

POSTĘPY FIZYKI



CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

**Nielokalne korelacje
pomiędzy przestrzennie rozdzielonymi atomami**
Jan Chwedeńczuk

**Szybki koniec świata,
czyli czego nie wiemy o postępującym ociepleniu**
Janusz Lipkowski

Fotowoltaika przyszłością energetyki
Marek Godlewski

LIGO i fale grawitacyjne I (wykład noblowski z 2017 roku)
Rainer Weiss

2 / 2020
TOM 71



nr indeksu 369721





POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE (PTF)

www.ptf.net.pl

ZARZĄD GŁÓWNY

Leszek Sirko (prezes)
Bogdan Kowalski (sekretarz generalny)
Jan Grabski (skarbnik)
Katarzyna Chałasińska-Macukow
Dariusz Grech
Bohdan Grządkowski
Zbigniew Kąkol
Stanisław Kistryn
Mirośław Łoś
Maiej Maśka
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

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)
Mirośław 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

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 Grządziel (Gliwice)
Aleksandra Piórkowska-Kurpas (Katowice)
Maciej Rybczyński (Kielce)
Małgorzata Nowina-Konopka (Kraków)
Janusz Filiks (Lublin)
Janusz Kuliński (Łódź)
Katarzyna Książek (Opole)
Sławomir Mamica (Poznań)
Jacek Fal (Rzeszów)
Agnieszka Włodarkiewicz (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

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 w formie przyjętej w czasopiśmie 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/).

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

© Copyright by Polskie Towarzystwo Fizyczne

Wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne

Skład i łamanie: Fixpoint Krzysztof Rudnik

Szanowni Czytelnicy,

epidemia koronawirusa zaburzyła życie Polek i Polaków, w tym także plany wydawnicze naszego kwartalnika. W kwietniu nie odbył się Jubileuszowy 46. Zjazd Fizyków Polskich, w związku z czym numer *Postępów Fizyki* poświęcony 100-leciu PTF ukaże się dopiero jesienią br. Zapraszamy zatem do zapoznania się z drugim tegorocznym numerem PF, w którym: dr hab. Jan Chwedeńczuk omawia pionierskie prace doświadczalne oraz najnowsze wyniki badające nielokalność w gazach kwantowych jako głos w trwającej od 1935 roku dyskusji na temat sprzeczności mechaniki kwantowej z tezami lokalnego realizmu, odsyłamy Czytelników do artykułu dr. hab. Andrzeja Dragana i prof. Artura Ekerta, którzy próbują odpowiedzieć na pytanie, czy najważniejsze cechy świata kwantów mogą wynikać ze szczególnej teorii względności, która do tej pory z mechaniką kwantową wydawała się nie mieć wiele wspólnego, a prof. Janusz Lipkowski wieści szybki koniec świata. Ponadto publikujemy nowe teksty w stałych cyklach: wykłady noblowskie, 70 lat PF, Kronika PTF.

21 kwietnia 2020 upłynął termin zgłoszeń na ogłoszony przez PTF Konkurs na najlepszy artykuł upowszechniający wiedzę fizyczną. Wpłynęło 12 artykułów, nad którymi obecnie pochyłają się członkowie Jury Konkursu – wyniki zostaną ogłoszone na stronie internetowej PTF do końca czerwca br.

Rok 2020 Rokiem Fizyki w Polsce i rokiem 100-lecia Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Mamy nadzieję, że spotkamy się na nadzwyczajnym 46. Zjeździe Fizyków Polskich (Warszawa 16-18.10.2020).

Informujemy:

- 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



Nielokalne korelacje pomiędzy przestrzennie rozdzielonymi atomami J. Chwedeńczuk	2
Czy względność leży u źródeł kwantowej egzotyki? J. Chrostowski	7
Szybki koniec świata, czyli czego nie wiemy o postępującym ociepleniu J. Lipkowski	9
Fotowoltaika przyszłością energetyki M. Godlewski	16
LIGO i fale grawitacyjne I R. Weiss	22
Wspomnienie o Profesorze Jerzym W. Jastrzębskim K. Rusek	39
Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego	40

Próba zobrazowania einsteinowskiej idej grawitacji (OTW)
(ryc.1 w: Rainer Weiss *LIGO i fale grawitacyjne I*)

Nielokalne korelacje pomiędzy przestrzennie rozdzielonymi atomami

Jan Chwedeńczuk

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Streszczenie. Mechanika kwantowa dopuszcza, by obiekty rozdzielone na znaczną odległość wpływały na siebie natychmiast, bez udziału fizycznego oddziaływania. By pogodzić takie zjawiska z postulatem, że prędkość światła jest skończona i nieprzekraczalna, należy odrzucić lokalny realizm. Dyskusje na temat sprzeczności mechaniki kwantowej z tezami lokalnego realizmu trwają od roku 1935, gdy ukazała się praca Einsteina, Podolskiego i Rosena. Niecałe trzydzieści lat później John Bell sformułował prosty przepis, zwany nierównością Bella, za pomocą którego można badać, czy dany układ kwantowy jest nielokalny. W tym artykule przedstawię postulaty lokalnego realizmu, zarys teorii Bella, omówię pionierskie prace doświadczalne oraz najnowsze wyniki badań nad nielokalnością w gazach kwantowych

W 1935 roku Albert Einstein, Boris Podolski i Nathan Rosen przedstawili argumenty na rzecz tezy, że opis świata, jakiego dostarcza mechanika kwantowa jest niekompletny [1]. Od „kompletnej” teorii oczekiwali, by spełniała wymogi, które obecnie nazywamy postulatami „lokalnego realizmu”. Realizm oznacza, że obiekty fizyczne mają obiektywnie określone własności (takie jak pęd czy położenie), niezależnie od ingerencji obserwatora. Lokalność wymaga, by stan układu zmieniał się tylko pod wpływem tego, co dzieje się w jego otoczeniu.

Einstein, Podolski i Rosen wzięli na warsztat układ składający się z dwu części i pokazali, iż teoria kwantów nie tylko dopuszcza, że stan jednego podukładu staje się określony natychmiast po pomiarze wykonanym na drugim, to jeszcze jego własności zależą od wyników tego pomiaru. Tym samym złamane są postulaty lokalnego realizmu, stąd teoria kwantów jest niekompletna. Już sam tytuł pracy „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?” zdradza zakończenie.

Minęło prawie 30 lat, gdy w 1964 roku irlandzki fizyk John Bell opublikował pracę „On the Einstein Podolsky Rosen Paradox”, w której wykazał, że mechaniki kwantowej nie da się „uzupełnić” tak, by spełniała postulaty lokalnego realizmu [2]. Dopóty, dopóki jest teorią obowiązującą – to znaczy nie zostanie zakwestionowana wynikami pomiarów – klasyczny obraz świata, przynajmniej na poziomie cząstek elementarnych, atomów i cząsteczek, należy porzucić. Przytoczymy teraz argument Bella, w nieco zmienionej i bardziej „popularnej” postaci, zaproponowanej przez Johna Clausera, Michaela Horne’a, Abnera Shimony’ego oraz Richarda

Holta [3].

Rozważmy oddalone układy A i B , którym zostają przydzielone dwie części obiektu fizycznego, i w których osobno mierzy się wielkość fizyczną mogącą przyjmować wartość 1 albo -1 . Zbiorczy wynik pojedynczego pomiaru to jedna z poniższych par liczb

$$\begin{aligned} (A : 1, B : 1), & \quad (A : 1, B : -1), \\ (A : -1, B : 1), & \quad (A : -1, B : -1). \end{aligned} \quad (1.1)$$

Doświadczenie powtarzane jest m razy – otrzymujemy zbiór m par wyników $\{(a_1, b_1), \dots, (a_m, b_m)\}$ i obliczamy *korelator*

$$E_m(a, b) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m a_k b_k. \quad (1.2)$$

Gdy $m \rightarrow \infty$, średnią arytmetyczną można zastąpić średnią po... no właśnie, po czym? By to zrozumieć, wyobraźmy sobie proces fizyczny, który prowadzi do pomiarów w A i B . Pewien obiekt jest dzielony na dwie części i każda z nich poddawana jest osobnym pomiarem. *Realizm* dopuszcza, by wyniki były powiązane, a korelacja powstaje w momencie podziału wyjściowego obiektu. Kiedy części są rozdzielone ich własności fizyczne są określone. To znaczy, że

$$E_m(a, b) \xrightarrow{m \rightarrow \infty} E(a, b) = \int d\lambda \rho(\lambda) a(\lambda) b(\lambda). \quad (1.3)$$

Tutaj λ jest pewną zmienną losową o rozkładzie prawdopodobieństwa $\rho(\lambda)$. Odzwierciedla on naszą niewiedzę o szczegółach mechanizmu podziału korelującego wyniki pomiarów w A z wynikami pomiarów w B . Jednak

zakładamy, że jest jakiś deterministyczny proces, który sprawia, że za każdym razem A i B mierzą jakieś $a(\lambda)$ i $b(\lambda)$ z wartością λ , która „się wylosowała” z rozkładu $\rho(\lambda)$. Rozumowanie Bella i kwartetu Clauser-Horne-Shimony-Holt (CHSH) opiera się na badaniu własności $E(a, b)$ przy zmianie wielkości mierzonych w A i w B . Dopuszczamy, że w obu podukładach obserwatorzy niezależnie decydują, czy mierzyć, tak jak poprzednio a i b , czy też jakąś inną wielkość a' bądź b' , za każdym razem dającą wynik ± 1 . Po decyzji, że w A mierzymy a' zamiast a , zaś w B pozostajemy przy b , korelator ma postać

$$E(a', b) = \int d\lambda \rho(\lambda) a'(\lambda) b(\lambda). \quad (1.4)$$

Decyzja podjęta w A nie wpływa na wynik pomiaru w B : własności podukładów są określone przez to, co dzieje się *lokalnie*. Rozważmy wartość bezwzględną kombinacji czterech korelatorów, którą nazywamy współczynnikiem Bella

$$\mathcal{B} = |E(a, b) - E(a', b) + E(a, b') + E(a', b')|. \quad (1.5)$$

\mathcal{B} przyjmuje maksymalną wartość, na przykład, niezależnie od λ , $a = 1$, $b = 1$, $a' = -1$ oraz $b' = 1$. Wtedy wszystkie korelatory wynoszą $+1$, zatem dla E zgodnych z postulatami lokalnego realizmu [równanie (1.3)] zachodzi

$$\mathcal{B} \leq 2. \quad (1.6)$$

Nierówność tę nazywamy nierównością Bella, bądź nierównością CHSH [2, 3].

Pozostaje ostatni krok – wykazać, że istnieją układy kwantowe, dla których łamana jest (nie jest spełniona – przyp. red.) nierówność Bella. Rozważmy dwie cząstki o spinie $1/2$ w stanie singletowym

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow, \downarrow\rangle - |\downarrow, \uparrow\rangle), \quad (1.7)$$

gdzie $|\uparrow, \downarrow\rangle = |\uparrow\rangle_A \otimes |\downarrow\rangle_B$, $\hat{\sigma}_z^{(A)} |\uparrow / \downarrow\rangle_A = \pm |\uparrow / \downarrow\rangle_A$ (i analogiczne dla B), $\hat{\sigma}_z^{(A)}$ zaś oznacza z-tową macierz Pauliego układu A [4]. Dla tego układu rozważmy korelator

$$E(\theta, \varphi) = \langle \hat{\sigma}_\theta^{(A)} \hat{\sigma}_\varphi^{(B)} \rangle, \quad (1.8)$$

gdzie

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_\theta^{(A)} &= \hat{\sigma}_x^{(A)} \cos \theta + \hat{\sigma}_y^{(A)} \sin \theta, & \hat{\sigma}_\varphi^{(B)} \\ &= \hat{\sigma}_x^{(B)} \cos \varphi + \hat{\sigma}_y^{(B)} \sin \varphi. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Licząc średnią (1.8) na stanie (1.7) otrzymujemy

$$E(\theta, \varphi) = -\cos(\theta - \varphi). \quad (1.10)$$

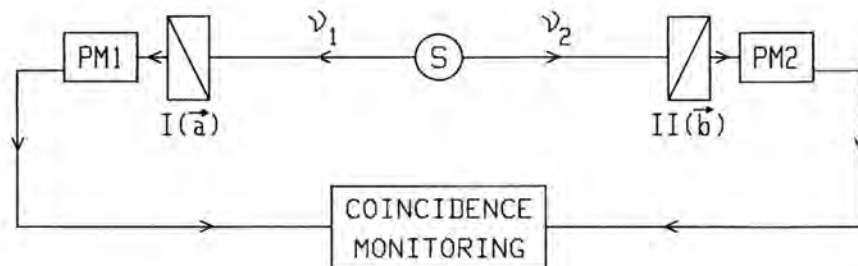
Biorąc $\theta = 0$, $\theta' = \frac{\pi}{2}$, $\varphi = -\frac{\pi}{4}$ oraz $\varphi' = \frac{\pi}{4}$, dostajemy

$$\mathcal{B} = |E(\theta, \varphi) - E(\theta', \varphi) + E(\theta, \varphi') + E(\theta', \varphi')| = 2\sqrt{2}, \quad (1.11)$$

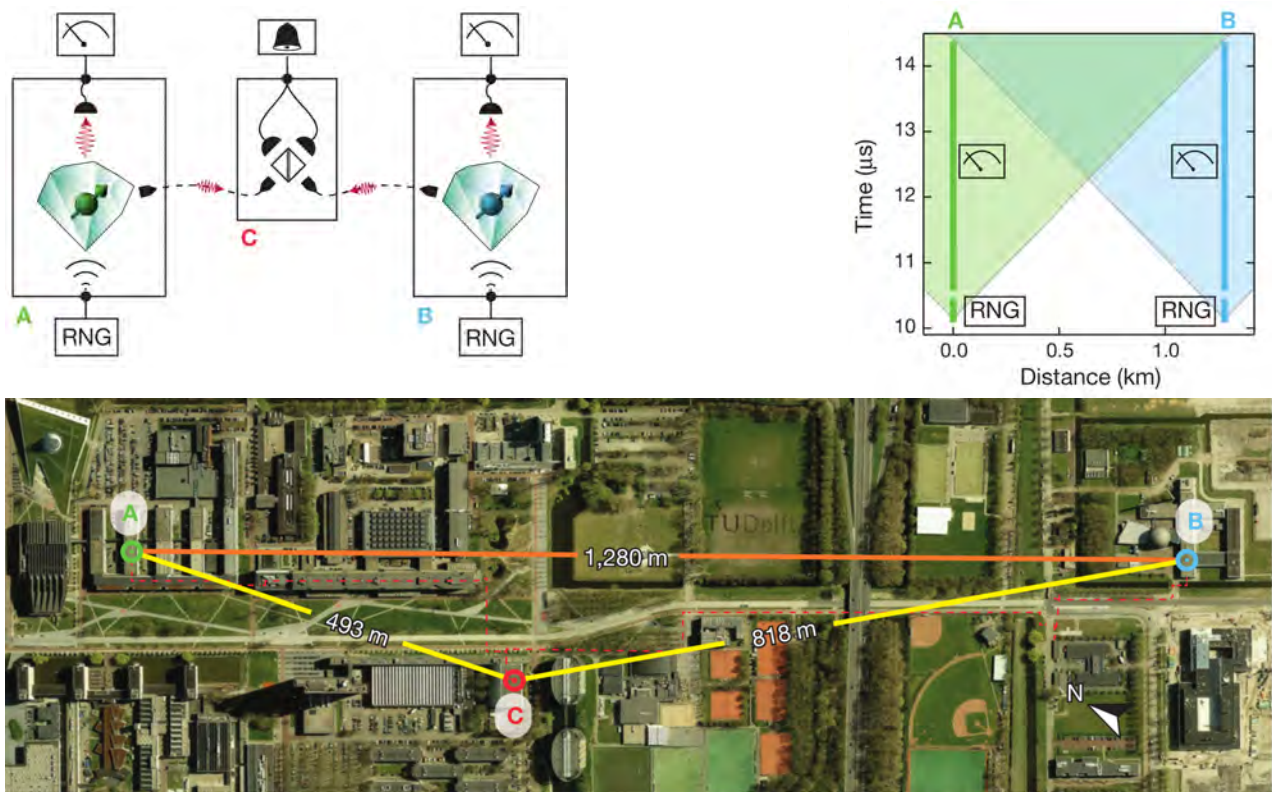
czyli nierówność Bella nie jest spełniona. Mechanika kwantowa nie spełnia postulatów lokalnego realizmu – nie istnieje „ukryta zmienna” λ , która w klasyczny sposób, zgodnie z równaniem (1.3), koreluje dwa spiny w stanie (1.7).

* * *

Pora prześledzić, jak te przewidywania są empirycznie weryfikowane. Pierwsze doświadczenia wykonywały pary fotonów powstałe w procesie parametrycznego podziału częstości [5] i splątane w polaryzacjach [6, 7]. Uproszczony schemat doświadczenia, typowy dla tego typu eksperymentów, przedstawiony jest na rys. 1. Źródłem fotonów (S) jest nieliniowy kryształ, na który pada wiązka laserowa. W trakcie propagacji w kryształach foton należący do wiązki ulega zamianie na parę fotonów o niższej częstości, tak że zachowany jest pęd i energia. W wyniku powstaje splątana para fotonów (tu oznaczonych przez ν_1 i ν_2), której stan jest opisywany równaniem (1.7), gdzie strzałki \uparrow / \downarrow odpowiadają wzajemnie prostopadłym polaryzaczom, a obszary A i B przeciwnym kierunkom, prowadzącym do polaryzatorów I i II. Ich orientacje \vec{a} i \vec{b} odpowiadają kątom θ i φ i mogą być niezależnie zmieniane. Fotopowielacze tworzą makroskopowy sygnał $E_I(\vec{a})$ i $E_{II}(\vec{b})$, który jest korelowany zgodnie z równaniem (1.2), a siła korelatora, badana nierównością (1.6), łamie klasyczne ograniczenie.



Rys. 1. Schemat doświadczenia pochodzący z pracy [7]. Źródło splątanych fotonów (S) wysyła parę fotonów do dwóch polaryzatorów I i II ustawionych w kierunkach zgodnych z wektorami \vec{a} i \vec{b} . Fotopowielacze PM1 i PM2 dają makroskopowy sygnał, którego korelator jest wynikiem doświadczenia.



Rys. 2. Schemat doświadczenia, w którym bada się nierówność CHSH (na górze po lewej). Dwa diamenty emitują po fotonie, te zaś podlegają pomiarowi w C, co splątuje A i B. Następnie, losowo w A i B, dobierane są orientacje kierunków, wzdłuż których wykonywane są pomiary rzutu spinów pojedynczych elektronów. Schemat na górze po prawej pokazuje, że od momentu generacji kierunków do pomiarów mija mniej czasu, niż zajęłoby światło skomunikowanie dwóch podukładów (stożki świetlne nie przekrywają się). Mapa na dole przedstawia schemat kampusu Delft University of Technology z zaznaczonymi laboratoriami A, B i C. Wszystkie rysunki pochodzą z pracy [8].

Czy każda obserwacja łamania nierówności Bella jest dowodem na sprzeczność mechaniki kwantowej z postulatami lokalnego realizmu? A nuż dwa polaryzatory w jakiś sposób się ze sobą komunikują, przesyłając informacje o swoich ustawieniach? By to wykluczyć, należałoby je rozsunąć na dużą odległość, a wszelkie manipulacje na obu przedstawicielach splątanej pary wykonać na tyle szybko, by wykluczyć przepływ informacji między podukładami (zakładamy, że wszystkie fizyczne sygnały przemieszczają się z prędkością nie większą niż światło). Takie doświadczenie udało się przeprowadzić w 2015 roku [8], a rys. 2 przedstawia jego schemat. Dwa odległe o 1.3 km diamenty (punkty A i B na mapie i na schematach) emitują po jednym fotonie. Para spotyka się mniej więcej po środku (C), gdzie w wyniku pomiaru tworzony jest stan splątany spinów pary elektronów w diamentach, taki jak w równaniu (1.7). Opierając się na wynikach uzyskanych z kwantowych generatorów liczb losowych (RNG – ang. *random number generator*), które dają wynik 0 bądź 1, niezależnie w A i B dobiera się kierunek, wzdłuż którego mierzy się spiny splątanych elektronów. W ten sposób uzyskuje się cztery korelatory $E(0,0)$, $E(1,0)$, $E(0,1)$ i $E(1,1)$. Na ich podstawie bada się nierówność CHSH (1.6), a otrzymany

wynik $B = 2.42 \pm 0.20$ łamie klasyczne ograniczenie. Wszystkie operacje wykonane w A i B, to jest losowanie kierunku oraz pomiar, wykonywane są w czasie wykluczającym komunikację podukładów z prędkością światła, co obrazuje schemat czasoprzestrzenny na rys. 2.

