. Oracja w języku bardzo obcym sprowadza się z konieczności do wyśmiewanego w poradniku pokazu, w którym *... to nie autor prezentacji jest moim przewodnikiem po historii, którą opowiada, lecz jego slajdy.* Dopóki biegłość w języku obcym nie stanie się istotnym kryterium doboru na naukowe stanowiska, żaden poradnik sytuacji naprawić nie zdoła. Drugim wyróżnikiem środowiskowym jest rola nauczyciela, którą pełni większość zatrudnionych w uczelni wyższej. (Formalnie wg najnowszej ustawy, na tym terenie wszyscy są nauczycielami akademickimi, bez względu na wykonywane czynności.) Autor poradnika pisze z rezygnacją: *Przeciętny student wysłuchuje w ciągu swego pobytu na uczelni tylu nudnych wykładów, że po jakimś czasie dochodzi do wniosku, że taka jest natura edukacji akademickiej.* To spostrzeżenie niewesołe i dla autora poradnika, i dla jego czytelników, i dla studentów: wszak na konferencjach spotykają się ludzie, praktykujący na co dzień w salach wykładowych. Ich nieudolność w przekazywaniu wiedzy ma swoje przyczyny: liczne, głębokie i starannie ukrywane za szyldem aktywności, którą z lubością nazywamy nauką.

Bezprzykładna otwartość autora poradnika pozwala właściwie docenić przesłanie jego dzieła. Służy ono nie doskonaleniu przekazu naukowych treści, lecz kreowaniu wizerunku naukowego osób w ich środowisku. Dla młodych to cenna pomoc, dla dojrzałych wezwanie do czujności, niezbywalnym bowiem atrybutem akademickiego zawodu jest przekazywanie wiedzy, a kariera jedynie dowodem uznania dla tej sztuki.

---

2. P. Petelencz, *Jak hartowało się doktoranta – szkoła naukowa profesora Kazimierza Gumińskiego*, *Wiadomości Chemiczne* 2019, 73, s. 5–6.

---

## ZAPRASZAMY DO POLEMIKI

# Sekrety naukowego języka czyli jak zabłysnąć w informacyjnej chmurze

Ludwik Komorowski

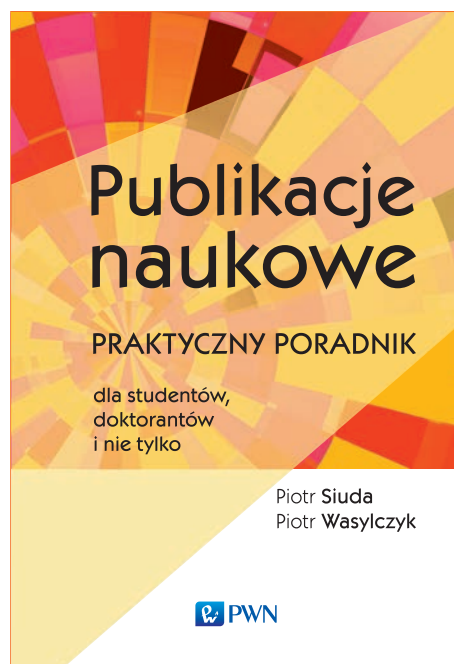
Wydział Chemiczny, Politechnika Wroclawska, [www.komorowski.edu.pl](http://www.komorowski.edu.pl)

Wkrótce po pierwszym poradniku dla zagubionych uczonych<sup>1</sup>, jego autor Piotr Wasylczyk wraz z Piotrem Siudą zaprezentowali kolejny: *Publikacje naukowe, praktyczny poradnik dla studentów, doktorantów i nie tylko*, PWN 2018. I ten doczekał się dodruku w 2020, oczywistego świadectwa popularności. Nic dziwnego, tylko owoce naszej pracy, które zdołamy zaprezentować na piśmie, przynoszą nam potencjalne profity, a w dalszej perspektywie niekiedy i upragniony rozgłos.

