

# POSTĘPY FIZYKI



CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO  
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

**Sukces polskich fizyków**

**Nierównowagowe kondensaty Bosego – Einsteina polarytonów  
ekscytonowych w mikrownękach półprzewodnikowych**  
Barbara Piętka

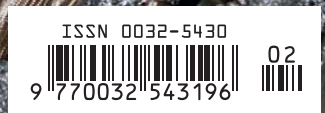
**Uczenie fizyki w XXI wieku. Jak i po co?**  
Lukasz A. Turski

**Wykłady noblowskie 2013**

2 / 2019  
TOM 70



nr indeksu 369721 cena 12 zł





**POLSKIE  
TOWARZYSTWO  
FIZYCZNE (PTF)**  
[www.ptf.net.pl](http://www.ptf.net.pl)

**ZARZĄD GŁÓWNY**

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

**BIURO ZARZĄDU**

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

**PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW**

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

## POSTĘPY FIZYKI (PF)

CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO  
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

czasopismo ukazuje się od 1949 roku

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

**RADA REDAKCYJNA**

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

**KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF**

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

**REDAKCJA**

Anna Szemberg (redaktor naczelna)  
Krzysztof Turzyński  
Wawrzyniec Kaszub

**ADRES**

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

**INFORMACJE DLA AUTORÓW**

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

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

**PRENUMERATA**

dla osób/institucji niebędących członkami Polskiego Towarzystwa Fizycznego prenumeratę oferuje Garmond Press ([www.garmondpress.pl](http://www.garmondpress.pl)). Prenumeratory, którzy nie chcą korzystać z usługi pośrednika, proszeni są o wpłacenie odpowiedniej kwoty na główne konto bankowe PTF nr 74 1030 0019 0109 8530 0046 3033, a następnie przesłanie e-mailowo potwierdzenia wpłaty na adres [postepy.fizyki@gmail.com](mailto:postepy.fizyki@gmail.com) podając, którego rocznika PF lub których numerów PF wpłata dotyczy oraz adres, na który czasopismo ma być przesyłane. Pojedynczy numer PF kosztuje 12 zł, rocznik 48 zł. Koszty przesyłki pokrywa wydawca.

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



Szanowni Czytelnicy,

oddając w Państwa ręce drugi numer Postępów Fizyki w roku 70-lecia istnienia czasopisma, wracamy w nim do tradycji **prezentowania wykładów noblowskich** – publikujemy tłumaczenia dwóch wykładów laureatów Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki w 2013 roku F. Englerta i P. Higgsa, wygłoszonych podczas ceremonii wręczenia medali.

Z radością publikujemy informację dotyczącą badań, w których wzięli udział polscy fizycy pod kierunkiem prof. dr. hab. Kazimierza Rzążewskiego z Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk (CFT PAN) w Warszawie. Badania te poszerzyły naszą wiedzę na temat kwantowych właściwości materii. W niedalekiej przyszłości ich zastosowanie pozwoli przyspieszyć rozwój nowych technologii, takich jak komputery kwantowe czy super dokładne detektory fal grawitacyjnych. Wyniki uzyskane przy udziale polskich fizyków to osiągnięcie na skalę światową. **Serdecznie gratulujemy!**

Zapraszamy do lektury artykułu dotyczącego nowego międzynarodowego układu jednostek miar SI. Cztery podstawowe jednostki – kilogram, amper, kelwin i mol – zdefiniowane zostały za pomocą stałych fizycznych: stałej Plancka  $h$ , ładunku elementarnego  $e$ , stałej Boltzmannna  $k$  i stałej Avogadra  $N_A$ , czyniąc cały układ SI układem uniwersalnym, niezależnym od własności materii. **Nowy układ SI obowiązuje już od 20 maja 2019 roku.**

„Wyobraźmy sobie strumień światła padający na szybę. Każda szyba przepuszcza tylko część światła, a resztę odbija albo pochłania. Wystarczy spojrzeć na własne odbicie w oknie. To, ile dokładnie światła się odbija, a ile przechodzi przez szybę...” Tak zaczyna się artykuł Andrzeja Dragana, który powstał na bazie jego niedawno opublikowanej książki *Kwantechizm czyli klatka na ludzi* – publikacja zebrała dobre recenzje i cieszy się niesłabnącym zainteresowaniem.

Do zobaczenia na 45. Zjeździe Fizyków Polskich, który w tym roku odbywa się w Krakowie w dniach 13–18 września i stanowi bardzo ważne wydarzenie w kalendarzu Polskiego Towarzystwa Fizycznego.

## Sukces polskich fizyków w badaniach nad kondensatem Bosego–Einsteina

Nierównowagowe kondensaty Bosego–Einsteina polarytonów ekscytonowych  
B. Piętka ..... 4

Uczenie fizyki w XXI wieku. Jak i po co?  
Ł. A. Turski ..... 13

*Kwantechizm czyli klatka na ludzi*  
A. Dragan ..... 18

Synchrotron SOLARIS  
E. Król ..... 21

Nowy Międzynarodowy Układ Jednostek Miar SI  
A. Szymrka-Grzebyk, A. Kowal ..... 25

Mechanizm BEH i związany z nim skalarny bozon  
F. Englert ..... 35

Obchodzenie twierdzenia Goldstone’a  
P. Higgs ..... 45

## Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego

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



Fragment linii badawczej w synchrotronie SOLARIS (fot. Anna Wojnar)

---

# Sukces polskich fizyków w badaniach nad kondensatem Bosego–Einsteina\*

Badania naukowców z Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk w Warszawie poszerzyły naszą wiedzę na temat kwantowych właściwości materii. W niedalekiej przyszłości ich zastosowanie pozwoli przyspieszyć rozwój nowych technologii, takich jak komputery kwantowe czy super dokładne detektory fal grawitacyjnych. Wyniki uzyskane przy udziale polskich fizyków, to osiągnięcie na skalę światową.

## Co to jest kondensat Bosego–Einsteina?

Kondensat Bosego–Einsteina to stan skupienia materii, który występuje w skrajnie niskich temperaturach, niewiele tylko wyższych od temperatury zera bezwzględnego ( $-273,15^{\circ}\text{C} = 0\text{ K}$ ). Gdy materia osiąga ten stan skupienia, uwidaczniają się jej kwantowe właściwości. Atomy w kondensacie są tak zimne, że zachowują się bardziej jak fale niż jak cząstki. Co więcej, ponieważ fale poszczególnych atomów nakładają się na siebie, to kondensat zachowuje się jak jeden „superatom”. Kondensat Bosego–Einsteina tworzy jedną wielką falę materii, która jest sumą setek tysięcy tworzących go atomów. Pierwszy kondensat stworzono eksperymentalnie w 1995 roku, a pracujące nad nim zespoły naukowców zostały uhonorowane w 2001 roku Nagrodą Nobla.

Tradycyjnie wyróżnia się 3 stany skupienia materii: stan gazowy, ciekły i stały. Możliwość wystąpienia, nowej nieznannej formy materii, przewidział w 1924 roku Albert Einstein. Jego teoria przewidywała, że jeśli bardzo mocno schłodzi się chmurę gazu pod odpowiednio niskim ciśnieniem, to podzieli się ona na dwie frakcje: standardową, w której cząstki poruszają się chaotycznie w różnych kierunkach ze średnią prędkością zależną od temperatury, oraz na kondensat Bosego–Einsteina, utworzony z cząstek, które będą lewitować praktycznie nieruchomo.

Polscy fizycy, pod kierunkiem prof. Kazimierza Rzążewskiego, uczestniczyli w pionierskim eksperymen-

cie pomiaru fluktuacji liczby cząstek w kondensacie Bosego–Einsteina. Zespół prof. Rzążewskiego odpowiadał za podstawę teoretyczną projektu, natomiast eksperyment w całości wykonano w Danii.

– Wspólnymi siłami z naukowcami z Danii i Niemiec dokonaliśmy prekursorskiego pomiaru – cieszy się prof. Kazimierz Rzążewski z Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. – Otworzyliśmy furtkę do lepszego zrozumienia własności statystycznych w zimnych atomach. W tej dziedzinie jest ciągle wiele zagadek, nad którymi pracują obecnie setki laboratoriów na świecie. Wypracowane w naszym eksperymencie metody przyspieszą ich prace – mówi profesor, który od wielu lat zajmuje się tą tematyką od strony teoretycznej.

– Wynik otwiera nowe możliwości praktyczne, zwłaszcza w dziedzinie metrologii. Dotychczas, fluktuacje liczby cząstek były odpowiedzialne za istotne szумы, zmniejszające precyzję pomiarów. Metody, które zastosowano w eksperymencie pozwolą przewyżnić takie problemy. Kolejnym zastosowaniem jest tworzenie stanów splątanych, będących niezbędnym elementem wszystkich kwantowych technologii” – dodaje dr Krzysztof Pawłowski, członek grupy badawczej. Wraz z nim w zespole prof. Rzążewskiego pracował także Michał Iglicki, obecnie doktorant Uniwersytetu Warszawskiego. Artykuł opisujący najnowsze osiągnięcie polskich fizyków został opublikowany w kwietniu 2019 roku w renomowanym czasopiśmie *Physical Review Letters* (dodatkowo wyróżniony przez jego redakcję). Warto zaznaczyć, że został on niezwykle dobrze oceniony przez środowisko naukowe, czego dowodem jest komentarz jednego z recenzentów publikacji, który określił eksperyment jako „tour de force”.

## Co zmierzono w opisywanym eksperymencie?

W eksperymencie zmierzono, ile ze schłodzonych atomów tworzy kondensat Bosego–Einsteina, a ile pozostaje zwykłym zimnym gazem, oraz w jakim stopniu liczby te podlegają zmianom (fluktuacjom). Choć bada-

---

\* Na podstawie tekstu informacji prasowej z 12.06.2019

nia nad właściwościami kondensatu ciągle się rozwijają, nikomu dotychczas nie udało się zmierzyć jednej z jego podstawowych właściwości. Zespół, w którego skład wchodził polski naukowiec, opracował unikalne metody przygotowania chmury atomów, z ustaloną liczbą cząstek, z precyzją sięgającą dziesiątych części procenta. Pozwoliło to na wielokrotne dokładne zmierzenie liczby atomów tworzących kondensat i określenie jak liczba ta fluktuuje.

Było to jednak wyzwanie nie tylko pod względem eksperymentalnym, ale także teoretycznym. Fizycy bowiem od dawna zastanawiali się nad tym, jakimi równaniami powinno się opisywać fluktuacje liczby atomów w kondensacie Bosego–Einsteina. Pytanie to pozostaje od lat otwarte, ponieważ nawet drobne zmiany w modelach teoretycznych prowadzą do zupełnie różnych wyników. Jednym z głównych problemów, nad którego rozwiązaniem wciąż pracują naukowcy, jest uwzględnienie w opisie teoretycznym zderzeń pomiędzy setkami tysięcy atomów tworzących kondensat. Polscy fizycy, używając metody pół klasycznych wykazali, że w zrealizowanym doświadczeniu wpływ zderzeń między atomami na uzyskiwane wyniki jest niezwykle mały. Pozwoliło to na bardzo precyzyjną analizę przeprowadzonych badań.

#### **Ale po co to wszystko?**

Badania związane z kondensatem Bosego–Einsteina i chmurami zimnych atomów przyspieszają rozwój wielu nowych technologii. Chmury zimnych atomów są już m.in. rutynowo używane w najdokładniejszych na świecie zegarach atomowych. Stosunkowo niedawno zaczęto je także wykorzystywać do bardzo precyzyjnych pomiarów pól magnetycznych i grawitacyjnych. Dzięki temu możliwy jest już na przykład pomiar przyciągania

grawitacyjnego wywołanego masą człowieka (i to nawet szczupłego). W przyszłości może to pozwolić na badania ruchów mas w głębi Ziemi i przewidywanie trzęsień Ziemi. Osobną gałęzią badań nad kondensatem Bosego–Einsteina jest też wykorzystanie go do budowy komputerów kwantowych. Idea komputerów kwantowych jest oparta na kwantowych bitach, zwanych kubitami, w których "0" i "1" mogą występować jednocześnie. Ich zastosowanie pozwoli wykonywać złożone zadania matematyczne, szybciej niż jest to możliwe z wykorzystaniem klasycznych komputerów.

#### **Tour de force niemal 100 lat po Einsteinie**

95 lat – tyle upłynęło od momentu, w którym Einstein przewidział istnienie kondensatu, do zmierzenia fluktuacji, które w nim zachodzą. Realizacja tego prekursorskiego projektu trwała ponad trzy lata (2016–2019). W badania, oprócz Polaków, zaangażowani byli także fizycy z Uniwersytetu w Aarhus w Danii i Uniwersytetu w Hanowerze w Niemczech – w sumie 10 naukowców. Projektem kierował prof. Jan Arlt z Danii, który zajmuje się badaniem kwantowych własności gazów schłodzonych do ultraniskich temperatur. To właśnie w jego laboratorium na Uniwersytecie Aarhus uzyskano wynik doświadczenia.

Badania zostały sfinansowane przez kilka instytucji z różnych krajów. Polskich naukowców wsparło Narodowe Centrum Nauki, badaczy z Niemiec Deutsche Forschungsgemeinschaft. Duńczycy otrzymali pomoc z Villum Foundation i Danish Council for Independent Research, oraz the Carlsberg Foundation. The Carlsberg Foundation to fundacja założona, przez duński browar Carlsberg, która wspiera innowacyjne badania naukowe.

---

# Nierównowagowe kondensaty Bosego–Einsteina polarytonów ekscytonowych w mikrownękach półprzewodnikowych

Barbara Piętka

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Polarytony ekscytonowe to kwazicząstki cieszące się ostatnio dużym zainteresowaniem w świecie naukowym. Wynika to z obserwacji ciekawych efektów kolektywnych tych cząstek, takich jak możliwość utworzenia kondensatu Bosego–Einsteina, laserowanie polarytonowe, czy nadciekłość. Polarytony ekscytonowe powstają w wyniku sprzężenia dwóch elementów: fotonów i cząstek materialnych, ekscytonów. Polarytony dziedziczą szczególne właściwości z obu swych komponentów. Składnik fotonowy, pochodzący od fotonów zlokalizowanych zwykle we wnękach optycznych, stanowi o krótkim czasie życia polarytonów i ich małej masie. Ekscytony, czyli wzbudzenia półprzewodnika w postaci coulombowsko sprzężonych par elektron-dziura, stanowią składnik materialny polarytonów, który odpowiada za ich wzajemne oddziaływanie.

Prace naukowe koncentrują się na zjawiskach, które zachodzą w gazie polarytonów ekscytonowych, kiedy układ ten jest bardzo silnie pobudzany nierezonansową lub rezonansową wiązką promieniowania. Dzięki temu można osiągnąć duże gęstości polarytonów w jednym ze stanów podstawowych i doprowadzić gaz polarytonów do przejścia fazowego do stanu nierównowagowego kondensatu Bosego–Einsteina. Taki stan pokazuje bardzo ciekawe właściwości, które dotychczas były obserwowane głównie w gazach zimnych atomów. Można obserwować takie zjawiska koherentne jak korelacje dalekiego zasięgu, wiry kwantowe, czy oscylacje Josephsona. Przy rezonansowym pobudzeniu układu koherentną wiązką promieniowania można wymusić stan nadciekły i badać zjawiska z reżimu hydrodynamiki kwantowej, gdzie kreowane są propagujące się wiry kwantowe. Ponadto polarytony ekscytonowe, dziedzicząc część swoich charakterystyk od ekscytonu, posiadają spin. Właściwości spinowe kondensatów polarytonowych do dziś nie są szeroko badane ze względu na małe rozszczenie Zeemana polarytonów. Na Uniwersytecie Warszawskim pokazaliśmy, że użycie półprzewodników półmagnetycznych do zmodyfikowania części ekscytono-

wej polarytonu prowadzi do obserwacji gigantycznego efektu Zeemana, nie blokując przy tym możliwości wytworzenia nierównowagowego kondensatu półmagnetycznych polarytonów. Nasze badania nad nowym typem polarytonów o silnych właściwościach magnetycznych otwierają drogę do badania spinorowych kondensatów polarytonowych, wyjątkowych wśród gazów bozonowych.

## Podstawy zjawiska kondensacji i pierwsze osiągnięcia

Polarytony ekscytonowe (zwane dalej polarytonami), są to kwazicząstki powstałe w wyniku silnego sprzężenia fotonów z ekscytonami [1]. Silne sprzężenie realizuje się poprzez umieszczenie półprzewodnikowej studni kwantowej w maksimum rozkładu pola elektrycznego w mikrownęce półprzewodnikowej. W tym celu mikrownęki półprzewodnikowe projektuje się tak, aby uzyskać dużą amplitudę fali elektromagnetycznej w ściśle określonym miejscu. Najczęściej wytwarza się strukturę złożoną z dwóch lusterek Bragga oddzielonych warstwą stanowiącą wnękę rezonansową, przy czym energie fotonów we wnęce dostrojone są do częstości przejścia ekscytonu w studni kwantowej. W wyniku sprzężenia (tzw. oscylacje Rabiego) zamiast modu fotonowego i rezonansu ekscytonowego, otrzymuje się dwa nowe mody: górny i dolny polaryton, o właściwościach obu swoich komponentów [1]. Polarytony dziedziczą małą masę efektywną od części fotonowej (9 rzędów wielkości mniejszą od masy atomów) i możliwość oddziaływań od składnika ekscytonowego.

W 2006 roku J. Kasprzak, M. Richard wraz ze współpracownikami [2] pokazali, że polarytony w reżimie dużych gęstości przechodzą do nowego stanu kwantowego: kondensatu Bosego–Einsteina (BEC) [3]. Ten szczególnie stan kwantowy przewidziany został przez Alberta Einsteina w latach 1924-25 zainspirowanego pracami Satyendry Natah Bosego pracującego nad statystycznymi własnościami fotonów. Einstein rozszerzył prace Bosego na wszystkie bozony i pokazał, że moż-

liwe jest makroskopowe obsadzenie pojedynczego stanu kwantowego i całkowita nierozróżnialność cząstek w niskich temperaturach. Dalej, w 1938 roku, korzystając z tych prac, Fritz London udowodnił, że zaobserwowane wówczas zjawisko nadciekłości helu jest bezpośrednio związane z kondensacją Bosego–Einsteina. Na eksperymentalne potwierdzenie istnienia przejścia fazowego gazu bozonów w niskiej temperaturze, należało poczekać aż do 1995 roku, kiedy to Carl Wieman i Eric Cornell oraz niezależnie Wolfgang Ketterle, wykorzystując techniki chłodzenia laserowego, zademonstrowali redukcję rozkładu prędkości atomów i makroskopowe obsadzenie pojedynczego stanu kwantowego. Przez bardzo długi czas obserwacja tej degeneracji kwantowej była zarezerwowana dla gazu atomów w bardzo niskich temperaturach, rzędu nanokelwinów.

Kondensacja polarytonów ekscytonowych, która obecnie jest obserwowana również w temperaturze pokojowej [4, 5], otworzyła ogromne możliwości badania tego szczególnego stanu kwantowego. Rozpoczęto studiowanie fundamentalnych zjawisk kwantowych jak określenie rodzaju korelacji dalekiego zasięgu [6] czy natury przejścia fazowego (BEC – BKT [7]) [8]. W 2009 roku A. Amo ze współpracownikami [9] pokazał, że polarytony wykazują nadciekłość, czego bezpośrednią konsekwencją są wiry kwantowe i pół-wiry kwantowe [10, 11], czy jak później pokazano, również ciemnie i jasne solitony [12, 13]. Badania w tej tematyce rozpoczęliśmy w grupie prof. Benoit Deveaud na Ecole Polytechnique w Lozannie, w Szwajcarii, kiedy zjawisko nierównowagowej kondensacji polarytonów, istnienie korelacji dalekiego zasięgu oraz nadciekłość zostały już zademonstrowane, natomiast nie były znane czasy budowania spójności fazowej, mechanizmy rządzące propagacją wirów kwantowych, czy inne zjawiska koherentne jak np. oscylacje Josephsona. Również część spinowa funkcji falowej polarytonów i ich właściwości magnetyczne nie były jeszcze w ogóle analizowane. Istnienie stanów wzbudzonych polarytonów oraz potencjalne możliwości manipulowania tymi stanami nie były nawet rozważane. Dzięki długiej tradycji badań nad półprzewodnikami półmagnetycznymi w Polsce oraz nowo rozwiniętej technologii wzrostu mikrowętek półprzewodnikowych na Uniwersytecie Warszawskim rozwój badań nad magnetycznymi właściwościami polarytonów stał się możliwy również w Warszawie.

#### **Stan wiedzy przed pojawieniem się tej tematyki w Polsce**

Obserwowana degeneracja kwantowa w gazie polarytonów ekscytonowych [2, 14, 15, 16, 17] jest bezpośrednią konsekwencją bozonowego charakteru polarytonów

i pojawia się dla dużych koncentracji, w reżimie nieliniowych oddziaływań polaryton-polaryton, gdzie stymulacja bozonowa do stanu końcowego dominuje nad stratami cząstek wynikającymi z ich rekombinacji promienistej. Nierównowagowy charakter kondensatu polarytonów odróżnia go od stabilnej natury kondensatów atomowych. Również typ samego przejścia fazowego nie jest taki sam jak w przypadku idealnego kondensatu Bosego–Einsteina ze względu na jego skończony rozmiar oraz to, że korelacje dalekiego zasięgu znikają wraz z odległością. Pomimo tego, określenie „kondensat” w odniesieniu do przejścia fazowego obserwowanego w gazie polarytonów zostało przyjęte w literaturze, jako że jest opisywane tymi samymi modelami teoretycznymi (np. równaniem Grossa – Pitaevskiego) z uwzględnieniem strat i zewnętrznego zasilania.

Idealny kondensat Bosego–Einsteina określony jest poprzez istnienie makroskopowej funkcji falowej [18]. Definiuje ją istnienie korelacji dalekiego zasięgu (ang. off-diagonal long range order, OLDRO), rozciągających się na cały układ fizyczny. Koncept ten został wprowadzony przez Penrose’a i Onsagera w 1956 roku, którzy uznali też, że to właśnie funkcja korelacji pełni rolę parametru uporządkowania w przypadku kondensatów atomowych. Pojawienie się niezerowej wartości funkcji korelacji przestrzennych jest zatem najważniejszym dowodem na obserwację przejścia fazowego. Pierwszym pytaniem, które zadaliśmy sobie, kiedy zaczęliśmy badać kondensaty polarytonów, było: jak szybko korelacje dalekiego zasięgu są budowane podczas przejścia fazowego? Należy również zwrócić uwagę, że badania nad dynamiką formowania się spójności fazowej są niezwykle trudne do przeprowadzenia w gazach zimnych atomów, gdzie na ten problem zwrócono uwagę dopiero w 2007 roku [19, 20]. Pokazaliśmy [22], że początek ustanawiania korelacji fazy pomiędzy punktami kondensatu oddzielonymi o  $8,5 \mu\text{m}$  zachodzi w czasie kilku pikosekund, dużo szybciej niż oczekiwano, czyli równocześnie z początkiem rozpraszania stymulowanego. Dynamika całego procesu zależy od gęstości cząstek. W reżimie niskich gęstości, tj. gęstości progowych, proces ustalania koherencji fazowej zachodzi wolno, adiabaticznie wraz ze wzrostem populacji. Gdy układ jest szybko przeprowadzany przez przejście fazowe, koherencja dalekiego zasięgu jest ustalona znacznie wolniej, niż buduje się populacja. Pokazuje to, że system potrzebuje trochę czasu (w naszym przypadku kilka pikosekund) aby zbudować porządek dalekiego zasięgu. Pokazaliśmy zatem, że prędkość tworzenia fazy w kondensacie polarytonowym jest tak samo duża lub nawet większa od prędkości propagacji oddziaływań zadanej przez prędkość dźwięku w tym układzie. Oznacza to, że jest to proces znacznie szybszy niż w przypadku układów zimnych atomów.

Problem budowania korelacji dalekiego zasięgu jest również ciekawy w przypadku systemów charakteryzujących się dużym nieporządkiem przestrzennym. Zostało przewidziane, że w przypadku układu charakteryzującego się niejednorodnym rozkładem potencjału lokalizującego cząstki, przejście fazowe nie następuje do stanu kondensatu, ale do stanu izolatora, tzw. Bose-Glass (BG) [21, 23, 24]. Stan BG charakteryzuje się zanikającą fazą nadciekłą i wykładniczym zanikiem korelacji dalekiego zasięgu wraz z odległością. Można by zatem oczekiwać, że w takim przypadku będziemy mieli od czynienia z defragmentacją kondensatu na mniejsze, nie związane ze sobą kondensaty. W pracy [25] badaliśmy korelacje przestrzenne w jednowymiarowym, niejednorodnym kondensacie polarytonów. Pokazaliśmy, że pomimo silnej lokalizacji cząstek w minimach potencjału, funkcja korelacji rozciąga się na cały kondensat. Zanik wartości funkcji korelacji wraz z odległością nie jest monotoniczny, a jego wartość jest ściśle związana z gęstością i fluktuacją gęstości polarytonów w danym minimum potencjału. Wyniki te potwierdziły jeszcze raz nierównowagowy charakter kondensatów polarytonowych.

Wiedząc zatem, że silnie niejednorodny przestrzennie kondensat polarytonów może zachowywać duże wartości funkcji korelacji dalekiego zasięgu, oraz dzięki badaniom, które pokazały, że możliwe jest również uzyskanie wielu różnych współoddziałujących kondensatów [26], zredukowaliśmy rozważany układ fizyczny do jeszcze prostszego. Zajęliśmy się badaniem kondensatu zlokalizowanego jedynie w dwóch minimach potencjału. Bariera oddzielająca oba kondensaty oraz gęstość polarytonów w każdym z minimów ustanawiała efektywną wartość stałej sprzężenia pomiędzy nimi. Otrzymaliśmy w ten sposób polarytonowy odpowiednik bozonowego złącza Josephsona. Efekt Josephsona jest jednym z bardziej zaskakujących przejawów kwantowych efektów kolektywnych materii, gdyż pozwala na przepływ prądu przez złącze bez dyssypacji, co byłoby niemożliwe w czysto klasycznym świecie. Tradycyjne złącze Josephsona powstaje przez oddzielenie od siebie dwóch nadprzewodników cienką warstwą izolatora. Bozonowe złącze Josephsona jest to układ dwóch kondensatów bozonowych oddzielonych barierą potencjału. Takie złącze zostało zrealizowane w kondensatach zimnych atomów [27, 28]. W pracy [30] pokazaliśmy, że efekt Josephsona można zaobserwować również w przypadku kondensatów polarytonowych. Badając rozkład w czasie gęstości polarytonów w obu pułapkach oraz wzajemne relacje fazowe między nimi, pokazaliśmy istnienie koherentnych i periodycznych oscylacji gęstości polarytonów pomiędzy minimami potencjału. Towarzyszące temu oscylacje fazy

modulo  $2\pi$  pokazują, że jest to zmiennoprądowy proces Josephsona.

W czasie, kiedy prowadziliśmy wspomniane badania, społeczność naukowa dużo dyskutowała na temat natury samego przejścia fazowego obserwowanego w gazie polarytonów. Już sama geometria zakazywała istnienia idealnego kondensatu Bosego – Einsteina. Polarytony są systemem dwuwymiarowym, gdyż powstają w płaszczyźnie wyznaczonej przez półprzewodnikową studnię kwantową, ponadto mają skończone rozmiary ze względu na rozmiar plamki lasera pobudzającego. Oczekiwano zatem, że przejście fazowe w tym systemie jest raczej typu Berezinski-Kosterlitz-Thoules (BKT) do fazy nadciekłej. W przypadku oddziałującego dwuwymiarowego gazu bozonowego faza nadciekła może powstawać przez łączenie się w pary wirów o przeciwnych ładunkach. W pracy [31] badaliśmy dynamikę formowania się spontanicznie powstających wirów kwantowych podczas przejścia fazowego w gazie polarytonów. Jak dotychczas wirowość w gazie polarytonów została potwierdzona jedynie w przypadku wirów zlokalizowanych na niejednorodnościach potencjału [29] czy wymuszonych zewnętrznym promieniowaniem [32, 33]. Dynamika spontanicznie kreowanych wirów pozostawała nieznana. Badając czasowo rozdzielone interferogramy o wysokiej rozdzielczości przestrzennej, pokazaliśmy [31], że spontanicznie kreowane wiry podążają zawsze tą samą ścieżką wyznaczaną przez nieporządek. Ten schemat powstawania wirów sugerował, że to mechanizm Kibble’a-Zurka [34, 35, 36] w układach nierównowagowych jest odpowiedzialny za formowanie się parametru porządku lokalnie, w sposób domenowy. Koherencja fazy byłaby budowana przez połączenia się domen o różnych fazach, przez co w stanie końcowym, o koherencji rozciągającej się na cały układ, mogłyby pozostawać liczne defekty topologiczne. Ta teoria nie została jednak potwierdzona [37].