W niektórych doświadczeniach ustawienia detektorów „losują” gwiazdy. W dwóch laboratoriach A i B, które dysponują dwiema częściami stanu splątanego (1.7), teleskopy obserwują przypadkowe migotanie światła pochodzącego od dwóch odległych gwiazd i na tej podstawie dobiera się ustawienia polaryzatorów [9, 10]. Nadal nie możemy wykluczyć, że miliardy lat temu gwiazdy uknuły spisek i migoczą teraz w sposób synchroniczny tak, aby oszukać fizyków na Ziemi, dając im błędne przeświadczenie, że udało im się potwierdzić sprzeczność mechaniki kwantowej z postulatami lokalnego realizmu. Jest to jednak mało prawdopodobne.

* * *

Doświadczeniom ze splątanymi parami fotonów towarzyszą badania nad nielokalnymi korelacjami łączącymi cząstki masywne [11, 12]. Rzecz w tym, że spreparowanie nieklasycznego stanu pary atomów czy czą-

steczek jest trudne i wymaga naprawę zaawansowanych technik eksperymentalnych. Potrzebne jest źródło cząstek, które jest stabilne i którym da się manipulować w kontrolowany sposób. Te kryteria spełnia kondensat Bosego–Einsteina, ultrazimny gaz bozonów, którego istnienie przewidziano w latach dwudziestych XX wieku [13, 14]. Na potwierdzenie empiryczne tej tezy przyszło czekać ponad siedemdziesiąt lat [15, 16].

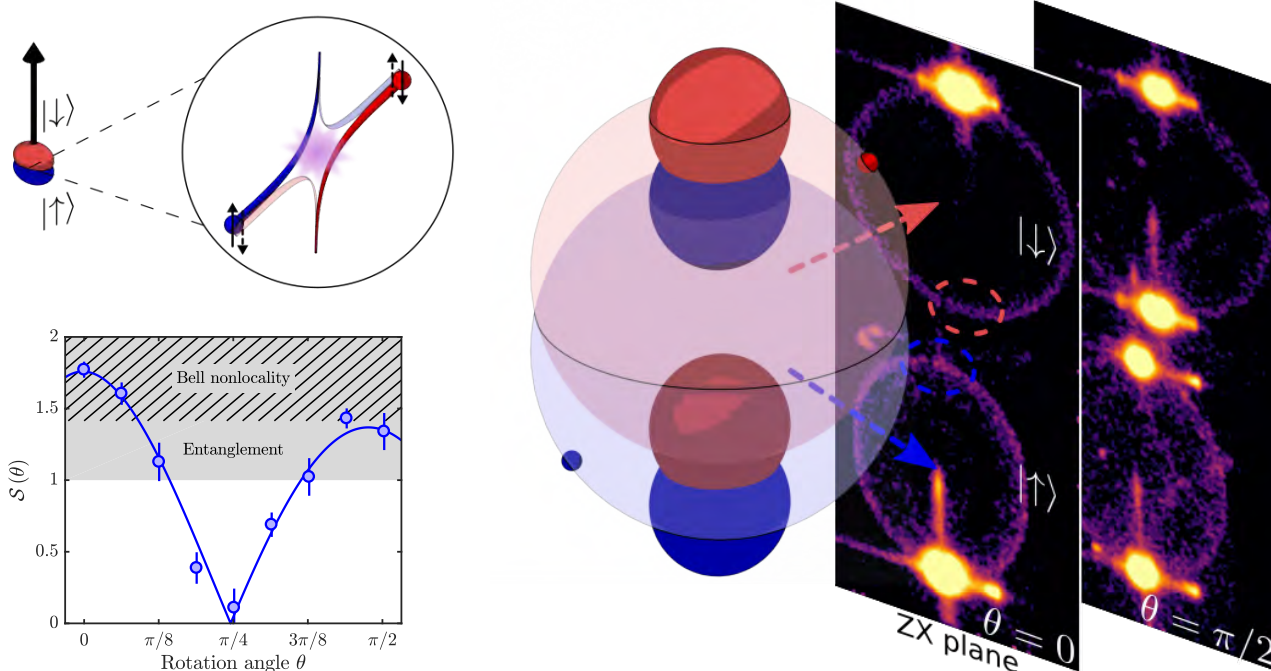
Kondensat to zbiór atomów, cząsteczek [17, 18] bądź bardziej egzotycznych obiektów (np. polarytonów [19]), które – w pewnym uproszczeniu – znajdują się w tym samym stanie: mają ten sam pęd i energię. Taki gaz jest pod wieloma względami podobny do wiązki laserowej, w której prawie wszystkie fotony lecą w tym samym kierunku (pęd) i mają ten sam kolor (energia). Laser, którego światło przechodzi przez nieliniowy ośrodek, staje się (w procesie parametrycznego podziału częstości) źródłem par splątanych fotonów. Analogiczne zjawisko zachodzi w kondensatach – cząstki tworzące gaz kwantowy nieustannie się zderzają i jeżeli dostarczą się im odpowiedniej energii, mogą opuścić matczyną chmurę. Jeżeli ponadto „wyposażą się” je w dodatkowy stopień swobody, odpowiadający polaryzacji fotonów, uzyskuje się gotowy przepis na stan typu Bella (1.7).

Doświadczenie, w którym zgodnie z tą regułą wytworzono atomowy stan Bella, a następnie dokonano pomiaru korelatora E z równania (1.8), wykonano

w laboratoriach Australian National University w 2019 roku [20]. Punktem wyjściowym był kondensat atomów ^4He w stanie spinowym $|J = 1, m_J = 1\rangle$, który oznaczmy jako $|\uparrow\rangle$. Oddziaływanie gazu z wiązką światła dostrójoną do przejścia $2^3S_1 \rightarrow 2^3P_0$ przetrzuca połowę atomów do stanu $|J = 1, m_J = 0\rangle$ ($|\downarrow\rangle$), nadając im jednocześnie prędkość około 120 mm/s. Dwie początkowo nakładające się chmury, rozchodzą się w przeciwnych kierunkach, zaś wchodzące w ich skład atomy zderzają się i rozpraszają, jak pokazano w górnej lewej części rys. 3. Główna część tego rysunku (pośrodku) przedstawia schemat pełnego układu po zderzeniu i nałożeniu dodatkowego gradientu pola magnetycznego. W wyniku efektu Sterna-Gerlaha otrzymuje się nieco rozsunięte chmury atomów $|\uparrow\rangle$ i $|\downarrow\rangle$, które można z osobna obserwować (po prawej stronie), mierząc diagonalną część funkcji korelacji (1.8). Korzystając z tej wielkości utworzono

$$\mathcal{S}(\theta, \varphi) = |E(\theta, \theta) - E(\varphi, \varphi)|. \quad (1.12)$$

Można wykazać [20, 21], że gdy $\mathcal{S}(\theta, \varphi) > 1$, dwa atomy są splątane, zaś gdy $\mathcal{S}(\theta, \theta + \frac{\pi}{2}) > \sqrt{2}$, korelacji między nimi nie można wytłumaczyć za pomocą szerokiego spektrum lokalnych teorii z ukrytym parametrem, patrz równanie (1.3). Łamanie obu tych klasycznych granic zaobserwowano w doświadczeniu (dolna lewa część rys. 3). Jest to jeden z pierwszych kroków na drodze



Rys. 3. Schemat doświadczenia [20], w którym pary atomów o przeciwnych spinach i poruszających się w przeciwnych kierunkach zderzają się, tworząc stan (1.7) – górna lewa część rysunku. Pełen układ z dwoma kondensatami w stanie $|\uparrow\rangle$ i $|\downarrow\rangle$ (czerwony i niebieski) oraz wynik pomiaru położenia pojedynczych rozproszonych atomów, pokazano w głównej części rysunku. Na dole z lewej funkcja korelacji $\mathcal{S}(\theta) \equiv \mathcal{S}(\theta, \theta + \frac{\pi}{2})$ wraz z zaznaczonymi obszarami, w których łamane są klasyczne ograniczenia.

do zaobserwowania nielokalnych zjawisk kwantowych w układach mezoskopowych, na które składają się miliony bądź miliardy cząstek [22, 23, 24, 25, 26].

* * *

Mechanika kwantowa jest teorią fizyczną, której przewidywania nieustannie potwierdzone są w doświadczeniach. Praktycznymi przykładami, że „się zgadza” z doświadczeniem są, między innymi, tranzystory w procesorach komputerowych, wyświetlacze LCD czy lasery. Jednak niektóre jej składowe, takie jak superpozycja, splątanie, czy problem obserwatora i pomiaru, nadają teorii kwantów wymiar fundamentalny i filozoficzny. Wśród nich jest zjawisko najbardziej kwantowe z kwantowych – łamanie nierówności Bella, świadczące o sprzeczności tego zbioru praw fizycznych z postulatami lokalnego realizmu.

Literatura

- [1] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
- [2] J. S. Bell, *Physics* **1**, 195 (1964).
- [3] J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony, and R. A. Holt, *Phys. Rev. Lett.* **23**, 880 (1969).
- [4] J. J. Sakurai, J. Napolitano, et al., *Modern quantum mechanics*, Vol. 185 (Pearson Harlow, 2014).
- [5] P. G. Kwiat, K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, A. V. Sergienko, and Y. Shih, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 4337 (1995).
- [6] S. J. Freedman and J. F. Clauser, *Phys. Rev. Lett.* **28**, 938 (1972).
- [7] A. Aspect, J. Dalibard, and G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804 (1982).
- [8] B. Hensen, H. Bernien, A. E. Dréau, A. Reiserer, N. Kalb, M. S. Blok, J. Ruitenberg, R. F. L. Vermeulen, R. N. Schouten, C. Abellán, W. Amaya, V. Pruneri, M. W. Mitchell, M. Markham, D. J. Twitchen, D. Elkouss, S. Wehner, T. H. Taminiau, and R. Hanson, *Nature* **526**, 682 (2015).
- [9] J. Handsteiner, A. S. Friedman, D. Rauch, J. Gallicchio, B. Liu, H. Hosp, J. Kofler, D. Bricher, M. Fink, C. Leung, et al., *Phys. Rev. Lett.* **118**, 060401 (2017).
- [10] D. Rauch, J. Handsteiner, A. Hochrainer, J. Gallicchio, A. S. Friedman, C. Leung, B. Liu, L. Bulla, S. Ecker, F. Steinlechner, et al., *Phys. Rev. Lett.* **121**, 080403 (2018).
- [11] M. Lamehi-Rachti and W. Mittag, *Phys. Rev. D* **14**, 2543 (1976).
- [12] H. Sakai, T. Saito, T. Ikeda, K. Itoh, T. Kawabata, H. Kuboki, Y. Maeda, N. Matsui, C. Rangacharyulu, M. Sasano, Y. Satou, K. Sekiguchi, K. Suda, A. Tamii, T. Uesaka, and K. Yako, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 150405 (2006).
- [13] S. N. Bose, (1924).
- [14] A. Einstein, SB Preuss. Akad. Wiss. phys.-math. Klasse (1924).
- [15] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, *Science* **198** (1995).
- [16] K. B. Davis, M.-O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. Kurn, and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3969 (1995).
- [17] M. Greiner, C. A. Regal, and D. S. Jin, *Nature* **426**, 537 (2003).
- [18] M. W. Zwierlein, C. A. Stan, C. H. Schunck, S. M. Raupach, S. Gupta, Z. Hadzibabic, and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 250401 (2003).
- [19] J. Kasprzak, M. Richard, S. Kundermann, A. Baas, P. Jembrun, J. Keeling, F. Marchetti, M. Szymańska, R. André, J. Staehli, et al., *Nature* **443**, 409 (2006).
- [20] D. Shin, B. Henson, S. Hodgman, T. Wasak, J. Chwedeńczuk, and A. Truscott, *Nature Communications* **10**, 1 (2019).
- [21] T. Wasak and J. Chwedeńczuk, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 140406 (2018).
- [22] J. Tura, R. Augusiak, A. B. Sainz, T. Vértesi, M. Lewenstein, and A. Acín, *Science* **344**, 1256 (2014).
- [23] R. Schmied, J.-D. Bancal, B. Allard, M. Fadel, V. Scarani, P. Treutlein, and N. Sangouard, *Science* **352**, 441 (2016).
- [24] E. G. Cavalcanti, C. J. Foster, M. D. Reid, and P. D. Drummond, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 210405 (2007).
- [25] Q. He, P. Drummond, and M. Reid, *Physical Review A* **83**, 032120 (2011).
- [26] E. Cavalcanti, Q. He, M. Reid, and H. Wiseman, *Physical Review A* **84**, 032115 (2011).

Czy względność leży u źródeł kwantowej egzotyki?¹

Jarosław Chrostowski

Streszczenie. Od swych początków mechanika kwantowa nie przestaje zadziwiać trudną do zrozumienia niezwykłością. Dlaczego jedna cząstka wydaje się przechodzić przez dwie szczeliny jednocześnie? Dlaczego zamiast konkretnych przewidywań możemy mówić tylko o ewolucji prawdopodobieństw? Zdaniem fizyków teoretyków z uniwersytetów w Warszawie i Oksfordzie, najważniejsze cechy świata kwantów mogą wynikać ze szczególnej teorii względności, która do tej pory z mechaniką kwantową wydawała się nie mieć wiele wspólnego.

Od czasu pojawienia się mechaniki kwantowej i teorii względności fizykom spędza sen z powiek niekompatybilność tych trzech konstrukcji (trzech, jak wiadomo teorii względności są dwie: szczególna i ogólna). Powszechnie przyjmowano, że opis mechaniki kwantowej jest bardziej fundamentalny i to teorię względności trzeba będzie do niego dopasować. Dwaj fizycy – dr hab. Andrzej Dragan z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (FUW) oraz prof. Artur Ekert z Uniwersytetu w Oksfordzie (UO)² właśnie zaprezentowali rozumowanie prowadzące do innego wniosku. W artykule „Quantum principle of relativity” („Kwantowa zasada względności”), opublikowanym 24,03,2020 w wolnym dostępie,³ dowodzą oni, że cechy mechaniki kwantowej decydujące o jej unikatowości i tak nieintuicyjnej egzotyce, na dodatek przyjmowane w niej „na wiarę” (jako aksjomaty), można wyjaśnić w ramach szczególnej teorii względności. Trzeba się tylko zdecydować na pewien dość nieortodoksyjny krok.

Albert Einstein zbudował szczególną teorię względności na dwóch postulatach. Pierwszy jest znany jako zasada względności Galileusza (która, nota bene, jest szczególnym przypadkiem zasady kopernikańskiej). Mówi ona, że fizyka jest taka sama w każdym układzie inercjalnym (czyli albo pozostającym w spoczynku,

albo poruszającym się ruchem jednostajnym prostoliniowym). Drugi postulat, zbudowany na wyniku słynnego eksperymentu Michelsona-Morleya, narzucał wymóg stałości prędkości światła w każdym układzie odniesienia.

„Einstein uważał drugi postulat za kluczowy. W rzeczywistości kluczowa jest zasada względności. Już w 1910 roku Władimir Ignatowski pokazał, że bazując tylko na niej można odtworzyć wszystkie zjawiska relatywistyczne szczególnej teorii względności. Efektowne proste rozumowanie, prowadzące bezpośrednio od zasady względności do relatywistyki, przedstawił też w 1992 roku profesor Andrzej Szymacha z Wydziału Fizyki UW”, mówi dr Dragan.

Szczególna teoria względności to spójna struktura, która dopuszcza trzy matematycznie poprawne rodzaje rozwiązań: świat cząstek poruszających się z prędkościami podświetlnymi, świat cząstek poruszających się z prędkościami nadświetlnymi. Ten trzeci wariant zawsze odrzucano jako niemający nic wspólnego z rzeczywistością. „Postawiliśmy pytanie: co się stanie gdy – na razie bez wnikania w fizyczność czy niefizyczność rozwiązań – potraktujemy serio nie część szczególnej teorii względności, lecz ją całą, razem z reżimem nadświetlnym? Spodziewaliśmy się paradoksów przyczynowo-skutkowych. Tymczasem zobaczyliśmy dokładnie te efekty, które tworzą najgłębszy rdzeń mechaniki kwantowej”, mówią dr Dragan i prof. Ekert.

Początkowo obaj teoretycy rozważali przypadek uproszczony: czasoprzestrzeń ze wszystkimi trzema rodzinami rozwiązań, ale składającą się tylko z jednego wymiaru przestrzennego i jednego czasowego (1 + 1). Cząstka pozostająca tu w spoczynku w jednym reżimie rozwiązań, w drugim wydaje się poruszać

1. Źródło: informacja zaczerpnięta z serwisu prasowego Wydziału Fizyki UW <http://www.fuw.edu.pl/informacje-prasowe.html>

2. Kontakt z autormi:

dr hab. Andrzej Dragan Instytut Fizyki Teoretycznej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, e-mail: dragan@fuw.edu.pl

prof. Artur Ekert University of Oxford,

e-mail: artur.ekert@maths.ox.ac.uk

Obaj autorzy pracują także w Centre for Quantum Technologies, National University of Singapore.

3. A. Dragan, A. Ekert „Quantum principle of relativity”, *New Journal of Physics* 22 (2020), DOI: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab76f7>

nadświatlnie, co oznacza, że sama nadświatłość jest względna.

W tak skonstruowanej czasoprzestrzeni w naturalny sposób pojawiają się wydarzenia niedeterministyczne. Jeśli bowiem w jednym reżimie w punkcie A dochodzi do nawet całkowicie przewidywalnego wygenerowania cząstki nadświatlnej emitowanej ku punktowi B, gdzie informacji o powodach emisji po prostu nie ma, to z punktu widzenia obserwatora w drugim reżimie wydarzenia przebiegają od punktu B do punktu A, a więc zaczynają się od wydarzenia zupełnie nieprzewidywalnego. Okazuje się, że analogiczne efekty pojawiają się także w przypadku emisji cząstek podświatlnych. Obaj teoretycy wykazali ponadto, że po uwzględnieniu rozwiązań nadświatlnych naturalnie pojawia się ruch cząstki po wielu torach jednocześnie, a opis przebiegu zdarzeń wymaga wprowadzenia sumy zespolonych amplitud prawdopodobieństwa świadczących o istnieniu superpozycji stanów, zjawiska dotychczas kojarzonego wyłącznie z mechaniką kwantową.

W przypadku czasoprzestrzeni z trzema wymiarami przestrzennymi i jednym czasowym (3 + 1), czyli odpowiadającej naszej fizycznej rzeczywistości, sytuacja jest bardziej skomplikowana. Zasada względności w swojej oryginalnej postaci nie jest zachowywana, reżimy podświatlne i nadświatlne są rozróżnialne. Jednak badacze zauważyli, że gdy zmodyfikuje się zasadę względności do postaci: „Możliwość opisu zdarzenia w sposób lokalny i deterministyczny nie powinna zależeć od wyboru inercjalnego układu odniesienia”, ograniczy ona rozwiązania do tych, w których wszystkie wnioski z rozważań w czasoprzestrzeni (1 + 1) pozostają ważne.

„Zwróciliśmy przy okazji uwagę na możliwość ciekawej interpretacji roli poszczególnych wymiarów. W reżimie wyglądającym dla obserwatora na nadświatlne niektóre wymiary czasoprzestrzenne wydają się zmieniać swoje fizyczne role. Tylko jeden wymiar świata nadświatlnego ma charakter przestrzenny: ten, wzdłuż którego porusza się cząstka. Pozostałe trzy wymiary wydają się wymiarami czasowymi”, mówi dr Dragan.