Tym razem autor wystąpił w tandemie z socjologiem, co w porównaniu z pierwszą publikacją o prezentacjach, znakomicie podniosło poziom tekstu drugiej pozycji. Jak przystało na poradnik, spis treści jest szczegółowy, a doskonale zorganizowana zawartość zdradza doświadczenie w pisarskim rzemiośle oraz w trudnej sztuce przebijania się przez rafy na szerokie wody światowej nauki. Kolejne etapy na drodze do ogłaszania efektów naukowego trudu są omawiane systematycznie: od wyboru odpowiednio ambitnego periodyku, pomysłu na plan artykułu, jego strukturę, tytuł, abstrakt oraz ilustracje, po instrukcje prowadzenia korespondencji z wydawcą. Całość tworzy szczegółowe kompendium wiedzy podane na tacy, by ulżyć badaczom z mozołem poznającym jej sekrety na niekończących się szlakach naukowej twórczości.

Książeczka jest w pełni współczesna, obrazuje realia dnia dzisiejszego w szybkozmiennym świecie przetwarzania informacji. Dla młodych to pożądana wskazówka, dla bardziej doświadczonych sprawdzian procesu ich ciągłego przystosowywania się do realiów rynku naukowych czasopism, który podlega głębokim zmianom w każdej dekadzie życia badacza. Ta okoliczność nie jest w książce ujawniona, choć zdecyduje o trwałości poradnika.

Porady autorów odnoszące się do zawartości poszczególnych części publikacji oraz jej technicznego



opracowania są bezdyskusyjne (przynajmniej z punktu widzenia przyrodnika). W zakresie stosowania narzędzi informatycznych służących do opracowania bibliografii będą dla mniej obytych nawet odkrywcze. Znaczącą częścią są również rady adresowane bezpośrednio do warstwy językowej, którą autorzy słusznie uważają za równie istotną dla publikacyjnego sukcesu, jak treść pracy. W tym jednak obszarze autorzy polegający na doświadczeniach własnych brodzą po nieprofesjonalnych płyciznach, rozpowszechniając fałszywe, a popularne przekonanie, że nawet gdy piszący nie bardzo zna angielski, a i w polskim jest nieporadny, to wsparty dobrymi radami potrafi odnosić sukcesy.

Szczegółowe podpowiedzi językowe sprawiają wrażenie, jakoby pozwalały uczynić nawet banalny opis pomiaru dziełem sztuki, pociągającym redaktora naukowego periodyku odpowiedniej rangi. To on jest w istocie jedynym czytelnikiem, dla którego musimy podejmować niekiedy karkołomne wysiłki w pracy nad tekstem w języku całkiem obcym. Zaskakującym jest, że au-

---

1. Piotr Wasylczyk, *Prezentacje naukowe. Praktyczny poradnik dla studentów, doktorantów i nie tylko*, PWN 2017, dodruk 2020.

torzy nie dostrzegli sprzeczności wysiłków, do których zachęcają, z wartościową inwokacją ich dzieła. Wyszmażony wg ich wskazówek tekst nie będzie cechowała *the driest possible presentation of results*, a w rezultacie *paper* może odnieść skutek sprzeczny z zamiarem piszących, ponieważ wobec tego rodzaju tekstu *many scientist feel practically manipulated*.

Osobliwą cechą książeczki jest jej drażniąca, demonstracyjnie niewyważona anglojęzyczność. Z jednej strony czytelnik jest traktowany jak naukowy kolega, dla którego liczne cytaty w angielskiej mowie będą oczywiście zrozumiałe. Z drugiej jednak, autorzy udzielają mu niezliczonych propozycji technicznych w postaci kulek językowych, nadających się do automatycznego kopiowania w pracy lub w korespondencji z redakcją, co słyca poradnik do poziomu „książki kucharskiej” dla amatorów.