Wiry mogą pojawiać się również w systemie polarytonów w jeszcze inny, dość wyjątkowy sposób: kiedy gaz przechodzi ze stanu nadciekłego do klasycznego, na granicy załamania się nadciekłości. W przypadku nadciekłego helu i zimnych gazów atomowych zostały one określone jako kwantowy odpowiednik turbulencji w płynach klasycznych. Kiedy polarytony w stanie nadciekłym zderzają się z przeszkodą, w cieniu przeszkody nukleują się parami wiry kwantowe, które dalej unoszone są przez płynącą ciecz [38]. Był to eksperyment bardzo szczególny, gdyż jako pierwszy pozwolił na rozważania z zakresu hydrodynamiki kwantowej w zdegenerowanych gazach polarytonowych. Polarytony w stanie nadciekłym zostały w tym eksperymencie wytworzone poprzez pobudzenie rezonansową wiązką lasera, podobnie jak w pracy A. Amo et al. [9], i, dalej już pro-



pagując się swobodnie, napotykały na swojej drodze defekt. W zależności od prędkości nadciekłych polarytonów  $v$  (zadanej przez kąt padania lasera pompującego) względem prędkości dźwięku w tym układzie  $c_s$  (zadanej przez stałą oddziaływań polaryton – polaryton oraz gęstość polarytonów), pokazaliśmy reżim typowo nadciekły (kiedy defekt jest omijany), reżim gazu w stanie klasycznym (gdzie obserwuje się liczne rozproszenia na defekcie) oraz graniczną sytuację, kiedy w cieczy generowane są wzbudzenia w postaci wirów kwantowych. Ta sytuacja jest osiągnięta dla  $v/c_s \approx 1$ , kiedy to prędkość cieczy osiąga prędkość dźwięku. Przedstawione tu badania pokazały jaki ogromny potencjał mają polarytony ekscytonowe w badaniach nad powstawaniem turbulencji w gazach kwantowych.

### Spinowe właściwości polarytonów ekscytonowych – rozwój tematyki na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Dotychczas w badaniach nie były uwzględniane właściwości spinowe polarytonów. Ekscytony optycznie aktywne, z degeneracją całkowitego momentu pędu  $\pm 1$  (zwanego dalej „spinem”) sprzęgają się ze światłem, tworząc polarytony o dwóch orientacjach spinowych. Z punktu widzenia struktury spinowej, polarytony są zatem złożonymi bozonami o wartości pseudospinu równej  $1/2$  [39], co jest nietypowe pośród gazów bozowych. W literaturze problem spinu polarytonów nie był szeroko rozważany ze względu na trudności eksperymentalne i spodziewane małe wartości rozszczepienia Zeemana polarytonów. Perspektywy były jednak bardzo ciekawe. W pracy teoretycznej Y. G. Rubo wraz ze współpracownikami [40], wykazał podobieństwo kondensatów polarytonowych do nadprzewodników, gdyż przewidział wypychanie zewnętrznego pola magnetycznego z wnętrza materiału (efekt Meissnera) oraz tłumienie nadciekłości przez pole magnetyczne. Zbadanie tego zagadnienia stało się jednym z celów naszej pracy na Uniwersytecie Warszawskim.

W pierwszej kolejności należało zatem zbadać wartość rozszczepienia Zeemana polarytonów i pokazać, czy polem magnetycznym można doprowadzić do energetycznego rozdzielania obu komponentów spinowych. Zajęliśmy się badaniami struktur opartych o materiały półprzewodnikowe z grup III-V, głównie GaInAs ze względu na to, że kondensaty polarytonowe w tych materiałach mają najdłuższe czasy życia [41], są najbardziej jednorodne [42] i wykazują propagację nadciekłych polarytonów na rekordowe odległości  $150 \mu\text{m}$  [43]. Bardzo szczegółowo zbadaliśmy zachowanie polarytonów w reżimie liniowym (bez kondensatu) w zewnętrznym polu magnetycznym aż do 14 T. Tak wysokie pole magnetyczne osiągalne jest w National Laboratory of High

Magnetic Fields w Grenoble we Francji, od wielu lat współpracującego z Uniwersytetem Warszawskim. Pokazaliśmy, jak zmieniają się energie polarytonów i jak ta zmiana wpływa na zawartość składnika ekscytonowego w polarytonie (odpowiedzialnego za efekt Zeemana i oddziaływania polaryton-polaryton). Ponadto wykazaliśmy zwiększenie energii sprzężenia (energii Rabiego) pomiędzy ekscytonem i fotonem w polu magnetycznym. Efekt Zeemana polarytonów okazał się jednak bardzo niewielki, rzędu  $100 \mu\text{eV}$ , co aż do 14 T było porównywalne z szerokością linii.

Tym samym stało się jasne, że aby obserwować wszystkie ciekawe efekty kolektywne związane ze spinem w zdegenerowanym gazie polarytonów należy zająć się innym materiałem, gdzie efekty spinowe będą większe. W tym samym czasie na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego dr hab. Wojciech Pacuski wraz z zespołem zaczął wytwarzać struktury mikrowętek półprzewodnikowych, wprowadzając do studni kwantowych jony manganu. Nowatorskim podejściem było wykreowanie nowego typu polarytonów ekscytonowych (tzw. polarytonów półmagnetycznych) przez wprowadzenie do układu oddziaływań magnetycznych poprzez oddziaływanie wymiany  $s, p - d$  między ekscytonowym składnikiem w polarytonie i momentami magnetycznymi atomów umieszczonych wewnątrz studni kwantowych. Struktura wnęki oraz zwierciadła Bragga nie zawierały jonów magnetycznych. W związku z tym oddziaływanie wymiany wpływa na polarytony tylko przez ich składnik ekscytonowy, natomiast ani jony Mn, ani zewnętrzne pole magnetyczne nie wpływają na fotony wnękowe. Pokazaliśmy gigantyczny efekt Zeemana występujący w takich strukturach [44]. Już w polu magnetycznym 5 T zaobserwowaliśmy rozdzielanie obu komponentów spinowych dolnego polarytonu, co było znaczącym osiągnięciem w badaniach nad magnetoptycznymi własnościami polarytonów.

Następny przełom nastąpił, kiedy w mikrowętkach półmagnetycznych wytwarzanych na UW zaobserwowaliśmy nierównowagową kondensację polarytonów. W warunkach silnego, impulsowego, nierezonansowego pobudzenia polarytony makroskopowo obsadzały pojedynczy stan kwantowy [45]. Wpływ oddziaływań polaryton-polaryton oraz polaryton-rezerwuar ekscytonowy był widoczny w zmianie energii polarytonów wraz ze zwiększaniem obsadzenia.

Fizyka w przypadku kondensatu polarytonów półmagnetycznych jest znacznie bogatsza i różni się od przypadku bozonów nieposiadających spinu. Oddziaływania pomiędzy polarytonami odpowiedzialne za szereg nieliniowych efektów (kondensacja, nadciekłość), zależą od spinu [39, 43, 46, 47]. Jest to spowodowane

faktem, że polarytony z równoległymi spinami odpychają się, a polarytony ze spinami antyrównoległymi się przyciągają. Badania skupione obecnie na analizie efektów spinowych w kondensatach półmagnetycznych polarytonów otwierają drogę do wielu ciekawych zjawisk. Pole magnetyczne wprowadza brak równowagi między obsadzeniem stanów o obu orientacjach spinowych poprzez tendencję do porządkowania spinów. Ponadto, pole magnetyczne wpływa na warunki krytyczne do osiągnięcia kondensacji [48]. Warto wspomnieć, że przez długi czas brak możliwości strojenia oddziaływań był uznawany za główną wadę kondensatów polarytonowych w porównaniu do kondensatów atomowych. Teraz chcieliśmy wykazać, że jest to także możliwe w przypadku kondensatów polarytonowych. Pokazaliśmy [49], że w przypadku kondensatu polarytonów, zewnętrzne pole magnetyczne może być ekranowane poprzez oddziaływania, podobnie jak w spinowym efekcie Meissnera [40]. Ponadto polarytony mogą mieć właściwości paramagnetyczne, ferromagnetyczne lub diamagnetyczne w zależności od warunków zewnętrznych [46, 50], nad czym obecnie pracujemy.

W specjalnie dedykowanym laboratorium na Uniwersytecie Warszawskim, wraz z dr. hab. Jackiem Szczytko i zespołem zbudowaliśmy interferometr, który przy sprzężeniu z układem pracującym w silnym polu magnetycznym pozwoli nam eksplorować bogactwo wirów kwantowych w tych spinorowych cieczach, tzw. półwiry kwantowe o różnej orientacji ładunku i polaryzacji [10, 11, 51], zjawisko, które nie występuje w gazach zimnych atomów.

Warto wspomnieć również, że oprócz ciekawych właściwości spinowych, polarytony posiadają bogatą strukturę stanów wzbudzonych. Ponieważ część funkcji falowej jest dziedziczona od ekscytonu, należy się spodziewać, że polarytony powinny posiadać identyczne stany wzbudzone. W studni kwantowej struktura stanów energetycznych ekscytonów jest analogiczna do dwu-wymiarowego atomu wodoru ze stanami kolejno  $1s$ ,  $2s$ ,  $2p$ ,  $3s$ ,  $3p$ ,  $3d$ , ... Stanami optycznie aktywnymi są ekscytony o symetrii funkcji falowej w płaszczyźnie studni kwantowej typu  $s$ . Oprócz stanu podstawowego ekscytonu  $1s$ , silne sprzężenie ekscyton-foton można zaobserwować również w stanie  $2s$  (oraz  $3s$ ) [52]. Eksperyment przeprowadziliśmy w silnym polu magnetycznym dzięki czemu rozdzieliliśmy stan  $2s$  od energetycznie bliższych [53, 54] stanów  $2p$ , co pozwoliło na obserwację rozszczepienia linii rezonansu fotonowego na dwie składowe polarytonowe. Również energia sprzężenia ekscyton – foton (energia Rabięgo) w stanie  $1s$  oraz  $2s$  znacznie rośnie w polu magnetycznym, co ma bezpośredni związek ze wzrostem siły oscylatora ekscytonu w polu magnetycznym [53, 54, 55].

Pokazanie istnienia drabinki stanów wzbudzonych polarytonów ekscytonowych pozwoliło nam na zaprojektowanie dużo bardziej skomplikowanego eksperymentu. Różnica energetyczna pomiędzy stanem  $1s$  a  $2p$  polarytonu wynosi  $6,5 \pm 0,5$  meV, co odpowiada długości fali fotonu z zakresu promieniowania THz,  $191 \mu\text{m}$ . Zaprojektowany eksperyment polegał na jednoczesnym kreowaniu polarytonów ekscytonowych w stanie podstawowym ekscytonu, czyli ekscytonów  $1s$  silnie sprzężonych z fotonami mikrownęki, z zakresu promieniowania NIR, oraz podświetleniu układu silną i koherentną wiązką promieniowania THz o energii dostrojonej do przejścia  $1s$ - $2p$  ekscytonu. Takie rezonansowe promieniowanie THz doprowadzi do dodatkowego silnego sprzężenia fotonów THz z rezonansem ekscytonowym  $1s$ - $2p$ . Eksperyment ten przeprowadziliśmy w laboratorium Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR, w Dreźnie w Niemczech, gdzie jest dostępny laser na swobodnych elektronach (FEL) o silnej (rzędu kilkuset mW) i wąskiej spektralnie ( $0,03$  meV) wiązce promieniowania. Istotnie pokazaliśmy [56], że ekscyton może być silnie sprzężony z dwoma fotonami o różnej energii NIR i THz. Natura tego sprzężenia jest inna, dla polarytonów są to oscylacje Rabięgo próżni, dla sprzężenia z promieniowaniem THz, zwykłe oscylacje Rabięgo. Pokazaliśmy zatem istnienie podwójnie ubranych stanów kwantowych. Stany zachowują charakter bozonowy. Kondensacja podwójnie ubranych polarytonów będzie zatem szczególnie interesująca, ponieważ stany te charakteryzują się dużym momentem dipolowym (ze względu na domieszkę stanów  $2p$ ). To może prowadzić do zupełnie nowych zjawisk jak np. super-ciało-stałe (ang. supersolidity) [57].

W odniesieniu do przyszłych możliwych zastosowań, zdolność do tworzenia kondensatu w strukturach półprzewodnikowych otwiera drogę do budowy nowych urządzeń optoelektronicznych w szybko rozwijającej się dziedzinie łączącej wiedzę opto-elektroniczną z polarytonami, tzw. polarytroniką [58].

### **Perspektywy – w poszukiwaniu nowych materiałów do obserwacji silnego sprzężenia światło – materia**

Obecnie poszukuje się alternatywnych sposobów na realizację polarytonów ekscytonowych i dąży do łatwej konstrukcji wnęki i obserwacji silnych własności nieliniowych w temperaturze pokojowej. Na szczególną uwagę zasługują wyniki otrzymane na związkach organicznych umieszczonych we wnękach zbudowanych na bazie materiałów dielektrycznych [59], białkach [60], nanorurkach węglowych [61], czy ostatnio bardzo obiecujących materiałach perowskitowych [62].

Szczególnie intensywnie badane są w ostatnich latach właściwości dwuwymiarowych płatków dichalko-

genków metali przejściowych (ang. transition metal dichalcogenides, TMDs) takich jak  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$  and  $\text{WSe}_2$ . Materiały te mają budowę bardzo przypominającą grafen, jednak w przeciwieństwie do niego posiadają przerwę energetyczną, co pozwala myśleć o wykorzystaniu ich do budowy tranzystorów lub diod LED. Ekscytony w tych materiałach są tak silnie związane, że są stabilne w temperaturze pokojowej. Dodatkowo struktura pasmowa tych związków pozwala na selektywne optyczne wzbudzenie ekscytonów do jednej z dwóch różnych dolin w przestrzeni Brillouina, co potencjalnie może służyć do zapisu, a następnie odczytu informacji.

Wiele grup badawczych doniosło już o obserwacji reżimu silnego sprzężenia ekscytonów w monowarstwach TMD z fotonami w różnego rodzaju płaskich wnękach optycznych: dielektrycznych [63, 64, 65], metalicznych [66], czy półprzewodnikowo-metalicznych [67]. Najlepsze jakościowo monowarstwy uzyskujemy na Uniwersytecie Warszawskim w grupie dr. Karola Nogajewskiego i prof. Marka Potemskiego metodą eksfoliacji [68], choć szczególnie obiecujących wyników można również oczekiwać po warstwach hodowanych MBE w grupie dr. hab. Wojciecha Pacuskiego, ze względu na jednorodne pokrycie luster jednakowym materiałem. Kondensaty polarytonów ekscytonowych oraz stany nadciekłe w układach zbudowanych na monowarstwach TMDs będą szczególnie interesujące z powodów połączenia efektów kolektywnych z własnościami optycznymi wynikającymi z istnienia charakterystycznych dolin w strukturze pasmowej TMDs. Ponadto możliwość łączenia monowarstw z innymi materiałami dwuwymiarowymi, takimi jak grafen lub heksagonalny azotek boru (h-BN) w stosach o różnych funkcjonalnościach [69], takich jak tranzystory [70] lub diody emitujące pojedyncze fotony [71], otwiera możliwości budowania nowych urządzeń optoelektronicznych.

Podsumowując, podstawowe aspekty fizyczne związane z fizyką polarytonów i ich potencjał aplikacyjny, nadaje tej dziedzinie fizyki półprzewodników wyjątkowe znaczenie a także interdyscyplinarny charakter. Dlatego fizyka polarytonów jest przedmiotem zainteresowania społeczności naukowych zajmujących się półprzewodnikami, gazami atomowymi i optyką kwantową.

## Literatura

- [1] C. Weisbuch, M. Nishioka, A. Ishikawa, Y. Arakawa, Observation of the coupled exciton-photon mode splitting in a semiconductor quantum microcavity, *Phys. Rev. Lett.* 69, 3314 (1992)
- [2] J. Kasprzak, M. Richard, S. Kundermann, A. Baas, P. Jeambrun, J. M. J. Keeling, F. M. Marchetti, M. H. Szymańska, R. André, J. L. Staehli, V. Savona, P. B. Littlewood, B. Deveaud, Le Si Dang, Bose–Einstein condensation of exciton polaritons, *Nature* 443, 409 (2006)
- [3] L. P. Pitaevskii, S. Stringari, „Bose–Einstein condensation” (Oxford: Clarendon Press, 2003)
- [4] S. Christopoulos, G. Baldassarri, Höger von Högersthal, A. J. D. Grundy, P. G. Lagoudakis, A. V. Kavokin, J. J. Baumberg, G. Christmann, R. Butté, E. Feltn, J.-F. Carlin, and N. Grandjean. Room-temperature polariton lasing in semiconductor microcavities. *Phys. Rev. Lett.* 98, 126405 (2007)
- [5] J. J. Baumberg, A. V. Kavokin, S. Christopoulos, A. J. D. Grundy, R. Butté, G. Christmann, D. D. Solnyshkov, G. Malpuech, G. Baldassarri Höger von Högersthal, E. Feltn, J.-F. Carlin, and N. Grandjean, Spontaneous polarization buildup in a room-temperature polariton laser. *Phys. Rev. Lett.* 101, 136409 (2008).
- [6] D. Sarchi and V. Savona, Long-range order in the Bose–Einstein condensation of polaritons *Phys. Rev. B* 75, 115326 (2007)
- [7] BKT – przejście fazowe typu Berezinski – Kosterlitz – Thoules. A. Posazhennikova, Weakly interacting, dilute Bose gases in 2D, *Rev. Mod. Phys.* 78, 1111 (2006).]
- [8] M. H. Szymańska, J. Keeling, P. B. Littlewood, Nonequilibrium quantum condensation in an incoherently pumped dissipative system, *Phys. Rev. Lett.* 96, 230602 (2006) oraz G. Roumpos, Y. Yamamoto (2012) The Berezinskii–Kosterlitz–Thouless Phase Transition in Exciton–Polariton Condensates. In: Timofeev V., Sanvitto D. (eds) *Exciton Polaritons in Microcavities*. Springer Series in Solid-State Sciences, vol 172. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [9] A. Amo, J. Lefrere, S. Pigeon, C. Adrados, C. Ciuti, I. Carusotto, R. Houdre, E. Giacobino, A. Bramati, Superfluidity of polaritons in semiconductor microcavities, *Nature Phys.* 5, 805 (2009)
- [10] K. G. Lagoudakis, T. Ostatnický, A. V. Kavokin, Y. G. Rubo, R. André, B. Deveaud-Plédran, Observation of half-quantum vortices in an exciton-polariton condensate. *Science* 326, 974, (2009)
- [11] F. Manni, K. G. Lagoudakis, T. C.H Liew, R. André, V. Savona, B. Deveaud, Dissociation dynamics of singly charged vortices into half-quantum vortex pairs, *Nat. Comm.* 3, 1309, (2012)
- [12] A. Amo, S. Pigeon, D. Sanvitto, V. G. Sala, R. Hivet, I. Carusotto, F. Pisanello, G. Leménager, R. Houdré, E Giacobino, C. Ciuti, A. Bramati, Polariton Superfluids Reveal Quantum Hydrodynamic Solitons, *Science* 332, 1167 (2011)

- [13] P. M. Walker, L. Tinkler, B. Royall, D. V. Skryabin, I. Farrer, D. A. Ritchie, M. S. Skolnick, D. N. Krizhanovskii, Dark Solitons in High Velocity Waveguide Polariton Fluids *Phys. Rev. Lett.* 119, 097403 (2017)
- [14] H. Deng, G. Weihs, Ch. Santori, J. Bloch, Y. Yamamoto, Condensation of semiconductor microcavity exciton polaritons, *Science* 298, 199 (2002).
- [15] T. Guillet, M. Mexis, J. Levrat, G. Rossbach, C. Brimont, T. Bretagnon, B. Gil, R. Butté, N. Grandjean, L. Orosz, F. Réveret, J. Leymarie, J. Zúñiga-Pérez, M. Leroux, F. Semond, and S. Bouchoule, Polariton lasing in a hybrid bulk ZnO microcavity, *Appl. Phys. Lett.* 99, 161104 (2011).
- [16] S. Christopoulos, G. Baldassarri Höger von Högersthal, A. J. D. Grundy, P. Lagoudakis, A. V. Kavokin, J. J. Baumberg, G. Christmann, R. Butté, E. Feltn, J.-F. Carlin, and N. Grandjean, Room-temperature polariton lasing in microcavities, *Phys. Rev. Lett.* 98, 126405 (2007)
- [17] J. J. Baumberg, A. V. Kavokin, S. Christopoulos, A. J. D. Grundy, R. Butté, G. Christmann, D. D. Solnyshkov, G. Malpuech, G. Baldassarri Höger von Högersthal, E. Feltn, J.-F. Carlin, and N. Grandjean, Spontaneous polarization buildup in a room-temperature polariton laser. *Phys. Rev. Lett.* 101, 136409 (2008)
- [18] W. Ketterle, Nobel Lecture, When atoms behave as waves: Bose–Einstein condensation and the atom laser, December 8, 2001.
- [19] S. Ritter, A. Öttl, T. Donner, T. Bourdel, M. Köhl, and T. Esslinger, Observing the Formation of Long-Range Order during Bose–Einstein Condensation, *Phys. Rev. Lett.* 98, 090402 (2007)
- [20] M. Hugbart, J. A. Retter, A. F. Varón, P. Bouyer, A. Aspect, M. J. Davis, Population and phase coherence during the growth of an elongated Bose–Einstein condensate, *Phys. Rev. A* 75, 011602(R) (2007)
- [21] M. P. A. Fisher, P. B. Weichman, G. Grinstein, and D. S. Fisher, Boson localization and the superfluid-insulator transition, *Phys. Rev. B* 40, 546 (1989)
- [22] G. Nardin, K. G. Lagoudakis, M. Wouters, M. Richard, A. Baas, R. André, Le Si Dang, B. Pietka, B. Deveaud-Plédran, Dynamics of long-range ordering in an exciton-polariton condensate. *Phys. Rev. Lett.* 103, 256402 (2009)
- [23] L. Fontanesi, M. Wouters, and V. Savona, Superfluid to Bose-Glass Transition in a 1D Weakly Interacting Bose Gas, *Phys. Rev. Lett.* 103, 030403 (2009).
- [24] G. Malpuech, D. D. Solnyshkov, H. Ouerdane, M. M. Glazov, and I. Shelykh, Bose glass and superfluid phases of cavity polaritons, *Phys. Rev. Lett.* 98, 206402 (2007)
- [25] F. Manni, K. G. Lagoudakis, B. Pietka, L. Fontanesi, M. Wouters, V. Savona, R. André, B. Deveaud-Plédran, Polariton condensation in a one-dimensional disordered potential. *Phys. Rev. Lett.* 106, 176401 (2011)
- [26] D. N. Krizhanovskii, K. G. Lagoudakis, M. Wouters, B. Pietka, R. A. Bradley, K. Guda, D. M. Whittaker, M. S. Skolnick, B. Deveaud-Plédran, M. Richard, R. André, Le Si Dang, Coexisting Non-Equilibrium Condensates with Long-Range Spatial Coherence in Semiconductor Microcavities, *Phys. Rev. B* 80, 045317 (2009)
- [27] F. S. Cataliotti, S. Burger, C. Fort, P. Maddaloni, F. Minardi, A. Trombettoni, A. Smerzi, M. Inguscio, Josephson junction arrays with Bose–Einstein condensates, *Science* 293, 843 (2001)
- [28] R. Gati, M. Albiez, J. Fölling, B. Hemmerling, M. K. Oberthaler, Realization of a single Josephson junction for Bose–Einstein condensates, *Appl. Phys. B* 82, 207 (2006)
- [29] K. G. Lagoudakis, M. Wouters, M. Richard, A. Baas, I. Carusotto, R. André, Le Si Dang, B. Deveaud-Plédran, Quantized vortices in an exciton-polariton condensate, *Nature Phys.* 4, 706 (2008)
- [30] K. G. Lagoudakis, B. Pietka, M. Wouters, R. André, B. Deveaud-Plédran, Coherent oscillations in an exciton-polariton Josephson junction. *Phys. Rev. Lett.* 105, 120403 (2010)
- [31] K. G. Lagoudakis, F. Manni, B. Pietka, M. Wouters, T. C. H. Liew, V. Savona, A. V. Kavokin, R. André, B. Deveaud-Plédran, Probing the dynamics of spontaneous quantum vortices in polariton superfluids. *Phys. Rev. Lett.* 106, 115301 (2011)
- [32] D. Sanvitto, F. M. Marchetti, M. H. Szymańska, G. Tosi, M. Baudisch, F. P. Laussy, D. N. Krizhanovskii, M. S. Skolnick, L. Marrucci, A. Lemaître, J. Bloch, C. Tejedor, L. Viña, Persistent currents and quantized vortices in a polariton superfluid, *Nature Phys.* 6, 527 (2010)
- [33] D. N. Krizhanovskii, D. M. Whittaker, R. A. Bradley, K. Guda, D. Sarkar, D. Sanvitto, L. Vina, E. Cerda, P. Santos, K. Biermann, R. Hey, and M. S. Skolnick, Effect of Interactions on Vortices in a Nonequilibrium Polariton Condensate, *Phys. Rev. Lett.* 104, 126402 (2010)
- [34] T. W. B. Kibble, Topology of Cosmic Domains and Strings, *J. Phys. A* 9, 1387 (1976).
- [35] W. H. Zurek, Cosmological experiments in superfluid helium?, *Nature (London)* 317, 505 (1985)
- [36] W. H. Zurek, Cosmological experiments in condensed matter systems, *Physics Reports-Review Section of Physics Letters*, 276(4):177–221, 1996.