Charakterystyczną cechą wymiarów przestrzennych jest to, że cząstka może się w nich przemieszczać w każdą stronę lub pozostawać w spoczynku, podczas gdy w wymiarze czasowym zawsze propaguje się w jedną stronę (co w potocznym języku nazywamy starzeniem). Trzy wymiary czasowe reżimu nadświatlnego

przy jednym przestrzennym (1 + 3) oznaczałyby więc, że cząstki w nieuchronny sposób starzeją się w trzech czasach jednocześnie. Proces starzenia się cząstki w reżimie nadświatlnym (1 + 3), obserwowany z reżimu podświatlnego (3 + 1), wyglądałby tak, jakby cząstka przemieszczała się jak fala kulista, prowadząc ku słynnej zasadzie Huygensa (każdy punkt ośrodka, do którego dotarło czoło fali, można traktować jako źródło nowej fali kulistej) oraz ku dualizmowi korpuskularno-falowemu.

„Cała dziwność, która pojawia się przy rozważaniu rozwiązań odnoszących się do reżimu wyglądającego na nadświatlne, okazuje się nie być dziwniejsza od tego, co od dawna mówi powszechnie akceptowana i doświadczalnie zweryfikowana teoria kwantowa. Przeciwnie, uwzględniając reżim nadświatlne można – przynajmniej teoretycznie – wyprowadzić ze szczególnej teorii względności część postulatów mechaniki kwantowej, które zazwyczaj przyjmowano jako niewynikające z innych, bardziej fundamentalnych przyczyn”, podsumowuje dr Dragan.

Niemal od stu lat mechanika kwantowa czeka na głębszą teorię, która pozwoliłaby wyjaśnić naturę jej zagadkowych zjawisk. Gdyby rozumowanie zaprezentowane przez autorów wspomnianego artykułu oparło się próbie czasu, historia okrutnie zakpiłaby ze wszystkich fizyków. Poszukiwana od dekad „nieznana” teoria, wyjaśniająca niezwykłość mechaniki kwantowej, byłaby bowiem strukturą znaną już od pierwszych prac nad teorią kwantów.



Ewolucja prawdopodobieństw i „niemożliwe” zjawiska mechaniki kwantowej mogą mieć źródła w szczególnej teorii względności, sugerują fizycy z uniwersytetów w Warszawie i Oxfordzie (źródło: F.U.W.).

Szybki koniec świata, czyli czego nie wiemy o postępującym ociepleniu¹

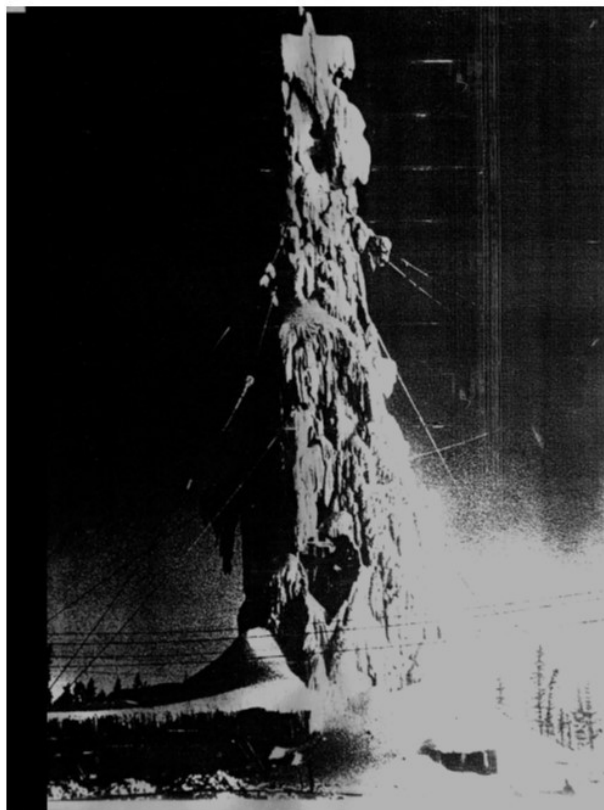
Janusz Lipkowski

Wydział Matematyczno-Przyrodniczy Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie i Towarzystwo Naukowe Warszawskie

Streszczenie. Artykuł dotyczy zagrożenia klimatu wynikającego z postępującej destabilizacji złóż metanu na Ziemi. Oszacowane ilości metanu "zamrożone" w formie hydratu, pod wodą na głębokościach kilkusetmetrowych, lub w rejonach wiecznej zmarzliny, przewyższają ilość tlenu w atmosferze. A uwolnienie go jest łatwe wskutek nadmiernego ocieplenia. Więc...

Nasz glob przeszedł w swojej historii pięciokrotnie okresy wielkiego wymierania, ostatnio ok. 65 mln lat temu, kiedy w morzach wyginęło 95% żyjących tam organizmów, a na lądach 70%. Ostatnio pojawiają się ostrzeżenia, że właśnie rozpoczęło się szóste wielkie wymieranie. Pogląd ten opiera się na niezwykle dramatycznych obserwacjach wzrostu liczby ginących gatunków. Na przykład w ciągu minionego dziesięciolecia ilość owadów w naszej strefie klimatycznej zmalała, licząc łączną ich wagę, trzykrotnie. Nie lekceważąc tych informacji muszę od razu stwierdzić, że nie będę o tym pisał, gdyż nie jestem w tej dziedzinie specjalistą i zwyczajnie się na tym nie znam. Nie jestem też ekspertem od zmian klimatu. Zajmę się wyłącznie metanem i jego wpływem na przyszłe losy świata. Nie jest to wiedza tajemna, specjaliści są świadomi wpływu metanu na klimat, ale z nieznanymi powodów zbyt mało, moim zdaniem, się o tym pisze i mówi w aspekcie bliskiej przyszłości. Można odnieść wrażenie, że powodem jest niepełna wiedza na temat wiązania metanu przez wodę, o czym za chwile napiszę.

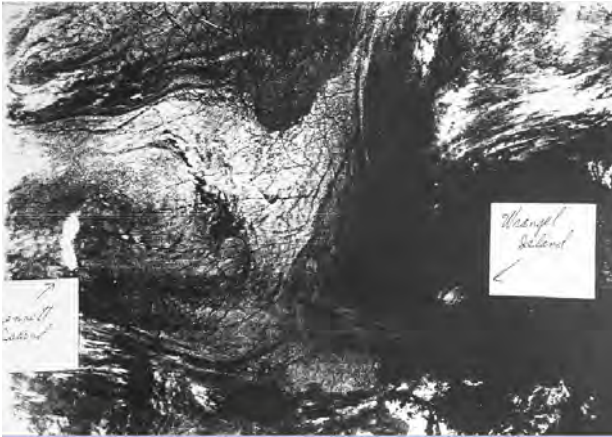
Zacznę od paru zdjęć o historycznej wadze: pierwsze (ryc. 1) przedstawia widok instalacji wiertniczej na Syberii po niespodziewanym wypływie wody z wykonywanego otworu wiertniczego. Ponieważ na zewnątrz panowała niezwykle niska temperatura (-63°C), to utworzył się widoczny na zdjęciu gigantyczny sopel. Było to w połowie XX wieku i niepełnie wiedziano, co było przyczyną tego zjawiska. Nie było chemicznej eksplozji, zwyczajnie w tym zimnie nagle wypłynęła woda! Drugą fotografię otrzymałem od przyjaciół z Nowosybirsk. Jest to zdjęcie zrobione z amerykańskiego satelity (ryc. 2),



Ryc. 1. Widok instalacji wiertniczej na Syberii z lat 50. XX w.. W wyniku wypływu wody z szybu wiertniczego, przy temperaturze zewnętrznej -63°C doszło do utworzenia gigantycznego sopla. Fotografia opublikowana w ówczesnej prasie radzieckiej została potem przedrukowana w *La Recherche* [La Recherche 18 192, 1193 (1987)]

pokazujące obszerny fragment morza arktycznego (zaznaczone są wyspy Wrangla i Benneta). Obserwatorów zaintrygowała rozległa chmura metanu (30x120 km) w kształcie banana (po lewej stronie fotografii u dołu), zlokalizowana w obszarze, na którym ZSRR wykonywał próby nuklearne. Amerykanie zwrócili się więc do uczonych w ZSRR o podjęcie wspólnych badań nad przyczy-

1. Referat wygłoszony na posiedzeniu Towarzystwa Naukowego Warszawskiego 6 marca 2020 roku.

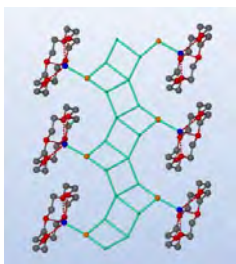


Ryc. 2. Fotografia satelitarna szerokiego obszaru morza arktycznego (zaznaczone wyspy Wrangla i Bennetta) zawierająca widok chmury gazu metanowego (z lewej strony u dołu) o kształcie przypominającym banana – długość (pionowo, na fotografii) 120 km i szerokość 30 km

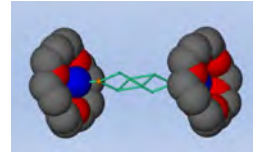
nami tego efektu. Do współpracy nie doszło, ale syberyjscy koledzy dostali tę fotografię, którą widzimy.

Rosjanie szybko opanowali niezbędną wiedzę o wyżej wspomnianych (i licznych innych) efektach związanych, jak się okazało, z erupcjami metanu. Doskonale wiadomo dzisiaj, że woda ma nadzwyczajne, prawie magiczne zdolności do wiązania substancji hydrofobowych bez tworzenia z nimi wiązań chemicznych. Po prostu cząsteczki wody chętnie tworzą struktury szkieletowe za pomocą wiązań wodorowych woda-woda. Takie struktury krystaliczne nie są trwałe samoistnie, lecz potrzebują wypełnienia istniejących w nich pustych przestrzeni przez obce składniki, które są niezbędne do zapewnienia trwałości strukturze, ale nie tworzą z wodą wiązań chemicznych.

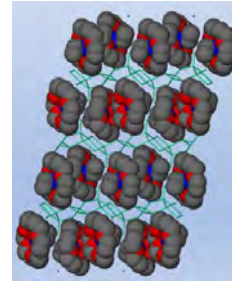
Tą tematyką zajmowałem się we współpracy z kolegami z Nowosybirsk przez ponad 20 lat. Nie będę tego opisywał, ale zilustruję kilkoma zdjęciami wybranymi z bardzo licznej kolekcji zbadanych struktur (ryc. 3, 4, 5). Bardzo jesteśmy dumni z tych osiągnięć, z licznych publikacji oraz kilku prac doktorskich. W szcze-



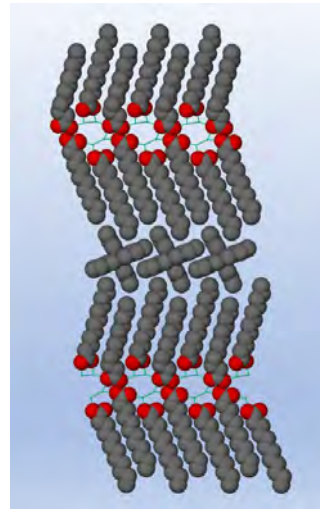
Ryc. 3a. Przykład struktury wody z substancjami hydrofobowymi – cząsteczki wody ukazane jako małe kuleczki jasnozielone tworzą agregaty, między którymi zlokalizowane są części hydrofobowe. Substancja „wiązana” przez wodę w tym przypadku to kompleks 18-korona-6 z fluorkiem amonu. Niebieskim kolorem oznaczono atomy azotu, pomarańczowym – fluor, czerwonym – tlen makrocyklu, szarym – węgiel, jasnozielonym – wiązania wodorowe między atomami tlenu wody, fluoru i azotu



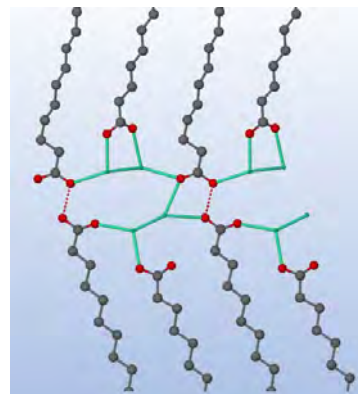
Ryc. 3b. Inny rzut oraz inna reprezentacja graficzna struktury z ryc. 3a



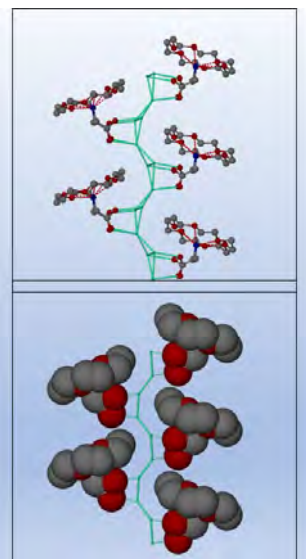
Ryc. 3c. Inny rzut oraz inna reprezentacja graficzna struktury z ryc. 3a i 3b



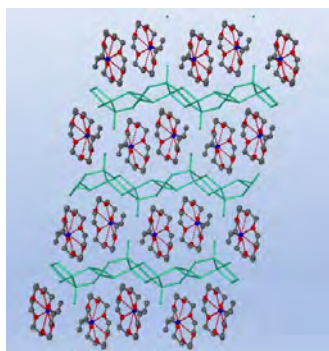
Ryc. 4a. Przykład struktury wody z substancjami hydrofobowymi – cząsteczki wody ukazane jako małe kuleczki jasnozielone, tworzą agregaty, między którymi zlokalizowane są części hydrofobowe. Jest to przykład struktury amfifilowej: jony alkiloamonium (o kształcie przypominającym w rzucie krzyż) wypełniają przestrzeń między hydrofobowymi końcami kwasu laurowego, zaś woda tworzy się z grupami karboksylowymi



Ryc. 4b. Inny rzut struktury z ryc. 4a, ukazujący sieć wiązań wodorowych wody (atomy tlenu wody – małe, jasnozielone kuleczki) z grupami kwasowymi (COO) – atomy tlenu tych grup zaznaczone kolorem czerwonym



Ryc. 5a. Przykład struktury wody z substancjami hydrofobowymi – cząsteczki wody ukazane jako małe kulki jasnozielone tworzą agregaty, między którymi zlokalizowane są części hydrofobowe. Substancja „wiązana” przez wodę w tym przypadku to kompleks 18-korona-6 z fluorkiem amonu (o innej stechiometrii niż na ryc. 3). Niebieskim kolorem oznaczono atomy azotu, pomarańczowym – fluor, czerwonym – tlen makrocyklu, szarym – węgiel, jasnozielonym – wiązania wodorowe między atomami tlenu wody



Ryc. 5b. Inna reprezentacja graficzna struktury z ryc. 5a

gólności jeden z rosyjskich doktorantów, Andrej Manakow (widoczny na fotografii Yurija Diadina w tle, ryc. 6) w ciągu rocznego pobytu w Warszawie nauczył się polskiego i w języku polskim obronił swój doktorat!



Ryc. 6. Profesor Yurij Diadin na konferencji w Popowie (2000 rok). W głębi, za plecami Diadna, Andrej Manakow

Wspomniane struktury nazywamy klatratami (łac. *clatratus* – okratowany). Są one w chemii znane od wielu lat. Klatrat cząsteczkowego chloru (Cl_2) otrzymał w stanie krystalicznym na początku XIX wieku Davy, jego skład chemiczny wyznaczył Faraday, a budowę świat poznał wiele lat później, gdy były już dostępne fizyczne metody badania struktury kryształów (Pauling). Klatraty mają raczej dziwne charakterystyki z chemicznego punktu widzenia. Przede wszystkim są związkami niestechiometrycznymi. Hydrat chloru jest w większości podręczników chemii podawany jako $\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (tak zapisał Faraday), ale rzeczywisty skład nieco się od tej proporcji różni. Najwcześniejsza teoria (van der Waals i Platteeuw) wyjaśniła niestechiometryczny charakter klatratów określając je jako międzywęzłowe, krystaliczne roztwory stałe. Aby klatrat był termodynamicznie stabilny, musi mieć zapełnioną pewną część pustych przestrzeni (klatek). To niezbędne minimum może być bardzo różne: od częściowego wypełnienia (jak zaledwie 1/3 w przypadku klatratów tworzonych przez hydrochinon), po bliskie całkowitemu zapełnieniu (hydraty klatratowe), co zależy od różnicy energii między strukturami: klatratową i nieklatratową. Tak zwana struktura „gospodarza” w klatracie jest bowiem różna od struktury tej substancji krystalizowanej w nieobecności składnika „gościa”. Tak dzieje się też ze strukturą wody. Wprawdzie „zwykły” lód ma budowę niewypełniającą przestrzeni efektywnie², ale istniejące w niej puste przestrzenie są niewystarczające, by mogły się tam zmieścić obce cząsteczki. Tworzenie klatratu polega zatem na utworzeniu jeszcze luźniejszej struktury „gospodarza” i równoczesnym zapełnianiu zawartych w niej luk przez „gościa”.

Wzór przytoczony poniżej jest kwintesencją pracy van der Waalsa i Platteeuwa – określa warunek stabilności klatratu. Wyraża on różnicę potencjałów chemicznych faz gospodarza: klatratowej i nieklatratowej; m w tym wyrażeniu jest czynnikiem strukturalnym (proporcje molekularne gospodarza do gościa), zaś Θ jest minimalnym stopniem wypełnienia klatek, powyżej którego klatrat jest termodynamicznie stabilny.

$$\ln(1 - \Theta) = -m\delta(T)/kT \quad (1)$$

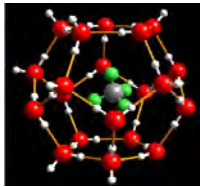
Woda może tworzyć znacznie więcej niż jedną strukturę klatratową, lecz z punktu widzenia tematyki tego artykułu wystarczy opis jednej z nich, zwanej strukturą typu I. Podstawowym jej elementem jest dwunastościan

2. Neon, gaz zbudowany z atomów o wielkości niemal identycznej z rozmiarem cząsteczki wody, ma po skropleniu gęstość o około 20% większą od gęstości wody, co dobitnie ukazuje nieefektywne upakowanie cząsteczek H_2O w ciekłej wodzie, a tym bardziej w strukturze lodu.

pięciokątny, tzw. „mała luka”. Takie bryły nie zapełniają przestrzeni, lecz powstaje między nimi mniejsza liczba luk (czternastościan, tzw. „duża luka”). Cząsteczki metanu mogą wchodzić w oba te rodzaje luk. Staranne badania wykazały, że stopień zapełnienia tych dwóch rodzajów luk jest różny. Małe luki wypełnione są prawie całkowicie, zaś luki duże zaledwie w 3/4 (2).

$$-\Delta v_W^0 = [3 \ln(1 - \Theta_L) - \ln(1 - \Theta_S)] \quad (2)$$

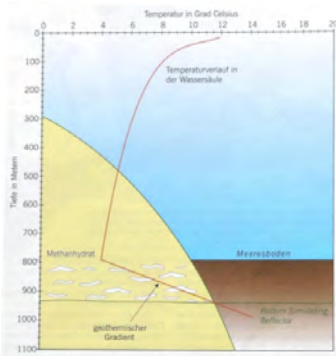
We wzorze tym różnica potencjałów chemicznych faz, podobnie jak we wzorze (1), jest związana z minimalnym stopniem zapełnienia klatek, odpowiednio, „małych” (s) i „dużych” (l).



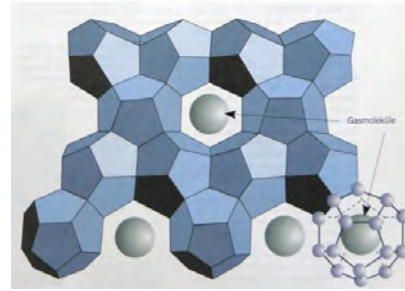
Ryc. 7. Strukturę klatki utworzonej przez cząsteczki wody (czerwone – atomy tlenu, białe – wodoru, szary – atom węgla), w centrum – cząsteczka metanu [clathrate structure, University of Göttingen, GZG. Abt.Kristallographie, źródło: USGS (United States Geological Survey) website]

Jak widać, klatraty są połączeniami niestechiometrycznymi, a podawane w literaturze wzory są najczęściej tylko przybliżeniami. Rycina 7 ilustruje budowę klatki „małej” z zawartą w niej cząsteczką metanu, podana zaś przy tym zawartość „gazu” wykazuje normalne odstępstwo od 100% stechiometrii. Gdyby wszystkie klatki były zapełnione, to zawartość metanu wynosiłaby 170 m^3 w 1 m^3 lodu, lecz w praktyce to jest ok. 160 m^3 . Na ten szczegół zwracam szczególną uwagę – proszę pamiętać, że w litrze takiego „metanowego” lodu zawarte jest 160 litrów gazu!