Znaczącym i nowatorskim elementem jest eksperyment prezentujący automatyczny przekład obszernych wskazówek dla autorów wybranego czasopisma anglojęzycznego, dokonany komputerowo za pomocą dostępnego translatora. To zawołowana zachęta do korzystania z podobnych narzędzi informatycznych oraz namacalny dowód, że tekst doskonały w jednym języku, po przetłumaczeniu maszynowym będzie co najmniej dobry. Prawdziwa jest też sytuacja przeciwna – tekst słaby w jednym języku, w drugim lepszy nie będzie, a najpewniej będzie zupełnie beznadziejny. Autorzy jednak, z polskim temperamentem zachęcają: *Mierz siły na zamiary!* podpowiadając rozmaite standardowe postaci tytułów oraz innych elementów stałych typowej publikacji. Właściwsza rada byłaby: najpierw ćwicz języki (własny i obce), potem miarkuj ambitne plany. Autorzy najwyraźniej nie doceniają wartości sztuki pisania, która nie jest pospolitym rzemiosłem, lecz umiejętnością nie mniej finezyjną, trudną i wymagającą, jak biegłość w arkanach fizyki czy socjologii. Tę prawdę powinni poznawać adepci nauki jak najwcześniej, by nie żywili złudzeń, że ją osiągnąć zdołają czytając poradniki lub stosując automatyczne translatory. Obchodzenie językowych przeszkód dziś powszechnie praktykowane, czyli publikowanie w towarzystwie partnera zagranicznego, który zadba o tekst, nie przynosi nam chluby.

Sprawa celowości pisania pracy naukowej oraz adresowania jej do właściwych czasopism jest przedmiotem pouczających rozważań ilustrowanych statystykami publikowalności. Autorzy pokazują bezmiar informacyjnego szumu wśród lawiny prac *niewiele, albo nic nie wnoszących (najczęściej)*. Pogląd autorów na popularne mierniki wartości bazujące na statystykach jest trzeźwy: *wskaźniki zaczynają mierzyć same siebie*, a rozpowszechniony *impact factor* (IF) czasopisma nie jest miarą wartości prac, które się w nim ukazują, lecz siły przyciąga-

nia przez czasopismo rzesz pretendentów do publikowania, generującej popyt i pozycję tytułu. Szeroka wiedza oraz krytyczny stosunek autorów poradnika nie zmienia jednak ich pragmatycznego dążenia do publikowania w czasopismach jak najwyżej punktowanych, do czego zachęcają potencjalnych autorów poprzez zgrabną alegorię. Porównują publikowanie w tych czasopismach ze zdobyciem Everestu, a publikowanie lokalne ze spacerem na Gubałówkę; pojedyncze wejście na ośmiotysięcznik ma wartość nieporównywalną z wielokrotnym zdobywaniem zakopiańskiego pagórka.

Turyście doświadczonemu na górskich szlakach nie trzeba wszakże tłumaczyć: kto zamierza ruszyć w Himalaje, musi wprzód niejeden sezon ćwiczyć w niedalekich „skałkach”, zdobywać tatrzańskie turnie, odwiedzać alpejskie trakty, a i potem sukces na dachu świata nie jest gwarantowany. Kto nie trudził się opisywaniem swoich badawczych dokonań i myśli w dysertacjach, potem w lokalnych pisemkach i w końcu nie wysyłał prac do szerzej dostępnych światowych periodyków, nie powinien mieć złudzeń, że iskrę jego „genialnego” odkrycia niechybnie rozpoznają redakcje światowej ekstraklasy.

Niedostateczna obecność Polaków w światowej literaturze wynika z wielu przyczyn. Nie najmniejszą jest rozpowszechniona nieporadność w języku ojczystym i dramatycznie kurczący się obszar, na którym można doskonalić naukowe piśmiennictwo w języku polskim. W naukach ścisłych pozostały nieliczne ostańce literatury fachowej (m. in. *Postępy Fizyki* i *Wiadomości Chemiczne*), do których trudno zachęcić doświadczonych autorów; ci poszukują punktów. Ambicją obytych w świecie promotorów jest prezentować wykonane pod ich kierunkiem doktoraty w języku angielskim, najchętniej jako plik publikacji, przez co doktorat traci sens - to z założenia ostatnia szansa demonstrowania umiejętności przelewania myśli na papier; nie sposób jej zauważyć ani docenić w spółdzielczych, wieloautorskich publikacjach. Czy można więc oczekiwać od adeptów nauki, by potrafili zasilić automatyczny translator tekstem wysokiego poziomu złożonym w mowie polskiej? Rzucą się raczej na poradnik kopiując jego szablony.