- [37] M. Matuszewski, E. Witkowska, Universality in nonequilibrium condensation of exciton-polaritons, *Phys. Rev. B* 89, 155318 (Apr 2014)
- [38] G. Nardin, G. Grosso, Y. Léger, B. Pietka, F. Morier-Genoud, B. Deveaud-Plédran, Hydrodynamic nucleation of quantized vortex pairs in a polariton quantum fluid. *Nature Physics* 7, 635 (2011)
- [39] Spin effects in exciton-polariton condensates, A. Kavokin in *Exciton polaritons in microcavities* by D. Sanvitto and V. Timofeev, Springer Series in Solid-State Sciences 172 (2012)
- [40] Y. G. Rubo, A. V. Kavokin, I. A. Shelykh, Suppression of superfluidity of exciton-polaritons by magnetic field, *Phys. Lett. A* 358, 227 (2006).
- [41] Yongbao Sun, P. Wen, Y. Yoon, G. Liu, M. Steger, L. N. Pfeiffer, K. West, D. W. Snoke, K. A. Nelson, Bose–Einstein Condensation of Long-Lifetime Polaritons in Thermal Equilibrium, *Phys. Rev. Lett.* 118, 016602 (2017)
- [42] E. Wertz, A. Amo, D. D. Solnyshkov, L. Ferrier, T. C. H. Liew, D. Sanvitto, P. Senellart, I. Sagnes, A. Lemaître, A. V. Kavokin, G. Malpuech, J. Bloch, Propagation and Amplification Dynamics of 1D Polariton Condensates, *Phys. Rev. Lett.* 109, 216404 (2012)
- [43] E. Wertz, L. Ferrier, D. D. Solnyshkov, R. Johne, D. Sanvitto, A. Lemaître, I. Sagnes, R. Grousson, A. V. Kavokin, P. Senellart, G. Malpuech, J. Bloch, Spontaneous formation and optical manipulation of extended polariton condensates, *Nature Phys.* 6, 860 (2010)
- [44] R. Mirek, M. Król, K. Lekenta, J.-G. Rousset, M. Nawrocki, M. Kulczykowski, M. Matuszewski, J. Szczytko, W. Pacuski, B. Piętka, Angular dependence of giant Zeeman effect for semi-magnetic cavity polaritons. *Phys. Rev. B* 95, 085429 (2017)
- [45] J.-G. Rousset, B. Piętka, M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, J. Szczytko, J. Borysiuk, J. Suffczyński, T. Kazimierzczuk, M. Goryca, T. Smoleński, P. Kossacki, M. Nawrocki, W. Pacuski, Strong coupling and polariton lasing in Te based microcavities embedding (Cd,Zn)Te quantum wells. *Appl. Phys. Lett.* 107, 201109 (2015)
- [46] Y. Zhang, B. Zou, Diamagnetism of microcavity polaritons induced by spin-dependent polariton–polariton interactions, *Phys. Lett. A* 376, 3332 (2012)
- [47] M. Vladimirova, S. Cronenberger, D. Scalbert, K. V. Kavokin, A. Miard, A. Lemaître, J. Bloch, D. Solnyshkov, G. Malpuech, and A. V. Kavokin, Polariton–polariton interaction constants in microcavities, *Phys. Rev. B* 82, 075301 (2010)
- [48] J.-G. Rousset, B. Piętka, M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, J. Szczytko, W. Pacuski, M. Nawrocki, Magnetic field effect on the lasing threshold of a semimagnetic polariton condensate. *Phys. Rev. B* 96, 125403 (2017)
- [49] M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, J.-G. Rousset, M. Nawrocki, M. Matuszewski, J. Szczytko, W. Pacuski, B. Piętka, Spin polarized semimagnetic exciton-polariton condensate in magnetic field. *Scientific Reports* 8, 6694 (2018)
- [50] H. Ohadi, A. Dreismann, Y. G. Rubo, F. Pinsker, Y. del Valle-Inclan Redondo, S. I. Tsintzos, Z. Hatzopoulos, P. G. Savvidis, and J. J. Baumberg., Spontaneous spin bifurcations and ferromagnetic phase transitions in a spinor exciton-polariton condensate, *Physical Review X* 5 (3), 031002 (2015)
- [51] M. T. Solano, Y. Rubo, Half-quantum vortices in exciton–polariton condensates in applied magnetic field, *Superlattices and Microstructures* 49, 318 (2011)
- [52] B. Piętka, M. R. Molas, N. Bobrovska, M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, P. Stępnicki, F. Morier-Genoud, J. Szczytko, B. Deveaud, M. Matuszewski, M. Potemski, 2s exciton polariton revealed in external magnetic field. *Phys. Rev. B* 96, 081402(R) (2017)
- [53] P. Stępnicki, B. Piętka, F. Morier-Genoud, B. Deveaud, M. Matuszewski, Analytical method for determining quantum well excitons properties in a magnetic field, *Phys. Rev. B* 91, 195302 (2015)
- [54] P. Zięba, B. Piętka, I. Tralle, J. Łusakowski, Exciton binding energy and oscillator strength in a shallow QW in an external magnetic field, *Acta Physica Polonica A* 128, 237 (2015).
- [55] B. Piętka, D. Zygmunt, M. Król, M. R. Molas, A. A. L. Nicolet, F. Morier-Genoud, J. Szczytko, J. Łusakowski, P. Zięba, I. Tralle, P. Stępnicki, M. Matuszewski, M. Potemski, B. Deveaud, Magnetic field tuning of exciton-polaritons in a semiconductor microcavity. *Phys. Rev. B* 91, 075309 (2015)
- [56] B. Piętka, N. Bobrovska, D. Stephan, M. Teich, M. Król, S. Winnerl, A. Pashkin, R. Mirek, K. Lekenta, F. Morier-Genoud, H. Schneider, B. Deveaud, M. Helm, M. Matuszewski, J. Szczytko, Doubly dressed bosons: exciton polaritons in a strong terahertz field. *Phys. Rev. Lett.* 119, 077403 (2017)
- [57] K. Góral, L. Santos, and M. Lewenstein, Quantum Phases of Dipolar Bosons in Optical Lattices, *Phys. Rev. Lett.* 88, 170406 (2002)
- [58] B. Deveaud-Plédran, Polaritronics in view. *Nature* 453, 297 (2008).

- [59] S. Kena-Cohen, S. R. Forrest, Room-temperature polariton lasing in an organic single-crystal microcavity, *Nature Photonics* 4, 371 (2010)
- [60] C. P. Dietrich, A. Steude, L. TROPF, M. Schubert, N. M. Kronenberg, K. Ostermann, S. Hofling, M. C. Gather, An exciton-polariton laser based on biologically produced fluorescent protein, *Sci. Adv.* 2, 1 (2016)
- [61] A. Graf, M. Held, Y. Zakharko, L. TROPF, M. C. Gather, J. Zaumseil, Electrical pumping and tuning of exciton-polaritons in carbon nanotube microcavities, *Nat. Mater.* 16, 911 (2017)
- [62] R. Su, C. Diederichs, J. Wang, T. C. H. Liew, J. Zhao, S. Liu, W. Xu, Z. Chen, Q. Xiong, Room-Temperature Polariton Lasing in All-Inorganic Perovskite Nanoplatelets, *Nano Lett.* 17, 3982 (2017)
- [63] X. Liu, T. Galfsky, Z. Sun, F. Xia, E.-C. Lin, Y.-H. Lee, S. Kena-Cohen, and V. M. Menon, *Nat. Photonics* 9, 30 (2014).
- [64] S. Dufferwiel, T. P. Lyons, D. D. Solnyshkov, A. A. P. Trichet, A. Catanzaro, F. Withers, G. Malpuech, J. M. Smith, K. S. Novoselov, M. S. Skolnick, D. N. Krizhanovskii, and A. I. Tartakovskii, *Nat. Commun.* 9, 4797 (2018).
- [65] L. C. Flatten, D. M. Coles, Z. He, D. G. Lidzey, R. A. Taylor, J. H. Warner, and J. M. Smith, *Nat. Commun.* 8, 14097 (2017).
- [66] Z. Sun, J. Gu, A. Ghazaryan, Z. Shotan, C. R. Conside, M. Dollar, B. Chakraborty, X. Liu, P. Ghaemi, S. Kena-Cohen, and V. M. Menon, *Nat. Photonics* 11, 491 (2017).
- [67] M. Waldherr, N. Lundt, M. Klaas, S. Betzold, M. Wurdack, V. Baumann, E. Estrecho, A. Nalotov, E. Cherotchenko, H. Cai, E. A. Ostrovskaya, A. V. Kavokin, S. Tongay, S. Klemmt, S. Hofling, and C. Schneider, *Nat. Commun.* 9, 3286 (2018).
- [68] M. Król, K. Lekenta, R. Mirek, K. Łempicka, D. Stephan, K. Nogajewski, M. Molas, A. Babiński, M. Potemski, J. Szczytko, B. Piętka, Valley polarization of exciton-polaritons in monolayer WSe<sub>2</sub> in a tunable microcavity, to appear in *Nanoscale* (2019)
- [69] A. K. Geim, I. V. Grigorieva, Van der Waals heterostructures. *Nature* 499, 419 (2013).
- [70] L. Britnell, et al. Field-E ect Tunneling Transistor Based on Vertical Graphene Heterostructures. *Science* 335, 947–950 (2012).
- [71] C. Palacios-Berraquero, et al. Atomically thin quantum light-emitting diodes. *Nat. Commun.* 7, 12978 (2016).

---

# Uczenie fizyki w XXI wieku. Jak i po co?\*

Łukasz A. Turski

Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

Pięćdziesiąt lat temu, gdy zakładano GIREP,<sup>1</sup> nasza cywilizacja różniła się znacznie od tej, w której żyjemy obecnie i którą próbujemy pojąć, aby dać przynajmniej jakieś porady przyszłemu pokoleniom. Rady, które dawniej nazwalibyśmy wykształceniem.

Pięćdziesiąt lat temu nasza cywilizacja była cywilizacją płyt winylowych – era walkmanów i MP3 miała dopiero nadejść; zegarki elektroniczne i telefony bezprzewodowe istniały tylko w komiksach Dicka Tracy'ego i w filmach o Jamesie Bondzie. Komputery były monstrami ukrytymi za drzwiami wojskowych, przemysłowych i wybranych badawczych instytutów. CERN i Arcibo były jeszcze w powijakach i w podobnym stanie były przygotowania do lądowania na księżycu. Satelity były już wystrzeliwane, ale służyły wyłącznie celom militarnym, choć w ograniczonym zakresie przynosiły także, często nawet ważne, wyniki naukowe.

Pięćdziesiąt lat temu świat ledwo dyszał pod ciężarem „zimnej wojny”, łapiąc chwiejną równowagę po zabójstwie prezydenta Kennedy'ego i wymuszonym ustąpieniu pierwszego sekretarza Chruszczowa. Francja zmagająca się z rozłokowaniem niemal 900 tysięcy przybyszów z Algierii likwidując przy tym pozostałości OAS (Organizacji Tajnej Armii). Nowe ogniska terroryzmu zaczynały kiełkować w Niemczech i we Włoszech. Odgłosy wymiany ognia z Wietnamu zbytnio nas jeszcze nie przejmowały.

Mimo tego wszystkiego „Zachód” był bogaty i szczęśliwy, ale niebawem ten stan iluzorycznego spokoju doznał wstrząsu na ulicach Paryża wraz ze studencką rewoltą, która wykoleiła ówczesny system edukacji. System ten był w zasadzie kontynuacją metody „business as usual” oddziedziczonej po przedwojennej Euro-

pie. Głównym skutkiem paryskiej wiosny było nadejście ery eksperymentów edukacyjnych opartych na przyjętych z góry ideologicznych „zasadach”. Najlepszy opis tych prób wynalezienia nowego rodzaju nauczania został sparodiowany przez komika i matematyka Toma Lehrera w jego piosence „Nowa Matma”<sup>2</sup> - „rzeczą najważniejszą jest wiedzieć, co się robi, a nie otrzymanie poprawnej odpowiedzi”. Motywowany politycznie system testów powoli, lecz systematycznie opanowywał najpierw szkoły, a następnie uniwersytety. Taki był mniej więcej system edukacji, jaki oddziedziczyły generacje XXI wieku.

Początek XXI wieku zaznaczył się wydarzeniem będącym pierwszym sygnałem, iż społeczeństwo, w którym żyjemy nie jest przygotowane do stawienia czoła zmianom technologicznym, jakie już przez ostatnie lata ubiegłego wieku niezauważalnie i powoli przekształcały przyszłość ludzkości. Wydumany problem katastrofy Y2K przewidywanej na noc z 2000 na 2001 rok poszedł szybko w niepamięć i wnioski z niego nie zostały nigdy wyciągnięte. Jednocześnie rozprzestrzeniający się z szybkością pożaru proces przenoszenia niemal wszystkich naszych istotnych działań do Sieci (*on-line*) doprowadził do sytuacji, w której poważna awaria sieci informatycznej w którymkolwiek kraju, ale szczególnie w którymś z najwyżej rozwiniętych, byłaby efektywnym Armageddonem.

Przy różnych okazjach pokazywałem zrobioną przez wnuczkę mojego brata podczas huraganu Sandy (Sandy to imię huraganu) w Nowym Yorku w 2012 roku fotografię ludzi stojących w kolejce do źródła prądu by naładować swoje przenośne urządzenia. Dostęp do sieci okazał się równie ważny, jak żywność i woda.

Dzisiaj typowa rodzina z dwójką dzieci w wieku szkolnym używa czterech smartfonów. W miarę ostrożnie oszacowane roczne zużycie energii przez smartfony –

---

\* IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1076 (2018) 012001 doi :10.1088/1742-6596/1076/1/012001

1. Groupe Internationale de Recherche sur l'Enseignement de la Physique (International Research Group on Physics Teaching, Internationaler Arbeitskreis zur Förderung des Physikunterrichtes).

2. Tom Lehrer. New Math. <https://www.youtube.com/watch?v=UIKGV2cTgqA>.

energii potrzebnej do podtrzymania łączności z siecią i światowego systemu chmur, bo drobny ułamek energii potrzebnej na samo doładowywanie możemy tu pominąć – jest takie samo, jak nowoczesnej lodówki. Rodzina z pewnością nie jest tego świadoma, choć ani społecznie ani zawodowo nie byłaby w stanie egzystować bez dostępu do sieci.

W tej zupełnie nowej cywilizacji obecny system edukacji próbuje udzielać porad naszej młodzieży wykorzystując w zasadzie ten sam język i te same idee, co przed pięćdziesięciu laty. Jesteśmy jak fizycy z przełomu wieków XIX i XX, próbujący wyjaśnić różne odkryte w tamtym czasie zjawiska przy pomocy fizyki klasycznej. Nie udało im się, gdyż potrzebny był nowy rodzaj nauki i nowy język. W końcu ta nowa nauka – mechanika kwantowa i teoria względności – powstała i zmieniła świat już na zawsze. Dokładnie tego samego potrzebujemy teraz w edukacji.

Skoro cywilizacja, w której żyliśmy zmieniała się wskutek namnożenia się odkryć dokonanych w fizyce, zobowiązani jesteśmy rozpocząć wymyślanie nowej edukacji, edukacji XXI wieku, od zmiany sposobu, w jaki nauczamy fizyki. Fizyka jest rozumiana w szerokim sensie, jako to, co zwykle nazywa się naukami przyrodniczymi, matematyką i zastosowaniami w podstawowych naukach społecznych, takich jak ekonomia. Jest to definicja fizyki, która pojawiła się w mającym szeroki odźwięk wykładzie wielkiego matematyka Vladimira Arnolda jeszcze w XX wieku.<sup>3</sup>

Fizyka jest dziś jedyną nauką, na którą składa się opis jakościowy i ilościowy zjawisk rozciągających się od właściwości próżni, po właściwości całego Wszechświata. Osiąga to za pomocą zadziwiająco niewielkiego zbioru fundamentalnych reguł i wykorzystując specyficzne sposoby rozwiązywania problemów. Polegają one na redukowaniu problemu do niewielu istotnych elementów, które albo już zostały rozwiązane wcześniej, a jeśli nie, są badane eksperymentalnie, aby umożliwić budowę modelu teoretycznego. Taki sposób osiągania zrozumienia zjawisk jest tym, co jest potrzebne, by skutecznie sobie radzić z zachodzącą obecnie transformacją cywilizacji. Wszystkie inne podejścia kończą się nie racjonalną, a chaotyczną działalnością, która wytwarza więcej entropii niż wymaga tego Druga Zasada Termodynamiki.

Nasz przyszły system – lub systemy – edukacji powinniśmy oprzeć na rozwiązywaniu problemów. Problemów wokół nas jest dostatecznie wiele. Podstawowe idee nauki i postępu cywilizacyjnego zostały sformu-

lowane przez Thomasa Jeffersona. Gerald Holton nazywał je jeffersonowskim programem badawczym.<sup>4</sup> Program ten przyjmuje, iż problemy, które należy rozwiązać, są wyszukiwane przez jednostki aktywne, w zależności od ich zainteresowań, z zestawu problemów dostarczanych przez środowisko przyrodnicze, społeczne i polityczne. W programie tym zastosowanym do edukacji pobrzmiewa XVIII-wieczne hasło „uczyć dziecko, a nie przedmiotu” Johanna Pestalotzkiego. Powinniśmy pozwolić uczniowi/uczennicy wynajdywać problemy zgodne z jego/jej talentem i zainteresowaniami, a następnie roztropnie wykorzystywać te zagadnienia do prowadzenia jego/jej przez długi process edukacji. Wymaga to zindywidualizowania nauczania, co nie było możliwe w przeszłości, ale obecnie jest do osiągnięcia dzięki fantastycznemu rozwojowi technologii. Nie musimy już dostarczać każdemu identycznych kawałków wiedzy, gdyż dowolna wiedza o faktach, dane, metody, gdy są potrzebne, są dostępne w morzu informacji zawartych w globalnej sieci. To co musimy w edukacji przekazać, to to, jak tę potrzebną wiedzę efektywnie odnaleźć wśród petabajtów<sup>5</sup> informacji i szumu w Sieci. Ponieważ efektywne wyszukiwanie informacji jest właśnie tym, co robimy w fizyce i ponieważ większość dzisiejszych problemów jest związana z fizyką, musimy w XXI wieku uczyć fizyki. Pytanie tylko, w jaki sposób?

Ponieważ **fizyka ma służyć jako narzędzie edukacji**, a nie być tylko jednym z wielu przedmiotów uwzględnionych w programach szkolnych, sposób w jaki jej uczymy musi się zmienić. Wspomniałem tu już o zachowaniu energii. Każdy chyba program fizyki w szkole powszechnej obejmuje zasadę zachowania energii oraz podstawy termodynamiki. Mimo to, pojęcie „energii odnawialnej” jest permanentnie używane w ważnych debatach o niezbędnej ludzkości energii i/lub przyszłości klimatu.<sup>6</sup> Fakt, że w Europie<sup>7</sup> energia słoneczna przypadająca na metr kwadratowy na dzień jest równoważna 0,5 litra 95 oktanowej benzyny i że, co więcej, ta niewielka ilość jest częściowo tracona przez dowolne urządzenie wynalezione do jej wykorzystania – ponieważ prawa termodynamiki są tak „okrutne” – nie jest powszechnie zrozumiany, nie tylko przez polityków.

Pobieżny rzut oka na stronę samochodów Tesla<sup>8</sup> przynosi informację, podaną przez producenta, ile elektryczności musimy wytworzyć i dostarczyć do gniazdka

3. V. Arnold. „O uczeniu matematyki”. Zob. np. <http://pauli.uni-muenster.de/~muensteg/arnold.html>.

4. G. Holton. „Science and Anti-Science”. Harvard University Press, Boston 1993. Zob. także <http://issues.org/16-1/holton/>.

5. 1 PB (petabajt) to 250 bajtów (przyp. red.)

6. powinno się mówić o „odnawialnych” źródłach energii (przyp. red.)

7. na szerokości geograficznej Europy (przyp. red.)

8. <https://www.tesla.com>.



w garażu posiadacza tesli, by mógł przejechać kilometr. Mnożąc tę wielkość przez liczbę zarejestrowanych w kraju samochodów, a następnie przez średni kilometr, możemy łatwo oszacować, że przejście na samochody tesla wymagałoby zaczętego procentowo zwiększenia krajowej produkcji prądu (w Polsce pomiędzy 15% a 30%). Dla krajowej sieci energetycznej, bez istotnego jej ulepszenia, byłaby to katastrofa.

Nie możemy przygotować przyszłych pokoleń na całkowicie „elektryczny” świat, jeśli nie będziemy ich uczyć nauk przyrodniczych, w szczególności fizyki, inaczej niż dziś. Świadom tego był ojciec inicjator rewolucji elektrycznej, Carl Proteus Steinmetz, gdy przygotowywał wykłady dla swoich studentów w Union College. Jego idee odbijają się echem w słowach Thomasa Friedmana i Michaela Mandelbauma:<sup>9</sup>

*Nauczyć się naprawiać silnik samochodu elektrycznego, lub robota narzędziowego używanego do cięcia, lub nowego pojazdu napędzanego gazem, który zawiera w sobie obliczeniową moc większą niż kapsuła statku kosmicznego Apollo – nie są to umiejętności, które można nabyć w ciągu jednego semestru nauki w szkole średniej.*

Oznacza to, pozostając przy moim przykładzie nauki o elektryczności, że oprócz fundamentalnych faktów, takich jak oddziaływanie coulombowskie, prawa Kirchhofa i Ohma, musimy wreszcie włączyć do programów szkół średnich równania Maxwella. Ponieważ w świecie, który jest obecnie zanurzony w promieniowaniu elektromagnetycznym, od światła słonecznego po fale wytwarzane przez bezprzewodową komunikację krótkiego zasięgu (bluetooth) łączącą w każdej sali wykładowej wszystkie smartfony, laptopy itp., wiedza o właściwościach fal elektromagnetycznych jest szczególnie ważna.

Aby uczyć właściwości pól elektromagnetycznych i o ich oddziaływaniu z materią musimy także uczyć, jak ludzkość dokonywała postępu rozwijając sposoby wytwarzania energii elektrycznej, uwzględniając i to, że elektryczność jest fantastycznym sposobem przesyłania energii i wyjątkowo nieefektywnym sposobem jej przechowywania. Znajomość tych faktów jest niezbędna wszystkim obywatelom XXI wieku, którzy muszą podjąć decyzję jak w przyszłości wytwarzać energię elektryczną. W przeciwnym wypadku różni aktywiści będą nadal wygrywać debaty za i przeciw energii jądrowej używając energii słonecznej jako panaceum na nasze dylematy energetyczne. Nowoczesne nauczanie elektryczności i magnetyzmu musi porzucić piękne, ale zupełnie bezużyteczne dla dzisiejszych dyskusji XIX-wieczne

doświadczenia; muszą one zostać zastąpione przez eksperymenty współczesne ukazujące te same właściwości pola elektromagnetycznego. Jednofaradowe straszycło – wielka metalowa sfera – powinno zostać zastąpione albo kondensatorem tworzonym przez układ powierzchnia Ziemi – jonosfera, albo być pochowane ze wszystkimi należnymi mu honorami. Chciałbym zapytać Was, czytelników tego artykułu, ilu z Waszych uczniów wie, jak działa superkondensator w moim kilka dolarów wartym zegarku? Choćby tylko, na jakich podstawowych zasadach się jego działanie opiera?

Przywrócenie użyteczności nauczaniu fizyki zaczyna się w szkolnym laboratorium. Tylko dając uczniom szansę robienia wielu nowoczesnych doświadczeń będziemy w stanie pokazać im, że ich zrobienie, a potem konstruowanie „rzeczy”, codziennego użytku, nie jest możliwe bez gruntownej znajomości praw podstawowych, takich jak zachowywanie energii, o którym dopiero co wspominałem.

Konieczne jest także odnowienie zestawu doświadczeń, które robimy w szkołach. Musimy przestać bać się nauczania radioaktywności w szkołach. Poziom wiedzy o tych zjawiskach, albo raczej niewiedzy w naszym nauczaniu szkolnym jest totalnym absurdem w czasach, gdy nasi koledzy medycy wykorzystują w swojej codziennej praktyce antymaterię (urządzenia PET). Nieodpowiedzialny wybór jednostek radioaktywności skutkuje tym, że siedem lub coś koło tego kilo-becquereli radioaktywnych rozpadów w naszym ciele, lub radioaktywność zwykłego banana może wywoływać głębokie uczucie strachu u większości ludzi mających średnie wykształcenie. Ilu techników-radiologów umie wyjaśnić kluczową różnicę pomiędzy jednostkami Graya i Sieverta? Różnica ta jest zasadnicza przy wyjaśnieniu, dlaczego plaże brazylijskiego kurortu Guarapari są udostępniane dla publiczności.

Jest wiele działów fizyki klasycznej, cokolwiek by ta nazwa miała znaczyć w XXI wieku, przedstawianych w szkołach błędnie. Na przykład pojęcie entropii jest kluczowe dla zrozumienia współczesnej informatyki, tego jak działają algorytmy kompresujące dane, takie jak MP3, itp. Nawet nie wspomnę już o podstawach kwantowego przetwarzania informacji. Ta ostatnia idea może zrewolucjonizować świat bardziej niż standardowa wypowiedź o kocie Schrödingera. Czy my tego w ogóle uczymy?

Większość urządzeń mechanicznych funkcjonuje dzięki tarcia. Ile tysięcy uczniów kończy szkolną lub licealną edukację z błędnym „przekonaniem”, iż siła tarcia  $T$  jest zawsze równa  $\eta N$ , gdzie  $N$  jest siłą działającą prostopadle do powierzchni, a  $\eta$  jest współczynnikiem tarcia?

9. T.L. Friedman i M. Mandelbaum: „That Used to Be Us How America Fell Behind in the World It Invented and How We Can Come Back”, Picador, New York (wydanie dostępne na czytniku Kindle).

Wszystkie w zasadzie fakty dotyczące tego o czym tu wspomniałem można znaleźć w Sieci. Większość z nich można tam znaleźć przy użyciu sposobów, które musimy wyjaśnić studentom. Wyjść przede wszystkim, że to co jest w Sieci, niekoniecznie jest prawdą. Wikipedia nie jest, niestety, tak godnym zaufania źródłem jak Alpha Wolframa. Nie wszystkie elektronicznie dostępne materiały edukacyjne są takiej jakości, jak te Akademii Khan.

Rozpowszechnienie internetu zmieniło nasze życie. Jednym z obszarów edukacji, gdzie, jak mi się wydaje, korzystanie z internetu powinno być ograniczone, jest szkolne laboratorium. Zdecydowanie sprzeciwiam się zastępowaniu rzeczywistych doświadczeń estetycznymi symulacjami komputerowymi i/lub prezentacjami na You Tube. Komputery mogą i powinny nam pomagać wykonywać doświadczenia lepiej i analizować ich wyniki, ale nigdy nie powinny zastępować doświadczeń. Powtórzę tu jeszcze raz, że jedynym możliwym wykorzystaniem laptopa, tabletu, czy czegoś podobnego w nauczaniu grawitacji jest zrzucenie go ze stołu w celu zademonstrowania, w którym kierunku działa grawitacja. Warte kilka dolarów narzędzia dostępne w zestawie Raspberry Pi project w połączeniu z tym komputerem są w stanie znakomicie pomóc uczniom w zbudowaniu własnej eksperymentalnej aparatury potrzebnej do dokładnego pomiaru przyspieszenia grawitacyjnego. To jednak wymaga aktywnego zaangażowania uczniów w rzeczywisty eksperyment. Okazję zmierzania się z trudnościami rzeczywistego eksperymentu, czyli ze światem, daje im tylko takie właśnie uczestnictwo, a nie piękna grafika komputerowa, czasem „podrasowywana” w celu uzyskania lepszej wizualizacji, jak prawa mechaniki wykorzystane w strzelanych scenach walki filmu Matrix.

Wierzę, że znajomość fizyki jest ważna jako podstawowe narzędzie umożliwiające rozumienie świata. Trzy lata temu mój dziesięcioletni wnuk zabrał ze sobą na wakacje, które spędzaliśmy razem, poleconą przez nauczyciela książkę *Przygody Tomka Sawyera*. Nie uszło mej uwagi, iż robił wszystko byle tylko uniknąć jej czytania. Przyznał mi się, że książka go nudzi. Czytał jej wydanie papierowe. Zaraz więc zaopatrzyłem go w jej wydanie elektroniczne i zaczęliśmy czytać używając dobrej jakości czytnika na jednym z naszych tabletów. I wtedy książka się „otwarła”. Dotarło do mnie, że dzieci w Polsce, którym każe się czytać tę książkę nie rozumieją, jakie jest jej pochodzenie, ani jakie znaczenie ma literacki pseudonim Samuela Clemensa – Mark Twain. Wykorzystaliśmy możliwości czytnika aby wyszukać w Sieci nazwy pojawiające się w tekście i zaczęliśmy je zgłębiać. Jako pierwsze – Mississippi. W krótkim czasie zgłębialiśmy już hydrologiczne osobliwości tej rzeki, po-

tem budowę pływających po niej słynnych łodzi i statków. Na przykład dłaczego statki te mają koło łopatkowe umieszczone z tyłu, inaczej niż statki pływające, powiedzmy, po Wiśle, czy Renie. Przedmiotem zainteresowania stała się także kwestia umiejscowienia na tych łodziach kotłów parowych i prostych eksperymentów, których dokonaliśmy za pomocą parówek, itd. Musieliśmy także rozwiązać problem przekładu książki na język polski, przede wszystkim sprawę niektórych politycznie niepoprawnych słów użytych przez Twaina, które na polski zostały przetłumaczone w sposób zupełnie śmieszny. Jak widzicie, wykorzystałem lekturę z zestawu obowiązującego w szkole podstawowej jako narzędzie przy uczeniu wielu „tematów”.<sup>10</sup>

Kilka dni temu na odbywającej się w Centrum Nauki Kopernik dorocznej konferencji dla nauczycieli, wraz ze znanym aktorem Andrzejem Sewerynem prowadziliśmy warszaty poświęcone fizycznemu sposobowi czytania książek. Tym razem przedmiotem analizy był wierszyk dla dzieci Jana Brzechwy pt. „Orzech”, w którym rejent z małego miasteczka opodal Warszawy trafia na szczególnie twardy orzech i próbuje go skruszyć na wiele sposobów, które wszystkie zawodzą; w końcu przez okno wskakuje wiewiórka, kruszy skorupę orzecha i zjada jego jądro. Wszystkie przedstawione próby skruszenia orzecha można wykorzystać, by wyjaśnić znaczenie słowa „twardy”, przedstawić sposoby mierzenia twardości materiałów (jedna z prób skruszenia orzecha przez kowala przy pomocy ciężkiego młota znakomicie pasuje do metody Leeba mierzenia twardości poprzez odbicie głowicy testera od testowanego materiału) i wreszcie wspomnieć fascynującą sprawę siły zębów gryzoni. Ta ostatnia rzecz pozwala wprowadzić pojęcie związków allometrycznych odgrywających podstawową rolę w przyrodzie, lecz nawet nie wspomnianych w szkolnej edukacji (siła zębów gryzoni wiąże się z masą ich ciała poprzez prawo potęgowe z tym samym wykładnikiem dla setek przebadanych gatunków gryzoni).