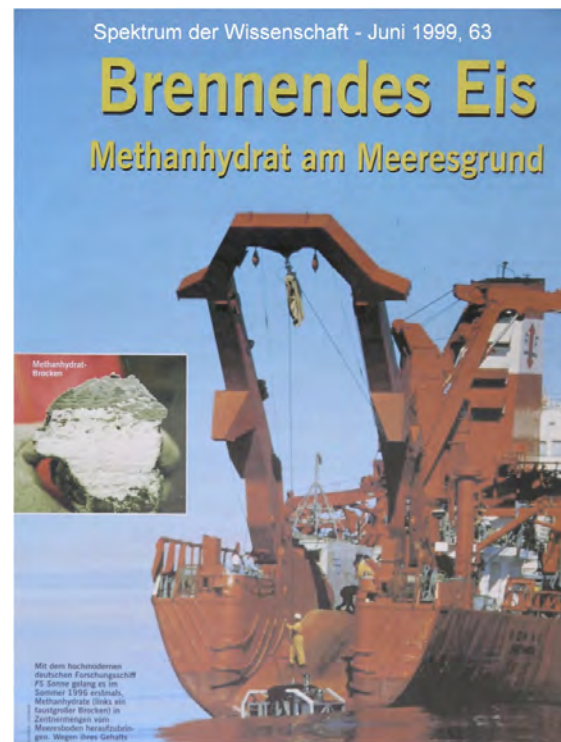
Powstawanie klatratu metanowego uwarunkowane jest dostępnością metanu oraz warunkami fizycznymi środowiska – temperatury i ciśnienia. Ilustruje to ry-



Ryc. 8a1. Schematyczne przedstawienie temperatury wody w oceanie (czerwona linia) w zależności od głębokości oraz zakresu stabilności hydratu metanu (żółte pole). Linia pozioma – temperatura, pionowa, głębokość [Spektrum der Wissenschaften i, 1999, 63, źródło: USGS website]



Ryc. 8a2. Schematyczna struktura hydratu – woda tworzy wielościany, między którymi mieszczą się cząsteczki metanu ukazane jako kulki [Spektrum der Wissenschaften i, 1999, 63, źródło: USGS website]

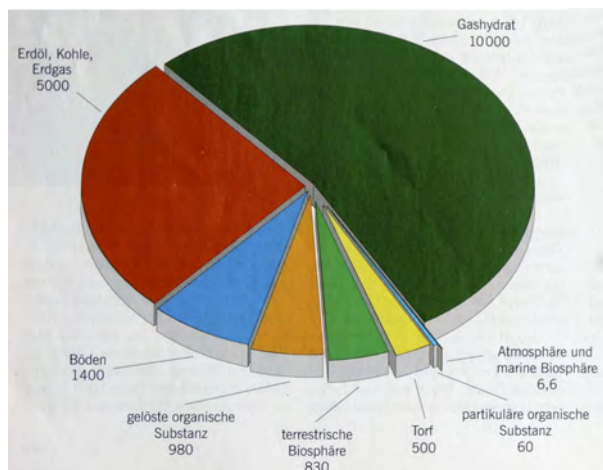


Ryc. 8b. Widok statku badawczego, na którym pobierano próbki hydratu metanowego i obok kawałek takiego „śniegu metanowego” [Spektrum der Wissenschaften i, 1999, 63, źródło: USGS website]

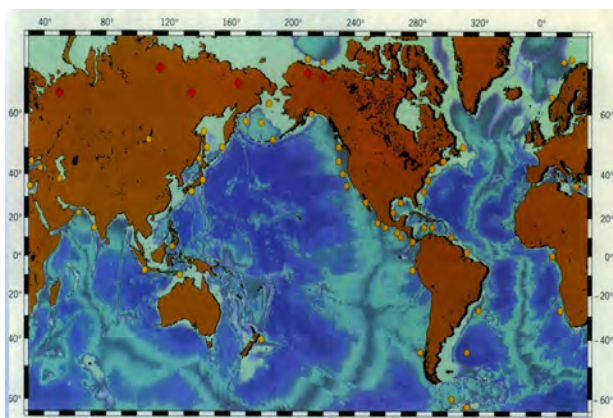
cina 8a1 na przykładzie środowiska oceanicznego. Czerwona linia ukazuje temperaturę wody malejącą przy zwiększaniu głębokości, a pole zaznaczone na żółto to obszar stabilności hydratu klatratowego. Jak widać, począwszy od głębokości około 500 m, warunki tworzenia klatratu metanowego zostają spełnione, o ile jest tam dostępny metan³. Od ponad 20 lat wiadomo, że przez tysiąclecia powstawały przeogromne złoża takich klatratowych hydratów metanu. Z danych US Geological Service⁴ wynika, że „organicznego węgla” (w postaci metanu) na Ziemi jest więcej niż łącznie węgla kopalnych, ropy naftowej i naturalnego gazu pochodzących z tzw.

3. Te dane skopiowałem z niemieckiego czasopisma, którego strona tytułowa widnieje na fotografii 8b. Oryginalnie pochodzą z badań amerykańskiej ekspedycji (US Geological Service).

4. *Spektrum der Wissenschaften i*, Juni 1999, 63.



Ryc. 9. Wynik badań amerykańskiej służby geologicznej: proporcje 'organicznego węgla' na Ziemi w różnych formach. Dominuje metan w hydratach (ciemne pole – 10 000 jednostek), potem mamy 5000 jednostek, łącznie, ropy naftowej, węgla kopalnego i gazu ziemnego, następnie, kolejno, organizmy żywe (1400), odpady organiczne (980), biosfera gruntowa (830), torf (500) oraz drobne organizmy w atmosferze i w oceanach [Spektrum der Wissenschaften i, 1999, 63, źródło USGS website]



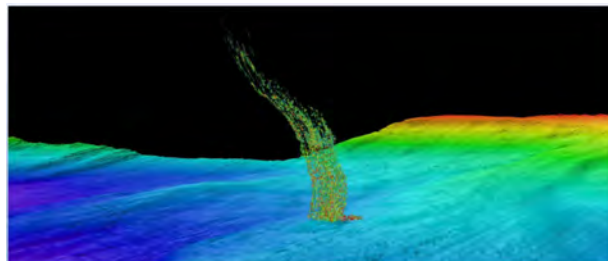
Ryc. 10. Stwierdzone lokalizacje złóż hydratu metanowego na świecie. Żółte punkty wskazują lokalizacje podmorskie: podmorskie i Bajkał, pomarańczowe romby – wieczną zmarzlinę, symbolicznie, na Syberii i na północy kontynentu amerykańskiego [Spektrum der Wissenschaften i, 1999, 63, źródło ilustracji USGS website]

konwencjonalnych źródeł oraz całej biosfery! (ryc. 9 oraz lokalizacja złóż na ryc. 10). Od lat trwają próby eksploatacji tych pokładów do celów energetycznych. Zadanie jest technicznie bardzo złożone, jednak w 2017 roku podano informację, że Chiny rozpoczęły próbną eksploatację złóż metanowych z dna Morza Chińskiego („palący się lód”, ryc. 11). Nieprzerwanie też trwają poszukiwania nowych pokładów. Chodzi już nie tyle o wydobycie gazu, lecz o diagnozę ryzyka związanego z ewentualną destabilizacją tych pokładów. Kilka ilustracji pochodzących z internetu pokazuje, że sprawa nie jest błaha (ryc. 12, 13, 14).

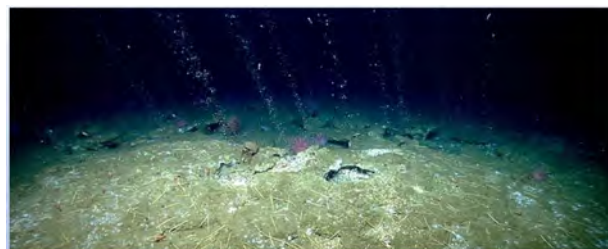
Podsumujmy właściwości klatratowego hydratu metanu. Jest to substancja pod wieloma względami podobna do zwykłego lodu (śniegu) z tym jednak, że topi się w temperaturze nieco wyższej (parę stopni) od zwykłego śniegu, zależnie od ciśnienia, i ma gęstość nieco



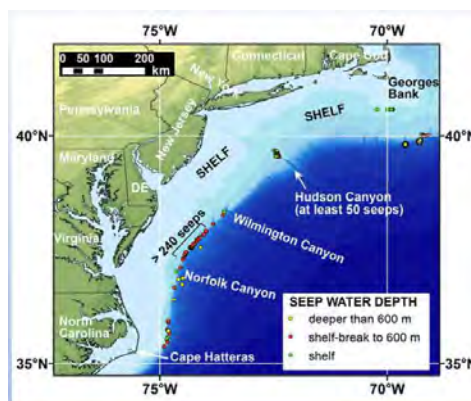
Ryc. 11. ilustracja, jak pali się metan uchodzący z topiącego się śniegu metanowego



Ryc. 12. Zaobserwowane bąbelki gazu uchodzące ze złoża dennego u wybrzeży stanu Waszyngton (na głębokościach od około 100 do 500 metrów) [USGS website]



Ryc. 13. Strumienie metanu uchodzące z dna Oceanu Atlantyckiego u wybrzeży stanu Virginia. Wynik projektu: NOAA Okeanos Explorer Program, 2014 [źródło: USGS website]



Ryc. 14. Mapa północnego wybrzeża atlantyckiego USA wskazująca lokalizacje świeżo odkrytych podmorskich źródeł metanu [źródło: USGS website]

wyższą od gęstości ciekłej wody, więc nie wypływa na powierzchnię, lecz tonie.

Stopień klatratu natychmiast uwalnia zawarty w nim metan, chemicy uwielbiają pokazy takiego „płonącego śniegu” (ryc. 11), Geolodzy, z kolei, popisują się niezwykle spektakularnymi demonstracjami płomieni uzyskiwanych z zapalenia mechanicznie naruszonych

struktur hydratowych w rejonach wiecznej zmarzliny, na przykład umieszczając czajnik nad takim topiącym się i palącym się lodem (Bajkał)⁵. Problem jednak ujawnia całą swoją powagę, gdy rozważymy rozmiar możliwych erupcji metanu z destabilizowanych pokładów. Aktualne pomiary ilości metanu uwalniającego się z wiecznej zmarzliny na Syberii podawane są w teragramach (miliony ton) rocznie, odkrywane są rozmaite rejon, gdzie woda „jakby gotuje się” w wyniku ciągłego wypływu metanu (rosyjscy naukowcy znaleźli najpotężniejszy wyciek metanu⁶, natomiast artykuł *Bąbelkowanie metanu z syberyjskich jezior wytopiskowych jako dodatnie sprzężenie ze zmianami klimatu*⁷ już kilkanaście lat temu zawierał ostrzeżenie przed metanem ze złóż hydratowych, w tym informację o obserwacjach bąbelków gazu uchodzącego z osadów dennych).

Geolodzy dysponują nader ciekawymi informacjami na temat destabilizacji pokładów metanowych w przeszłości. Udowodniono, że w okresach wielkiego wymierania przed milionami lat zawartość metanu w atmosferze była znacznie zwiększona, w okresach „interstadialnych” (cieplejsze okresy przedzielające „stadia” w czasach zlodowacenia) także widać destabilizację hydratów metanu (patrz artykuł *Dokumentacje oparte o izotopowe badania węgla wskazujące na niestabilności hydratu metanowego podczas „Interstadialów” w czwartorzędzie*⁸, a nawet opublikowano hipotezę, że erupcje

metanu „regulowały” okresy zlodowacenia. Wzrost gigantycznych lodowców powodował bowiem obniżenie poziomu oceanów, to destabilizowało hydraty (obniżenie ciśnienia wody) i poprzez efekt cieplarniany metanu wpływało na ocieplenie (metan jest ponad 20-krotnie silniejszym gazem cieplarnianym niż dwutlenek węgla). Ten pogląd nie jest, jak rozumiem, oficjalnie uznany przez specjalistów, ale odpowiadające mu zmiany zawartości metanu w atmosferze ziemskiej dają do myślenia.



Ryc. 15. Mapka tzw. Storegga Slide – miejsca, skąd wyszła gigantyczna fala tsunami, która zdemolowała m.in. wybrzeże Szkocji. Przypuszcza się, że uwolnienie metanu odegrało w tym rolę, jakkolwiek przyczyna nie jest dokładnie określona [źródło: <http://jvarekamp.web.wesleyan.edu/199.htm>]

5. Krótki film ukazujący ten efekt, nakręcony na Alasce, jest zamieszczony na stronie internetowej Towarzystwa Naukowego Warszawskiego. Jest to kopia fragmentu pokazanego przez telewizję TVN.

6. Zwracam uwagę na komentarz dodany do tej informacji: 8 października 2019 r. Ekspedycja badawcza Politechniki z Tomsku odkryła wyciek metanu na wschód od wyspy Bennetta na morzu Wschodniosyberyjskim, gdzie energiczne bąbelkowania sprawiają wrażenie, jakby woda się „gotowała” na powierzchni 50 stóp kwadratowych. Szelf kontynentalny w tym obszarze [East Siberian Arctic Shelf (ESAS)] jest światowym epicentrum strefy bogatej w metan, która może nahttps://www.telegraph.co.uk/news/2019/10/08/russian-scientists-find-powerful-ever-methane-seep-arctic-ocean/sz świat wyrzucić do góry nogami. Przy tym ESAS nie jest brany pod uwagę w głównym nurcie nauki i nie jest uwzględniany w obliczeniach międzyrządowego panelu dotyczącego zmian klimatycznych [Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)], co nie jest to zrozumiałe. To jedna z największych zagadek w światowej łamigłówce zmian klimatycznych. I jest to bardzo kontrowersyjne, bo powoduje podwyższony poziom niepewności. Należy wspomnieć, że ESAS jest największym szelfem kontynentalnym na świecie, obejmującym Morze Laptewa, Morze Wschodniosyberyjskie oraz rosyjską część Morza Czukczów. I jest obszarowo równoważne połączonym obszarom Niemiec, Francji, Wielkiej Brytanii, Włoch i Japonii.

7. K. M. Walter, S. A. Zimov, J. P. Chanton, D. Verbyla & F. S. Chapin III, *Nature* 443, 71-75 (2006).

8. J. P. Kennett, K. G. Canniataro, I. L. Hendy, R. J. Behl, *Science* 288, 128 (2000).

Ładnie udokumentowany jest przykład gigantycznej fali tsunami na Morzu Norweskim (ryc. 15), która zdemolowała wybrzeże Szkocji – do dziś istnieją ślady na wybrzeżu, a skamieliny morskich stworzeń znajdujące się nawet w odległości 80 km od wybrzeża. Uwolnienie metanu z pokładów hydratowych jest niezwykle łatwe. Wystarczy niewielkie podgrzanie, np. w wyniku ruchów tektonicznych.

O czym powinniśmy wiedzieć, w związku z powyższym? Przede wszystkim pamiętajmy, że metan zalegający w hydratách w ilości określonej na 10^{19} gramów to ilość, z grubsza biorąc, większa od ilości tlenu w atmosferze. Nagłe uwolnienie go, np. w przypadku katastrofy kosmicznej, oznaczałoby biologiczną śmierć totalną. Powolne uwalnianie musi wzmacniać efekt cieplarniany a potem przyspieszać destabilizację i tworzyć dodatnie sprzężenie zwrotne. Według powszechnie publikowanych danych zawartość metanu w atmosferze rośnie coraz szybciej. Teraz około 15% efektu cieplarnianego powodowane jest przez metan, którego w atmosferze jest mniej niż 2 ppm (ang. *parts per million*). Jednak przybywa go coraz więcej – o prawie 10% więcej w ciągu dwóch lat 2017–2019! Podobno temperatura oce-

anu w ciągu minionej dekady wzrosła o 0,7 stopnia⁹. Jeśli tak dalej pójdzie, to za dwie dekady termiczna destabilizacja hydratów metanu ruszy w dużej skali i koniec świata się rozpocznie „na całego”.

Specjaliści od zmian klimatycznych systematycznie informując o postępującym ociepleniu, w zasadzie nadmiernie nie alarmują. Dodają jednak, że sytuacja może przybrać bardzo niekorzystny obrót jeśli, cytuję, przekroczymy jakiś „punkt krytyczny”. Mam nieodparte wrażenie, że destabilizacja złóż metanowych, najpierw w obszarach wiecznej zmarzliny, a następnie na szelfach

oceanicznych, musi stać się takim „punktem krytycznym”. I chyba nie ma odwrotu!

Na zakończenie pozwolę sobie odesłać Czytelników do prezentacji o hydracie metanu oraz o atmosferze Wenus i hipotezie „cieplarnianej” (http://zuserver2.star.ucl.ac.uk/~idh/apod/image/0405/venus2_gal_big.gif). Nie będąc specjalistą w tym zakresie nie umiem ocenić czy, a jeżeli tak to w jakim stopniu, taka hipoteza jest prawdopodobna. Przytaczam to tutaj, bo autorzy wspomnianej prezentacji uważają, że na Wenus przed milionami lat istniała atmosfera podobna do naszej, ale efekty cieplarniane doprowadziły do wysuszenia oceanów i utworzenia obecnej atmosfery złożonej z dwutlenku węgla, a w niej chmur z tlenków siarki.

Podziękowanie: bardzo serdecznie dziękuję Panu Profesorowi Andrzejowi Kajetanowi Wróblewskiemu za zachętę-inspirację do przygotowania artykułu, a następnie za niezwykle życzliwą pomoc w opracowaniu tego materiału.

9. W dyskusji (na posiedzeniu TNW – przyp. red.) prof. Szymon Malinowski, wybitny fizyk atmosfery i znawca problematyki zmian klimatu na Ziemi, stwierdził, że te dane odnoszą się do warstw powierzchniowych oceanu, nie zaś do temperatury średniej. Warto byłoby więc dowiedzieć się, jak to wygląda na głębokościach około 500 m (szelfy oceaniczne), co dałoby szansę bardziej wiarygodnego oszacowania omawianych efektów w skali czasu.

Fotowoltaika przyszłością energetyki

Marek Godlewski

Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

Streszczenie. W artykule nakreślono perspektywy dalszego rozwoju energetyki w skali świata, w tym najczystszej jej formy – energetyki słonecznej. Rozwój tzw. zielonej energetyki jest pilną koniecznością biorąc pod uwagę obecną skalę dewastacji środowiska naturalnego i wyczerpywanie się nieodnawialnych źródeł energii. To uzasadnia długi wstęp (Motywacja), w którym opisana jest obecna sytuacja w energetyce i skala zagrożeń wynikająca ze skażenia środowiska. Następnie omówione są dwa typy energetyki słonecznej, ich historia, zasady działania i, w przypadku fotowoltaiki, typy ogniw.

Motywacja

Ogromny przyrost ludności Ziemi w XX wieku (z około 3,5 mld w połowie wieku do ponad 7 mld obecnie), towarzysząca temu gwałtowna industrializacja, ale i wzrost zamożności ludności w większości krajów świata, doprowadził do niebywałego zwiększenia zapotrzebowania na energię, w tym na energię elektryczną. Scenariusz na najbliższe dziesięciolecia jest zbliżony – do 2040 roku zapotrzebowanie na energię będzie rosło pomiędzy 1 a 1,3% każdego roku, a na energię elektryczną 2,1% rocznie. Według tych prognoz rośnie cały czas rola elektryczności osiągając ponad 30% całego zapotrzebowania na energię. Potwierdzają to dane o wzroście zapotrzebowania na energię elektryczną znacznie wyprzedzające wzrost ludności świata. W perspektywie ostatnich 100 lat ludność świata zwiększyła się 4-krotnie, a zapotrzebowanie na energię elektryczną aż 16-krotnie! Te dane są niepokojące. Uważa się, że deficyt energii (głównie elektrycznej) może limitować dalszy rozwój naszej cywilizacji.

W tych oszacowaniach musimy wziąć pod uwagę zacofanie cywilizacyjne całych kontynentów – Afryki i dużych obszarów Azji. Według danych WEO (World Energy Organization) dostępu do energii elektrycznej nie ma ciągle jeden miliard dwieście milionów ludzi na Ziemi, w tym około sześćset milionów mieszkańców Afryki. Mimo szybkiego postępu liczba ta spadnie poniżej jednego miliarda dopiero w 2030 roku, co po części wynika z przyczyn demograficznych. Na tych obszarach najszybciej rośnie zaludnienie. W konsekwencji w połowie XXI wieku nadal około pięćset mln mieszkańców Afryki będzie mieszkało na obszarach bez elektryczności.