Autorzy nie kryją, że znakomitą większość umiejętności stanowiących o efektywności publikowania przyswajamy sobie w środowisku o wysokiej kulturze pracy naukowej, która wyróżnia nieliczne, najlepsze grupy badawcze spośród innych – średnich czy słabych, posiadających takie same środki, a nawet intelektualne zasoby. Ten boleśnie prawdziwy sąd pozwala czytelnikowi domyślać się niewyrażonego wprost zaproszenia do owego elitarnego obszaru najwyższej naukowej kultury, w której autorzy sami wyrosli.

Mimo tak pociągającej perspektywy, czytelnik niedowie się z poradnika, że proces publikowania to jedy-



nie naskórkowy element większej całości – badawczej twórczości, obejmującej przedpola myślowych koncepcji, podwaliny badawczego pomysłu oraz ogrom wykonywanej na co dzień zwyczajnej pracy, po której zostają sterty zapisanego wyników na papierze. Autorzy z młodzieńczą werwą opowiadają o publikowaniu jako o esencji naukowego żywota, radząc by już na etapie planowania badań (dla autora fizyka oznacza to pomiary) przewidywać wykorzystanie ich wyników do ogłaszania. Nie dzielą z czytelnikiem najgłębszej treści naukowej kultury, której podstawą jest badawcza myśl, zamiar zbudowany na fundamentach istniejącej wiedzy i weryfikowany w nieustannych konfrontacjach – dyskusjach i badawczych próbach. Przemawiając z wysokiej pozycji swoich uczelni, autorytatywnie potwierdzają intuicję zespołów średnich, słabych lub niewolniczych, że byle jaki wynik pomiaru zasługuje na publikowanie, jeśli wydaje się poprawny. Ich poradnik będzie skuteczną pomocą w formatowaniu i polerowaniu wyników miarkich, by nikomu niepotrzebne teksty przepychać przez jak najwyżej usytuowane redakcyjne sita. Cytowane statystyki potwierdzają, że to rozpowszechniony światowy trend, daleki od standardu wysokiej kultury pracy naukowej.

Zafascynowani własnymi sukcesami publikacyjnymi autorzy nie dostrzegają jeszcze innej, głębszej, a skrytej cechy publikacyjnego systemu w nauce, który ciekawie opisują. Wśród bez mała 18 tysięcy naukowych czasopism świata, którym autorytet polskiego ministra przydzielił etykiety (punkty) czasopism naukowych, wymieniają jednym tchem *Nature*, *Science*, a potem *Polimery w domu i zagrodzie*, oraz *Króliki (!)*. Przeoczyli jawną śmieszność w traktowaniu ostatnich (i tysięcy im podobnych) jako miejsca publikowania wyników pracy naukowej – czyli badawczej. Potwierdzają zakorzeniony w kraju defekt rozdymania obszaru „naukowej twórczości” do granic absurdu na mocy biurokratycznego dyktatu. Bezrefleksyjny przekaz pozwala poszukującym

wsparcia młodym dryfować po peryferiach pracy badawczej, gdzie grzęzną z dala od otwartych przestrzeni światowej nauki. Tymczasem praca nie może być nazywana nauką, jeśli nie cechuje jej dociekliwość, a nawet gotowość do upartego weryfikowania utartych poglądów i twierdzeń, w poszukiwaniu nowych zjawisk, efektów, sformułowań, ocen lub myśli. Tylko te są warte ogłaszania, pozostałe to ledwie publicystyka, ćwiczebne wprawki lub składane po kolei klocki większej całości oczekującej na pełną krystalizację z upływem czasu. Praca prawdziwie naukowa czyli odkrywczą powstawać może w każdych warunkach, a jej prezentacja wymaga zaledwie tego, co lapidarnie ujął recenzent prowincjonalnego lekarza i późniejszego noblisty:<sup>2</sup> *It leaves nothing more to be proved.*