Sądzę, że przedstawiłem mój punkt widzenia dostatecznie jasno. Chciałbym zakończyć cytatem wspierającym mój sposób myślenia o nauczaniu fizyki w XXI wieku. Pochodzi on z książki Johna Deweya „Demokracja i edukacja: wprowadzenie do filozofii edukacji”, która od chwili, gdy ją dostałem, kształtowała mój pogląd na edukację. Pisze on:

*Uczniowie rozpoczynają studia naukowe od tekstów, w których dziedzina jest podzielona na zagadnienia zgod-*

10. Wykład Ł. A. Turskiego z okazji 60-lecia Instytutu Badań Literackich Polskiej Akademii Nauk, 2013 r. Prezentacja komputerowa dostępna u autora. Fragmenty wykorzystane w wywiadzie Anity Czupryn w *Polska the Times*, <http://www.polstatimes.pl/artykul/1074870.prof-turski-bez-pana-tadeusza-nie-mozna-zrozumiec-tego-co-sie-w-polsce-dzialo-i-dzieje,id,t.html>.

nie z porządkiem nadanym im przez specjalistów. Koncepcje techniczne, wraz z ich definicjami są wprowadzane najpierw. Prawa są formułowane na początkowym etapie i w najlepszym razie opatrzone tylko wskazówkami, co do sposobu, w jaki do nich się doszło. Uczniowie uczą się „nauki” zamiast uczyć się naukowego sposobu traktowania materiału znanego z powszechnego doświadczenia.

Po pięćdziesięciu latach istnienia GIREP światowa cywilizacja znajduje się na zakręcie. Mamy fantastyczny postęp w technologii, medycynie, rolnictwie, biologii – wliczając tu poznanie struktury naszego własnego genomu – i stoimy przed możliwością uczynienia tego świata miejscem dostatnim i tak spokojnym, jak tylko to jest możliwe. Musimy jednak mierzyć się z mającym skalę porównywalną z tym sprzed pięćdziesięciu laty, problemem imigrantów, z którym nie możemy sobie poradzić za pomocą naszych technicznych środków przewyższających wszystko, co było dostępne naszym poprzednikom. Stajemy wobec zagrożenia przez terrorystów, którego także nie możemy opanować nawet przy użyciu technologii, o której nikomu nawet się nie śniło, gdy Czerwone Brygady grasowały na ulicach Rzymu. Stoimy wobec światowego kryzysu energetycz-

nego i możliwych konsekwencji zmian klimatu, jakie jeszcze nadejdą. Myślę, że wszystko to jest silnie związane z fiaskiem światowego systemu edukacji.

System edukacji, który obecnie mamy, zawiódł nas. Problem polega na stworzeniu nowego. W tym nowym systemie głównym celem powinno być lepsze zrozumienie otaczającej nas przyrody, ponieważ zmiany w niej zachodzące, niezależnie od tego, czy będące skutkiem ludzkiej działalności, czy powodowane przez zjawiska naturalne, w krótkim czasie zaczną wywierać wpływ na nasz sposób życia na skalę, której sobie nie wyobrażaliśmy, gdy ujarzmiana była energia atomowa i budowany był pierwszy tranzystor. Celu tego nie da się osiągnąć bez poprawienia zrozumienia podstawowych zasad, według których działa przyroda i podstawowych zasad, które możemy spożytkować, by sensownie ją wykorzystywać. A to oznacza fizykę. Ulepszając nauczanie fizyki możemy stworzyć prawdziwie wykształcone społeczeństwo, społeczeństwo ludzi wykształconych, jak to ujął Thomas Jefferson, jedyne, jakie może zagwarantować zachowanie najcenniejszej wartości w ludzkim życiu – wolności.

*Przekład Piotr Chankowski*

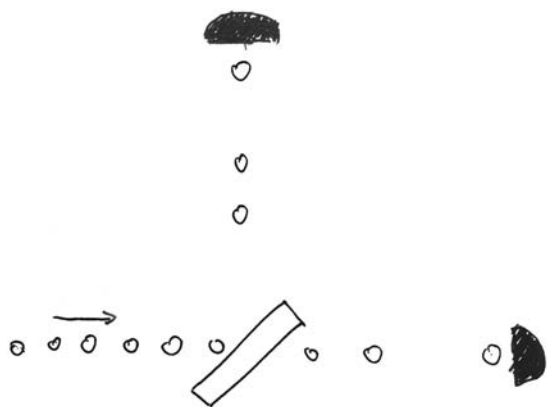
# Kwantechizm czyli klatka na ludzi\*

Andrzej Dragan

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Wyobraźmy sobie strumień światła padający na szybę. Każda szyba przepuszcza tylko część światła, a resztę odbija albo pochłania. Wystarczy spojrzeć na własne odbicie w oknie. To, ile dokładnie światła się odbija, a ile przechodzi przez szybę zależy od szczegółów materiału, z którego wykonane jest szkło. Dla uproszczenia wyobraźmy sobie, że mamy szkło, które odbija i przepuszcza dokładnie po połowie padającego światła.

Przyjmijmy też, że światło ma jeden określony kolor, na przykład czerwony. Z teorii Plancka wynika, że strumień światła składa się z ogromnej liczby niepodzielnych i identycznych fotonów. Właściwości światła, takie jak kierunek poruszania się albo kolor, muszą więc w jednakowy sposób charakteryzować każdy z identycznych fotonów z których składa się wiązka. Czyli mówiąc ludzkim głosem, każdy z tych fotonów musi poruszać się w tę samą stronę i mieć ten sam czerwony kolor, co reszta. Fotony są obiektami niezwykle prostymi i w rozważanym przypadku wszystkie one powinny być po prostu identyczne. Schemat naszego eksperymentu myślowego przedstawia poniższy rysunek, na którym zana-

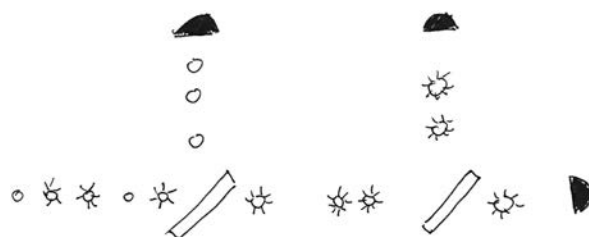


czony są fotony padające na półprzepuszczalną szybę.

Połowa z nich się odbija, a reszta przechodzi na drugą stronę wpadając do specjalnych detektorów, które

rejestrują każdy wpadający foton, jednocześnie go pochłaniając. A teraz trudne pytanie: skoro połowa fotonów ulega odbiciu, a połowa przechodzi przez szkło, to co decyduje o tym, jak zachowa się konkretny foton, skoro wszystkie one są identyczne? Pomyślmy nad tym przez moment.

Niby proste pytanie, a dręczyło Einsteina do samej śmierci. Einstein był przekonany, że fotony muszą się od siebie czymś różnić. I to owe różnice muszą powodować, że niektóre fotony się odbijają, a inne nie. Wyobraźmy sobie na przykład, że niektóre fotony miałyby włosy, a inne nie. Może to owe włosy, albo jakieś inne ukryte cechy, decydują o tym, że dany foton będzie się odbijać od szyby? Wyobraźmy sobie, że tak właśnie jest, a kawałek szkła przepuszcza jedynie fotony owłosione, a łyse odbija. Tylko, że wtedy kolejna, identyczna płytko szklana umieszczona na drodze odfiltrowanych owłosionych fotonów powinna spowodować, że wszystkie one ponownie przez nią przejdą... Eksperyment pokazuje



jednak, że dzieje się inaczej: znów połowa padających fotonów ulega odbiciu, a połowa przechodzi przez szkło.

Pomimo wielu prób, ani w tym, ani w żadnym podobnym eksperymencie, nie udało się sprowokować fotonów do zmiany zachowania — zawsze odbijała się połowa, czyli proporcje ani drgnęły. Nie udało się też dostrzec w ich zachowaniu żadnej prawidłowości. Statystyka pomiarów niczym nie różniła się od statystyki czysto losowej.

Być może jednak nasz kawałek szkła wcale nie jest statycznym przedmiotem, a jakieś ukryte dynamiczne procesy zachodzące wewnątrz odpowiadają za to, że fo-

\* Andrzej Dragan *Kwantechizm czyli klatka na ludzi*, Fabuła Frazza 2019, fragment rozdziału 7.



ton padający w danej chwili zachowa się inaczej niż kolejny identyczny foton lądujący na powierzchni szkła chwilę później? Okazuje się, że znów nic z tego. Zaraz okaże się, że taka ewentualność również nie daje się łatwo obronić. Ale zanim do tego dojdziemy, wysłuchajmy, co na temat zachowania pojedynczych fotonów mówi mechanika kwantowa.

A mówi ona rzecz, od której włos się jeży: przyczyna takiego, a nie innego zachowania pojedynczego fotonu w ogóle nie istnieje. Foton zachowuje się w sposób fundamentalnie nieprzewidywalny i nie ma w procesie padania na szkło niczego, co decydowałoby o jego przyszłych losach. Proces odbicia bądź przejścia fotonu przez szkło jest fundamentalnie losowy, czyli *niedeterministyczny*.

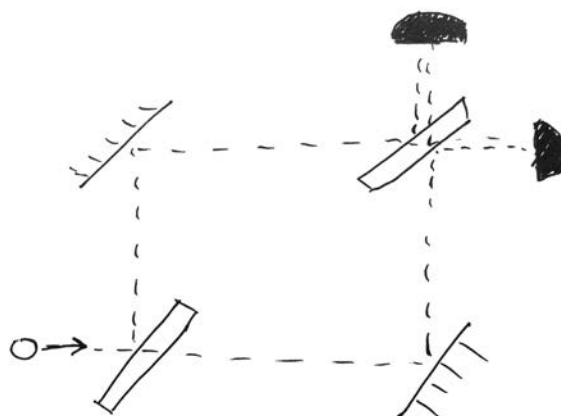
Chwila, chwila. Zwolnijmy na moment i zastanówmy się, coż takiego wygaduje mechanika kwantowa. Cała wcześniejsza klasyczna fizyka nie była niczym innym, jak skuteczną metodą przewidywania przyszłości. Na przykład prawa mechaniki Newtona pozwalały przewidzieć, gdzie upadnie kula wystrzelona z armaty. Nawet jeśli w rzutach monetą raz wypada orzeł, a raz reszka, to słusznie podejrzewamy, że zmienność wynika tylko z tego, że moneta podrzucana jest za każdym razem trochę inaczej. A nawet bardzo drobna różnica w początkowych parametrach rzutu może doprowadzić do zmiany wyniku. I dlatego wyniki rzutu mogą być różne.

Mechanika kwantowa mówi jednak coś więcej: jeśli przepuścimy pojedynczy foton przez kawałek szkła, po czym powtórzymy identyczny pod każdym względem eksperyment. Nie podobny. Nie prawie taki sam. Identyczny. To otrzymane wyniki mogą okazać się inne niż chwilę wcześniej. Mechanika kwantowa mówi, że absolutnie nic nie decyduje o tym, co stanie się w takim eksperymencie z pojedynczym fotonem. Nie chodzi więc tylko o naszą niepełną wiedzę o fotonie. I to właśnie nie dawało Einsteinowi spokoju i dlatego do znużenia powtarzał on, że *Bóg nie gra w kości, Bóg nie gra w kości*.

Oczekiwanie, że ktokolwiek po prostu przyjmie tak zaskakujące twierdzenia na wiarę byłoby czystą bezczelnością. Powróćmy więc do rozsądnie brzmiącej hipotezy, że nawet jeśli poszczególne fotony niczym się od siebie nie różnią, to wewnątrz szkła przebiega jakiś dynamiczny proces, który sprawia, że przy każdym kolejnym padającym fotonie, warunki eksperymentu podlegają niewielkim, ale istotnym zmianom. Być może stoją za tym na przykład termiczne drgania atomów?

Aby sprawdzić, czy to możliwe, rozważmy nieco zmodyfikowaną wersję naszego doświadczenia. Umieścimy na drodze dwóch rozdzielonych wiązek światła dwa idealne lustra, które skierują wiązki na drugi kawa-

łek szkła, jak przedstawia to poniższy rysunek. Zaraz za



tą drugą płytkę szklaną, na której wiązki ponownie się nakładają, umieścimy dwa detektory mierzące natężenie padającego światła. Jakie będą ich odczyty, gdy oświetlimy dolną płytkę szklaną silnym strumieniem światła?

Wydawać by się mogło na pierwszy rzut oka, że detektory wskażą identyczne natężenia stanowiące połowę natężenia pierwotnej wiązki. Okazuje się jednak, o czymś zapomnieliśmy. Można tak skonstruować nasz eksperyment, żeby całe światło wpadało wyłącznie do dolnego detektora. Jak to możliwe?

Pamiętajmy, że obie wiązki po ponownym nałożeniu na drugiej płytce szklanej, będą ze sobą *interferować*. Są bowiem falami i te fale będą się na siebie nakładać na drugim kawałku szkła. Światło wpadające do górnego detektora może dotrzeć tam na dwa sposoby. W trakcie podróży górną drogą dochodzi do trzykrotnego odbicia światła: najpierw od pierwszego kawałka szkła, później od lustra i wreszcie od drugiej szybki. Natomiast druga, dolna droga wymaga tylko jednego odbicia — od lustra, ale za to światło dwukrotnie przejdzie przez szklane płytki.

Światło podróżując przez szkło trochę spowalnia i dlatego fala podróżująca dołem będzie nieco opóźniona w stosunku do fali podróżującej górą. Opóźnienie to zależy od grubości użytych płytek szklanych. Można tak dobrać te grubości, żeby górki fali światła podróżującej górną drogą trafiły dokładnie na dołki fali światła podróżującej dołem. Dojdzie wówczas do destruktywnej interferencji, w wyniku której górny detektor pozostanie kompletnie nieoświetlony.

Skoro więc światło nie wpada do górnego detektora, to musi wpaść do dolnego. Bo energia nie może po prostu zniknąć. Przyjmijmy więc, że w taki właśnie sposób skonstruowaliśmy nasz układ szkieł i lusterek, nazywany *interferometrem Macha-Zehndera*, że całe światło zawsze ląduje w dolnym detektorze.

Czas na najciekawsze pytanie: co stanie się z pojedynczym fotonem wpuszczonym do interferometru? Jakie będą jego dalsze losy? Jak słusznie zauwa-

zył pewien komentator zawodów jeździeckich, *teraz wszystko w rękach konia*.

Wydawać by się mogło, że foton musi w jakiś sposób „zdecydować się” na jedną z dróg. Pod nieobecność innych fotonów, z którymi mógłby interferować, powinien równie często wpadać do jednego, jak i do drugiego detektora, gdy będziemy wielokrotnie powtarzać eksperyment. Co prawda, niezbyt wiadomo, co miałyby decydować o wyborze przez foton tej, a nie innej drogi, ale czy przychodzi nam do głowy jakieś inne rozwiązanie?

Okazuje się, że musi nam przyjść do głowy inne rozwiązanie, bo nasze wnioski są kompletnie sprzeczne z wynikami eksperymentu. Okazuje się, że nawet używając pojedynczych fotonów nie da się „obudzić” górnego detektora. Za każdym razem porcja światła zostanie zarejestrowana w dolnym detektorze. To oczywiście przy założeniu, że grubości płytek szklanych cały czas dobrane są w szczególności sposób, jak to wcześniej ustaliliśmy. Foton *zawsze* wylądowuje na dole, ani razu na górze! Eksperyment można powtarzać do woli.

Wygląda to znowu na efekt interferencyjny, który zachodził w przypadku silnych wiązek. Tylko z czym niby jeden foton miałby interferować, skoro niczego nie ma w pobliżu. Z samym sobą?!

Jak by to powiedzieć... trudno znaleźć jakiegokolwiek inne wyjaśnienie. Mając do dyspozycji dwa alternatywne sposoby przebycia interferometru, foton zachowuje się tak, jak gdyby podróżował dwiema drogami *równocześnie*! Obie alternatywne ścieżki interferują dokładnie w taki sposób, w jaki interferowały dwie fale świetlne powstałe w wyniku rozszczepienia na pierwszej płytce szklanej. I w wyniku tej interferencji foton lądowuje na koniec w dolnym detektorze.

Z tego, co powiedzieliśmy mogłoby wynikać, że z jednego fotonu robią się dwa, co wydaje się przeczyć postulatowi niepodzielności fotonu. Aby sprawdzić, czy foton aby się nie rozdwa, wystarczy po-

nownie postawić na jego drodze (drogach?) dwa detektory pochłaniające światło umieszczone tuż za pierwszą płytką szklaną. Zadaniem urządzeń pomiarowych będzie sprawdzenie, którędy na *prawdę* podróżuje foton. I znów stanie się coś zadziwiającego: klikać będzie *zawsze* tylko jeden detektor, czasami górny, a czasami dolny. Obydwa nigdy. Sytuacja wygląda zupełnie tak, jak gdyby foton zorientowawszy się, że jest pod obserwacją, postanowił nie siać zgorzenia i zlokalizować się tylko w jednym z dwóch detektorów. Gdy natomiast nikt nie patrzy, foton zachowuje się ponownie tak, jak gdyby podróżował obiema drogami *na raz*. Czyli jak żona (lub mąż), która zmienia swoje zachowanie w zależności od tego, czy jest pod obserwacją, czy też nie.

I teraz możemy już powrócić do poprzedniego pytania — co decyduje o tym, który z dwóch detektorów umieszczonych tuż za pierwszą płytką, złapie padający na nią pojedynczy foton? Czy może za to odpowiadać jakiś nieznan dynamiczny proces zachodzący w szkle w chwili, gdy pada na niego foton? Jakaś fluktuacja?

Otóż nasze spostrzeżenie, że po usunięciu dwóch detektorów umieszczonych tuż za pierwszą płytką foton zachowuje się tak, jak gdyby poruszał się *równocześnie* górną i dolną drogą, wskazuje na to, że w chwili padania na pierwszą płytkę foton *wcale* nie podejmuje decyzji, czy ma się odbić, czy przejść. Realizowane są oba scenariusze. Dopiero gdy wsuniemy w drogę fotonu dwa detektory, foton „zdecyduje się” na jedną z możliwych dróg.

Oznacza to, że dopiero akt pomiaru sprawia, że foton jest tu albo tam, natomiast przed pomiarem położenie fotonu nie jest *wcale* dobrze określone. Gdyby foton podejmował decyzję o swoich dalszych losach już w chwili padania na płytkę szklaną, nie mogłoby przecież dojść później do interferencji! I dlatego zirytowany Niels Bohr odrzekł kiedyś Einsteinowi, powtarzającemu w kółko, że *Bóg nie gra w kości: przestań wreszcie mówić Bogu, co ma robić*.

# Synchrotron SOLARIS

Emilia Król

Narodowe Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS  
Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

## Zapraszamy naukowców na pomiary w synchrotronie SOLARIS

Naukowcy z kraju i zagranicy już od października ubiegłego roku mogą prowadzić regularne badania w Centrum SOLARIS. Znajdujący się w ośrodku synchrotron stwarza im unikalne możliwości badawcze, dotąd niedostępne w Europie Środkowo-Wschodniej. O wybudowanie w Polsce synchrotronu zabiegano od ponad trzydziestu lat, dlatego pierwsi użytkownicy w SOLARIS to przełomowy moment dla polskiej nauki.



Fot. 1. Budynek Narodowego Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS, w którym mieści się synchrotron. (fot. Michał Domański)

Aktualnie na naukowców czekają dwie linie badawcze UARPES oraz PEEM/XAS, z pomocą których można prowadzić badania w zakresie fizyki ciała stałego, chemii, fizyki nadprzewodników czy nowych materiałów elektronicznych.

Naukowcy, którzy zgłoszą swoje wnioski w aktualnym naborze, będą mieli do dyspozycji czas badawczy od marca 2020 roku.

Czas badawczy zostanie przyznany naukowcom na zasadach konkursowych, aplikacje oceni międzynarodowa komisja.

Po pierwszym naborze wniosków przeprowadzono 26 eksperymentów, natomiast po drugim naborze za-

kwalifikowane zostały 24 wnioski badawcze. Pomiary na liniach wykonywali badacze afiliowani w polskich uczelniach i instytucjach badawczych: Akademii Górniczo-Hutniczej, Instytucie Katalizy i Fizykochemii Powierzchni im. Jerzego Habera PAN, Instytucie Fizyki PAN, Uniwersytecie Jagiellońskim, Uniwersytecie Śląskim, Uniwersytecie Rzeszowskim, Uniwersytecie Warszawskim i Uniwersytecie Wrocławskim. Są też aplikacje z Hiszpanii, Włoch, Estonii, Słowacji i Austrii.

Naukowcy badają izolatory topologiczne, materiały dirakowskie i nadprzewodniki, a także właściwości elektroniczne materiałów, oddziaływania magnetyczne i rozkład pierwiastków w materiałach. W przyszłości wyniki pomiarów mogą przyczynić się m.in.: do opracowania wydajniejszych ogniw fotowoltaicznych, szybszych i pojemniejszych dysków twardych czy nowych materiałów elektronicznych.

Z wyników pomiarów przeprowadzonych w SOLARIS powstał już pierwszy naukowy artykuł opublikowany w *Scientific Reports*-- prestiżowym czasopiśmie wydawanym przez Nature Research.

Aplikację o czas badawczy w Centrum SOLARIS może złożyć każdy zainteresowany naukowiec, zarówno z Polski, jak i zagranicy. Nabory wniosków odbywają się dwa razy w roku (wiosną i jesienią). Naukowcy składają swoje aplikacje online, za pośrednictwem serwisu Digital User Office. Korzystanie z infrastruktury SOLARIS jest dla naukowców całkowicie **bezpłatne**. Przed złożeniem wniosku warto przedyskutować z opiekunem linii badawczej techniczną możliwość przeprowadzenia planowanego eksperymentu.

## Polski synchrotron – światło dla nauki

Centrum SOLARIS to ośrodek badań prowadzonych z wykorzystaniem promieniowania synchrotronowego.

Promieniowanie synchrotronowe (zwane również światłem synchrotronowym) jest wytwarzane

w synchrotronie, do którego dołączane są linie badawcze ze stanowiskami pomiarowymi. Linie modyfikują światło synchrotronowe w taki sposób, by najlepiej służyło badaniom, które są przy nich prowadzone.

Obecnie do synchrotronu SOLARIS dołączone są dwie linie badawcze (PEEM/XAS z dwoma stanowiskami pomiarowymi oraz UARPES z jednym stanowiskiem). W przyszłości jednak na hali eksperymentalnej Centrum SOLARIS będzie funkcjonowało kilkanaście linii badawczych z około dwudziestoma stanowiskami pomiarowymi.

Centrum SOLARIS cały czas się rozbudowuje. W miarę powstawania nowych linii badawczych oferta zarówno dla naukowców jak i różnych sektorów przemysłu będzie się rozszerzać.

Na hali eksperymentalnej w Centrum SOLARIS trwa bowiem budowa dwóch kolejnych linii badawczych PHELIX i XMCD.

Linia PHELIX będzie wykorzystywała miękkie promieniowanie rentgenowskie. Jej stacja badawcza umożliwi szeroki zakres badań spektroskopowych i absorpcyjnych charakteryzujących się różną czułością powierzchniową. Użytkownicy będą zatem mogli prowadzić badania nowych materiałów, cienkich warstw i wielowarstw, katalizatorów i biomateriałów, badania powierzchni materiałów litych, stanów powierzchniowych spolaryzowanych spinowo oraz zachodzących na powierzchni reakcji chemicznych.

Następną linią w budowie jest linia eksperymentalna miękkiego promieniowania rentgenowskiego przeznaczona do badań magnetycznego dichroizmu kołowego XMCD.

Linia działała w ośrodku badawczym MaxLab w Lund (Szwecja). W lutym 2016 r. została zdemontowana i przetransportowana do Krakowa przez członków zespołu SOLARIS.

Magnetyczny dichroizm kołowy to technika pozwalająca na badanie właściwości materiałów magnetycznych. Technika XMCD znajduje zastosowanie w badaniach m.in.: warstw magnetycznych, nanostruktur, struktury magnetycznej i elektronicznej.

Planujemy także linię krystalograficzną, na której budowę w czerwcu 2018 r. podpisaliśmy umowę ze Zjednoczonym Instytutem Badań Jądrowych w Dubnej (Rosja).

Na mocy umowy powstanie Laboratorium Badań Strukturalnych Makromolekuł i Nowych Materiałów, którego podstawę stanowić będzie linia do badań strukturalnych. Linia ta jest jedną z najbardziej pożądanych przez polskie środowisko naukowe, jak i przemysłowe. Jej stanowiska badawcze umożliwią badania o charakterze podstawowym, jak i aplikacyjnym, takie jak:

- kompleksowe badania struktur krystalicznych próbek różnych materiałów, w tym próbek biologicznych (białek, kompleksów białkowych, kwasów nukleinowych itd.), makrocząsteczek biologicznych w roztworach, zawiesin nanocząstek, nowych nanomateriałów (układów polimerowych, sit molekularnych, nanokompozytów, ciekłych kryształów itd.);
- badania struktur krystalicznych materiałów funkcjonalnych pod wysokim ciśnieniem;
- badania strukturalnych przejść fazowych pod wysokim ciśnieniem;
- badania struktur obiektów nieuporządkowanych (białek, białek błonowych i kulistych, kompleksów wielkocząsteczkowych, wirusów i cząstek wirusopodobnych, błon biologicznych, kwasów nukleinowych i ich kompleksów z białkami i / lub zespółami do dostarczania leków.

Otrzymaliśmy także finansowanie z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na budowę dwóch linii badawczych FTIR (linia eksperymentalna do badań w podczerwieni) i POLYX (linia badawcza do multimodalnego obrazowania rentgenowskiego) oraz stacji badawczej skaningowej transmisyjnej mikroskopii rentgenowskiej STXM.

Ważnym wydarzeniem nie tylko dla SOLARIS, ale także dla świata nauki jest zakup kriomikroskopu elektronowego i utworzenie pod dachem SOLARIS Krajowego Centrum Kriomikroskopii Elektronowej. Po kilku miesiącach instalacji przeprowadzone zostały pierwsze testy. Wkrótce kriomikroskop będzie dostępny dla użytkowników. Wniosek złożony do MNISW o sfinansowanie zakupu mikroskopu to wspólna inicjatywa 17 wiodących instytucji naukowych w Polsce prowadzących badania z zakresu biologii strukturalnej. Konsorcjum działa pod przewodnictwem dr. Sebastiana Glatta z Małopolskiego Centrum Biotechnologii UJ i dr. hab. Marcina Nowotnego z Międzynarodowego Instytutu Biologii Molekularnej i Komórkowej w Warszawie.