Niestety zacofane kraje Afryki i Azji naśladową złe wzorce industrializacji Europy z XIX i pierwszej połowy XX wieku. Na przykład, szacuje się, że zapotrzebowa-

nie na ropę naftową w Afryce w roku 2040 będzie większe niż w Chinach. Gwałtowny wzrost ludności Afryki i Azji generuje ponadto boom na budownictwo („energożerna” produkcja cementu i stali). Ponadto energetyka (nie tylko zresztą w Afryce czy też w Azji) ciągle oparta jest o kopaliny takie jak węgiel, ropa czy też gaz. Pomimo najlepszych warunków klimatycznych (nasłonecznienie) instalacje fotowoltaiczne w Afryce to obecnie około 5 GW, czyli mniej niż 1% globalnego zapotrzebowania na energię elektryczną.

Istniejące scenariusze wskazują na wyczerpywanie się nieodnawialnych źródeł energii, kopalin takich jak węgiel, ropa i gaz. Te kopaliny – w energetyce jest to głównie węgiel (na świecie prawie 40% energii elektrycznej produkowane jest w elektrowniach spalających węgiel kamienny lub brunatny), a w transporcie dominuje ciągle ropa naftowa. Te dane stawiają pod znakiem zapytania dalszy postęp, który jest konieczny, jeśli weźmie się pod uwagę, że średnie światowe zużycie energii elektrycznej na obywatela jest w krajach zacofanych ponad dwukrotnie niższe niż w krajach wysoko rozwiniętych.

Gwałtowny wzrost ludności świata oraz industrializacja doprowadziły ponadto do niebywałego skażenia środowiska naturalnego i emisji gazów cieplarnianych; Dane o ich emisji (głównie CO₂ i metanu) są alarmujące! Nadwyżka CO₂ dodawana corocznie do atmosfery przekroczyła 9 mld ton. W konsekwencji ilość dwutlenku węgla w atmosferze wzrosła od 280 ppm (takie stężenie utrzymywało się przez wiele wieków), do 360 ppm w 2000 roku, a w roku 2013 przekroczyła 400 ppm i nadal rośnie. Jeśli ilość emitowanego CO₂ będzie nadal rosła, to średnia temperatura na Ziemi podniesie się nawet o 4-5°C do roku 2050. Szacuje się, że z powodu zmian klimatycznych w ciągu ostatnich 30 lat zmarło

na Ziemi około 150 000 ludzi! A przy dalszym wzroście temperatury ta liczba będzie zdecydowanie większa.

Energetyka jest jednym z głównych emiterów gazów cieplarnianych, a wśród elektrowni wykorzystujących nieodnawialne surowce, to te węglowe najbardziej dewastują nasze środowisko naturalne. 1 kWh wytworzona w elektrowniach węglowych, to 360 gramów węgla (jako składnika dwutlenku węgla) emitowanego do atmosfery! W przypadku elektrowni gazowych jest to dwukrotnie mniej.

Niestety na niechlubnej liście trucicieli środowiska naturalnego zaczynają dominować kraje nadrabiające zacofanie gospodarcze, w tym azjatyckie „tygrysy gospodarki”. W ciągu siedmiu lat ich gwałtownego rozwoju (2000-2007) emisja CO₂ w Chinach wzrosła o 100%, a w Indiach o 40%. Te dwa kraje, obok USA, są obecnie głównymi „trucicielami” świata. Przy tym nic nie wskazuje na szybką zmianę – według danych WEO (World Energy Organization) obecnie budowanych jest 170 GW instalacji energetycznych wykorzystujących spalanie węgla! Zapotrzebowanie na inne kopaliny rośnie również szybko. Według danych WEO zapotrzebowanie na gaz wzrosło w Azji (głównie w Chinach) o 70%.

Przemysł energetyczny (elektrownie węglowe) obok transportu i budownictwa to główni emiterzy. Potwierdzają to dane IEA (International Energy Association) dotyczące emisji CO₂, która wynosi 14 502 Mt (mega ton) ze spalania węgla (z tego ponad połowa – 9 761 Mt przy produkcji elektryczności i w elektrociepłowniach), 11 377 Mt ze spalania ropy (głównie transport), 8 743 Mt ze spalania gazu, i tylko 218 Mt z innych źródeł.

W Europie to Polska ma obecnie najgorszą strukturę energetyki i nic nie wskazuje na szybką poprawę tej sytuacji. Według informacji prasowych (www.eko.org.pl) spółka PGE ubiega się o przedłużenie eksploatacji złoża węgla brunatnego z odkrywki Turów do 2044 roku i powiększenie jej z rocznym wydobywaniem 9–11,5 mln ton do 2030 roku. Ciekawe jest więc porównanie danych dotyczących emisji gazów cieplarnianych, które podaje za IEA. Roczne zużycie energii elektrycznej wzrosło w Polsce w ciągu 27 lat (od 1990 do 2017) o 32%, a na świecie o 117%! Niestety oznacza to wzrost emisji CO₂ o 60% w skali świata, za to w Polsce emisja ta spadła o 10%, co wynika ze zmian struktury przemysłu. Ciekawe jest także porównanie danych dotyczących emisji CO₂ na jednego obywatela (per capita) za okres 1990-2017. Emisja ta w Polsce zmalała z 9,1 w 1990 do 8,1 tony na obywatela w 2017. Podobny trend obserwujemy w Unii Europejskiej – emisja spadła z 8,4 tony na obywatela do 6,3 w 2017. Różnie te dane wyglądają w wiodących gospodar-

kach europejskich – Niemcy: 11,8 t w 1990 i 8,2 t w 2017, Francja: 5,9 t w 1990 i 4,4 t w 2017, a UK: 9,6 t w 1990 i 5,3 t w 2017 – ten imponujący wynik UK zawdzięcza odejściu od energetyki węglowej. Niestety w skali świata emisja ta wrosła z 3,9 t do 4,4 t na obywatela. Do tych niepokojących danych główny wkład pochodzi z Chin i Indii (Chiny: 1,8 t w 1990 i 6,7 t w 2017, Indie: 0,6 t w 1990 i 1,6 t w 2017, na obywatela). Niewielki wzrost nastąpił także w Japonii i w całej Afryce.

Zielona energetyka i energetyka odnawialna

Podane powyżej dane wskazują na pilną konieczność modyfikacji profilu energetyki wykorzystującej nieodnawialne źródła energii na bardziej ekologiczną, na przykład wykorzystującą energię słoneczną. Przede wszystkim powinniśmy dążyć do ograniczania energetyki węglowej, jak i do szerszego wprowadzania do transportu napędu gazowego lub elektrycznego. Aktualne prognozy mówią, że w roku 2040 ponad 50% energii elektrycznej powinno być otrzymywane ze źródeł o niskiej emisji CO₂. Przewiduje się, że wiodącą rolę będą pełniły generatory wiatrowe, fotowoltaika, ale także hydroenergetyka (około 15% w skali światowej) i energetyka jądrowa (8%). Przy okazji warto podkreślić, że jeśli chcemy obniżyć skażenie radioaktywne powinniśmy budować elektrownie jądrowe, a nie węglowe. Węgiel zawiera także (oprócz na przykład siarki) metale ciężkie, w tym radioaktywne. Warto także zaznajomić się z danymi o emisji rtęci do powietrza przez elektrownię w Bełchatowie.

Jeśli chodzi o energetykę jądrową, to w 2018 roku na świecie działały 452 reaktory; uruchomiono wówczas instalacje o mocy 11,2 GW, co było największym przyrostem od roku 1989. W budowie były dalsze elektrownie jądrowe o mocy 6 GW. Jeśli utrzymają się obecne trendy to całkowita moc instalacji jądrowych w 2030 roku wyniesie 497 GW (bardziej optymistyczny scenariusz przewiduje 542 GW!). Z punktu widzenia emisji gazów cieplarnianych, dzięki energetyce jądrowej w ciągu ostatnich 50 lat ograniczono emisję CO₂ o 55 Gt (miliardów-ton). Dalszy rozwój tej energetyki ograniczy emisję o dodatkowe 4 Gt.

Energetyka jądrowa nie należy jednak do odnawialnych źródeł energii, do których zaliczamy energetykę słoneczną, wiatrową, energetykę wykorzystującą biomasę, czy też hydroenergetykę. Rola energetyki odnawialnej rośnie, jej całkowita produkcja w roku 2018 wzrosła o 450 TWh, czyli o 8%, co było wynikiem uruchomienia instalacji o mocy 180 GW, głównie wiatrowych i słonecznych. Do 2040 roku przybędzie instalacji związanych z energetyką odnawialną o mocy 8 500 GW. Szacuje się, że 50% dodatkowych instalacji do roku

2040, to będzie energetyka wiatrowa i słoneczna. Wiatraki wytwarzać będą wówczas 8 300 TWh, instalacje fotowoltaiczne 7 200 TWh, hydroenergetyka 6 950 TWh. 30% ciepła wytwarzane będzie w instalacjach wykorzystujących źródła odnawialne, w transporcie zaś źródła odnawialne pokryją 60% zapotrzebowania na energię. W sumie około 44% energii wyprodukowane zostanie z odnawialnych źródeł energii, w tym 37% energii elektrycznej, 60% w ciepłownictwie).

Udział źródeł odnawialnych w energetyce rośnie dynamicznie. Ocenia się, że docelowo 80% nowych instalacji energetycznych związanych będzie z energetyką odnawialną (w ciągu kilku ostatnich lat obserwujemy 50% dynamikę wzrostu). Energetyka słoneczna odpowiadać będzie za 60% tego wzrostu. W Chinach (obecnie największym emiterze gazów cieplarnianych) ta dynamika wzrostowa jest także bardzo duża, wynosi bowiem 40%. Część tego wzrostu pochodzi z rozproszonych instalacji fotowoltaicznych (niewielkie instalacje produkujące energię dla gospodarstw domowych). Chiny są liderem w tym obszarze energetyki.

Energetyka słoneczna

Słońce jest podstawowym źródłem energii dla naszej planety. Do Ziemi dociera 174 PW (petawatów), z czego około 30% odbijane jest przez górne warstwy atmosfery, a resztę pochłania atmosfera, gleba, rośliny i woda, co w przeliczeniu na jednostkę powierzchni wynosi 3,5–7,0 kWh/m² dziennie. Te dane zależą oczywiście od położenia danego obszaru/kraju na kuli ziemskiej. Także w Polsce roczna gęstość promieniowania słonecznego jest wystarczająco duża (950–1250 kWh/m²), aby rozwijać energetykę słoneczną. Jest to praktycznie jedyne niewyczerpywalne dostępne nam źródło energii, które może pokryć nasze potrzeby nawet w dalekiej perspektywie. Wystarczy, jeśli nauczymy się korzystać z kilku procent tej energii, aby zaspokoić zapotrzebowanie całego świata.

Poniżej omawiam dwa podstawowe systemy energetyki słonecznej i perspektywy ich rozwoju. Zaczynam od tzw. termalnej energetyki słonecznej, która dominowała do czasu znaczącej obniżki ceny paneli fotowoltaicznych.

Elektrownie CSP (Concentrated Solar Power)

– termalna energetyka słoneczna

Pomysł takich instalacji jest stary. Pierwszy prototyp zbudowany został w roku 1897 przez Amerykanina F. Shumana. Tak naprawdę była to maszyna parowa, tyle że do grzania eteru w pierwotnym obiegu używano energii słonecznej. Pomysł ten został wdrożony w roku 1908, a w celu zwiększenia wydajności grzania zastosowano

lustra. To był prawzór dzisiejszych instalacji CSP. System opatentowano w roku 1912, a pierwsza instalacja zbudowana została w Egipcie i zasilala pompy do nawadniania pól.

Pomysł analogicznych instalacji powrócił w okresie tzw. kryzysu naftowego w latach 70. XX wieku. W najnowszych elektrowniach słonecznych typu CSP używa się nawet tysiące luster skupiających energię słoneczną, sterowanych systemem śledzenia Słońca. Zmieniono także płyn w obiegu pierwotnym na stopioną sól. Taki system może działać nawet kilka godzin po zachodzie słońca; jego zaletą jest także możliwość magazynowania energii. Stopioną i rozgrzaną sól można magazynować nawet tydzień i przepompować w okresie zwiększonego zapotrzebowania na energię. Tego typu systemy zbudowano w wielu miejscach na świecie, np. w Hiszpanii, w Stanach Zjednoczonych Ameryki, w Chile. Mogą one z powodzeniem konkurować z „klasyczną” energetyką. Według Międzynarodowej Agencji Energetyki Odnawialnej (International Renewable Energy Agency, IRENA), średnie ceny energii słonecznej, ze sterowanych elektrowni słonecznych typu CSP wynoszą, w nasłonecznionych częściach świata, 0,07 USD/kWh, czyli są niższe niż koszt energii w Polsce.

Wydaje się jednak, że technologia termalnej energetyki słonecznej CSP przegrywa obecnie z szybko taniejącą fotowoltaiką. Dlatego w dalszej części tego artykułu skupiam się na tej formie energetyki słonecznej.

Fotowoltaika

Fotowoltaika (FW) przeżywa obecnie gwałtowny rozwój, co wynika z szybkiego spadku cen paneli FW (10-krotny spadek w ostatniej dekadzie), a cena za 1 kWh z dużych instalacji FW w nasłonecznionych obszarach świata spadła do 0,02 USD. Jest to nie tylko najtańsze źródło energii elektrycznej, ale także najczystsze, czyli najbardziej ekologiczne. Energia włożona w produkcję panelu FW zwraca się w ciągu dwóch lat, a wkrótce nawet w 1,5 roku. Te dane tłumaczą niebywały rozwój tej dziedziny energetyki. O ile na koniec 2006 roku była to ciągle niszowa energetyka – na całym świecie zainstalowano panele fotowoltaiczne o mocy 1 581 MW, a skumulowana moc przez nie wytwarzana wynosiła 6 890 MW, to już po pięciu latach (2011) moc zainstalowanych baterii słonecznych wyniosła aż 27 650 MW, a ich moc skumulowana wzrosła do 67 350 MW. Liderem mocy zainstalowanych paneli słonecznych są Niemcy (32 380 MW), a więc kraj o podobnym klimacie i nasłonecznieniu co Polska. Potencjał fotowoltaiki w Niemczech robi wrażenie, jeśli porówna się go z potencjałem polskich konwencjonalnych (czytaj węglowych) elektrowni, który wynosi około 38 000 MW.

Obecnie systemy FW to trzecie (po hydroenergetyce i energetyce wiatrowej) źródło energii odnawialnej. Według danych IEA potencjał FW wzrośnie o 700 – 880 GW pomiędzy rokiem 2019 a 2024. Całkowita moc w instalacjach FW w roku 2018 wyniosła 515 GW, a produkcja energii elektrycznej ponad 500 TWh, co stanowi około 2 % ogólnego zapotrzebowania na elektryczność. To jednak szybko się zmieni i moc w instalacjach FW wzrośnie do roku 2030 do 3000 GW lub nawet (optymistyczne szacunki) do 10000 GW. W roku 2050 20% energii elektrycznej produkować będą systemy FW.

Historia badań i zastosowań fotowoltaiki

Pojęcie fotowoltaika, wprowadzone w roku 1849, pochodzi z języka greckiego ($\phi\omega\varsigma$ (*phōs*) znaczy światło) i od nazwiska uczonego włoskiego Aleksandra Volty, wynalazcy pierwszych baterii elektrochemicznych. Zjawisko fotowoltaiczne odkryte zostało w roku 1839 przez Francuza Aleksandra Edmunda Becquerela. To niezwykle, że wynalazca miał wtedy tylko 19 lat! Zaobserwował, że możliwa jest generacja prądu elektrycznego poprzez oświetlenie danego obiektu (tj. elektrody zanurzonej w przewodzącym roztworze) światłem słonecznym. Na tym etapie ta ciekawa obserwacja nie miała żadnych zastosowań praktycznych. Obserwowany efekt był niewydajny.

Pierwsze praktyczne zastosowania związane były z fotografią. Wynikały one z obserwacji Smitha (1873) oraz Adamsa i Daya (1876), że oświetlona płytka selenu wytwarza prąd elektryczny. Efekt ten wykorzystywano do oceny intensywności oświetlenia (natężenia światła) w fotografii, a prekursorem użycia go w energetyce był Fritts, który skonstruował pierwsze ogniwa słoneczne (z wykorzystaniem płytek selenu). Po raz pierwszy opatentowano takie ogniwa dopiero w roku 1941. Autorem tego patentu był amerykański inżynier i badacz półprzewodników Russell S. Ohl. Konkluzja patentu Ohla była zgodna z poprzednimi obserwacjami – oświetlone płytki wybranych metali emitują elektrony.

Prawdziwa „rewolucja” w tej dziedzinie zaczęła się jednak w roku 1954. Trzej pracownicy laboratorium firmy Bell (Bell Labs, a propos tam też powstał pierwszy tranzystor i dlatego rozwinęto produkcję kryształów krzemu) Daryl Chapin, Calvin Fuller i Gerald Pearson skonstruowali pierwsze krzemowe ogniwo fotowoltaiczne. Pomimo że wydajność takiego ogniwa ciągle była dosyć niska (około 4%), to była już wystarczająca do zasilania wybranych urządzeń elektrycznych przez kilka godzin. Koszt takich paneli FW był bardzo wysoki – wynosił 286 USD za 1 W mocy.

Wkrótce motorem napędowym fotowoltaiki stała się eksploracja Kosmosu. Pierwszy panel poleciał w Ko-

smos w roku 1958 zasilając instalację radiową w satelicie Vanguard 1. Kolejne satelity zarówno amerykańskie, jak i radzieckie (Sputnik-3) również miały takie zasilanie. Moc paneli wysyłanych w Kosmos szybko rosła od 1 W w przypadku Vanguarda 1 do kilkuset watów w satelitach wysyłanych w pierwszej połowie lat 60. XX wieku.

Amerykanie stali się także pionierami użycia paneli słonecznych do zasilania budynków. W roku 1973 powstał pierwszy budynek (Solar One) zasilany w ten sposób w energię elektryczną. Nie wszyscy wiedzą, że instalacje fotowoltaiczne zasilają Biały Dom, siedzibę prezydentów USA. Powstały one w okresie prezydentury J. Cartera i następnie B. Obamy.

Dla tych zastosowań konieczny był postęp w wydajności paneli, która szybko rosła z pierwotnych 4% do 8% i 14% (1957 i 1960, odpowiednio), a następnie do 20% w roku 1985 (prace uczonych australijskich z uniwersytetu New South Wales, Sydney).

Dla szybkiego rozwoju tej dziedziny energetyki istotny był nie tylko stały wzrost wydajności paneli (komercyjne panele mają wydajności pomiędzy 14 a 22%), ale także ciągła redukcja ich kosztów – pod koniec 2011 cena spadła poniżej 1 USD/W z wyjściowej 286 USD/W, a w roku 2013 do 0,74 USD/W. Szacuje się, że w przyszłości będzie to 0,5 USD/W lub nawet blisko 0,3 USD/W. Ważne są także łatwość instalacji i obsługi paneli słonecznych, długi czas życia (ponad 20 lat), jak i fakt, że do ich konstrukcji używany jest krzem powszechnie występujący na Ziemi. Nie ma konieczności używania innych, rzadkich (czytaj drogich) surowców, np. szerszego zastosowania ogniwi wykorzystujących tellurek kadmu (CdTe).

Ceny za 1 kWh pochodzącą z instalacji FW w 2017 roku spadły do 0,03–0,05 USD/kWh, mogą więc już konkurować z cenami prądu wytwarzanego w „klasycznych” instalacjach energetycznych. Ponadto te ostanie będą nadal rosły, ponieważ rosną tzw. kary emisyjne za emisję CO₂ do 50 USD za tonę, co skutkuje wzrostem cen za 1 kWh o 0,005 USD.