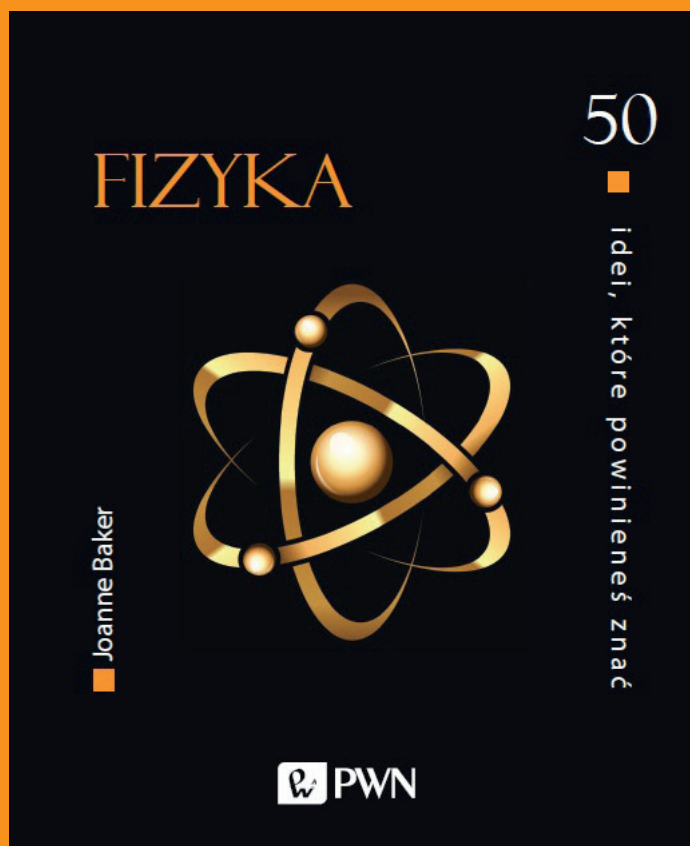
Poradnik publikacyjny Wasylczyka i Siudy ma szansę spotkać się z bardzo różnym przyjęciem w naukowych pracowniach i instytutach: od zachwyty ambitnych młodych przyrodników, przez pobłażliwą życzliwość ich profesorów, do politowania ze strony tuzów humanistyki. Najciekawszy będzie jego potencjalny wpływ na środowiska nauki miernej, który poznamy po niewielu latach. Dla pozbawionych oparcia w swoim środowisku pracujących badaczy jest światłem w tunelu, dla umocowanych zarządców naukowych włości – czerwoną lampką alarmową. Kręgi władzy nad polską nauką też mają okazję do refleksji: przyszłość publikowania w językach obcych należy do translatorów automatycznych, więc najwyższy czas wspierać powrót do pisarstwa w języku ojczystym, zanim jego naukowe odmiany całkowicie zwiędną, wyparte przez surową i nieporadną angielszczyznę.

---

2. Robert Koch (Nobel w medycynie 1905), odkrywca prątków gruźlicy i bakterii wąglika, był lekarzem powiatowym w Wolsztynie. Komentarz prof. Juliusa Cohnheima wygłoszony został po pierwszej prezentacji wyników badań we Wrocławiu. [Za:] <https://www.britannica.com/biography/Robert-Koch>



## 50 idei, które powinieneś znać



Seria książek wprowadzających w fascynujący świat pytań i zagadnień – tych trudnych i tych zupełnie podstawowych – które od dawna towarzyszą ludzkości w procesie zrozumienia świata.

Seria prezentuje najważniejsze teorie oraz idee głównych dziedzin wiedzy, stanowiąc świetny punkt wyjścia do dalszej nauki.

**Obowiązkowa lektura dla każdego początkującego erudyty.**

Wznowienie polskiego wydania światowego bestselleru literatury popularno-naukowej z pasjonującej serii *50 idei, które powinieneś znać*. Publikacja zawiera 50 krótkich, świetnie napisanych esejów prezentujących najważniejsze koncepcje w dziejach fizyki, objaśniających jak funkcjonuje otaczający nas świat. Autorka w przystępny sposób, nie posługując się wzorami matematycznymi, opowiada o najważniejszych teoriach i odkryciach w dziedzinie fizyki. Przedstawia historyczne przełomy naukowe, takie jak prawo Keplera o ruchu planet czy prawo grawitacji Newtona; opisuje złożoność współczesnych teorii: od zasady nieoznaczoności Heisenberga, poprzez zakaz Pauliego, kota Schrödingera, po teorię strun. **Obala mit o niedostępności fizyki dla przeciętnego człowieka.** Teksty uzupełnione są ilustracjami, biogramami najśłynniejszych fizyków, kalendarium odkryć fizycznych, słowniczkiem pojęć oraz indeksem.