## O synchrotronie

Synchrotrony pozwalają zajrzeć w głąb materii i dokonać jej precyzyjnych analiz. Dzięki nim naukowcy mogą badać zarówno skład badanej substancji, jak i jej strukturę – światło synchrotronu może przenikać do wnętrza badanej materii. Może odwzorować z dowolną szczegółowością ukryte warstwy lub ich wybrane fragmenty, bez uszkodzania tych połączonych na zewnątrz. Promieniowanie synchrotronowe stymuluje również procesy zachodzące w materii – wywołuje zmiany w badanych

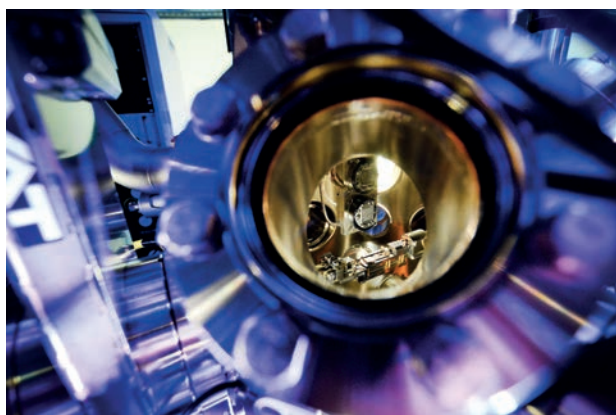


objektach. Synchrotrony otwierają zupełnie nowe możliwości badawcze. Dzięki nim można przeprowadzić analizy, które dotychczas dla badaczy były niedostępne. Synchrotrony pozwalają również uzyskać w krótszym czasie lepsze wyniki tych badań, które wcześniej były realizowane zwykłymi metodami. To obecnie najwszechstronniejsze urządzenia, jakimi dysponują nauki przyrodnicze i techniczne, takie jak biologia, chemia, fizyka, inżynieria materiałowa, nanotechnologia, medycyna, farmakologia, geologia czy krytalografia.

Centrum SOLARIS działa przy Uniwersytecie Jagiellońskim. Zlokalizowane jest na terenie Kampusu 600-lecia Odnowienia UJ, w południowej części Krakowa. Sąsiaduje ze specjalną strefą ekonomiczną Krakowskiego Parku Technologicznego. Centrum zostało wybudowane w latach 2011–2014. Inwestycję dofinansowała Unia Europejska ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007–2013.

### Co badamy w synchrotronie?

Rozpoczęliśmy nowy nabór wniosków o czas badawczy na liniach pomiarowych w synchrotronie SOLARIS. Już wkrótce naukowcy będą mogli realizować swoje badania, z których powstaną interesujące publikacje i prezentacje na konferencjach. W tym kontekście warto przywołać kilka przykładów badań, które były wykonywane na naszych liniach badawczych w poprzednich naborach.



Fot. 2. Fragment stacji badawczej UARPES. (fot. Anna Wojna)

### Nowe metody zapisu danych

Jedną z dwudziestu kilku grup badawczych w pierwszym naborze była grupa dra inż. Piotra Kuświka z Instytutu Fizyki Molekularnej PAN z Poznania, która wykonywała badania w zakresie fizyki ciała stałego wykorzystując linię PEEM/XAS. Grupa badała ultracienkie warstwy magnetyczne, które mogą posłużyć jako nośnik do zapisu informacji.

W przyszłości wyniki badań pozwolą określić czy istnieje możliwość utworzenia bardzo małych struktur magnetycznych i ich zastosowania w pamięciach masowych o wysokiej gęstości zapisu danych. Wyzwaniem dla naukowców jest uzyskanie takich stabilnych struktur w temperaturze pokojowej, które pozwoliłyby zwiększyć aktualnie uzyskiwane gęstości zapisu informacji w konwencjonalnych dyskach twardych. Chociaż są to badania podstawowe mające na celu zdobywanie nowej wiedzy o zjawiskach fizycznych, nie wyklucza się ich zastosowania również do opracowania nowego typu tranzystorów czy układów logicznych.

*Praca na synchrotronie to jeden z etapów naszej pracy badawczej – mówi Piotr Kuświk lider grupy realizujący projekt NCN SONATA-BIS. Zanim dotarliśmy tutaj pracowaliśmy blisko 4 lata. Pierwszym etapem było opracowanie technologii wytworzenia warstw magnetycznych z wykorzystaniem rozpylania magnetronowego i ablacji laserowej. Te prace wymagały zastosowania specjalistycznej aparatury próżniowej, która została zakupiona z projektu SpinLab współfinansowanego ze środków UE. Po ich wytworzeniu wykonuje się serię pomiarów w celu określenia ich podstawowych właściwości strukturalnych i magnetycznych. Taką charakterystykę wykonaliśmy przy zastosowaniu szeregu metod badawczych przy użyciu aparatury takiej jak: dyfraktometr, mikroskop sił magnetycznych, magnetometr. Po uzyskaniu pożądanych wielkości fizycznych, przyszedł czas na wykonanie badań na synchrotronie – uzupełnia naukowiec.*

Świat nauki i biznesu pokłada dużą nadzieję w rozwoju nowych nośników danych, które będą mogły zrewolucjonizować zapis rosnącej lawinowo ilości danych. Dlatego mamy nadzieję, że praca tej grupy badawczej dzięki pomiarom na synchrotronie znajdzie wiele nowatorskich zastosowań.

### Wydajniejsze ogniwa fotowoltaiczne

Kolejną grupą działającą w obiecującym i innowacyjnym obszarze to grupa prof. Małgorzaty Igalson z Politechniki Warszawskiej, która wykonała pomiary na stacji XAS. Ich badania koncentrują się w obszarze fizyki materiałowej ogniw słonecznych. Na synchrotronie badają jeden z rodzajów cienkich ogniw słonecznych i sprawdzają gdzie w tych ogniwach lokuje się sód. Jest to ważne, gdyż sód należy do czynników, które poprawiają wydajność ogniw.

W latach 90-tych XX w. na Uniwersytecie w Uppsali przez przypadek odkryto, że sód zwiększa wydajność ogniw słonecznych typu CIGS. Wykonując ogniwo na zwykłym szkle, zawierającym m.in. tlenek i węgiel sodu, zaobserwowano, iż wydajność ogniwa wzrosła.

*Wspólnie z doktorantką Panią Anielą Czudek sprawdzamy dlaczego ogniwa CIGS zwiększają wydajność po dodaniu sodu. Na synchrotronie badamy otoczenie atomów sodu w ogniwie – mówi dr Aleksander Urbaniak.*

*Badania, które prowadzimy są elementem projektu dotyczącego badania roli sodu w ogniwach CIGS i stanowią uzupełnienie dla szeregu innych metod badawczych. Wyniki uzyskane na synchrotronie pozwolą nam na eksperymentalną weryfikację modeli teoretycznych dotyczących badanej roli sodu – dodaje badacz.*

### Nowe materiały dla energetyki

Innym przykładem obiecujących pomiarów wykonanych na synchrotronie – tym razem w obszarze inżynierii materiałowej – są badania grupy dr Aleksandry Mielewczyk-Gryń z Politechniki Gdańskiej.

Grupa ta badała domieszkowane ziemiami rzadkimi kobyaltyt lantanu, które należą do materiałów posiadających właściwości strukturalne i elektryczne bardzo atrakcyjne z punktu widzenia ich potencjalnego zastosowania jako materiał elektrodowy w wysokotemperaturowych ogniwach paliwowych i w elektrolizerach. Praktycznym zastosowaniem tych badań może być dalsze projektowanie nowych, stabilnych i wydajnych materiałów dla energetyki.

*Badania realizowane w SOLARIS na stacji XAS stanowią część naszego szerokiego projektu badawczego, w trakcie którego stosujemy różne techniki pomiarowe, w tym np. takie jak: dyfrakcja rentgenowska (również z wykorzystaniem promieniowania synchrotronowego) i dyfrakcja neutronowa, transmisyjna mikroskopia elektronowa, termogravimetria, czy badania właściwości elektrycznych – wyjaśnia dr Mielewczyk-Gryń. Ponadto w celu uzyskania pełnego obrazu procesów absorpcyjnych wymagane jest poszerzenie badań o pomiary z wykorzystaniem twardego promieniowania rentgenowskiego. Dlatego też złożyliśmy wniosek na linię XAFS w synchrotronie ELETTRA, w trakcie którego planujemy wykonać między innymi pomiary na krawędzi K kobaltu – uzupełnia prof. Agnieszka Witkowska, koordynująca badania realizowane z wykorzystaniem metod spektroskopowych.*

### Spintronika

To oczywiście tylko kilka przykładów interesujących badań. Natomiast pierwszymi pomiarami na synchrotronie, które doczekały się publikacji w „Scientific Reports”

– prestiżowym czasopiśmie wydawanym przez Nature Research, są badania dra inż. Michała Ślęzaka i współpracowników z grupy „Nanostruktury Powierzchniowe” na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Pod koniec roku 2018 naukowcy wykorzystali możliwości pomiarowe oferowane przez stację badawczą XAS w Centrum SOLARIS. Grupa dokonała ciekawego odkrycia dotyczącego właściwości magnetycznych układów dwuwarstwowych typu antyferromagnetyk/ferromagnetyk. Dotychczas uważano, że to warstwa antyferromagnetyczna zawsze dominuje nad sąsiadującym ferromagnetykiem i np. dyktuje mu jaki powinien wybrać kierunek dla swojego namagnesowania. W rzeczy samej, taka sytuacja ma często miejsce i w większości dotychczasowych publikacji taki opis uznawano za powszechną właściwość układów antyferromagnetyk/ferromagnetyk.

Naukowcy z AGH, dzięki symulacjom komputerowym i badaniom na synchrotronie, odkryli odwrotną zależność dla układu typu ferromagnetyk (w tym przypadku żelazo) i antyferromagnetyk (tlenek kobaltu). Dzięki zastosowaniu warstwy ferromagnetyka o bardzo silnych i dobrze zdefiniowanych właściwościach magnetycznych, udało się „zmusić” warstwę antyferromagnetyka by podążała za kierunkiem namagnesowania warstwy ferromagnetyka. Opracowano zatem nowy sposób sterowania magnetyzmem antyferromagnetyków, co jest niezwykle istotne z punktu widzenia zastosowań w dziedzinie współczesnej spintroniki, czyli elektroniki bazującej już nie na ładunku elektrycznym elektronu, lecz na jego spinie (momencie magnetycznym). W przyszłości można upatrywać praktycznego zastosowania tych badań w przypadku pracy nad nowym sposobem zapisu informacji, łatwiejszą kontrolą i sterowalnością tego zapisu.

W chwili obecnej naukowcy przygotowują się do kontynuacji tych badań, w szczególności chcą sprawdzić czy podobne efekty można zaobserwować w innych układach, w których jako ferromagnetyk występować będą np. kobalt lub nikiel, a rolę antyferromagnetyków będą odgrywały warstwy wytworzone m.in. z tlenku nikielu, żelaza czy chromu.

Wszystkich użytkowników synchrotronu zapraszamy do przygotowania eksperymentów badawczych i składania wniosków poprzez portal Solaris Digital User Office (DUO).

---

# Nowy Międzynarodowy Układ Jednostek Miar SI

Anna Szmyrka-Grzebyk, Aleksandra Kowal

Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN im. Wł. Trzebiatowskiego, Wrocław

---

**Streszczenie.** 16 listopada 2018 r., po kilkunastu latach badań, Generalna Konferencja Miar (CGPM) zatwierdziła nowy międzynarodowy układ jednostek miar SI. Cztery podstawowe jednostki – kilogram, amper, kelwin i mol – zdefiniowane zostały przez odpowiednie stałe fizyczne: stałą Plancka  $h$ , ładunek elementarny  $e$ , stałą Boltzmana  $k$  i stałą Avogadra  $N_A$  czyniąc cały układ SI układem uniwersalnym, niezależnym od własności materii. Układ został tak opracowany, by zachować spójność z dotychczas obowiązującym. Zbudowane zostały wzorce jednostek gwarantujące osiągnięcie odpowiednio wysokiej dokładności pomiaru, a także dokumenty *Mise en pratique* opisujące praktyczną realizację poszczególnych jednostek miar. Nowy układ SI będzie obowiązywał od 20 maja 2019 r.

W artykule podano nowe definicje jednostek miar i omówiono podstawowe metody ich realizacji. Zamieszczono także obszerny wykaz literatury zawierający odnośniki do prac historycznych, najnowszych publikacji przeglądowych podsumowujących osiągnięte rezultaty, jak również do dokumentów opublikowanych przez Międzynarodowe Biuro Miar.

---

## 1. Wstęp

Obowiązujący od ponad pół wieku Międzynarodowy Układ Jednostek Miar, znany jako układ SI<sup>1</sup> [1,2], wymagał kolejnej rewizji oraz istotnej zmiany. Układ SI zatwierdzony przez 9. Generalną Konferencję Miar (CGPM – General Conference on Weights and Measures) w 1960 r. definiował 6 podstawowych jednostek miar: metr, kilogram, sekunda, amper, kelwin, kandela. Są to odpowiednio jednostki długości, masy, czasu, natężenia prądu elektrycznego, temperatury i światłości. W 1971 r., na 14. Generalnej Konferencji Miar, do grupy podstawowych jednostek miar włączono mol – jednostkę liczności materii. Definicje jednostek miar tego układu mają różny charakter. Jeden metr to odległość, jaką pokonuje światło w próżni w czasie  $1/299\,792\,458$  s, co oznacza, że definicja metra powiązana jest z uniwersalną stałą fizyczną  $c$  – prędkością światła w próżni. Definicja sekundy – czas równy  $9\,192\,631\,770$  okresom promieniowania odpowiadającego przejściu między nadsubtelnymi poziomami stanu podstawowego atomu cezu 133 – związana jest z własnościami atomu. Definicje te mają charakter uniwersalny, nie podlegają zmianie w czasie. Inaczej jest zdefiniowany kilogram – jednostka masy, która jest równa masie artefaktu, międzynarodowego prototypu kilograma (*IPK* – International Prototype of Kilogram) przechowywanego w Międzynarodowym Biurze Miar (BIPM – International Bureau of Weights and Measures) w Sèvres czy jednostka temperatury – kelwin, równa  $1/273,16$  temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody. Do zdefinio-

wana tych jednostek wykorzystano własności materii, które mogą i ulegają zmianie w czasie.

Wzorcem kilograma jest walec wykonany ze stopu platyny (90 %) i irydu (10 %) o średnicy podstawy równej jego wysokości wynoszącej 39 mm [3]. Taki prototyp kilograma został wykonany około 1880 r., a już w 1889 r. Generalna Konferencja Miar uznała ten artefakt za międzynarodowy wzorec jednostki masy. Wykonano wówczas 40 kopii wzorca kilograma, spośród których wybrano 30 egzemplarzy o masie nieróżniącej się więcej niż o  $\pm 1$  mg od międzynarodowego wzorca i przekazano je narodowym instytutom metrologicznym (NMI – National Metrology Institute) w całym świecie, przede wszystkim sygnatariuszom Konwencji Metrycznej podpisanej 20 maja 1975 r. [4]. Przeprowadzone pod koniec ubiegłego wieku międzynarodowe porównania wzorców kilograma wykazały niewielkie, ale mierzalne zmiany masy –  $50\ \mu\text{g}/100$  lat – tych wzorców. Krzywe obrazujące zmiany masy kilkunastu egzemplarzy wzorców kilograma z wybranych instytutów metrologicznych dostępne są m.in. na stronie BIPM [5]. Wyniki porównań skłoniły międzynarodowe gremia metrologów do podjęcia działań zmierzających do zmiany definicji i wzorca jednostki masy. W 1999 r. na 21. posiedzeniu GCPM sformułowano rezolucję [6] zalecającą podjęcie badań mających na celu wykorzystanie nowoczesnych narzędzi jakich dostarcza współczesna nauka i technika do zdefiniowania jednostki masy przez stałą uniwersalną lub atomową, podobnie jak zostały wcześniej zdefiniowane jednostki miary długości i czasu. Stało się to inspiracją do szerszych zmian układu SI, a mianowicie podjęcia próby zdefiniowania także innych jednostek

---

1. Skrót od nazwy w języku angielskim International System of Units, the SI

miar za pomocą odpowiednich stałych fizycznych. I już w 2005 r. Międzynarodowy Komitet Miar (CIPM – International Committee for Weights and Measures) rekomendował opracowania nowych definicji kilograma, ampera, kelwina i mola, w celu wyrażenia ich poprzez stałe uniwersalne. Wówczas realizacja wszystkich podstawowych jednostek miar układu SI byłaby niezależna od czasu, miejsca i innych czynników. Proponowanymi stałymi uniwersalnymi, z którymi mały być powiązane te jednostki są odpowiednio: stała Plancka  $h$  – kilogram, ładunek elementarny  $e$  – amper, stała Boltzmana  $k$  – kelwin oraz stała Avogadra  $N_A$  – mol [7, 8].

W celu zachowania ciągłości z dotychczas obowiązującym układem przyjęto zachować takie wartości liczbowe stałych uniwersalnych, by nie zaburzały tej ciągłości. Redefinicja układu miała być procesem dwuetapowym. W początkowym etapie wartości liczbowe stałych uniwersalnych należało wyznaczyć w obecnym układzie SI stosując aktualne definicje jednostek miar. Kiedy wartości liczbowe stałych zostaną wyznaczone z niezbędną niepewnością, wówczas w drugim etapie redefinicji przyjmie się je za definicyjne w nowym układzie SI, a jednostki miar będą wynikały z przyjętych wartości definicyjnych stałych uniwersalnych [9].

## 2. Nowa koncepcja definiowania jednostek miar

Istotną zmianą nowego układu SI będzie sposób definiowania jednostek miar – przypisanie odpowiedniej wartości liczbowej stałej uniwersalnej, co implikuje wybór odpowiednich jednostek.

Definiowanie jednostek miar przez przypisanie wyznaczonej wartości liczbowej stałej uniwersalnej uzasadnia się w następujący sposób [10]:

Jeżeli  $Q$  jest wielkością uniwersalną, wynikającą z praw przyrody, wówczas jej wartość nie może być dowolnie wybrana. Ale zawsze wartość  $Q$  jest iloczynem wartości liczbowej oznaczonej symbolem  $\{Q\}$  i jednostki o symbolu  $[Q]$ . Przykładem jest stała uniwersalna  $c$  – prędkość światła zdefiniowana jako:  $c = \{c\} \times [c] = 299\,792\,458$  m/s. Wartość liczbową wynika z przyjętej w obecnie obowiązującym układzie SI jednostki miary prędkości (m/s).

Można też podejść inaczej do zdefiniowania stałej uniwersalnej przyjmując jej wartość liczbową  $\{Q\}$  za wielkość stałą (np.  $\{c\} = 299\,792\,458$  dokładnie), wówczas implikuje to przyjęcie określonej jednostki  $[Q]$  (w przedstawianym przykładzie  $[c] =$  m/s).

Przykład powyższy dowodzi, że przez wybór wartości liczbowej stałych uniwersalnych, fundamentalnych wielkości w przyrodzie, możemy dokonać zdefiniowania jednostki określonej wielkości.

## 3. Etapy badań

Na badania zostały skierowane duże środki finansowe z budżetu Unii Europejskiej. Uczestniczyły w nich także bardzo aktywnie instytuty spoza Europy, przede wszystkim ze Stanów Zjednoczonych, Kanady, Japonii, Chin, Korei Południowej, Australii. Sądzone, że kilkuletni wysiłek wiodących w świecie instytucji naukowych umożliwi redefinicję jednostek miar i zatwierdzenie nowego, „kwantowego” układu SI na początku drugiej dekady XXI wieku [11]. Rzeczywistość okazała się inna. Kolejne rezolucje wydawane przez Generalne Konferencje Miar w 2011 r. [12], a następnie 2014 r. [13] podkreślały istotny postęp w badaniach, ale osiągnięte rezultaty wciąż nie upoważniały do zatwierdzenia nowych definicji. Na wstępnym etapie prac założono, że nowy układ jednostek miar będzie mógł być zatwierdzony przez CGPM, o ile zostanie osiągnięta odpowiednia niepewność pomiaru poszczególnych stałych uniwersalnych.

Zadaniem jakie stanęło przed naukowcami było wyznaczenie wartości liczbowych stałych z dokładnością, która gwarantowałaby osiągnięcie niepewności pomiaru wielkości przez nie definiowanych nie mniejszej od niepewności osiąganych w dotychczasowym układzie SI. Ponadto najdokładniejsze wyniki należało potwierdzić przez zastosowanie jednej lub dwóch innych metody gwarantujących tylko nieco mniejszą dokładność.

Warunek ten okazał się wielkim wyzwaniem, szczególnie w przypadku pomiaru stałej Plancka  $h$  i redefinicji kilograma. Dopiero w 2017 r. wartości wszystkich stałych zostały wyznaczone z odpowiednią niepewnością. Committee on Data for Science and Technology (CODATA) opublikował osiągnięte wartości stałych [14, 15]:

$$\text{stała Plancka } h = 6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$\text{z niepewnością } u = 1.0 \times 10^{-8},$$

$$\text{ładunek elementarny } e = 1.602\,176\,6341(83) \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{z niepewnością } u = 5.2 \times 10^{-9},$$

$$\text{stała Boltzmana } k = 1.380\,649\,03(51) \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$$

$$\text{z niepewnością } u = 3.7 \times 10^{-7},$$

$$\text{stała Avogadra } N_A = 6.022\,140\,758(62) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$\text{z niepewnością } u = 1.0 \times 10^{-8}.$$

Wówczas Międzynarodowy Komitet Miar uznał za uzasadnione przyjęcie następujących wartości stałych uniwersalnych z zerową wartością niepewności:

$$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s},$$

$$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C},$$

$$k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1},$$

$$N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

i zarekomendowanie Generalnej Konferencji Miar za twierdzenie nowego układu jednostek miar SI [16]. Nastąpiło to na 26. posiedzeniu CGPM 16 listopada 2018 r. Nowe definicje obowiązywać będą od 20 maja 2019 r., w kolejną rocznicę podpisania Konwencji Metrycznej w 1875 r.

#### 4. Nowe definicje jednostek miar

Nazwa nowego układu jednostek miar nie ulegnie zmianie; nadal będzie obowiązywała obecna – Międzynarodowy Układ Jednostek Miar (SI), w języku angielskim: *The International System of Unit (SI)*. Nowy system ma własne logo.



Logo Międzynarodowego Układu Jednostek Miar SI  
(dostępne do pobrania na [www.bipm.org/en/si-download-area/graphics-files.html](http://www.bipm.org/en/si-download-area/graphics-files.html))

Rekomendowany przez BIPM układ SI jest układem jednostek, w którym [16]:

- częstotliwość przejścia między nadsubtelnyimi poziomami stanu podstawowego atomu cezu  $133 \Delta\nu_{Cs}$  wynosi  $9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$ ,
- prędkość światła w próżni  $c$  wynosi  $299\,792\,458 \text{ m/s}$ ,
- stała Plancka  $h$  wynosi  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ,
- ładunek elementarny  $e$  wynosi  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,
- stała Boltzmanna  $k$  wynosi  $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,
- stała Avogadra  $N_A$  wynosi  $6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ,
- światłość źródła emitującego promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ ,  $K_{cd}$ , wynosi  $683 \text{ lm/W}$ ,

gdzie herc, dżul, kulomb, lumen, i wat, o symbolach Hz, J, C, lm i W, odnoszą się odpowiednio do jednostki sekundy, metra, kilograma, ampera, kelwina, mola i kandeli, z symbolami jednostek s, m, kg, A, K, mol i cd, zgodnie z zależnościami  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{m}^2\text{kg s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{ m}^{-2} = \text{cd sr}$  i  $\text{W} = \text{m}^2 \text{ kg s}^{-3}$ .

W nowym układzie SI została zmieniona kolejność prezentowania jednostek, tak by nie wprowadzać definicji jednostki podstawowej zależnej od innej znajdującej się na dalszej pozycji. Porządek ten jest więc następujący: s, m, kg, A, K, mol, cd.

Uwzględniając powyższe liczbowe wartości stałych uniwersalnych definicje 7 podstawowych jednostek miar będą następujące<sup>2</sup>:

**sekunda**, symbol s, jest jednostką czasu w układzie SI. Jest ona zdefiniowana przez przyjęcie wartości liczbowej częstotliwości przejścia między nadsubtelnyimi poziomami stanu podstawowego atomu cezu  $133 \Delta\nu_{Cs}$  wynoszącej  $9\,192\,631\,770$ , kiedy wyrażona jest w jednostce Hz, która jest równa  $\text{s}^{-1}$ .

**metr**, symbol m, jest jednostką długości w układzie SI. Jest ona zdefiniowana przez przyjęcie wartości liczbowej prędkości światła w próżni  $c$  wynoszącej  $299\,792\,458$ , kiedy wyrażona jest w jednostce m/s, gdzie sekunda zdefiniowana jest przez częstotliwością atomu cezu  $\Delta\nu_{Cs}$ .

**kilogram**, symbol kg, jest jednostką masy w układzie SI. Jest ona zdefiniowana przez przyjęcie wartości liczbowej stałej Plancka  $h$  wynoszącej  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ , kiedy wyrażona jest w jednostce J s, która jest równa  $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ , gdzie metr i sekunda są zdefiniowane przez  $c$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ .

**amper**, symbol A, jest jednostką natężenia prądu elektrycznego w układzie SI. Jest ona zdefiniowana przez przyjęcie wartości liczbowej ładunku elektrycznego  $e$  wynoszącej  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ , kiedy wyrażona jest w jednostce C, która jest równa A s, gdzie sekunda jest zdefiniowana przez  $\Delta\nu_{Cs}$ .

**kelwin**, symbol K, jest jednostką temperatury termodynamicznej w układzie SI. Jest ona zdefiniowana przez przyjęcie wartości liczbowej stałej Boltzmanna  $k$  wynoszącej  $1,380\,649 \times 10^{-23}$ , kiedy wyrażona jest w jednostce  $\text{J K}^{-1}$ , która jest równa  $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , gdzie kilogram, metr i sekunda są zdefiniowane przez  $h$ ,  $c$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ .

**mol**, symbol mol, jest jednostką liczności materii w układzie SI. Jeden mol zawiera dokładnie  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  cząstek elementarnych. Ta liczba jest przypisaną wartością liczbową stałej Avogadra  $N_A$ , kiedy wyrażona jest w jednostce  $\text{mol}^{-1}$  i nosi nazwę liczby Avogadra.

Liczność materii, o symbolu  $n$ , jest miarą liczby określonych cząstek elementarnych. Cząstkami elementarnymi mogą być atomy, molekuly, jony, elektrony i inne cząstki lub określone grupy cząstek.

**kandela**, o symbolu cd, jest w układzie SI jednostką natężenia światła w określonym kierunku. Jest zdefiniowana przez wartość liczbową natężenia światła

2. Podane definicje zostały przetłumaczone z języka angielskiego przez autorki artykułu



monochromatycznego promieniowania o częstotliwości  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , która wynosi 683, kiedy jest wyrażona w jednostce  $\text{lm W}^{-1}$ , gdy jest równa  $\text{cd sr W}^{-1}$  lub  $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ , kiedy kilogram, metr i sekunda są zdefiniowane przez  $h$ ,  $c$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ .

## 5. Wzorce jednostek miar nowego układu SI

### 5.1. Kilogram

Dotychczasowy międzynarodowy wzorec masy *IPK* (*International Prototype of Kilogram*) – artefakt o masie 1 kg – zostanie zastąpiony urządzeniem umożliwiającym wyznaczenie stałej Plancka  $h$  przez porównanie energii elektrycznej wyrażonej w watach i energii mechanicznej wyrażonej w jednostkach masy (w kilogramach). Urządzenie to w języku angielskim nosi nazwę *watt balance*, której tłumaczenie na język polski zaproponowane przez J. Borzumińskiego z Głównego Urzędu Miar powinno brzmieć *waga watowa* [17]. W 2016 r. Międzynarodowe Biuro Miar zarekomendowało stosowanie nazwy *Kibble balance* (*waga Kibble'a*), od nazwiska pierwszego konstruktora takiej wagi – B.K.Kibble z National Physical Laboratory (NPL) w Wielkiej Brytanii [18]. Waga Kibble'a jest urządzeniem za pomocą którego można wyznaczyć związek między jednostkami elektrycznymi i mechanicznymi układu SI:

$$UI = mgv,$$

gdzie  $U$  jest napięciem indukowanym na zaciskach kołistej cewki poruszającej się pionowo w radialnym polu magnetycznym o indukcji  $B$  z prędkością  $v$ ;  $I$  jest natężeniem prądu w cewce, kiedy cewka znajduje się w polu o takiej samej indukcji  $B$  a siła wywołana prądem  $I$  i indukcją  $B$  dokładnie równoważy ciężar  $m \times g$  (siłę;  $g$  – stała grawitacji) wzorca masy  $m$ .

W celu ustanowienia związku między makroskopową masą  $m$  i stałą Plancka  $h$  w eksperymencie mierzone są dwie wielkości elektryczne, napięcie  $U$  i prąd  $I$ , stosując metody oparte na makroskopowych efektach kwantowych – efekcie Josephsona i kwantowym efekcie Halla. Efekty te pozwalają na powiązanie wielkości elektrycznych z dwoma stałymi elementarnymi: ładunkiem elementarnym  $e$  i stałą Plancka  $h$  [19].

Zdefiniowanie kilograma przez stałą  $h$  gwarantuje jej uniwersalność, niezmienniczość, a przede wszystkim niezależność od własności materii. Wzorcem tak zdefiniowanej jednostki masy będzie waga Kibble'a. Zasada działania wagi Kibble'a opisana jest m.in. na stronie BIPM [18] oraz w licznych publikacjach, z których kilka cytowano w niniejszej pracy [19–23]. Są to prace najnowsze, które zawierają odnośniki do wcześniejszych opracowań. Praktyczna realizacja jednostki masy opi-

sana jest też w dokumencie „*Mise en pratique of the definition of the kilogram*” [24].

Po zatwierdzeniu nowej definicji kilograma, opartej na stałej uniwersalnej  $h$ , masa dotychczasowego międzynarodowego wzorca kilograma *IPK* będzie nadal wynosić 1 kg z tym, że do wartości tej zostanie przypisana niepewność  $1 \times 10^{-8}$ . Należy zauważyć, że waga Kibble'a może być wykorzystywana do wyznaczania dowolnej wartości masy z dużą dokładnością. W przypadku dotychczas stosowanego artefaktu tylko masa 1 kilograma jest wyznaczana z najmniejszą niepewnością ( $1 \times 10^{-8}$ ), natomiast, gdy wyznaczane są wartości masy dużo mniejsze od 1 kg, niepewność pomiaru znacznie wzrasta, nawet do  $10^{-4}$  dla mas o wartości miligramów.

### 5.2. Mol

W początkowym etapie prac nad redefinicją kilograma rozważano możliwość powiązania definicji jednostki masy, kg, także ze stałą Avogadra  $N_A$ . Stała Avogadra określa liczbę cząstek elementarnych zawartych w molu substancji. Mol w dotychczasowym układzie SI jest jednostką liczności materii układu zawierającego liczbę cząstek równą liczbie atomów w masie 0,012 kg izotopu węgla  $^{12}\text{C}$ . Kilogram mógłby być zdefiniowany jako masa ( $10^3 N_A \text{ mol}/12$ ) atomów węgla  $^{12}\text{C}$  przez ustalenie bardzo dokładnej wartości liczbowej stałej  $N_A$ . Wymagałoby to wyrażenia stałej Avogadra z niepewnością nie większą niż  $2 \times 10^{-8}$ . W połowie poprzedniej dekady osiągnięcie takiej wartości niepewności nie było łatwe, więc stosunkowo szybko zdecydowano, że definicja kilograma będzie wyrażana przez stałą Plancka  $h$ , natomiast stała Avogadra  $N_A$  będzie definiowała jednostkę liczności materii.

Badania nad redefinicją mola koordynowane były przez BIPM w ramach projektu o nazwie *Avogadro Project* [25]. Do badań wybrano krzem, ponieważ można z niego wykonać duży, o wysokiej czystości, niemalże idealny monokryształ. Prowadzone badania miały na celu wyznaczenie z najwyższą osiągalną dokładnością składu izotopowego dwóch kul krzemowych, masy molowej, masy, objętości i gęstości, a także parametrów sieci krystalicznej krzemu. Wielkości te niezbędne są do wyznaczenia stałej Avogadra  $N_A$ , która opisywana jest zależnością:

$$N_A = \frac{n M}{\rho a^3}$$

gdzie  $n$ ,  $M$ ,  $\rho$  i  $a$  są odpowiednio liczbą atomów w komórce elementarnej (w przypadku  $^{28}\text{Si}$   $n = 8$ ), masą molową, gęstością i parametrem sieci krystalograficznej. W badaniach zastosowano dyfrakcyjny pomiar gęstości elektronowej (*X-Ray Crystal Density Technique – XRCDD*). Masy  $m$  obu kul wykonanych z izotopu  $^{28}\text{Si}$  porównywane były z masą wzorca kilograma *IPK*. Pomiar

zostały uznane za satysfakcjonujące, gdy osiągnięto standardową niepewność pomiaru masy mniejszą niż  $5 \mu\text{g}$  ( $5 \times 10^{-9}$ ).

Szereg badań, które doprowadziły do osiągnięcia tak dużej dokładności pomiaru stałej Avogadra  $N_A$  zostało opisanych w pacach opublikowanych w 2011 r. w specjalnie poświęconemu temu zagadnieniu numerze Metrologii [26]. Obszerną publikację w języku polskim na temat *Projektu Avogadra* opracował Wł. Chyła [27]. Wyniki późniejszych badań, a także bogaty wykaz prac oryginalnych zawierają m.in. artykuły [28, 29]. Przykłady praktycznej realizacji jednostki miary liczności materii podane są w dokumencie „*Mise en pratique of the definition of the mole*” [30].

Wyznaczenie stałej Avogadra  $N_A$  z osiągniętą niepewnością pomiaru ( $1,0 \times 10^{-8}$ ) metodą XRCD ma też bardzo istotne znaczenie dla praktycznej realizacji jednostki masy, kilograma, zdefiniowanej przez stałą Plancka  $h$ . Może stanowić alternatywną metodę wyznaczania  $h$  przez pomiar wielkości określanej jako molowa stała Plancka  $N_A h$ , którą opisuje równanie:

$$N_A h = \alpha^2 c A_r(e) M_u / 2 R_\infty,$$

gdzie  $\alpha$  jest stałą struktury subtelnej,  $c$  – prędkością światła w próżni,  $A_r(e)$  – względną masę atomową elektronu,  $M_u$  – masą molową i  $R_\infty$  – stałą Rydberga. Ponieważ molową stałą Plancka  $N_A h$  można wyznaczyć bardzo dokładnie, z niepewnością  $4 \times 10^{-10}$  [20], a więc z dużo mniejszą niż stałą Plancka  $h$  czy stałą Avogadra  $N_A$ , możliwe staje się wyliczenie stałej  $h$  znając stałą  $N_A$  z odpowiednią niepewnością. A zatem stała Plancka  $h$  może być wyznaczona z wymaganą dużą dokładnością dwoma metodami opartymi na różnych zjawiskach fizycznych – stosując wagę Kibble’a lub XRCD technikę.

### 5.3. Amper

W obowiązującym układzie SI, amper, jednostka wielkości elektrycznej – natężenia prądu, zdefiniowana jest w następujący sposób:

*prąd elektryczny niezmienny, który występując w dwóch równoległych prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju znikomo małym umieszczonych w próżni w odległości 1 metra od siebie wywoływałby między tymi przewodami siłę  $2 \times 10^{-7}$  niutona na każdy metr długości.*

Definicja ta jest pojęciowo trudna, trudna jest też w praktycznej realizacji, a osiągnięta niepewność pomiaru jest duża, znacznie większa niż można uzyskać dla innych jednostek wielkości elektrycznych takich jak napięcie czy opór elektryczny. Szczególnie duży postęp

w metrologii elektrycznej osiągnięto w latach 80. ubiegłego wieku dzięki pracom B. Josephsona i K. von Klitzinga, którzy odkryli występowanie makroskopowych efektów kwantowych w niskich temperaturach, pozwalających na bardzo dokładne wyznaczenie wartości napięcia i oporu elektrycznego [31].

Efekt Josephsona to zjawisko związane z tunelowaniem par Coopera w złączu dwóch nadprzewodników rozdzielonych izolatorem, w wyniku którego powstaje napięcie  $U$  równe:

$$U = \frac{hf}{2e}$$

gdzie  $h$  jest stałą Plancka,  $f$  – częstotliwością promieniowania elektromagnetycznego,  $e$  – ładunkiem elementarnym. Wielkość

$$K_J = \frac{2e}{h}$$

jest stałą uniwersalną, która od nazwiska odkrywcy nosi nazwę stałej Josephsona, a jej wartość liczbową zatwierdzona przez CODATA od 1990 r. wynosiła [32]:

$$K_{J-90} = 483,5979 \times 10^9 \text{ Hz}$$

z niepewnością  $u = 4 \times 10^{-7}$ .

Klaus von Klitzing<sup>3</sup> zaobserwował na próbkach dwuwymiarowych w bardzo niskich temperaturach (poniżej 4,2 K) i silnych polach magnetycznych (kilku tesli) występowanie skwantowanych wartości oporu elektrycznego (kwantowy efekt Halla) dających opisać się zależnością:

$$R = \frac{h}{ne^2}$$

gdzie  $R$  jest oporem elektrycznym,  $h$  – stałą Plancka,  $e$  – ładunkiem elektrycznym, a  $n$  – małą liczbą naturalną. Wielkość

$$R_K = \frac{h}{e^2}$$

jest wielkością stałą (stała Klitzinga) wiążącą wartość oporu elektrycznego z dwoma stałymi uniwersalnymi. Wartość  $R_{K-90}$  przyjęta w 1990 r. wynosiła 25812,807  $\Omega$  z niepewnością  $u = 2 \times 10^{-7}$  [32].

Z uwagi na uzyskiwaną znacznie niższą wartością niepewności pomiaru napięcia i oporu elektrycznego oba efekty kwantowe już w ostatniej dekadzie ubiegłego

3. Klaus von Klitzing, laureat nagrody Nobla w 1985 r., jest obecnie bardzo aktywnie zaangażowany w promocję nowego układu jednostek miar SI. Odwiedził także kilkakrotnie Polskę. Uczestniczył w QM 2016 – 5th International Conference on Quantum Metrology zorganizowanej przez Politechnikę Poznańską w 2016 r. z wykładem *Fundamental Constants: The Basis for a New SI*, a na zaproszenie Politechniki Wrocławskiej w 2018 r. wygłosił referat *A New Kilogram in 2019: the Biggest Revolution in Metrology since the French Revolution* (Interdyscyplinarne Seminarium Naukowe Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 18.04.2018).

wieku stosowano do praktycznej realizacji wzorców jednostek miar wielkości elektrycznych w miejsce wzorców ampera opartych na obowiązującej definicji SI. W nowym układzie jednostek miar SI [34] jednostka napięcia, volt, będzie realizowana z wykorzystaniem efektu Josephsona przyjmując wyznaczoną z dokładnością 15 cyfr wartość stałej Josephsona  $K_J = 483\,597,848\,46\,894\text{ GHzV}^{-1}$ . Do wyznaczania jednostki oporu elektrycznego, oma, będzie stosowany kwantowy efekt Halla. Wyznaczona wartość stałej Klitzinga  $R_K$  wynosić będzie  $R_K = 25\,812,807\,459\,3045\ \Omega$ . Jednostka natężenia prądu elektrycznego  $I$ , amper, które zgodnie z prawem Ohma równe jest stosunkowi napięcia  $V$  i oporu  $R$ , będzie realizowana z zastosowaniem obu efektów kwantowych. Wartości liczbowe stałych  $K_{J-90}$  i  $R_{K-90}$  zostaną skorygowane do podanych wyżej wartości z uwagi na przyjętą przez CODATA w 2017 r. wartość stałej Plancka  $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ J s}$  [14, 15].

Amper w nowym układzie SI jest zdefiniowany przez ładunek elektryczny  $e$ , którego wartość wynosi  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ , jednak praktyczna realizacja ampera w myśl definicji – przez wyznaczenie dokładnej wartości liczbowej  $e$ , jest wciąż trudna, a osiągnięcie niepewności pomiaru  $e$  przy zastosowaniu urządzeń typu SET – *single electron transport device* – generujących prąd elektryczny w kontrolowany sposób są na razie znacznie większe od niepewności pomiarów  $U$  i  $R$  opartych na efektach kwantowych [34].

#### 5.4. Kelwin

W dotychczas obowiązującym układzie jednostek miar SI definicja jednostki temperatury, kelwina, powiązana jest podobnie jak jednostka masy, kilogram, z wzorcem materialnym – z wodą. Kelwin – jednostka temperatury termodynamicznej – równy jest  $1/273,16$  temperatury punktu potrójnego wody. Definicja taka została zatwierdzona przez 10. Generalną Konferencję Miar już w 1954 r [35], w setną rocznicę zaproponowania jej przez lorda Kelvina. W taki sam sposób została też zdefiniowana w Międzynarodowej Skali Temperatury z 1990 r. (MST-90) [36]. Przeprowadzone na początku wieku międzynarodowe porównania dokładności realizacji temperatury punktu potrójnego wody wykazały zależność temperatury od składu izotopowego wody [37], w wyniku czego w 2005 r. Komitet Doradczy ds. Temperatury Międzynarodowego Biura Miar (BIPM CCT) zarekomendował przypisanie wartości dokładnie równej  $273,16\text{ K}$  punktowi potrójnemu wody o zdefiniowanym składzie izotopowym odpowiadającym składowi wody oceanicznej (SMOW) [38]. W praktyce punkt potrójny wody realizowany jest obecnie z niepewnością  $u = 1.8 \times 10^{-7}$  [39].

Nowa definicja kelwina wywodzi się z kinetyczno-molekularnej teorii gazów opracowanej w XIX wieku

przez J.C. Maxwella i L. Boltzmann [40, 41]. Dla gazu idealnego w stanie równowagi termodynamicznej średnia energia kinetyczna  $E_k$  cząstek jest opisana zależnością:

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{i}{2} kT$$

gdzie  $m$  jest masą,  $v$  – prędkością,  $i$  – stopniem swobody (cząsteczki gazu mają 3 stopnie swobody),  $k$  – stałą Boltzmann i  $T$  – temperaturą termodynamiczną. Równanie wyraża związek między energią kinetyczną i temperaturą termodynamiczną:

$$E_k \sim kT$$

Stała Boltzmann  $k$  – uniwersalna stała fizyczna – jest współczynnikiem konwersji między średnią energią kinetyczną molekuł poruszających się w określonym kierunku w gazie idealnym i temperaturą termodynamiczną  $T$ . Naturalnym więc było wyrażenie jednostki temperatury za pomocą tej stałej.

Redefinicja kelwina w oparciu o stałą Boltzmann  $k$ , zgodnie z rekomendacją BIPM CCT [42] wymagała spełnienia dwóch warunków:

- stała  $k$  musi być wyznaczona z niepewnością mniejszą niż  $1 \times 10^{-6}$  przynajmniej jedną metodą,
- dwie różniące się od siebie metody muszą pozwolić na wyznaczenie stałej  $k$  z niepewnością nie mniejszą niż  $3 \times 10^{-6}$ .

Wyznaczenie stałej Boltzmann  $k$  z wymaganą niepewnością pomiaru umożliwiają trzy rodzaje termometrów pierwotnych, tzn. takich, w których mierzona wielkość (parametr termometryczny) powiązana jest z temperaturą termodynamiczną za pomocą znanych zależności nie zawierających innych wyrażen zależnych od temperatury:

- **gazowy termometr akustyczny (AGT – Acoustic Gas Thermometer)**, za pomocą którego wyznaczana jest zależność prędkości dźwięku  $c$  rozchodzącego się w gazie (argon lub hel) od temperatury termodynamicznej  $T$  opisana równaniem:

$$c = (\gamma_0 RT/M)^{1/2}$$

gdzie:  $\gamma_0 = C_p/C_v$  jest stosunkiem ciepła właściwego gazu przy stałym ciśnieniu  $C_p$  do ciepła właściwego w stałej objętości  $C_v$ ,  $R = k N_A$  – stała gazowa,  $M$  – masa molowa gazu [43, 44];

- **gazowy termometr dielektryczny (DCGT – Dielectric-constant gas thermometer)**, którego zasada działania polega na wyznaczeniu stałej dielektrycznej gazu w funkcji temperatury  $T$ . W równaniu stanu gęstość gazu jest zastąpiona przez stałą dielek-

tryczną  $\epsilon$  i przyjmuje postać:

$$p = kT(\epsilon - \epsilon_0)/\alpha_0$$

gdzie  $\epsilon_0$  – stała dielektryczna próżni i  $\alpha_0$  – statyczna polaryzowalność dipola elektrycznego atomu gazu [45,46];

- **termometr szumowy (JNT – Johnson Noise Thermometer)** – dokonuje pomiaru napięcia szumu cieplnego Johnsona na zaciskach elementów oporowych układu elektrycznego opisanego równaniem Nyquist’a

$$V_T^2 = 4kTR\Delta f$$

gdzie  $V_T$  – napięcie,  $k$  – stała Boltzmanna,  $T$  – temperatura termodynamiczna,  $R$  – opór elektryczny,  $\Delta f$  – częstotliwość [47,48].

Najdokładniej, z niepewnością  $u = 3.7 \cdot 10^{-7}$ , wartość stałej Boltzmanna  $k$  równą  $1.380\,649\,03(51) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$  wyznaczono za pomocą gazowego termometru akustycznego [49].

Konsekwencją wprowadzenia nowej definicji jednostki temperatury, kelwina, będzie przypisanie temperaturze punktu potrójnego wody równej nadal 273,16 K niepewności  $u = 3.7 \times 10^{-7}$ , co odpowiada wartości 0,1 mK.

Międzynarodowa Skala Temperatur z 1990 r. będzie nadal dokumentem aktualnym, opisującym praktyczną realizację kelwina. Uzupełni ją “*Mise en pratique of the definition of the kelvin*” [50].

W przypadku redefinicji kelwina, podobnie jak kilograma czy mola, kwartalnik *Metrologia* poświęcił specjalne wydanie [51] zawierające szereg prac przedstawiających wyniki badań, które doprowadziły do osiągnięcia wymaganej dokładności pomiaru stałej Boltzmanna  $k$ . Podsumowaniem tych badań był także referat inauguracyjny wygłoszony przez Michaela de Podesta *The definition of the kelvin in the new SI; its rationale, implementation and implications* [52] podczas XIII International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science w Zakopanem w 2016 r, którego organizatorem był Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN oraz prace opublikowane w 2018 r [53, 54].

## 6. Informacje dla użytkowników

Międzynarodowe Biuro Miar wydało dokument *Information for users about the proposed revision of the SI*, dostępny na stronie BIPM [55], w którym podaje podstawowe informacje dotyczące wprowadzanego nowego systemu jednostek miar SI ważne dla zainteresowanych odbiorców. Podkreśla się, że mimo istotnych zmian jakie zostały dokonane w definicjach czterech jednostek – kilograma, ampera, kelwina i mola

– w rzeczywistości w świecie nauki, techniki i życiu każdego człowieka, zmiany te nie będą odczuwalne. Przede wszystkim definicje zostały tak zaproponowane, by zachowana została spójność z obowiązującym dotychczas systemem SI. Komitety Doradcze w BIPM, właściwe dla poszczególnych dziedzin, opracowały cytowane wyżej dokumenty *Mise en pratique* opisujące podstawowe zasady praktycznej realizacji poszczególnych jednostek.

Po zatwierdzeniu przez Generalną Konferencję Miar (CGPM) dnia 16 listopada 2018 r. definicje te będą obowiązywały od 20 maja 2019 r. 20 maja – to dzień podpisania Konwencji Metrycznej w 1875 r.; w dniu tym co roku celebruje się Dzień Metrologii.

## 7. Podsumowanie

Rekomendacja Międzynarodowego Biura Miar sformułowana w 2005 r. [7], której celem było zainicjowanie badań umożliwiających zdefiniowanie jednostek miar za pomocą stałych uniwersalnych stała się faktem. 26. Generalna Konferencja Miar 18 listopada 2018 r. zatwierdziła nowy Międzynarodowy System Jednostek Miar SI, często zwany układem kwantowym, który definiuje siedem podstawowych jednostek miar za pomocą stałych uniwersalnych czyniąc go niezależnym od czasu i miejsca praktycznej realizacji. Wartości stałych uniwersalnych – stałej Plancka  $h$ , ładunku elektrycznego  $e$ , stałej Boltzmanna  $k$  i stałej Avogadra  $N_A$  – rekomendowane do definicji jednostki masy (kilograma), natężenia prądu elektrycznego (ampera), temperatury (kelwina) oraz liczności materii (mola) zostały wyznaczone z wymaganą dużą dokładnością uzasadniającą przeprowadzenie redefinicji tych jednostek.

W otwartej części posiedzenia CGPM poświęconej redefinicji jednostek miar, na której odbyło się głosowanie zatwierdzające nowy system SI, miały zaszczyt i przyjemność uczestniczyć także autorki niniejszej pracy.



Identyfikator upoważniający do udziału w 26. Posiedzeniu CGPM

## Appendix

### Państwowy wzorzec jednostki temperatury w INTiBS PAN

Metrologia temperatury w INTiBS PAN we Wrocławiu rozwijana jest przez ponad pół wieku. Niemal od

początku prace prowadzone były we współpracy z zagranicznymi instytutami metrologicznymi. Współpraca ta zaowocowała zbudowaniem stanowiska do realizacji Międzynarodowej Skali Temperatury z 1990 r. (MST-90) w zakresie temperatur od 13,8033 K do 273,16 K [56, 57], które w 2001 r. uzyskało rangę Państwowego Wzorca Jednostki Miary na mocy decyzji Prezesa Głównego Urzędu Miar [58]. Elementy wzorca uczestniczyły w porównaniach międzynarodowych potwierdzających wysoką dokładność osiąganych parametrów [59, 60]. W celu zapewnienia spójności pomiarowej z utrzymanym wzorcem Instytut wykonuje wzorcowania urządzeń do pomiaru temperatury w zakresie temperatur kriogenicznych dla licznych odbiorców zewnętrznych. Posiada także akredytację Polskiego Centrum Akredytacji na wzorcowanie termometrów w zakresie wyższych temperatur do 400 K (Certyfikat AP nr 125).

Instytut ma rangę Instytutu Desygnowanego w międzynarodowych organizacjach metrologicznych – w Międzynarodowym Biurze Miar (BIPM) i Europejskim Stowarzyszeniu Narodowych Instytutów Metrologicznych EURAMET. Od wielu lat aktywnie uczestniczy w realizacji międzynarodowych projektów badawczych pod auspicjami EURAMETu, Komitetu Technicznego ds. Temperatury w BIPM (CCT), a w 2016 r. był organizatorem prestiżowej w świecie konferencji TEMP-MEKO 2016 – XIII International Symposium on Temperature and Thermal Measurement in Industry and Science, która odbyła się w Zakopanem z udziałem blisko 400 uczestników z 46 krajów całego świata. Obecnie Instytut ubiega się o fundusze na budowę termometru akustycznego, który będzie realizował jednostkę temperatury zgodnie z nową definicją.

## Literatura

- [1] [www.bipm.org/utis/common/pdf/SI-brochure](http://www.bipm.org/utis/common/pdf/SI-brochure); *The International System of Units*, SI Brochure. 8<sup>th</sup> edn.
- [2] Rozporządzenie RM z dnia 30 listopada 2006 r. w sprawie legalnych jednostek miar, Dz. Ustaw nr 225 (2006) poz. 1638
- [3] R.S. Davis, *The SI unit of mass*, Metrologia 40 (2003) 299-305
- [4] [www.bipm.org/en/worldwide-metrology/metre-convention](http://www.bipm.org/en/worldwide-metrology/metre-convention). *The Metre Convention*
- [5] [www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/](http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/) On the future revision of the SI./Why?
- [6] [www.bipm.org/en/CGPM/db/21/7/](http://www.bipm.org/en/CGPM/db/21/7/) Resolution 7 of the 21st CGPM (1999), *The definition of the kilogram*
- [7] [www.bipm.org/utis/en/pdf/CIPM/CIPM2005-EN.pdf](http://www.bipm.org/utis/en/pdf/CIPM/CIPM2005-EN.pdf), Recommendation 1 (CI-2005) *Preparative steps towards new definitions of the kilogram, the ampere, the kelvin and the mole in terms of fundamental constants*
- [8] I.M. Mills, P.J. Mohr, T.J. Quinn, B.N. Taylor, E.R. Williams, *Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole, proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005)* Metrologia 43 (2006) 227-46
- [9] M. Stock *The revision of the SI – towards an international system of units based on defining constants*, Measurement Techniques 60 (2018) 1169-1177; DOI 10.1007/s11018-018-1336-2
- [10] P.J. Mohr, *Defining units in the quantum based SI*, Metrologia 45 (2008) 129-133
- [11] [www.bipm.org/en/CGPM/db/23/12/](http://www.bipm.org/en/CGPM/db/23/12/) Resolution 12 of the 23rd CGPM (2007), *On the possible of certain base units of the International System of Units (SI)*
- [12] [www.bipm.org/en/CGPM/db/24/1/](http://www.bipm.org/en/CGPM/db/24/1/) Resolution 1 of the 24th CGPM (2011), *On the possible future revision of the International System of Units, the SI*
- [13] [www.bipm.org/en/CGPM/db/25/1/](http://www.bipm.org/en/CGPM/db/25/1/) Resolution 1 of the 25th CGPM (2014), *On the future revision of the International System of Units, the SI*
- [14] D. B. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, K. Fujii, S.G. Karshenboim, H.S. Margolis, E de Mirandés, P.J. Mohr, F. Nez, K. Pachucki, T.J. Quinn, B.N. Taylor, M. Wang, B.M. Wood, Z. Zang, *The CODATA 2017 values of  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$  for the Revision of the SI*, Metrologia 55 (2018) L13-L16
- [15] P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga *Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment*, Metrologia 55 (2018) 125-146
- [16] [www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/](http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/) On the future revision of the SI./Key Documents Draft 9<sup>th</sup> edition of the SI Brochure (2018)
- [17] J. Borzymiński, *Problemy tłumaczenia terminów obcych i kształtowania nowych terminów w metrologii*, Metrologia i Probiernictwo, Biuletyn Głównego Urzędu Miar 3 (2015) 51-54
- [18] [www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance/](http://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance/) *The BIPM Kibble balance (watt balance)*
- [19] Special issue, *Watt and Joule Balances, the Planck Constant and the Kilogram*, Metrologia 51 (2014) no 2
- [20] R.S. Davis, P. Barat, M. Stock, *A brief history of the unit of mass: continuity of successive definitions of the kilogram*, Metrologia 53 (2016) A12-A18
- [21] B. Wood, C. A. Sanchez, R. G. Green, J. O. Liard, *A summary of the Planck constant determinations using the NRC Kibble balance*, Metrologia 54 (2017) 399-409