Zasada działania ogniwa fotowoltaicznego

W roku 2005 obchodziliśmy stulecie nowoczesnej fizyki. Związane to było z wyjaśnieniem przez Alberta Einsteina efektu fotoelektrycznego. Ta praca wprowadziła pojęcie kwantu promieniowania elektromagnetycznego (nazwanego później fotonem). To był początek „nowej fizyki” – mechaniki kwantowej. Dla zrozumienia zjawiska fotowoltaicznego istotny był także pomysł Wilsona – wprowadzenie pojęcia pasm energetycznych i przerwy wzbronionej. Tak wytłumaczono różnice pomiędzy izolatorem (niezerowa przerwa wzbroniona) i me-

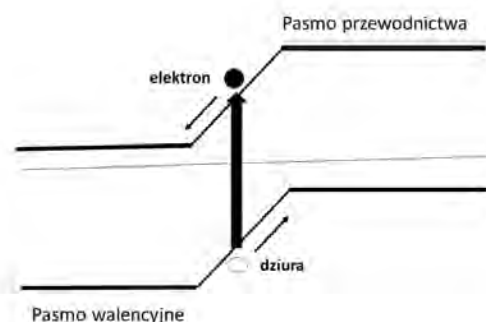
talem (brak przerwy wzbronionej). Według tej nomenklatury krzem jest izolatorem, ponieważ ma niezerową przerwę energetyczną pomiędzy tzw. pasmem walencyjnym i przewodnictwa.

Aby wzbudzić nośniki prądu, oprócz elektronów są to także dziury (puste miejsca po elektronach w paśmie walencyjnym – kwazicząstki o dodatnim ładunku elektrycznym), należy oświetlić dany materiał fotonami o energii większej od szerokości przerwy energetycznej (rys. 1). Fotony zostają zaabsorbowane przez elektrony



Rys. 1. Schemat procesu wzbudzenia pasmo-pasmo

walencyjne, które są wzbudzane do pasma przewodnictwa. Każdy z zaabsorbowanych fotonów wzbudza jedną parę nośników – elektron w paśmie przewodnictwa oraz dziurę w paśmie walencyjnym. Nośniki te następnie rekombinują (elektron wraca do pasma walencyjnego), a nadmiar energii jest wyemitowany w postaci fotonu lub zamieniony na ciepło. Aby przetworzyć promieniowanie na prąd (energję elektryczną) nośniki należy rozseparować wytwarzając w materiale pole elektryczne. Zablockowana jest wtedy szansa na ich wydajną rekombinację. W tym celu wytwarza się złącze p-n poprzez odpowiednie domieszkowanie jednego obszaru materiału (na przykład krzemu) centrami wprowadzającymi nadmiar elektronów (powstaje materiał typu n), a drugiego obszaru domieszkami wprowadzającymi nadmiar dziur (powstaje materiał typu p). Wspólną cechą różnego typu ogniw fotowoltaicznych jest więc obecność złącza p-n.



Rys. 2 Schemat wzbudzenia pasmo-pasmo w obszarze złącza p-n. Występujące pole elektryczne separuje nośniki prądu

W obszarze złącza działa pole elektryczne, konieczne do separacji par elektron-dziura. Powstanie pola elektrycznego można prosto wytłumaczyć przepływem elektronów z obszaru n (z nadmiarem elektronów) do obszaru p (z niedomiarem elektronów). W wyniku tego przepływu obszar typu p ładuje się ujemnie, a typu n dodatnio. Blokowany jest dalszy przepływ elektronów przez wytworzoną w ten sposób barierę potencjału (rys. 2). Do obszaru złącza przykładane jest pole elektryczne blokujące rekombinację par elektron-dziura generowanych oświetleniem i separujące te nośniki. Elektrony przepływają do obszaru typu n, a dziury do obszaru typu p. Powstaje różnica potencjałów – zjawisko to jest podstawą efektu fotowoltaicznego. Jeśli do obszarów typu n i p dodamy kontakty omowe i podłączymy obciążenie, to popłynie prąd – światło generuje prąd elektryczny.

Typy ogniw fotowoltaicznych

Współczesna fotowoltaika wykorzystuje głównie ogniwa krzemowe. Typ ogniwa zależy jednak od formy użytego krzemu. W ogniwach FW pierwszej generacji wykorzystuje się monokrystaliczny krzem. Tego rodzaju ogniwa dostępne w sprzedaży mają wydajności rzędu 14-20%. Istnieje wiele odmian konstrukcji takich ogniw w zależności od sposobu strukturyzacji przedniej elektrody, użytej metalizacji i sposobu naniesienia warstw antyrefleksyjnych na przedniej i tylnej stronie ogniwa. Istotne jest, że takie ogniwa obniżają emisję CO₂ do atmosfery. Szacuje się, że każda wytworzona kilowatogodzina ogranicza emisję tego gazu cieplarnianego o 37,3 do 72,2 gramów. Kolejne ogniwa krzemowe pierwszej generacji wykorzystują polikrystaliczny krzem. Choć ich wydajność jest niższa niż tych z monokrystalicznym krzemem, to są one znacząco tańsze.

Wadą ogniw pierwszej generacji jest niska wydajność generacji nośników światłem. Wynika to z właściwości krzemu. Jest to materiał o tzw. skośnej przerwie energetycznej. Aby zwiększyć wydajność generacji konieczne jest użycie grubszych warstw krzemu, co podnosi koszty ogniw.

Tę wadę wyeliminowano w ogniwach drugiej generacji, w których oprócz amorficznego krzemu wykorzystuje się materiały o prostej przerwie energetycznej. Do nich zalicza się głównie CdTe, CdS, CIGS (CuInGaSe₂), a jako materiał przezroczystej elektrody stosuje się ITO (tlenek indowocynowy) lub ZnO. W tych ogniwach FW stosuje się cienkie warstwy materiałów, co obniża koszty. Do trzeciej generacji zaliczone są ogniwa wykorzystujące materiały organiczne, ogniwa perowskitowe, ale także ogniwa Graetza z nanocząstkami.

Osobną kategorią ogniw są ogniwa multizłączone, dla których osiągnęto rekordowe wydajności. Ogniwa te są bardzo drogie, ale znajdują zastosowanie w astronautyce, gdzie wydajność ogniwa, a nie jego cena, jest kluczowa.

Podsumowanie

Kiedy wytworzono pierwsze krzemowe ogniwa fotowoltaiczne nikt nie przewidział, co nastąpi po upływie kolejnych kilkudziesięciu lat. Jeszcze kilka lat temu energetyka fotowoltaiczna była niszowa i odpowiadała za promile wytwarzanej energii elektrycznej. Obecne prognozy przewidują dominację fotowoltaiki w energetyce wykorzystującej odnawialne źródła energii i powszechne użycie paneli FW do zasilania domostw, tzw.

rozproszona fotowoltaika. FW wykorzystuje niewyczerpywalne źródło energii – Słońce i należy do najczystszych źródeł energii. Powszechne użycie paneli FW w energetyce wymagać jednak będzie opracowania lepszych, wydajniejszych i tańszych metod magazynowania energii.

Przygotowując ten artykuł korzystałem z szeregu źródeł dostępnych w opracowaniach International Energy Association (IEA) (www.iea.org), World Energy Organization (WEO), na stronie internetowej trendy w energetyce (<https://trendywenergetyce/>) i Międzynarodowej Agencji Energetyki Odnawialnej (International Renewable Energy Agency, IRENA).



LIGO i fale grawitacyjne I¹

Wykład noblowski Rainera Weissa

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

Opublikowany w języku polskim za zgodą Nobel Foundation

©The Nobel Foundation 2017

Przekład dokonany przy wsparciu finansowym Fundacji Pro-Physica

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

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

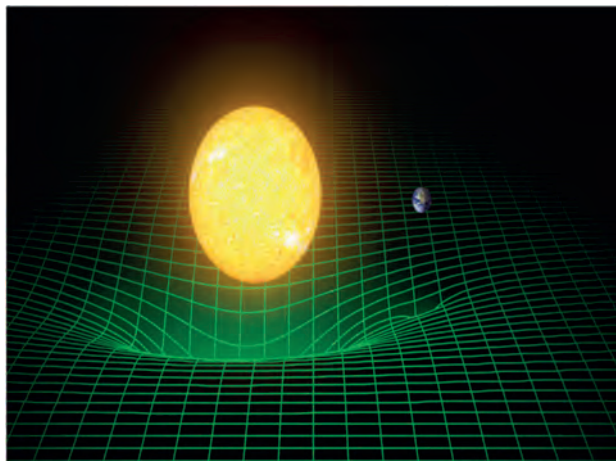
pomiarów. On też przedstawi wizję wiedzy, jaka może się wyłonić z badania nieba za pomocą rejestrowania fal grawitacyjnych o okresach od ułamka milisekundy do miliardów lat.

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

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

1. Nagrodę Nobla za rok 2017 podzielili między siebie Rainer Weiss, Barry C. Barish i Kip S. Thorne. Artykuły numerowane I, II i III są tekstami ich przemówień wygłoszonych z tej okazji. Polski przekład wykładu Kipa S. Thorne'a *LIGO i fale grawitacyjne III* opublikowany został w PF 3/2019, s. 18-41 (przyp. red.).

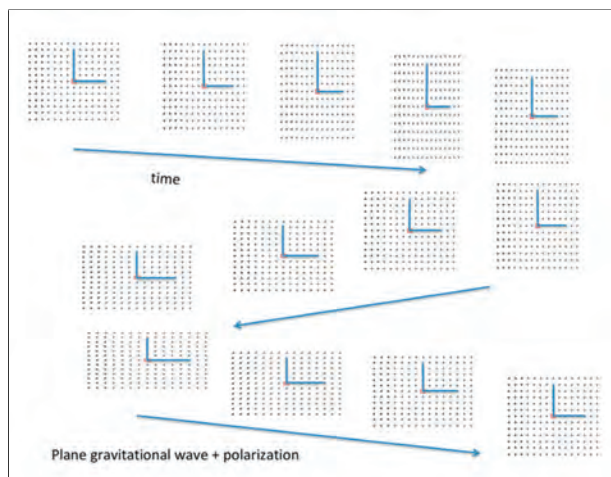
2. Teksty w nawiasach kwadratowych dodał tłumacz z uwagi na zbyt zwięzły, a czasem wręcz niezrozumiały język oryginału (przyp. red.).



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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

gdzie

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

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

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

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

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

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

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



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

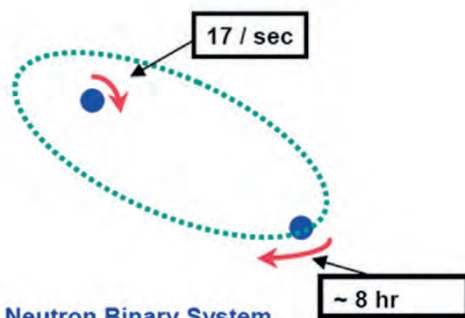
wykorzystując także inne efekty relatywistyczne, wyznaczyć masy obu gwiazd układu. Jednym z najbardziej spektakularnych wyników była zmiana okresu obiegu z biegiem lat. Rycina 4 zaczerpnięta z pracy Taylora i Weisberga [8] pokazuje, że okres ten systematycznie się skracał; taki efekt był zgodny z przewidywanymi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

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

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

Neutron Binary System – Hulse & Taylor

PSR 1913 + 16 -- Timing of pulsars



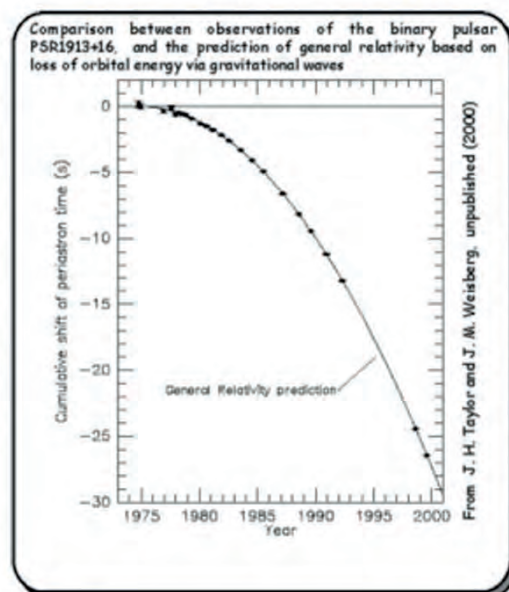
Neutron Binary System

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

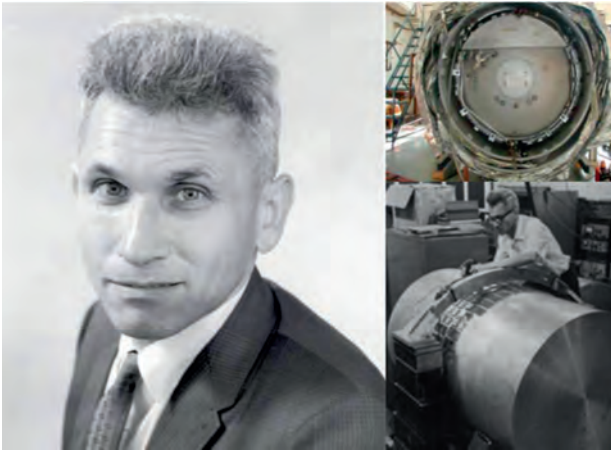
Prediction from general relativity

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

Emission of gravitational waves



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

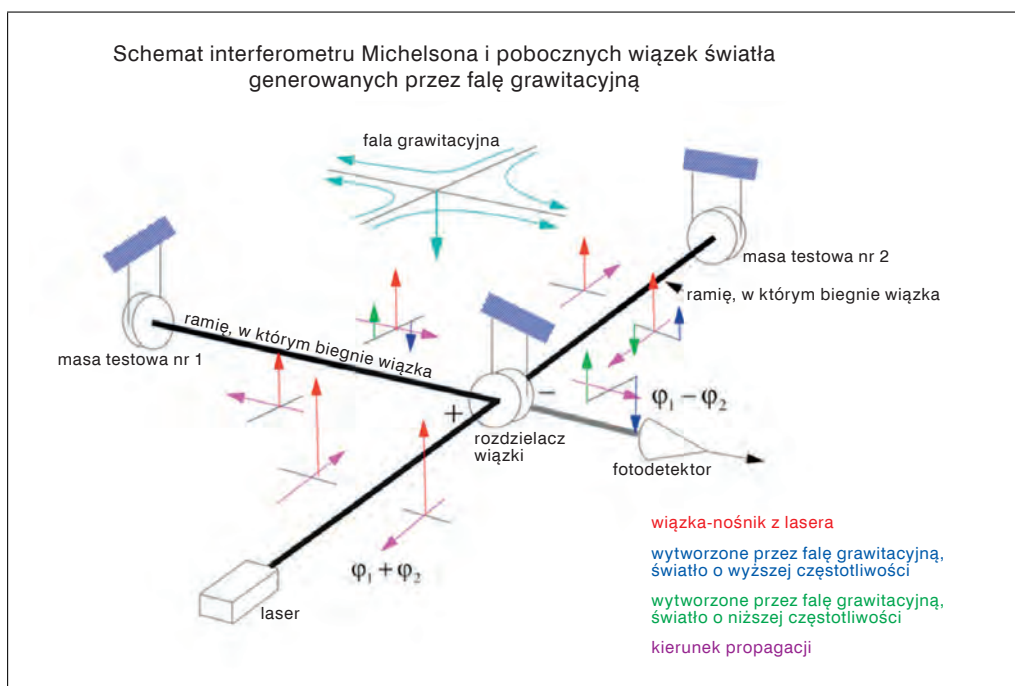


Ryc. 5. Joseph Weber jako pierwszy próbował bezpośrednio wykryć fale grawitacyjne pochodzące ze źródeł astrofizycznych. Pomysł, jak to robić, wypracowali Wheeler i Weber w trakcie odbywającej się w roku 1957 w Chapel Hill konferencji poświęconej grawitacji. Polegał on na mierzeniu wywołanego przez falę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

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

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

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



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

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

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

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

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

Initial interferometric GW detector groups late 1970's



H. Billing



L. Schnupp



K. Maischberger



W. Winkler



R. Schilling



A. Rudiger

Max Planck Garching



R. Drever



J. Hough



B. Meers



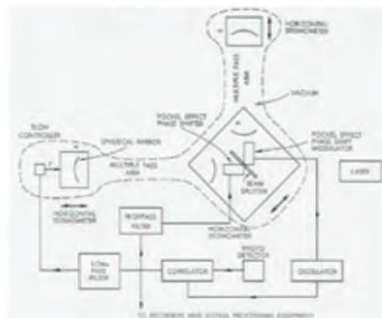
H. Ward

Glasgow



F.A.E. Pirani

MIT



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

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

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

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

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

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

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




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

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

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

The measurement challenge



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

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

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

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

Kip Thorne

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

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

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

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

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

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

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

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

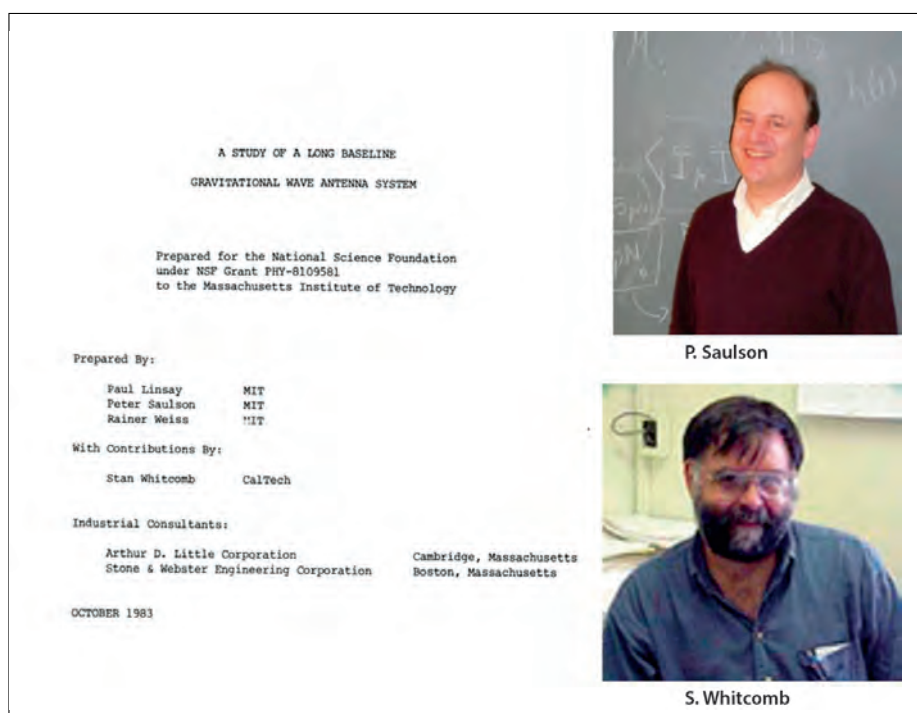
nowanej skali projektu daleko idącej ekstrapolacji istniejących technik eksperymentalnych. Uważamy jednak, iż fundamentalne naukowe znaczenie takich badań jest tak duże, że są one warte poniesienia znacznych nakładów.

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

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

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

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



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



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

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

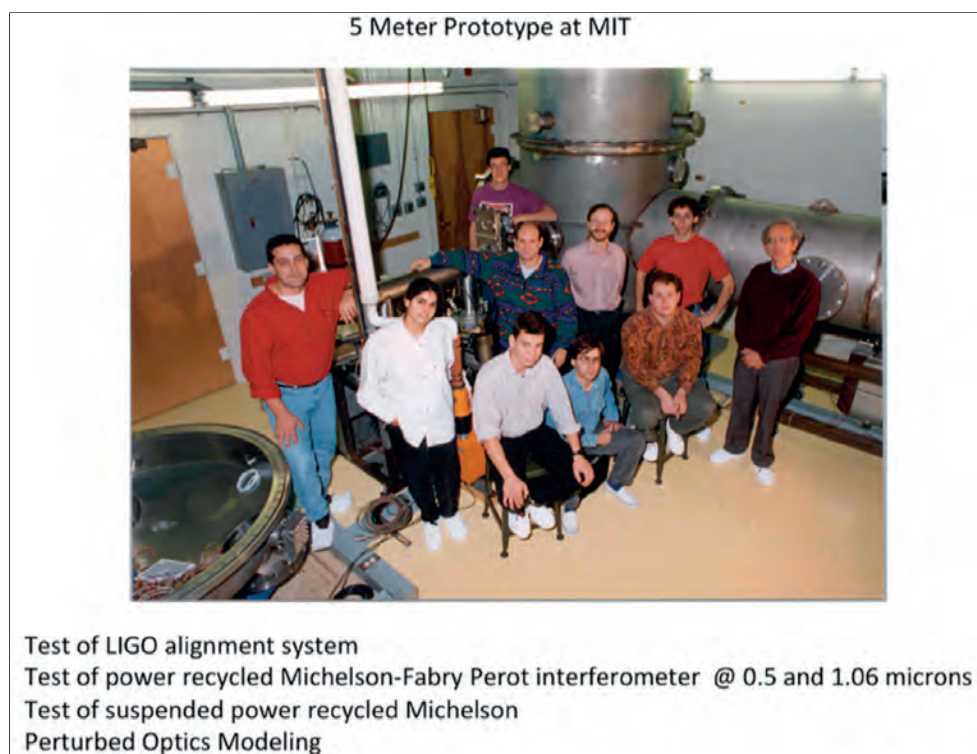
Po burzliwym okresie jaki przeszedł projekt, drugim dyrektorem LIGO został w roku 1994 Barry Barish. Wprowadził on wiele zmian w organizacji przed-

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

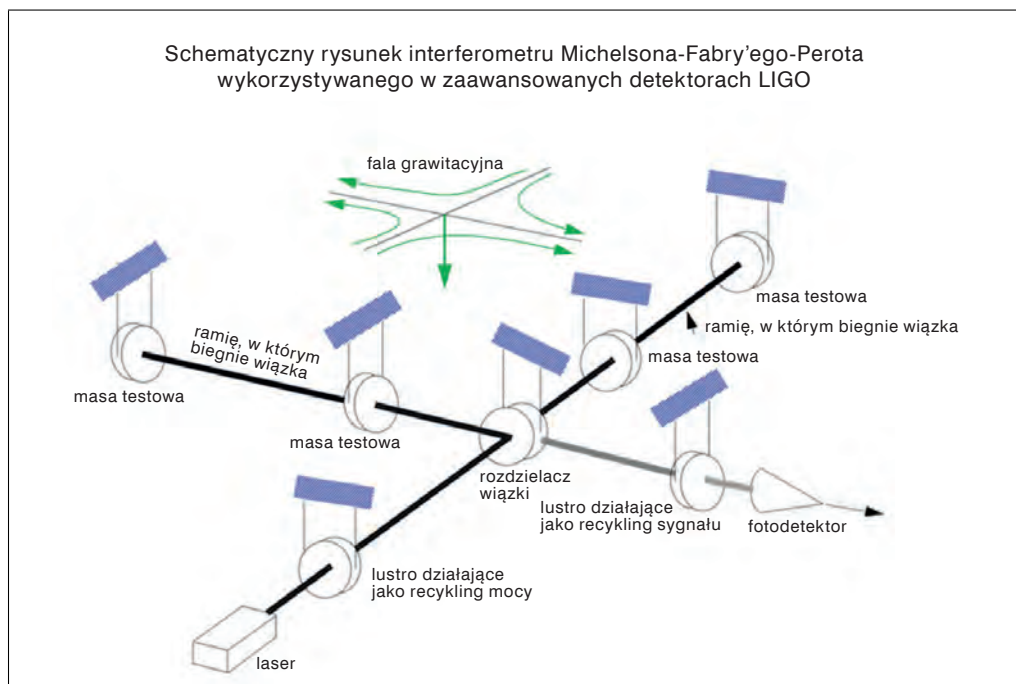
Około połowy lat osiemdziesiątych prace nad rozwojem technik mających na celu pokonanie wspomnianych (ryc. 9) dwóch czynników 10^{-12} były prowadzone w kilku laboratoriach badawczych: w Caltechu, gdzie powstał 40-metrowy prototyp, w MIT, gdzie pracowano nad 5-metrowym prototypem (ryc. 13), w Glasgow,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



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



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



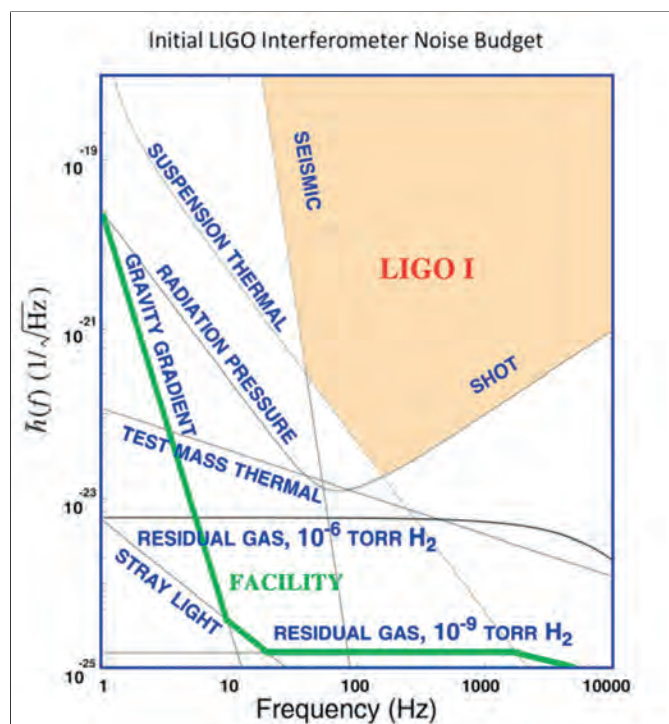
Ryc. 14. Schemat zaawansowanego detektora, który w roku 2015 zarejestrował fale grawitacyjne emitowane przy zderzeniu dwóch czarnych dziur. Interferometr ten ma wszystkie elementy niezbędne, by jego czułość przewyższała czynnik 10^{-12} i pozwalała mu mierzyć małe przemieszczenia mas testowych. Do zasadniczych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

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

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

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

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



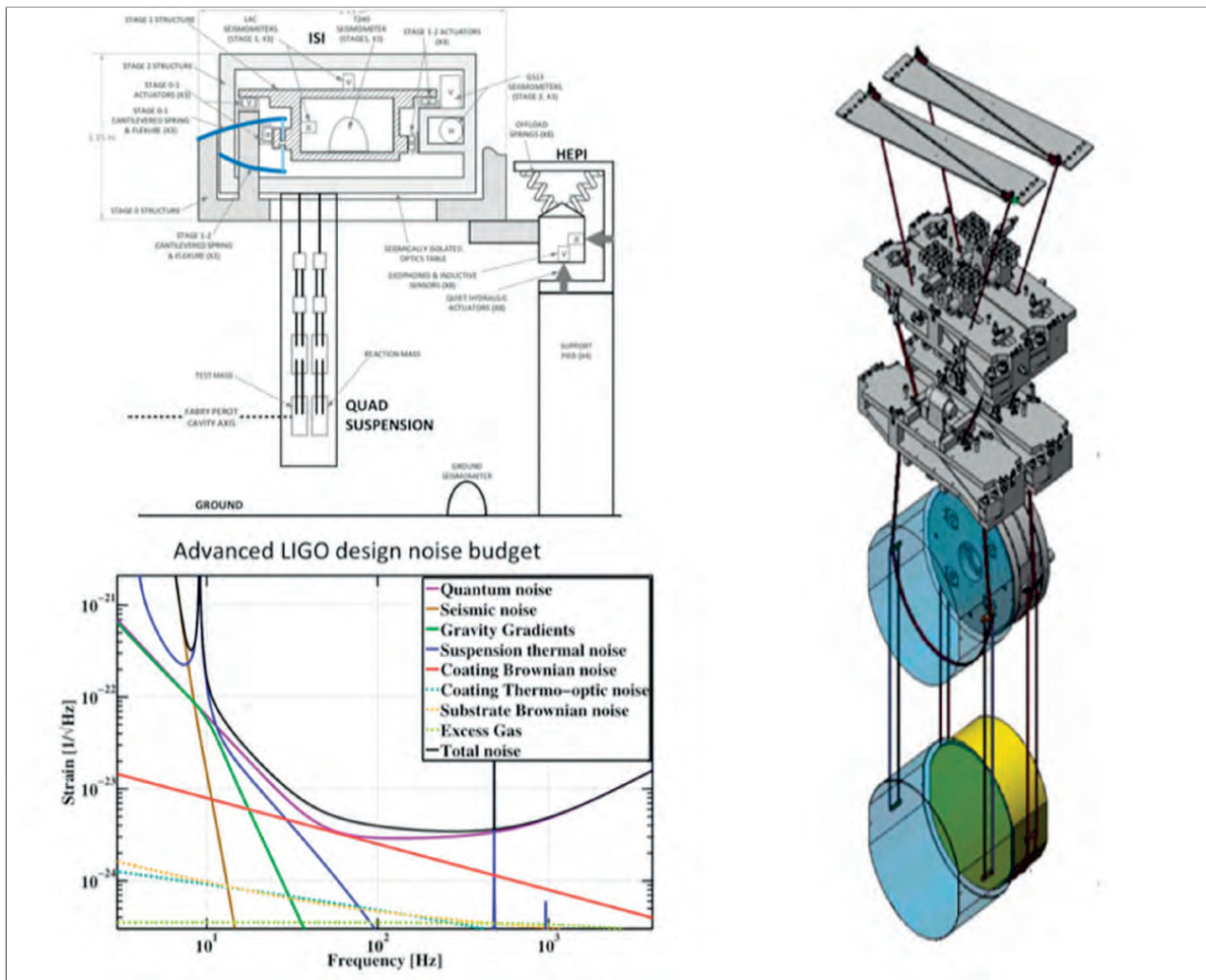
Ryc. 15. Zestawienie szumów występujących w pierwszym interferometrze LIGO pochodzące z wystąpienia do NSF z roku 1989. Należy zauważyć, że na osi pionowej odłożona jest amplituda spektralna (transformata Fouriera) w jednostkach pierwiastek z częstotliwości. Aby przetłumaczyć tę wielkość na pierwiastek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

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

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

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

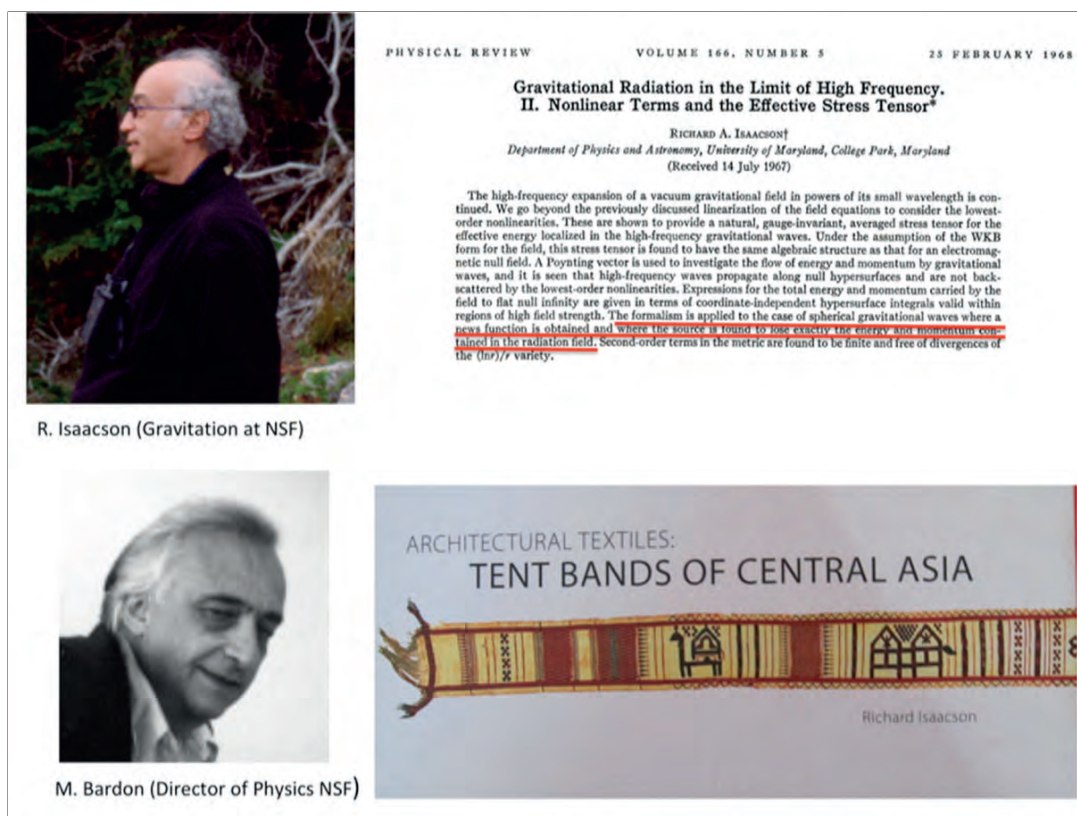
Jeszcze refleksja osobista: komentatorzy nauki, którzy pisali o projekcie LIGO odnotowywali, że upłynęło 45 lat od jego poczęcia do pierwszych pomiarów. Podkreślali naszą wytrwałość i innowacyjność grupy uczonych pracujących tak długo bez satysfakcji z uzyskania znaczących wyników naukowych. Tak może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



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

LITERATURA

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



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



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

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

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

Przekład Piotr Chankowski

Wspomnienie o Profesorze Jerzym W. Jastrzębskim

Krzysztof Rusek

Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów, Uniwersytet Warszawski

Profesor Jerzy Jastrzębski, jeden z twórców i wieloletni dyrektor Środowiskowego Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego, zmarł nagle 19.08.2018. Ten wybitny fizyk w dziedzinie eksperymentalnej fizyki jądrowej i zastosowań metod fizyki jądrowej w medycynie, zainicjował współpracę naukowców z Polski i Francji. Był założycielem i wieloletnim członkiem Polsko-Francuskiej Komisji ds. współpracy, a także reprezentował Polskę w Nuclear Physics European Cooperation Committee (NuPECC), wypracowując trwałą i liczącą się pozycję polskich fizyków jądrowych w krajach europejskich.

Jerzy był absolwentem Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Po uzyskaniu tytułu magistra w roku 1955 rozpoczął pracę w nowo powstałym Instytucie Badań Jądrowych w Świerku niedaleko Warszawy, w niewielkim zespole fizyków pod kierownictwem profesora Andrzeja Sołtana. Dwa lata później wyjechał na stypendium naukowe do czołowego francuskiego laboratorium fizyki jądrowej w Orsay pod Paryżem. Pracując tam przez kilka lat w gronie znakomitych naukowców stał się ekspertem w dziedzinie spektroskopii jądrowej, publikując jednocześnie wiele ważnych wyników swoich badań. Niektóre z nich były przedmiotem jego pracy doktorskiej (1963) i habilitacyjnej (1971), obronionych w jego macierzystym Instytucie Badań Jądrowych. Tytuł profesora uzyskał w roku 1981. W Instytucie Badań Jądrowych pracował do roku 1983, a następnie przeniósł się do powstającego właśnie Środowiskowego Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego, w którym już po roku został dyrektorem.

Dzięki jego tytanicznej pracy, uporowi i wytrwałości Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów zostało rozbudowane i wyposażone w cyklotron ciężkich jonów U-200P, przyspieszający wiązki różnych jonów do energii 10 MeV/nukleon. Pierwszy eksperyment wykorzystujący wiązkę jonów przyspieszonych w cyklotronie odbył się w 1994 roku i odtąd Laboratorium służy wielu naukowcom polskim i zagranicznym, stając się uznanym w Europie laboratorium fizyki jądrowej niskich energii.

Jerzy pracował na stanowisku dyrektora do 2009 roku z przerwą w latach 1994-2000, którą wykorzystał na prowadzenie intensywnych badań naukowych w CERN dotyczących rozkładu materii w jądrach ato-



fot. Mirosław Kaźmierczak

mowych nowatorską metodą z użyciem wiązki antyprotonów. Powstałe wówczas prace cieszą się do dziś dużym zainteresowaniem.

Rozumiał służebną wobec społeczeństwa rolę badań podstawowych i jako znany już naukowiec zajął się opracowaniem programu zastosowania radioaktywnych izotopów w diagnostyce i terapii nowotworów. Był pomysłodawcą Ośrodka Produkcji i Badań Radiofarmaceutyków, który dzięki niemu powstał w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów i został otwarty w 2012 roku. Współpracował z naukowcami z kraju i zagranicy specjalizującymi się w medycynie nuklearnej oraz radiochemii, prowadząc intensywne badania interdyscyplinarne związane z zastosowaniem metod jądrowych w medycynie. Działalność ta postawiła Go w ostatnich latach w jednym szeregu z wybitnymi ekspertami z tej dziedziny.

Różnorodność działań Jerzego została uhonorowana licznymi odznaczeniami: Krzyżem Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski, Orderem Palm Akademickich i Medalem Uniwersytetu Warszawskiego.

Profesor Jerzy Jastrzębski należał do pionierów eksperymentalnej fizyki jądrowej w Polsce. Był wybitnym naukowcem o ogromnym dorobku, przekazującym swą wiedzę młodszym kolegom (wypromował kilkunastu doktorów), pomysłodawcą, organizatorem i budowniczym krajowej infrastruktury badawczej, organizatorem szerokiej międzynarodowej współpracy naukowej. Każdej z tych aktywności oddawał się z ogromną pasją do ostatnich chwil.

Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego

Opracowana na podstawie informacji nadesłanych przez korespondentów oddziałów PTF

STYCZEŃ 2020

Wrocław. 31 stycznia odbyło się posiedzenie Oddziału Wrocławskiego Polskiego Towarzystwa Fizycznego połączone z Seminarium Instytutów Fizyki Uniwersytetu Wrocławskiego, na którym prof. Anna Szmyrka-Grzebyk z Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN wygłosiła wykład *New International System of Units*.

LUTY 2020

Kraków. 1 lutego utworzony został Instytut Fizyki Teoretycznej w ramach Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego.

Wrocław. 21 lutego odbyło się posiedzenie Oddziału Wrocławskiego Polskiego Towarzystwa Fizycznego połączone z Seminarium INTiBS PAN, na którym prof. Adam Proń z Katedry Chemii i Technologii Polimerów Wydziału Chemicznego Politechniki Warszawskiej wygłosił wykład *Stare jest piękne! Od zapomnianych barwników do współczesnych półprzewodników i luminoforów*.

MARZEC 2020

Kraków. 3 marca w Auli Collegium Novum Uniwersytetu Jagiellońskiego odbyło się uroczyste posiedzenie Rady Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ zwołane z okazji odnowienia po 50-ciu latach doktoratu profesora Andrzeja Szytuły. Dyplom w języku łacińskim odczytała prof. Ewa Gudowska-Nowak – Dziekan WFAiS UJ.

Sylwetkę prof. Andrzeja Szytuły i jego dorobek naukowy nakreślił laudator prof. Rafał Abdank Kozubski.

[...] *Profesor Andrzej Szytuła urodził się 04.11.1940 w Tarnowie. Studia fizyczne na Uniwersytecie Jagiellońskim ukończył w roku 1965. W tym samym roku został*



Fot. 1. Odczytanie dyplomu (Krzysztof Magda)



Fot. 2. Profesor Andrzej Szytuła z dyplomem (Krzysztof Magda)

zatrudniony w Instytucie Fizyki UJ. Stopień naukowy doktora został mu nadany przez Radę Wydziału Matematyki, Fizyki i Chemii UJ 22.01.1970. Wydarzenie to dało początek karierze naukowej, w której wybitnym osiągnięciom naukowym i dydaktycznym towarzyszyło uzyskiwanie kolejnych stopni i tytułów aż do mianowania profesorem zwyczajnym w Uniwersytecie Jagiellońskim w roku 1996. [...] prof. Andrzej Szytuła w latach 1972–2012 pełnił funkcję kierownika Zakładu Fizyki Ciała Stałego w Instytucie Fizyki UJ, a w okresie 1991–3 był dyrektorem tegoż instytutu. Zainteresowania naukowe prof. Andrzeja Szytuły koncentrują się na eksperymen-

talnym określaniu właściwości fizycznych związków międzymetalicznych, wysokotemperaturowych nadprzewodników i manganitów, w tym w szczególności ich właściwości magnetycznych. Kilkudziesięcioletnia działalność Profesora [w tym szeroka współpraca z licznymi ośrodkami w Polsce i za granicą] zaowocowała współautorstwem ponad 570 artykułów naukowych, które doczekały się ponad 5 tys. cytowań. Jako uznany autorytet w swojej dziedzinie prof. Szytuła został zaproszony do opracowania dwóch artykułów przeglądowych w renomowanych periodycznych wydawnictwach zagranicznych: „Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths”, tom 12, Elsevier 1989, rozdz. 83, ss. 193–211 (420 cytowań) oraz „Handbook of Magnetic Materials”, tom 6, Elsevier 1991, rozdz. 2, ss. 85–180 (172 cytowania). Do znaczących pozycji w dorobku Profesora należy również wydana w roku 1984 przez CRC Press monografia „Handbook of Crystal Structures and Magnetic Properties of Rare Earth Intermetallics” (295 cytowań). Pomimo przejścia na emeryturę w roku 2012, Profesor nadal prowadzi działalność naukową, a o jego aktywności w tym okresie świadczy współautorstwo około 60 artykułów naukowych. [...] Na szczególne podkreślenie zasługuje dbałość Profesora o rozwój bazy aparaturowej Instytutu Fizyki UJ [...] a także wkład Profesora Szytuły w kształcenie studentów oraz rozwój kadry naukowej. [...] Był opiekunem 49 prac magisterskich oraz promotorem 20 prac doktorskich. Ponad 150 razy wystąpił w roli recenzenta prac doktorskich i habilitacyjnych oraz wniosków o nadanie tytułu profesora.