- [22] H. Bettin, S. Schlamminger, *Realization, maintenance and dissemination of the kilogram in the revised SI*, *Metrologia* 53 (2016) A1-A5
- [23] A. Possolo, S. Schlamminger, S. Stoudt, J. R Pratt, C J Williams, *Evaluation of the accuracy, consistency, and stability of measurements of the Planck constant used in the redefinition of the international system of units*, *Metrologia* 55 (2018) 29-37
- [24] [www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/](http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/) On the future revision of the SI./Key Documents Draft for Appendix 2 of the SI Brochure for the “Revised SI” CCM *Mise en pratique* of the definition of the kilogram
- [25] [www.bipm.org/en/bipm/mass/avogadro/](http://www.bipm.org/en/bipm/mass/avogadro/) International Avogadro Project
- [26] Special issue, *International determination of the Avogadro constant*, *Metrologia* 48 (2011) no 2
- [27] W.T. Chyla, *Projekt Avogadro (IAC) i redefinicja jednostki liczności materii*, *Wiadomości Chemiczne*, 66 (2012) 767-787
- [28] N. V. Abrosimov, D. G. Aref'ev, P. Becker, H. Bettin, A. D. Bulanov, M. F. Churbanov, S. V. Filimonov, V. A. Gavva, O. N. Godisov, A. V. Gusev, T. V. Kotereva, D. Nietzold, M. Peters, A. M. Potapov, H.J. Pohl, A. Pramann, H. Riemann, P.T. Scheel, R. Stosch, S. Wundrack, S. Zakel, *A new generation of 99.999% enriched  $^{28}\text{Si}$  single crystals for the determination of Avogadro's constant*, *Metrologia* 54 (2017) 599-609
- [29] K. Fujii, E. Massa, H. Bettin, N. Kuramoto, G. Mana, *Avogadro constant measurements using enriched  $^{28}\text{Si}$  monocrystals*, *Metrologia* 55 (2018) L1-L4
- [30] [www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/](http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/) On the future revision of the SI./Key Documents Draft for Appendix 2 of the SI Brochure for the “Revised SI” CCQM *Mise en pratique* of the definition of the mole
- [31] B. Taylor, T. Witt, *New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum Hall effects*, *Metrologia* 26 (1989) 47-62
- [32] P.J. Mohr, B.N. Taylor, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants:1998*, *Rev. Mod. Phys.* 72 (2000) 351-495
- [33] N. Fletcher, G. Rietveld, J. Olthoff, I. Budovsky, M. Milton, *Electrical Units in the New SI: Saying Goodbye to the 1990 NCSLI Measure Journ.* 9 (2014) 30-35
- [34] [www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/](http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/) On the future revision of the SI./Key Documents Draft for Appendix 2 of the SI Brochure for the “Revised SI” CCEM *Mise en pratique* for the definition of the ampere and other electric units in the SI
- [35] T. Quinn, *Temperature* (1990) Academic Press, London
- [36] H. Preston\_thomas, *The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*, *Metrologia* 27 (1990) 3-10
- [37] Renaot E., M.H. Valin, G. Bonnier, M. White, A. Van der Linden, G. Bairy, T. Kovacs, S. Nemeth, J. Bojkovski, R. Kuna, T. Weckström, J. Ivarsson, C. Rauta, F. Helgesen, A. Uytun, S. Ugur, J. Kryl, F. Adunka, J. Ronostaj, S. Duris, M. Anagnostou, E. Kokkini, A. Pauza, V. Augevicius, *Comparison of realizations of the triple-point of water; EUROMET project No 549*, *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science*, Zagreb-Croatia (2005) 1009–1016
- [38] [www.bipm.org/utills/en/pdf/CIPM/CIPM-2005EN.pdf](http://www.bipm.org/utills/en/pdf/CIPM/CIPM-2005EN.pdf) 94<sup>th</sup> meeting of CIPM(2005), Recommendation 2 (CI-2005): *Clarification of the definition of the kelvin, unit of thermodynamic temperature*
- [39] A. Peruzzi, R. Bosma, O. Kerkhof, R. Peter, M.D. del Campo Maldonado, M. Smid, D. Zvizdic, M.B. Nielsen, M. Anagnostou, E. Grudniewicz, M. Nedea, P. P. M. Steur, E. Filipe, I. Lobo, I. Antonsen, E. Renaot, T. Weckstrom, J. Bojkovski, E. Turzó-András, M. White, E. Tegeler, M. Dobre, J. Ranostaj, A. Kartal Dogan, V. Augevicius, A. Pokhodun and S. Simic, *Final Report on EUROMET.T-K7: Key comparison of water triple point cells*, *Metrologia* 46 (2009) Tech. Suppl. 03001
- [40] M de Podesta, *Rethinking the kelvin*, *Nature Physics*, 12 (2016) 104
- [41] B. Fellmuth, C. Gaiser, J. Fischer, *Determination of the Boltzmann constant – status and prospects*, *Meas. Sci. Technol.* 17 (2006) R145-159
- [42] <http://www.bipm.org/utills/common/pdf/CC/CCT/CCT27.pdf> Consultative Committee for Thermometry Report of the 17th Meeting (2014) Recommendation CCT T1
- [43] M. Moldover, R.M. Gavioso, J.B. Mehl, L. Pitre, M. de Podesta, J.T. Zhang, *Acoustic gas thermometry*, *Metrologia* 51 (2015) R1-R9
- [44] L. Pitre, F. Sparasci, L. Risegari, C. Guianvarc'h, C. Martin, M. E. Himbert, M. D. Plimmer, A. Allard, B. Marty, P. A. Guliano Albo, B. Gao, M. R. Moldover, J. B. Mehl, *New measurement of the Boltzmann constant  $k$  by acoustic thermometry of helium-4 gas*, *Metrologia* 54 (2017) 856-873
- [45] C. Gaiser, T. Zandt, B. Fellmuth, *Dielectric-constant gas thermometry*, *Metrologia* 52 (2015) S217-S226

- [46] C. Gaiser, B. Fellmuth, N. Haft, A. Kuhn, B. Thiele-Krivoi, T. Zandt, J. Fischer, O. Jusko, W. Sabuga, *Final determination of the Boltzmann constant by dielectric-constant gas thermometry*, Metrologia 54 (2017) 280-289
- [47] J. Qu, S.P. Benz, A. Pollarolo, H. Rogalla, W.L. Tew, R. White, K. Zhou, *Improved electronic measurement of the Boltzmann constant by Johnson noise thermometry* Metrologia 52 (2015) S242-S256
- [48] N. E. Flowers-Jacobs, A. Pollarolo, K. J. Coakley, A. E. Fox, H. Rogalla, W. L. Tew, S. P. Benz *A Boltzmann constant determination based on Johnson noise thermometry*, Metrologia 54 (2017) 730-737
- [49] [www.BIPM.org/cc/AllowedDocuments.jsp](http://www.BIPM.org/cc/AllowedDocuments.jsp) (2017)  
J. Fischer, *Task Group on the SI (TG-SI) Report to CCT*
- [50] [www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/](http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/) *On the future revision of the SI./Key Documents Draft for Appendix 2 of the SI Brochure for the "Revised SI" CCT Mise en pratique for the definition of the kelvin in the SI*
- [51] *Special Issue Focus on the Boltzmann Constant* Metrologia 52 (2015) vol. 2
- [52] M. de Podesta *The definition of the kelvin in the new SI; its rationale, implementation and implications*, XIII International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Zakopane (2016), invited lecture
- [53] J. Fischer, B. Fellmuth, C. Gaiser, T. Zandt, L. Pitre, F. Sparasci, M.D. Plimmer, M. de Podesta, R. Underwood, G. Sutton, G. Machin, R.M. Gavioso, D. Madonna Ripa, P.P.M. Steur, J. Qu, X.J. Feng, J. Zhang, M.R. Moldover, S.P. Benz, D.R. White, L. Gianfrani, A. Castrillo, L. Moretti, B. Darquié, E. Moufarej, C. Daussy, S. Briaudeau, O. Kozlova, L. Risegari, J.J. Segovia, M.C. Martin. D del Campo, *The Boltzmann project*, Metrologia 55 (2018) R1-R20
- [54] G. Machin, *The kelvin redefined*, Meas. Sci. Technol. 29 (2018) 022001 (11pp)
- [55] <http://www.bipm.com/utis/common/pdf/SI-statement.pdf> *Information for users about the proposed revision of the SI*
- [56] A. Szmyrka-Grzebyk, L. Lipiński, H. Manuszkie-wicz, *Wzorzec jednostki temperatury dla zakresu niskich temperatur w INTiBS PAN*, Krajowy Kongres Metrologii – KKM'2001, Warszawa (2001)
- [57] A. Szmyrka-Grzebyk, L. Lipiński, H. Manuszkie-wicz, A. Kowal, A. Grykałowska, D. Jancewicz, *Measuring Systems for Thermometer Calibration in Low-Temperature Range*, Intern. J Thermophys 32 (2011) 2466-2472
- [58] GUM, *Zarządzenie nr 20 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 28 marca 2001 r.* (Dz. Urz. Głównego Urzędu Miar Nr. 1, poz. 9) (2001)
- [59] K.D. Hill, A. Szmyrka-Grzebyk, L. Lipiński, Y. Hermie, L. Pitre, F. Sparasci, *CCT-K2.4: NRC/INTiBS/LNE-Cnam trilateral comparison of capsule-type standard platinum resistance thermometers from 13.8 K to 273.16 K*, Metrologia 49 (2012) Technical Suppl. 03005
- [60] A. Peruzzi, A. Szmyrka-Grzebyk, *Final report on EURAMET.T-K7.2: Bilateral comparison of water triple point cells*, Metrologia 49 (2012) Tech. Suppl. 03006



# Mechanizm BEH i związany z nim skalarny bozon



Wykład noblowski Francois Englerta  
(Wolny Uniwersytet w Brukseli, Belgia), 8 grudnia 2013<sup>1</sup>

## 1. Wprowadzenie: długo- i krótkozasięgowe oddziaływania

Fizyka, tak jak ją rozumiemy dzisiaj, próbuje interpretować różne zjawiska jako szczególne przejawy sprawdalnych praw ogólnych. Od swego początku w Renesansie, przede wszystkim dzięki rewolucyjnym ideom Galileusza, podejście takie okazywało się metodą wyjątkowo skuteczną; do tego stopnia, iż, po zdumiewających osiągnięciach z pierwszej połowy dwudziestego wieku, można było nawet wyrazić przypuszczenie, że wszystkie zjawiska, zachodzące poczynając od skali atomowej, aż po krańce obserwowanego wszechświata, podlegają tylko dwóm fundamentalnym i znanym prawom: klasycznej ogólnej teorii względności - einsteinowskiemu uogólnieniu newtonowskiej grawitacji – i kwantowej elektrodynamice, czyli kwantowej wersji maxwellowskiej teorii elektromagnetycznej.

Oddziaływania grawitacyjne i elektromagnetyczne są oddziaływaniami długozasięgowymi. Oznacza to, że działają one między obiektami które są jedne od drugich dowolnie bardzo oddalone. Postęp w zrozumieniu takiej fizyki stosowalnej do wielkich skal można z pewnością przypisać temu, że efekty takich oddziaływań można dostrzegać bez pośrednictwa wysoce skomplikowanych urządzeń technicznych. Odkrycie struktur subatomowych ujawniło jednak istnienie innych oddziaływań fundamentalnych, które są krótkozasięgowe, tzn. są pomijalnie słabe na dużych skalach odległości. We wczesnych latach sześćdziesiątych nie było jeszcze spójnej interpretacji teoretycznej krótkozasięgowych oddziaływań fundamentalnych: ani „oddziaływań słabych” odpowiedzialnych za rozpady radioaktywne ani „silnych oddziaływań” odpowiedzialnych za powstawanie struktur jądrowych.

Robert Brout i ja [1] oraz, niezależnie, Peter Higgs [2] skonstruowaliśmy mechanizm pozwalający ująć fundamentalne krótkozasięgowe oddziaływania w ramy teorii. Rober Brout odszedł w roku 2011 i zostawił mnie samego, bym opowiedział naszą historię. Wytlumaczę więc, w jaki sposób doszliśmy do zaproponowania tego mechanizmu i jak czyni on możliwym skonstruowanie spójnych wewnętrznie fundamentalnych teorii krótkozasięgowych oddziaływań oraz tworzenie się mas cząstek elementarnych. Stał się on kamieniem węgielnym Modelu Standardowego, a ostatnio został potwierdzony przez wspaniałe odkrycie – odkrycie w CERNie skalarnego bozonu, którego istnienie jest jego konsekwencją. Przekonało nas to, iż spójne sformułowanie oddziaływań krótkozasięgowych wymaga wspólnego pochodzenia zarówno długo-, jak i krótkozasięgowych oddziaływań.

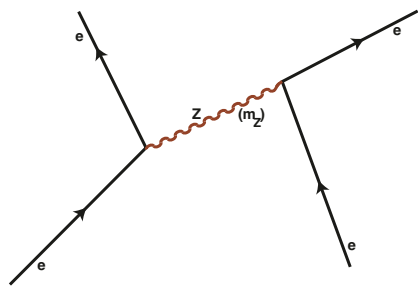
Choć zarówno klasyczna ogólna teoria względności i kwantowa elektrodynamika są teoriami długozasięgowych oddziaływań i są zbudowane w oparciu o bardzo szerokie symetrie, zwane „lokalnymi”, mają bardzo odmienne struktury: w odróżnieniu od klasycznej ogólnej teorii względności, długozasięgowa elektrodynamika kwantowa jest w pełni spójna na poziomie kwantowym i została na tym poziomie eksperymentalnie potwierdzona; w szczególności przez udane sprowadzenie chemii do znanej fizyki. Oczywista okoliczność, że dobra teoria oddziaływań krótkozasięgowych powinna być spójna jako teoria kwantowa, w sposób naturalny skłaniała nas do przyjęcia za model odpowiadających im oddziaływań długozasięgowych uogólnienia elektrodynamiki kwantowej znanego jako teoria Yanga–Millsa.

Kwantowymi składnikami fal elektromagnetycznych są „fotony” – bezmasowe elektrycznie obojętne cząstki podróżujące z prędkością światła. Konsekwen-

1. Opublikowano w języku polskim za zgodą Nobel Foundation  
©The Nobel Foudation 2013

cją ich bezmasowego charakteru jest to, że odpowiadające im fale mogą być spolaryzowane jedynie w kierunkach prostopadłych do kierunku swojej propagacji. Właściwości te są najwyraźniej zabezpieczone przez lokalną symetrię, gdyż symetria taka nie przeżywa jawnego włączenia do teorii wyrazów masowych. Teoria Yanga–Millsa jest zbudowana w oparciu o podobne symetrie lokalne, tylko rozszerzone tak, by dopuścić kilka oddziałujących bezmasowych kwantowych składników, zarówno neutralnych jak i naładowanych. Te bezmasowe obiekty są zwane wektorowymi bozonami cechowania (często po prostu bozonami cechowania).

Aby w ramach teorii Yanga–Millsa przetworzyć oddziaływania długozasięgowe w krótkozasięgowe, wystarczyłoby nadać bozonom cechowania masę, czyli zrobić coś, co jak właśnie powiedzieliśmy, jest najwyraźniej niedozwolone przez lokalne symetrie tej teorii. Porzucając na chwilę ten wątek, przypomnijmy najpierw, dlaczego cząstki masywne przenoszą w ogólności oddziaływania krótkozasięgowe.



Rys. 1. Masywna cząstka przenosząca oddziaływanie krótkozasięgowe.

Rysunek 1 przedstawia diagram Feynmana. Jego odwołujący się do intuicji wygląd skrywa ściśle określone matematyczne treści. Obrazuje on, jeśli przyjąć, że czas płynie od dołu do góry rysunku, rozpraszanie dwóch elektronów będące skutkiem wymiany masywnej cząstki oznaczanej  $Z$  o masie  $m_Z$ . Według fizyki klasycznej proces taki nie może zachodzić, gdyż pojawienie się cząstki  $Z$  pogwałciłoby zachowanie energii. Zgodnie z mechaniką kwantową jest on jednak dopuszczalny, jeśli przeciąg czasu, w trakcie którego energia nie jest zachowana, jest rzędu  $\hbar/mc^2$ . Proces pokazany na rysunku 1 reprezentuje w najniższym rzędzie rachunku zaburzeń oddziaływanie, którego zasięg jest ograniczony do odległości rzędu  $\sim \hbar/mc$ .

Jako że lokalne symetrie wyraźnie zabraniają wprowadzenia do teorii masywnych bozonów cechowania, zwracamy naszą uwagę na klasę teorii, w których stan [podstawowy] układu nie respektuje zasad symetrii, którym podlega dynamika. Zdarza się to często w fizyce statystycznej przemian fazowych [3]. Nie ma w tym nic zaskakującego, gdyż z reguły rozważania energetyczne pokazują, iż stan podstawowy lub nisko nad nim le-

żące stany wzbudzone układu wielu ciał wykazują uporządkowanie. Zmienna kolektywna, taka jak namagnesowanie, przybierając niezerową wartość oczekiwaną definiuje pewien parametr porządku, choć na mocy symetrii (we wspomnianej teorii Landaua wynikającej z izotropowości) zakodowanej w sformułowaniu teorii powinna ona zniknąć. Jest to przykład spontanicznego łamania symetrii SSB (*Spontaneous Symmetry Breaking*), które jest powszechne w statystycznej teorii przemian fazowych drugiego rodzaju. Czy masa bozonów cechowania mogłaby powstawać w wyniku analogicznego łamania symetrii? Pytanie to w sposób naturalny wynikło z przełomowej pracy Yoichiro Nambu, który pokazał [4–6], że efekt SSB można przenieść ze statystycznej teorii przemian fazowych do dziedziny relatywistycznej kwantowej teorii pola, stanowiącej matematyczne ramy analizy świata cząstek elementarnych.

Prowadzi to do jeszcze głębszego pytania: czy SSB może być czynnikiem powodującym przekształcanie się oddziaływań długozasięgowych przenoszonych przez bezmasowe pola cechowania w krótkozasięgowe oddziaływania przenoszone przez pola masywne, bez podważania dobrego kwantowego zachowania, które charakteryzuje najprostszą teorię Yanga–Millsa, czyli elektrodynamikę kwantową.

Jak zobaczymy, odpowiedzią na oba pytania jest „tak” pod warunkiem, że pojęcie SSB zostanie zastąpione bardziej subtelnym: mianowicie pojęciem mechanizmu BEH (czyli mechanizmem: Brouta, Englerta i Higgsa) [1,2]. Aby przygotować omówienie tego mechanizmu przypomnę najpierw, jak SSB można przenieść z teorii przemian fazowych na grunt relatywistycznej kwantowej teorii pola.

## 2. Spontaniczne łamanie symetrii

### 2.1. Spontaniczne łamanie symetrii przy przemianie fazowej

Rozpatrzmy układ materii skondensowanej, którego dynamika jest niezmiennicza względem operacji tworzących ciągłą grupę symetrii. Gdy temperatura spadnie poniżej krytycznej, symetria może się obniżyć z powodu przejścia układu do jakiejś fazy uporządkowanej. Złamanie wyjściowej symetrii w punkcie przemiany jest zawsze zdarzeniem nieciągłym, ale parametr porządku jako funkcja temperatury może narastać w sposób ciągły. W takim przypadku przemiana jest drugiego rodzaju.<sup>2</sup> Łamanie symetrii przy przemianie fazowej dru-

2. Dziś przemiany fazowe klasyfikuje się raczej jako pierwszego rodzaju i ciągłe (bez dzielenia tych drugich na drugiego rodzaju, trzeciego itp.) bo taka klasyfikacja lepiej pasuje do rzeczywistości (przyp. tłum.).

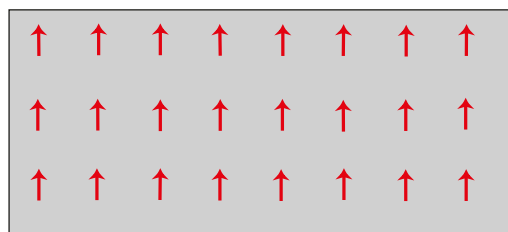
giego rodzaju charakteryzuje [zjawiska takie jak]<sup>3</sup> np. ferromagnetyzm, nadciekłość, czy nadprzewodnictwo.

Omówię najpierw ferromagnetyczną przemianę fazową, która ilustruje trzy ogólne cechy SSB w fazie niskoenetycznej; pojawiają się one w punkcie, w którym zachodzi przemiana. Są to: degeneracja stanu podstawowego, pojawienie się „modu bezmasowego”, w przypadku, gdy dynamika ma *ciągłą* grupę symetrii, oraz wystąpienie „modu masywnego” odzwierciedlającego „sztywność” parametru porządku.

Przy braku zewnętrznego pola magnetycznego i [przy pominięciu] efektów powierzchniowych, substancja ferromagnetyczna poniżej punktu Curie wykazuje globalną orientację namagnesowania, mimo iż dynamika układu jest w oczywisty sposób niezmiennicza względem obrotów: hamiltonian układu jest niezmienniczy względem działania pełnej grupy obrotów. Jest to właśnie SSB.

Układ wykazujący ferromagnetyzm jest zbudowany z mikroskopijnych atomowych magnesików (w uproszczonych modelach, takich jak model Heienberga, są nimi obiekty o spinie 1/2), których wzajemne oddziaływania starają się ustawić sąsiednie spiny równolegle. Globalna orientacja nie występuje w wysokich temperaturach, w których dominuje burzący porządek ruch termiczny. Poniżej krytycznej „temperatury Curie” dominującą rolę odgrywa natomiast energia i układ wykazuje globalne namagnesowanie: równoległe ustawienie sąsiednich spinów rozpropagowuje się, doprowadzając do makroskopowego namagnesowania. Wyróżnia ono pewien kierunek, który w nieskończonym, całkowicie izolowanym ferromagnetyku jest arbitralny. Łatwo można udowodnić, iż w przypadku układu nieskończonego każde dwie możliwe orientacje definiują dwa wzajemnie ortogonalne<sup>4</sup> stany podstawowe oraz, że lokalne wzbudzenia ponad tymi stanami podstawowymi są również wzajemnie ortogonalne. Cała przestrzeń Hilberta rozpada się tym samym na nieskończenie wiele rozłącznych przestrzeni Hilberta. To właśnie jest degeneracja stanu podstawowego (rysunek 2).

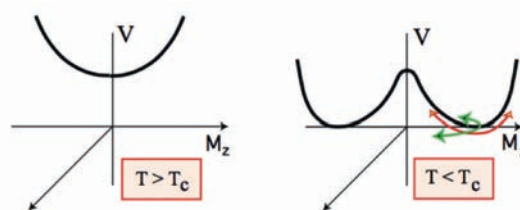
Termodynamiczny potencjał efektywny  $V$ , którego minimum, przy braku zewnętrznego pola magnetycznego, wyznacza namagnesowanie, jest pokazany na rysunku 3. Powyżej punktu Curie  $T_C$  namagnesowanie  $\vec{M}$  jest równe zero. Poniżej punktu Curie na wykresie potencjału na płaszczyźnie  $(V, M_z)$  pojawia się podwójne minimum, które w kierunkach  $M_x$  i  $M_y$  tworzy całą do-



Rys. 2. Klasyczne przedstawienie stanu podstawowego ferromagnetyka.

linę. Każdy punkt tej doliny definiuje jeden zdegenerowany stan podstawowy; wszystkie one odpowiadają tej samej wartości  $|\vec{M}|$ .

W ustalonym minimum, powiedzmy takim, w którym  $\vec{M} = M^z \vec{I}_z$ , krzywizna potencjału efektywnego jest miarą odwrotności podatności [magnetycznej], która wyznacza energię fluktuacji o nieskończenie długiej fali. Energia takiej fluktuacji jest analogiem masy cząstki w relatywistycznej fizyce cząstek. Odwrotność podatności jest zerowa w kierunkach poprzecznych w stosunku do [wektora  $\vec{M}$ ] parametru porządku i dodania w kierunku doń równoległym. Podatność w kierunku poprzecznym daje więc „bezmasywny” mod poprzeczny charakterystyczny dla złamanej symetrii: są to „fale spinowe”, których kwantowymi składnikami są oddziałujące bozony zwane „magnonami”. Podatność „podłużna”, tj. w kierunku równoległym do  $\vec{M}$ , odpowiada „masywnym” modom podłużnym (mogą one być niestabilne), które odpowiadają fluktuacjom parametru porządku. W odróżnieniu od modu bezmasowego, który istnieje tylko przy spontanicznym złamaniu symetrii ciągłej, gdy istnieje cała dolina [minimów], mod masywny towarzyszy każdemu SSB, ciągłemu albo dyskretnemu, i jest miarą sztywności uporządkowanej struktury.



Rys. 3. Kształt termodynamicznego potencjału efektywnego ferromagnetyka powyżej i poniżej punktu Curie.

Struktura [potencjału] pokazana na rysunku 3 jest typowa dla wielu przemian fazowych drugiego rodzaju i prowadzi do podobnych konsekwencji. W przypadku nadprzewodnictwa zachodzi jednak dodatkowe zjawisko. Symetria fazy kwantowej jest złamana przez kondensat par elektronowych związanych siłą przyciągającą pochodzącą od wymiany fononu [pomiędzy elektronami znajdującymi się] w pobliżu powierzchni Fermiego. Kondensacja prowadzi do powstania na po-

3. sformułowania w nawiasach kwadratowych [ ] pochodzą od tłumacza (przyp. red.).

4. W sensie iloczynu skalarnego w p. Hilberta.

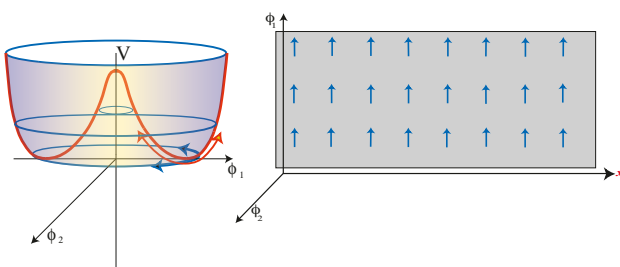


wierzchni Fermiego przerwy w widmie energii. W nadprzewodnikach neutralnych przerwę tę wypełniłby mod bezmasowy, co prowadziłoby do wszystkich ogólnych cech charakteryzujących SSB. Jednak występowanie długi zasięgowych oddziaływań coulombowskich modyfikuje ten obrazek. *Mod bezmasowy przestaje istnieć*: staje się on częścią oscylacji gęstości elektronów, czyli „masywnego” modu plazmowego. Jak stanie się to jasne dalej, jest to prototyp mechanizmu BEH [7,4,8]

## 2.2. Spontaniczne łamanie symetrii w ramach w teorii pola

Spontaniczne łamanie symetrii zostało wprowadzone do relatywistycznej kwantowej teorii pola przez Nambu [4] w analogii do teorii BCS nadprzewodnictwa. Problemem badanym przez Nambu oraz Nambu wraz z Jona-Lasinio [6] było spontaniczne łamanie symetrii  $U(1)$  działającej na pola bezmasowych fermionów, będącej skutkiem dowolności wyboru względnej (chiralnej) fazy pomiędzy rozprzęgniętymi lewymi i prawymi składowymi tych pól. Chiralnie niezmiennicze oddziaływania nie mogą w ramach rachunku zaburzeń spowodować, że fermion stanie się masywny, ale mogą być tego przyczyną, jeśli występuje (nieperturbacyjny) kondensat fermionów: kondensat taki łamie bowiem spontanicznie symetrię chiralną. Nambu [5] pokazał, że takiemu spontanicznemu łamaniu symetrii towarzyszy istnienie bezmasowego pseudoskalara. Bezmasowość ta jest interpretowana jako granica chiralna właściwości pionu (którego masa, mierzona skalą mas hadronów, jest bardzo mała). Taka interpretacja pionu stanowiła przełom w naszym rozumieniu fizyki oddziaływań silnych. Bezmasowy pseudoskalar jest teoriopolem odpowiednikiem „bezmasowego” modu fal spinowych w ferromagnetyzmie. W ramach modelu przedstawionego w pracy [6] pokazane zostało, iż SSB prowadzi także do powstania masywnego skalarnego bozonu - odpowiednika „masywnego modu”, który przy przemianie fazowej „mierzy” sztywność parametru porządku w fazie, w której symetria jest spontanicznie złamana.

Znaczenie tego, iż z SSB wiąże się istnienie zarówno bozonu bezmasowego, jak i masywnego dobrze ilustruje prosty model zaproponowany przez Jeffrey'ego Goldstone'a [9]. Pokazany na rysunku 4 potencjał



Rys. 4. Spontaniczne łamanie symetrii w modelu Goldstone'a.