Działalność naukowo-dydaktyczna Profesora została uhonorowana licznymi odznaczeniami i wyróżnieniami, spośród których warto wymienić: Krzyż Kawalerski Orderu Odrodzenia Polski (1987), Laur Jagielloński (2006) oraz tytuł profesora honorowego Uniwersytetu św. Cyryla i Metodego w Skopje (Republika Macedonii) nadany w roku dwutysięcznym.

z laudacji prof. R. A. Kozubskiego



Fot. 3. Wystąpienie Profesora Andrzeja Szytuły (Krzysztof Magda)

Profesor Andrzej Szytuła opowiedział zebranym o swojej pracy naukowej od czasu studiów, poprzez długie lata zatrudnienia na coraz wyższych stanowiskach w Zakładzie Fizyki Ciała Stałego Instytutu Fizyki UJ. Mówił o kolejnych tematach swoich zainteresowań badawczych oraz o ludziach, którzy odegrali ważną rolę w ich rozwijaniu. Dziękował swoim mistrzom, opiekunom i współpracownikom zarówno żyjącym, jak i tym, którzy już odeszli.



Fot. 4. Profesor Andrzej Szytuła w gronie współpracowników i przyjaciół (Krzysztof Magda)

Poznań. W dniach 6–7 marca w Auli im. Arkadiusza Piekary na Wydziale Fizyki UAM, odbyła się XVI Ogólnopolska Konferencja Filozofii Fizyki *Ontologie Przyrodoznawstwa* zorganizowana pod patronatem Poznańskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Filozoficznego oraz Poznańskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Fizycznego, w której wzięli udział filozofowie, fizycy i astronomowie.

Wrocław. 9 marca na posiedzeniu Oddziału Wrocławskiego Polskiego Towarzystwa Fizycznego, połączonym z Seminarium Fizyki Politechniki Wrocławskiej prof. Piotr Perlin z Instytutu Wysokich Ciśnień PAN "Unipress" wygłosił wykład *Lasery na bazie półprzewodników azotowych, wyzwania i perspektywy*.

MARZEC--MAJ 2020

Warszawa. Od początku stanu zagrożenia epidemiologicznego Wydział Fizyki UW zorganizował energiczne działania mające na celu pomoc w zaopatrywaniu służby zdrowia w niezbędne elementy ochrony osobistej. Poniżej raport szefa akcji z 09.05.2020.

Szanowni Państwo,

[...] chciałbym przekazać aktualności dotyczące akcji „Materiały dla medyków”. Jest mi miło poinformować, że do wczoraj udało się nam wyprodukować i przekazać medykom 8353 przyłbic. Na liście obdarowanych jest już 171 instytucji. Nasz cel – 10 000 przyłbic dla medyków jest

już prawie na wyciągnięcie ręki i mam nadzieję, że osiągniemy go do końca przyszłego tygodnia.

Dzięki Państwa wsparciu udało się zebrać wystarczające środki, żeby go zrealizować z nawiązką! Dlatego zdecydowaliśmy o zawieszeniu akcji zbierania filamentu oraz wpłat na konto Fundacji Uniwersytetu Warszawskiego.

Wszystkie zebrane dotychczas środki zostaną wykorzystane do produkcji przyłbic na potrzeby medyków – mamy jeszcze zgłoszenia, głównie spoza Mazowsza, które zrealizujemy w najbliższym czasie. Bardzo serdecznie Państwu dziękujemy za wsparcie!

Na podsumowanie przyjdzie jeszcze czas, ale chciałbym bardzo podkreślić, że sukces akcji wynika z ogromnego zaangażowania całej społeczności naszego Wydziału. Dziękuję wolontariuszom – studentom, doktorantom i pracownikom – bezpośrednio zaangażowanym w produkcję i dystrybucję przyłbic!

Razem z wolontariuszami jestem bardzo wdzięczny za wielką pomoc w realizacji akcji ze strony Administracji, Sekcji Finansowej, Działu Zamówień Publicznych oraz Grona Dziekańskiego F UW.

Jak już wspomniałem akcja „Materiały dla medyków”

powoli dobiega końca, ale na horyzoncie pojawiły się nowe wyzwania. W związku z możliwością powrotu na uczelnię, jaka otworzyła się kilka dni temu, chcielibyśmy wyposażyć pracowników, doktorantów i studentów powracających do nauki i pracy w przyłbice. Pomysł zyskał wsparcie Władz Dziekańskich. Ze względu na to, że rozporządzenie Rady Ministrów z dn. 2 maja br. dopuszcza stosowanie zamiast maseczek ochronnych przyłbic, mogą one być szczególnie pomocne w pracy w laboratoriach naukowych, pracowniach studenckich, ale również w dziekanacie i ogólnie administracji wydziałowej – słowem wszędzie tam, gdzie bezpośrednie kontakty międzyludzkie są nieodzowne.

Na zakończenie zachęcam Państwa do odwiedzenia strony akcji:

<http://makerspace.uw.edu.pl/pl/akcja-mdm/o-akcji/>
Znajdziecie tam Państwo najświeższe informacje o naszych wspólnych działaniach – zbiórka środków została zawieszona, ale akcja ciągle jeszcze trwa!

Z serdecznymi pozdrowieniami,

Andrzej Wyszmołek
Kierownik Pracowni Projektów Studenckich
Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Leszek M. Sokołowski

SZCZEGÓLNA TEORIA WZGLĘDNOŚCI

Notatki z wykładu



Skrypt [...] do jednosemestralnego wykładu STW. Obejmuje [...] materiał, który z trudem mogę wyłożyć w dostępnym czasie. Zrezygnowałem zatem z przedstawienia czasoprzestrzeni Galileusza fizyki nierelatywistycznej, mimo że jest ona bardzo pouczającym przykładem, iż geometria Minkowskiego jest konstrukcyjnie od niej prostsza. Podaję jedynie [podstawy] mechaniki relatywistycznej, bez formalizmu Lagrange'a i Hamiltona. Kinematykę relatywistyczną ograniczyłem do minimum, właściwym miejscem jej prezentacji jest bowiem wykład fizyki cząstek elementarnych. Skrypt zachował telegraficzny styl notatek do wykładu. Zawiera sporo powtórzeń, które psują elegancję wykładu, lecz są wygodne dla czytelnika, [a] więc celowe. Notatki te uzupełniłem [...] komentarzem, który był wygłaszany na wykładzie.

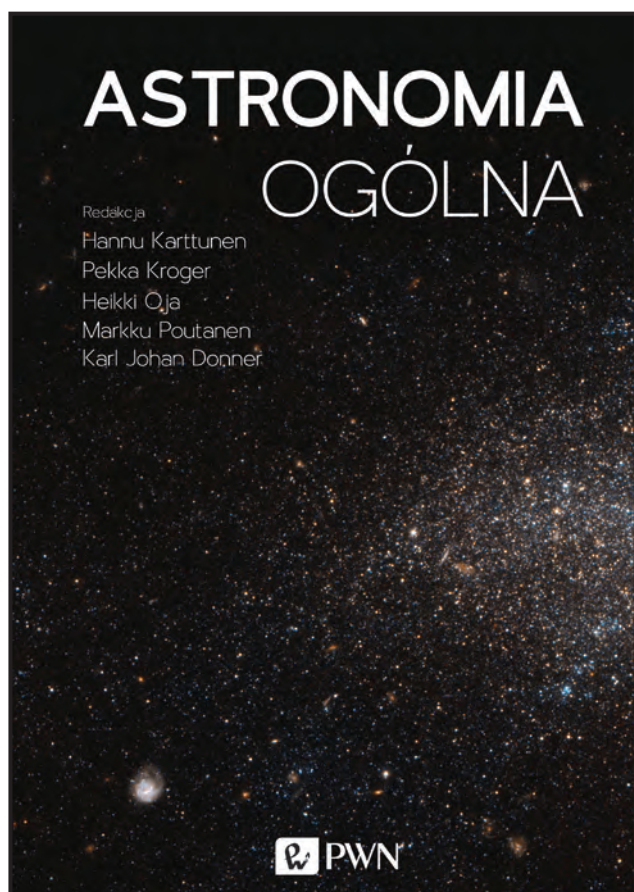
z przedmowy autora

Dr hab. Leszek M. Sokołowski jest fizykiem teoretykiem pracującym w Zakładzie Astrofizyki Relatywistycznej i Kosmologii Obserwatorium Astronomicznego Uniwersytetu Jagiellońskiego, którym przez wiele lat kierował. Zajmuje się kosmologią matematyczną i konceptualnymi podstawami fizyki grawitacji, problemem istnienia wielu alternatywnych (do teorii Einsteina) teorii grawitacji oraz filozofią fizyki, w tym zagadką matematyczności przyrody.

Skrypt oparty na notatkach do jednosemestralnego wykładu podstaw szczególnej teorii względności (STW) przeznaczony dla studentów drugiego roku fizyki i astronomii. Teoria ta jest tu przedstawiona w ujęciu geometrycznym. Skrypt rozpoczyna się od elementarnej dyskusji pojęć czasoprzestrzeni i układów odniesienia, następnie autor wprowadza zasadę względności i zarysowuje podstawy STW. W dalszej części omawiane są między innymi diagramy Minkowskiego, geometryczna struktura czasoprzestrzeni Minkowskiego i grupa Lorentza. Skrypt kończy się krótkim rozdziałem dotyczącym relatywistycznej dynamiki.

Niewątpliwą zaletą skryptu jest geometryczne podejście do STW, ułatwiające zrozumienie wielu zagadnień, które w tradycyjnym „analitycznym” ujęciu jawią się jako dość skomplikowane czy nieintuicyjne. Nie jestem natomiast do końca pewien, czy skrypt ten należy polecać tym studentom, którzy nie mają jeszcze za sobą żadnego kursu STW, ponieważ jest napisany, według słów samego autora, „w telegraficznym stylu notatek z wykładu”, co dla osoby rozpoczynającej „od zera” studiowanie STW może być pewnym utrudnieniem.

dr hab. Andrzej Okołów IFT, Wydział Fizyki UW



ASTRONOMIA OGÓLNA

Redakcja
Hannu Karttunen
Pekka Kroger
Heikki Oja
Markku Poutanen
Karl Johan Donner

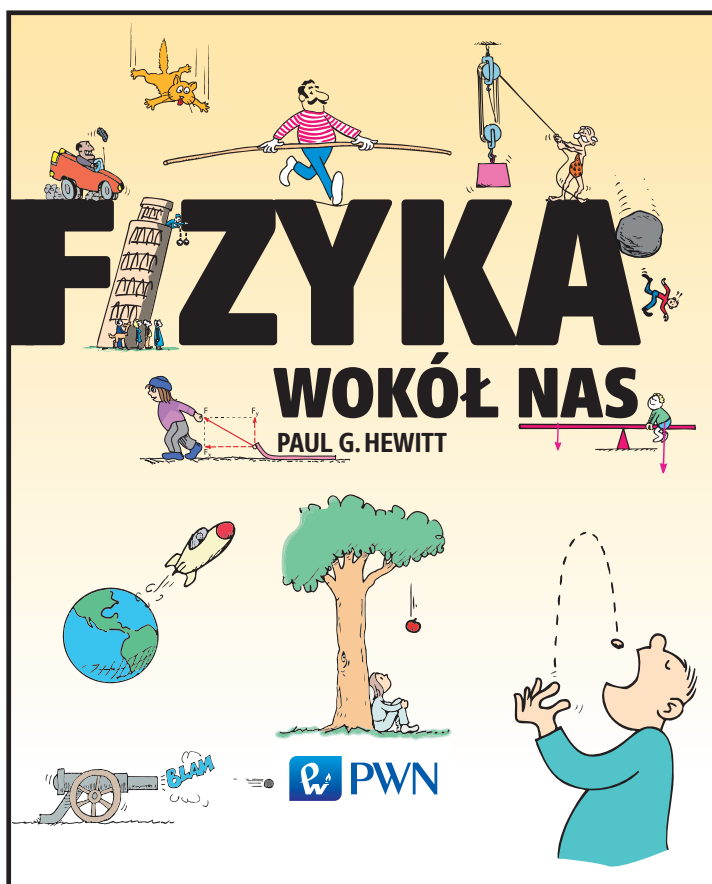
Głównym powodem, dla którego ludzie zajęli się badaniem Wszechświata jest ich wrodzona ciekawość. Kluczową rolę w jego poznaniu odgrywają obserwacje i umiejętność wyciągania logicznych wniosków. Proces ten nie może być ograniczony żadnymi koncepcjami filozoficznymi, politycznymi, ani też wierzeniami religijnymi.

Astronomia ogólna to kompleksowe wprowadzenie do astronomii klasycznej oraz współczesnej astrofizyki i kosmologii.

Autorzy – znani fińscy astronomowie, profesorowie uniwersyteccy, wielokrotnie nagradzani przez środowisko astronomiczne – prezentują najważniejsze koncepcje astronomiczne, jak też leżące u ich podstaw zasady fizyczne. Oprócz rozważań teoretycznych, Czytelnik znajdzie tu zadania wraz z rozwiązaniami oraz tabele zawierające najważniejsze zbiorcze dane z zakresu astronomii i fizyki.

Z założenia jest to podręcznik akademicki dla studentów pierwszych lat kierunków astronomia i fizyka, wierzymy jednak, że w gronie Czytelników znajdą się także pasjonaci wiedzy astronomicznej, dla których zgłębianie wiedzy o kosmosie jest po prostu ciekawe.

PWN poleca



Nareszcie fizyka rozumiała dla wszystkich!

Niezwykła opowieść o fizyce autorstwa Paula G. Hewitta – amerykańskiego fizyka wyróżnionego za działalność edukacyjną wieloma nagrodami, w tym nagrodą Amerykańskiego Stowarzyszenia Nauczycieli Fizyki (AAPT, 1982). Dzięki przykładom z codziennego życia oraz bardzo dużej liczbie ilustracji, fotografii i wspaniałym rysunkom Autora łatwiej jest zrozumieć prawa rządzące przyrodą.

Podręcznik stanowi rewolucję w nauczaniu fizyki i choć Autor nie stroni od matematyki i wzorów, to są one jedynie pomocą – nie przesłaniają istoty wykładu. Niemal na każdej stronie znajdziemy przykłady i opisy doświadczeń, które doskonale pokazują związki fizyki z innymi naukami przyrodniczymi i techniką. A są tak opisane, że aż chce się samodzielnie wykonać eksperyment. Obecne wydanie uwzględnia najnowsze osiągnięcia fizyki, szczególnie w atomistyce, energetyce czy kosmologii.

Trzeba powiedzieć jasno, iż podręcznik Hewitta, pomimo w końcu tradycyjnego układu materiału, nie tylko rozpoczął nową epokę podręczników, ale wyznaczył nowe standardy [...] obecne wydanie wzbogacone jest o opisy matematyczne i zadania rachunkowe. Książka kończy się dodatkami matematycznymi. [...] Dygresje i przykłady to najmocniejsza strona książki; jest ich dużo, trafią do każdego, jest w czym wybierać. To one stanowią o tym, że nikt po przejrzeniu książki nie powie, że fizyka to oderwana od życia nauka o równi pochyłej, solenoidach, wahadle matematycznym czy gazie doskonałym. Z podręcznika]można czerpać wprost garściami przykłady prostych doświadczeń i zadań koncepcyjnych.

z recenzji dr. Zofii Gołąb-Meyer, Instytut Fizyki, WFAiS UJ

Publikacja szczególnie godna polecenia wszystkim którym fizyka wydaje się trudna i nudna. Nieoceniona pomoc dla uczniów i ich rodziców, studentów oraz nauczycieli.

PWN poleca

Profesor dr hab. Andrzej Kajetan Wróblewski

fizyk i historyk fizyki, absolwent Uniwersytetu Warszawskiego, gdzie pracuje od roku 1954, obecnie jako profesor emerytowany. W latach 1986–1989 pełnił funkcję dziekana Wydziału Fizyki, a w latach 1989–1993 był rektorem Uniwersytetu Warszawskiego.

- Członek: Polskiej Akademii Nauk, Polskiej Akademii Umiejętności, Towarzystwa Naukowego Warszawskiego, Polskiego Towarzystwa Fizycznego i Polskiego Towarzystwa Astronomicznego.
- Laureat: Nagrody Marii Skłodowskiej-Curie, Medalu Mariana Smoluchowskiego.
- Doktor honoris causa uniwersytetów: Chapmana (Orange, USA), Glasgow (Szkocja), Siegen (Niemcy), Politechniki Warszawskiej, Uniwersytetu Jana Kochanowskiego.
- Autor wielu prac naukowych z fizyki wielkich energii i historii fizyki, w tym *Historii fizyki* (PWN 2006) cieszącej się ogromnym uznaniem Czytelników, a także książek popularnonaukowych *Prawda i mity w fizyce* (Iskry 1987) oraz *300 uczonych prywatnie i na wesoło t. 1, 2* (Prószyński Media).
- Współautor wraz z prof. Januszem A. Zakrzewskim dwutomowego, nowatorskiego podręcznika akademickiego *Wstęp do fizyki* (wydawanego przez PWN w latach 1976–1991).

HISTORIA FIZYKI W POLSCE to kompleksowy opis rozwoju fizyki od początków naszej państwowości, aż do czasów współczesnych. Autor prezentuje rozwój polskich badań w dziedzinie fizyki na tle historii nauki europejskiej, a także historii szkolnictwa uniwersyteckiego w Europie. Publikacja składa się z czterech części: pierwsza obejmuje okres do utraty niepodległości w roku 1795, druga poświęcona jest rozwojowi fizyki na ziemiach polskich w okresie zaborów, trzecia dotyczy polskiej fizyki w okresie międzywojennym, czwarta zaś to historia fizyki w Polsce po 1945 roku.

Czytając tę książkę:

- poznajemy mało znane fakty z życia polskich uczonych mających wpływ na rozwój rodzimej, jak i światowej fizyki,
- uświadamiamy sobie, z jakimi trudnościami i ograniczeniami technologicznymi oraz geopolitycznymi musieli zmagać się polscy fizycy,
- dowiadujemy się, jak polska nauka wyglądała na tle rozwiązań światowych oraz jaki był wkład polskich fizyków w rozwój nauki i kultury światowej.

Całość wzbogacono o biogramy fizyków oraz nierzadko humorystyczne cytaty z ich opracowań naukowych.

Publikacja skierowana jest do studentów nauk ścisłych i przyrodniczych oraz pracowników naukowo-dydaktycznych w tych dziedzinach. Polecamy ją także profesjonalistom i pasjonatom historii nauki, filozofii i kultury.

ANDRZEJ KAJETAN WRÓBLEWSKI



FIZYKA
Doświadczenia i Perwersje.
Albo
DOSWIADCZENIA
FIZYCZNE
Przez Kawalców Filozofii
uczących się
w Collegium Nobilium Sibi. Pięć
Publicznie czynione,
Polskim i językiem
NAPISANE
Przez X. Szymona Chodźkę
Szkolny Pięć.
Filozofii i Astronomii
WARSZAWIE
W Drukarni Książkowej
i Antykwarycznej S. P. 1916.

HISTORIA
FIZYKI
W POLSCE

PWN

20 lipca 2020
PREMIERA