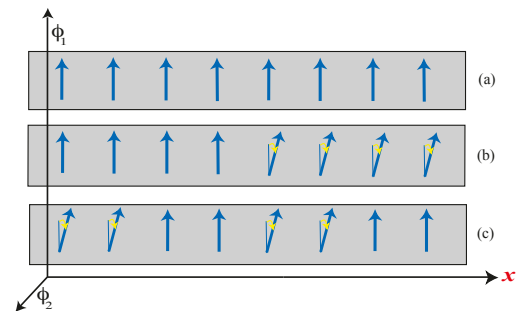
$V(\phi_1, \phi_2)$  [tego modelu] jest niezmienniczy względem obrotów w płaszczyźnie rzeczywistych pól  $(\phi_1, \phi_2)$ , lub, co równoważne, jest niezmienniczy względem tworzących grupę  $U(1)$  zmian fazy zespolonego pola  $\phi = (\phi_1 + i\phi_2)/\sqrt{2}$ . Symetria ta jest spontanicznie złamana przez wartość oczekiwaną  $\langle \phi \rangle$ , którą pole  $\phi$  przyjmuje w minimum potencjału wyróżniając jakiś kierunek na płaszczyźnie  $(\phi_1, \phi_2)$ , powiedzmy [kierunek pola]  $\phi_1$ . Czyli, pisząc  $\phi = \langle \phi \rangle + \varphi$ ,

$$\phi_1 = \langle \phi \rangle + \varphi_1, \quad (2.1)$$

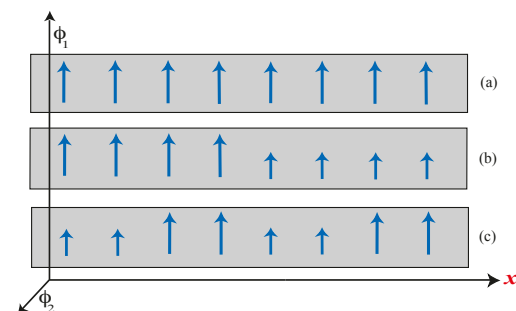
$$\phi_2 = \varphi_2. \quad (2.2)$$

Jeśli pola  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  są małe, możemy utożsamić kwantowe fluktuacje  $\varphi_1$  wspinające się po zboczach potencjału z modem masywnym, który mierzy sztywność wybranego przez wartość  $\langle \phi_2 \rangle$  stanu podstawowego ze spontanicznie złamaną symetrią, a fluktuację kwantową  $\varphi_2$  w prostym kierunku (w kierunku doliny) z bezmasowym modem charakterystycznym dla SSB.

Sens tych fluktuacji jest zilustrowany na rysunkach 5 i 6, pokazujących odpowiednio klasyczne mody falowe  $\varphi_2$  i  $\varphi_1$  na klasycznym tle  $\langle \phi_2 \rangle$ . Odpowiadające im bozony: bezmasowy i masywny są kwantowymi składnikami pokazanych fal.



Rys. 5. Bezmasowy mod  $\varphi_2$  Nambu-Goldstone'a.



Rys. 6. Masywny skalarny mod  $\varphi_1$ .

Rysunek 5a pokazuje schematycznie stan o najniższej energii („próżnię”) tego układu: stała, niezerowa wartość  $\langle \phi_2 \rangle$  pola  $\phi_1$  przenika całą czasoprzestrzeń. Z kolei rysunek 5b obrazuje wzbudzenie polegające na obróceniu połowy pól w płaszczyźnie  $(\phi_1, \phi_2)$ . Kosztuje to tylko tyle energii, ile jest zlokalizowane w pobliżu powierzchni rozdzielającej obrócone pola od wybranej

próżni. Dzięki SSB obrócenie wszystkich pól rzeczywistości nie wymaga w ogóle żadnego wydatku energii: obrócenie takie jest w istocie zastąpieniem wybranej początkowo próżni przez inną, jej równoważną, o tej samej energii. Jest to właśnie charakterystyczna dla SSB *degeneracja próżni*. Rysunek 5c ma ilustrować falę pola  $\varphi_2$ . Porównując rysunki 5c i 5b widzimy, że gdy długość fali rośnie nieograniczenie jej energia spada do zera i w tej granicy można ją uważać za zmiany pola wzdłuż doliny potencjału z rysunku 4. Kwantowe wzbudzenia niesione przez falę osiągają więc przy zerowym pędzie zerową energię i stąd masa  $m_{\varphi_2}$  jest równa zeru. Rysunek 5 można łatwo uogólnić na przypadki bardziej skomplikowanego spontanicznego łamania ciągłych symetrii. Bezmasowe bozony są więc ogólną cechą takiego SSB, cechą którą ujawniło odkrycie przez Nambu [5], że bezmasowy pion jest konsekwencją spontanicznego łamania symetrii chiralnej. Bozony takie będą dalej nazywane bezmasowymi bozonami Nambu–Goldstone’a (bozony NG). Formalne dowody potwierdzające powyższą prostą analizę można znaleźć w literaturze [10].

Rysunek 6 obrazuje w podobny sposób [jak poprzednie rysunki] klasyczną falę odpowiadającą fluktuacjom pól wokół ich wartości próżniowych. Wzbudzenia takie w kierunku  $\varphi_1$  reprezentują fluktuacje parametru porządku  $\langle\varphi_1\rangle$ . Są one efektem objętościowym i ich energia nie znika, gdy długość takiej fali rośnie nieograniczenie. Kwantowe wzbudzenia odpowiadające  $\varphi_1$  są zatem masywne. Na rysunku 4 odpowiadają one wspinaniu się [pola] po stromiznie potencjału. Argumenty te znowu można rozciągnąć na bardziej ogólne warianty SSB (także na przypadki łamania symetrii dyskretnej), tak by uwzględnić fluktuacje parametru porządku. Niezmienniczość lorentzowska wymaga, by takie masywne wzbudzenia były cząstkami skalarnymi.<sup>5</sup> Były one obecne już w pracy [6] i będą ogólnie nazywane *masywnymi bozonami skalarnymi*.

Podsumowując: pole  $\varphi_2$  opisuje bozony bezmasowe,  $\varphi_1$  masywne, a „parametr porządku”  $\langle\varphi_1\rangle$  można traktować, jak kondensat bozonów  $\varphi_1$ .

### 3. Mechanizm BEH

Powyższe rozważania odnoszą się tylko do spontanicznego łamania ciągłych symetrii globalnych. Globalność oznacza, że operacje symetrii nie zależą od punktu  $x$  czasoprzestrzeni. Np. symetriami modelu Goldstone’a są globalne obroty pól z rysunku 5a w płaszczyźnie  $(\varphi_1, \varphi_2)$  o kąty niezależne od czasoprzestrzennego punktu  $x$  (są one przemieszczeniami wzdłuż doliny z rysunku 4): obroty takie nie wymagają żadnego wydatku

energii i po prostu przebiegają przez zdegenerowane próżnie. Teraz zaś omówimy, co się dzieje z SSB, gdy globalna symetria stanie się symetrią lokalną.

#### 3.1. Co się dzieje z bozonami Nambu–Goldstone’a i masy bozonów wektorowych

Uogólniamy globalną symetrię  $U(1)$  modelu Goldstone’a do symetrii lokalnej. Teraz kąt obrotu w płaszczyźnie  $(\varphi_1, \varphi_2)$  z rysunku 5 lub, równoważnie, przemieszczenie wzdłuż doliny z rysunku 4, może być wybrany niezależnie w każdym punkcie  $x$  czasoprzestrzeni bez żadnego wydatku energii i bez jakichkolwiek fizycznych efektów. Aby tak mogło być, trzeba wynaleźć nowe pole, przekształcające się tak, by kasować energię, która by była wytworzona przez takie przemieszczenie w jego nieobecności. Pole takie, to „wektorowe pole cechowania”  $A_\mu$ . Musi ono być polem wektorowym, aby kompensować energię we wszystkich kierunkach przestrzennych i musi przekształcać się w odpowiedni sposób przy obrotach w płaszczyźnie  $(\varphi_1, \varphi_2)$ ; przekształcenie takie nazywa się przekształceniem cechowania i prowadzi do olbrzymiej dowolności w wyborze pola  $A_\mu$  odpowiadającej dowolnym „wewnętrznym” obrotom w różnych punktach przestrzeni. Konsekwencją takiej symetrii cechowania jest to, że fale są spolaryzowane w kierunkach prostopadłych do kierunku swojego rozchodzenia się, a ich kwantowe składniki muszą być wprowadzone jako bezmasowe obiekty.

Lokalna symetria  $U(1)$  jest najprostszą teorią z cechowaniem; jest to grupą symetrii elektrodynamiki kwantowej. Przy lokalnym uogólnieniu modelu Goldstone’a (tzw. operacji jego „przecechowania”) wprowadzenie potencjału z rysunku 4 bardzo istotnie wpływa na „potencjał elektromagnetyczny”  $A_\mu$ .

Tak jak w modelu Goldstone’a przedstawionym w paragrafie 1.2, Yang–Millsowska faza ze spontanicznie zlaną symetrią realizuje się, gdy występuje niezerowa wartość oczekiwana pola  $\phi = (\varphi_1 + i\varphi_2)/\sqrt{2}$ , którą wybieramy w kierunku pola  $\varphi_1$ . Tak więc

$$\phi = \langle\phi\rangle + \varphi, \quad (3.1)$$

z  $\varphi_1 = \langle\phi\rangle + \varphi_1$  i  $\varphi_2 = \varphi_2$ . Tak jak poprzednio wydaje się, iż polom  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  odpowiadają bezmasowy bozon NG i masywny skalar bozon.

Jednak spojrzenie na rysunek 5 pokazujący mod NG od razu ujawnia, iż rysunki 5b i 5c różnią się od rysunku 5a tylko o lokalne obroty i wobec tego w lokalnym modelu Goldstone’a apokazane na nich konfiguracje pól są ze sobą powiązane. Nie są one związane z wydatkiem energii, a zatem bozon NG znikł: odpowiadające mu fluktuacje w kierunku doliny są tylko innym (przetransformowanym) sposobem scharakteryzowania tej samej niezmienniczej względem cechowania

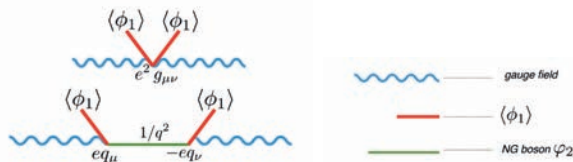
5. Tzn. o spinie zero – przyp. tłumacza.

próżni. Nietrudno zauważyć, iż argument ten pozostaje słuszny w przypadku każdej lokalnej cechowania, a zatem *bozony NG nie przeżywają operacji podniesienia globalnej spontanicznie złamanej symetrii do rangi symetrii lokalnej*. Próżnia nie jest już po takiej operacji zdegenerowana i, mówiąc ściśle, nie ma czegoś takiego, jak spontaniczne łamanie symetrii cechowania. Powód, dla którego faza, w której istnieje niezerowa wartość oczekiwana pola skalarnego jest [mimo to] często nazywana fazą z SSB jest taki, że korzysta się z rachunku zaburzeń, by przy zerowej wartości sprzężenia do pola cechowania (czyli, gdy spontaniczne łamanie globalnej symetrii zachodzi) wybrać konfigurację pola skalarnego; ten *preferowany* wybór jest jednak tylko wygodnym wyborem.

Nieistnienie bozonów NG jest więc natychmiastową konsekwencją lokalnej symetrii. Argument powyższy [11] został znacznie później sformalizowany [12], ale formalne dowody nie oparte bezpośrednio na niezmienniczości próżni względem operacji cechowania podano [13,14] już w roku 1964.

Można już teraz jakościowo zrozumieć konsekwencje zniknięcia bozonów NG. Oczywiście nie można oczekiwać, że stopnie swobody reprezentowane przez pole NG  $\phi_2$  mogą zniknąć. Z powodu jego sprzężenia z polem cechowania należy spodziewać się, że gdy znika bozon NG, związane z nim stopnie swobody zostają jakoś przeniesione na pole cechowania. Może tak się dziać jedynie poprzez uzupełnienie poprzecznych polaryzacji pola cechowania o polaryzację podłużną. Jak już wcześniej wspominałem, istnienie takiej polaryzacji jest jednak wzbronione, gdy pole jest bezmasowe. Zatem sprzężenie „niedoszłego” bozonu NG do pola cechowania musi czynić to pole masywnym! Na tym właśnie polega istota mechanizmu BEH.

Powyższe jakościowe rozważania można ukonkretnić [1] rozpatrując diagramy Feynmana obrazujące propagację pola cechowania  $A_\mu$  w próżni, w której występuje niezerowa wartość oczekiwana pola skalarnego, powiedzmy  $\langle \phi_1 \rangle \neq 0$ . Propagacja ta jest pokazana w najniższym rzędzie na rysunku 7 (czas na nim biegnie horyzontalnie); oddziaływanie pola  $A_\mu$  z kondensatem  $\langle \phi_1 \rangle$  skutkuje polaryzacją próżni. Pierwszy diagram pokazuje oddziaływanie pola cechowania z kondensatem, które jest lokalne, drugi natomiast oddziaływanie nielokalne powodowane propagacją bozonu NG.  $e$  jest tu stałą sprzężenia wektorowego pola cechowania do mate-



Rys. 7. Oddziaływanie pola cechowania z kondensatem.

rii,  $q_\mu$  zaś jest czteropędem ( $q_0$  jest energią, a  $\vec{q}$  pędem),  $q^2 = q_0^2 - \vec{q}^2$ ; tensor  $g_{\mu\nu}$  ma niezerowe elementy tylko, gdy  $\mu = \nu$ : 1, -1, -1, -1. Oba diagramy dodają się do siebie dając

$$\Pi_{\mu\nu} = (g_{\mu\nu} - q_\mu q_\nu / q^2) \Pi(q^2), \quad (3.2)$$

gdzie

$$\Pi(q^2) = e^2 \langle \phi_1 \rangle^2. \quad (3.3)$$

Drugi czynnik we wzorze (3.2) nie znika, gdy  $q^2 = 0$ . W kwantowej teorii pola oznacza to, że pole cechowania uzyskało masę

$$M_V^2 = e^2 \langle \phi_1 \rangle^2. \quad (3.4)$$

Pierwszy czynnik jest, gdy  $q^2 = M_V^2$ , rzutem  $g_{\mu\nu}$  na przestrzeń rozpinaną przez polaryzację, która, jak to było jakościowo wyjaśnione wyżej, musi być trójwymiarowa, gdy pole wektorowe jest masywne. Poprzeczność tego czynnika (tj. jego znikanie, gdy zostanie on zwięzony z czterowektorem  $q^\mu$ ) jest przejawem tzw. „tożsamości Warda”, która wyraża to, że lokalna symetria cechowania nie jest w istocie złamana; czynnik ten jest analogiczny do podobnego czynnika występującego w elektrodynamice kwantowej - istotny fakt, który skomentujemy w następnym paragrafie.

Uogólnienie powyższych wyników na bardziej skomplikowane symetrie prowadzi (przy rzeczywistych polach) do macierzy masy

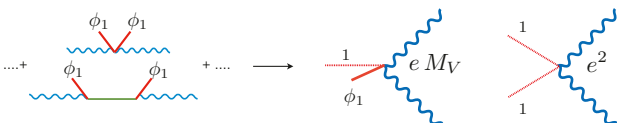
$$(M_V^2)^{ab} = -e^2 \sum_{A,B,C} \langle \phi^B \rangle T^{aBC} T^{bCA} \langle \phi^A \rangle, \quad (3.5)$$

w której  $T^{aBC}$  jest rzeczywistym antysymetrycznym macierzowym generatorem stowarzyszonym z polem cechowania  $A_\mu^a$ , a  $\langle \phi^A \rangle$  oznacza wartość oczekiwaną [rzeczywistego pola skalarnego  $\phi^A$ ]. W takich przypadkach niektóre z pól cechowania mogą pozostać bezmasowe. Weźmy jako przykład, zamiast niezmienniczości modelu Goldstone’a na okręgu w płaszczyźnie  $(\phi_1, \phi_2)$ , niezmienniczość na sferze w trójwymiarowej przestrzeni  $(\phi_1, \phi_2, \phi_3)$ , złamaną przez  $\langle \phi_1 \rangle \neq 0$ . W tym przypadku z obrotami na sferze są stowarzyszone trzy pola cechowania i podczas gdy pola  $A_\mu^2$  i  $A_\mu^3$  stają się masywne, pole  $A_\mu^1$  pozostaje bezmasowe. Można to zrozumieć w następujący sposób: gdyby symetria była globalna, generatory obrotów wokół kierunków 2 i 3 przemieszczałyby  $\langle \phi_1 \rangle$  co, jak na rysunku 5, skutkowałoby istnieniem odpowiednich bozonów NG; związane z nimi stopnie, gdy symetria jest lokalna, przenoszą się na masywne pola cechowania  $A_\mu^2$  i  $A_\mu^3$ , umożliwiając im przybieranie trzeciej polaryzacji. Generator obrotów wokół kierunku 1 nie wpływa na wartość oczekiwaną  $\langle \phi_1 \rangle \neq 0$  i obroty takie nie powodują zatem, w przypadku, gdy symetria jest globalna, powstania bozonu NG i z tego powodu pole  $A_\mu^1$  pozostaje bezmasowe.

Mechanizm BEH może zatem w ramach jednej teorii unifikować długo- i krótkozasięgowe oddziaływania, pozostawiając niezłamaną pewną podgrupę przekształceń symetrii (np. obroty wokół kierunku 1): stowarzyszone z tą podgrupą pola cechowania pozostają bezmasowe.

### 3.2. Los masywnego bozonu skalarnego

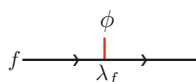
Rzut oka na rysunek 5 wyjaśnia, że rozciąganie (klasycznego) pola skalarnego jest niezależne od lokalnych obrotów pola  $\phi$  w płaszczyźnie  $(\phi_1, \phi_2)$ . Przekłada się to na to, że wartość bezwzględna pola  $\phi$  jest niezmiennicza względem cechowania. Skalarne bozony przeżywają zatem operację „przecechowania” symetrii i ich klasyczna analiza jest identyczna z podaną przy okazji omawiania modelu Goldstone’a w paragrafie 1.2. Sprzężenie skalarne bozonu  $\phi_1$  do masywnego pola cechowania wynika z rysunku 7, przyjmując, że czas biegnie na nim horyzontalnie, i korzystając ze związku (3.1), otrzymuje się dwa wierzchołki pokazane na rysunku 8, na którym ciężkie linie faliste po prawej stronie reprezentują propagatory masywnych pól cechowania. Sprzężenie odpowiadające wierzchołkowi wynika ze wzoru (3.4).



Rys. 8. Sprzężenie skalarne bozonu  $\phi_1$  do masywnych bozonów cechowania.

### 3.3. Masy fermionów

Sprzęgnijmy pola Yanga–Millsa do bezmasowych fermionów w sposób respektujący symetrię Yanga–Millsa. Sprzężenie takie zachowuje symetrię chiralną bezmasowych fermionów. Powstanie mas fermionów wymaga więc SSB. W teorii Nambu spontanicznego łamania symetrii chiralnej prowadzi to do istnienia bozonów NG, które tu są „zjadane” przez masywne pola cechowania. Można to osiągnąć odpowiednio sprzęgając do fermionów pola skalarne, których wartości oczekiwane łamią symetrię. Mechanizm powstawania mas fermionów jest zobrazowany na rysunku 9.



Rys. 9. Powstawanie mas fermionów  $m_f = \lambda_f \langle \phi \rangle$  dzięki ich sprzężeniu  $\lambda_f$  do pola skalarnego  $\phi$ .

### 3.4 Dlaczego taki mechanizm jest niezbędny?

Wzór (3.2) jest wyrazem tego, że, w przeciwieństwie do wyrazu masowego, wprowadzanego „ręcznie” *ab initio*, masa powstająca dzięki mechanizmowi BEH nie

niszczy lokalnej symetrii. Wzór ten pozostaje słuszny także w wyższych rzędach rachunku zaburzeń i ma tę samą formę, co tensor polaryzacji próżni w elektrodynamice kwantowej. Tak jak w tamtej teorii oznacza ona, że w cechowaniach kowariantnych propagator wektorowego bozonu cechowania tłumi kwantowe fluktuacje, co wskazuje, że teoria jest renormalizowalna [15]. Jest jednak wysoce nietrywialnym zagadnieniem wykazanie, iż przyczynki od niefizycznych cząstek nie psują tej postaci, i stąd udowodnienie kwantowej spójności we wszystkich rzędach [rachunku zaburzeń takiej teorii] jest bardzo trudnym problemem. To że rzeczywiście jest ona spójna zostało pokazane przez ’t Hoofta i Veltmana [16] (zob. także pracę [17]).

Kwantowa spójność mechanizmu BEH jest głównym powodem odniesienia przezeń sukcesu. Wyniki precyzyjnych eksperymentalnych pomiarów mogły zostać przewidziane teoretycznie i przewidywania te zostały rzeczywiście potwierdzone. Wewnętrzna spójność mechanizmu BEH odegrała też istotną rolę przy analizie produkcji skalarnego bozonu w LHC i jego rozpadów, co umożliwiło potwierdzenie szczegółowej słuszności tego mechanizmu.

### 3.5. Dynamiczne łamanie symetrii

Będące źródłem masy wektorowych bozonów cechowania łamanie symetrii może być także powodowane formowaniem się kondensatu fermionów. Nazywa się to *dynamicznym łamaniem symetrii*. Jeśli [w ten sposób] złamana spontanicznie symetria globalna zostanie przez wprowadzenie pól cechowania podniesiona do rangi symetrii lokalnej, z fizycznego spektrum tak jak poprzednio znikną bezmasowe bozony NG i ich wchłonięcie przez pola cechowania spowoduje masywność tychże. W odróżnieniu od łamania symetrii przez kondensat pola skalarnego, w takim przypadku, jeśli teoria jest renormalizowalna, jest [jednak] bardzo trudno zapewnić masywność fermionów.

### 3.6 Teoria elektroslaba i Model Standardowy

Sukcesem mechanizmu BEH, który robi największe wrażenie, jest teoria elektroslaba, czyli teoria oddziaływań słabych i elektromagnetycznych [18] zastosowana do wszystkich cząstek modelu standardowego, tj. do wszystkich znanych cząstek. Są nimi: a) fermiony, których listę przedstawia rysunek 10, b) wektorowe bozony cechowania  $\gamma$ ,  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$  przenoszące elektromagnetyczne i słabe oddziaływania, c) osiem „gluonów” – wektorowych bozonów cechowania związanych z grupą  $SU(3)$  „koloru”, przenoszących oddziaływania silne oraz *last but not least* d) jeden masywny skalarny bozon, który został niedawno odkryty i utożsamiony ze skalarzem przewidywanym przez mechanizm BEH.



particles (charge)					
$e (-1)$	$\nu_e (0)$	$u u u (\frac{2}{3})$	$d d d (-\frac{1}{3})$	+ antiparticles	
$\mu (-1)$	$\nu_\mu (0)$	$c c c (\frac{2}{3})$	$s s s (-\frac{1}{3})$		
$\tau (-1)$	$\nu_\tau (0)$	$t t t (\frac{2}{3})$	$b b b (-\frac{1}{3})$		

Rys. 10. Fermionowe składniki modelu standardowego.

Pierwszy rząd rysunku 10 zajmują podstawowe składniki atomu, czyli elektron oraz trzy „górne” i trzy „dolne” kwarki, z których, gdy są związane gluonami, zbudowany jest proton i neutron; do cząstek tych dołączone jest neutrino elektronowe. Drugi i trzeci rząd rysunku 10 zostały skompletowane jako przewidywania teoretyczne [19], [20]; hipotezy te zostały następnie potwierdzone eksperymentalnie. Kolor został wprowadzony w latach sześćdziesiątych. Cząstki występujące na rysunku 10 w pierwszej i drugiej kolumnie są nazywane leptonami. Do każdego fermionu z tabelki z rysunku 10 należy oczywiście dołożyć odpowiadający mu antyfermion.

Wszystkie fermiony są chiralne i ich chiralne składowe mają inne grupowe liczby kwantowe. Są więc one, tak jak wektorowe bozony cechowania, bezmasowe, gdy nie działa mechanizm BEH, tj. gdy nie występuje kondensat pola skalarnego. Istnienie kondensatu  $\langle \phi \rangle \neq 0$  czyni masywnymi bozony  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$  i wszystkie fermiony z wyjątkiem trzech chiralnych neutrin, które w konwencjonalnym modelu standardowym nie mają swoich odpowiedników o przeciwnej chiralności. Foton i gluony pozostają bezmasowe; [oddziaływania przenoszone przez] te ostatnie stają się jednak krótkozasięgowe z powodu – jak się to zwykle przedstawia – silnie nieperturbacyjnej próżni (mechanizm za to odpowiedzialny jest w jakiś sposób dualny do mechanizmu BEH).<sup>6</sup>

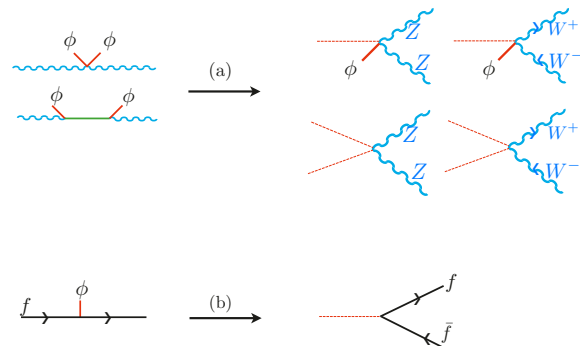
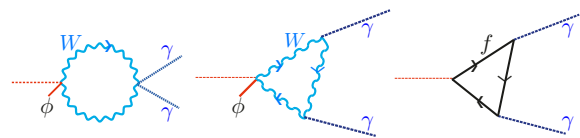
Odkrycie bozonów  $W$  i  $Z$  w roku 1983 oraz precyzyjne pomiary testujące spójność modelu standardowego jako teorii kwantowej potwierdziły poprawność mechanizmu [BEH]; [mimo to] nie było jednak jasne, czy jest to skutek dynamicznego łamania symetrii, czy skutek istnienia cząstki, którą przy rozpatrywanej skali energii można uznać za elementarny bozon.

6. Mechanizm BEH Modelu Standardowego może także spowodować, że neutrina też staną się masywne, jeśli wprowadzić dodatkowe pola prawochiralnych neutrin lub zrezygnować (co przy obecnym rozumieniu statusu tej teorii nie jest krokiem bardzo dramatycznym) ze ścisłej renormalizowalności tej teorii. Jest to konieczne, ponieważ, jak już wiadomo, neutrina nie są bezmasowe. (przyp. tłum.).

#### 4. Odkrycie

Model standardowy przewiduje istnienie jednego skalarnego bozonu  $\phi$  (oznaczanego czasem  $H$ ). Sprzęga się on do masywnych bozonów  $W$  i  $Z$ . Wynika to z rysunku 8, a sprzężenie to jest zobrazowane na rysunku 11a. Sprzężenie tego bozonu do elementarnych fermionów wynika w podobny sposób ze sprzężeń pokazanych na rysunku 9, tak jak to pokazuje rysunek 11b. Jego sprzężenie do bezmasowego fotonu jest czysto kwantowym efektem, nawet w najniższym rzędzie wymagającym pętli, takich jak to zostało pokazane na rysunku 12.

Przebiegający pod granicą francusko-szwajcarską tunel skrywający LHC jest zaznaczony na fotografii pokazanej na rysunku 13. Tunel ten, tworzący okrąg o długości 27 km, którego wewnątrz jest pokazane na fotografii 14, mieści dwie rury, otoczone chłodzonymi nadciekłym helem nadprzewodzącymi elektromagnesami prowadzącymi; rurami tymi w przeciwnych kierunkach bieżą protony. Fotografie 15 i 16 przedstawiają detektory ATLAS i CMS, które są umieszczone w komorach na przeciwległych końcach średnicy [okręgu tworzo-

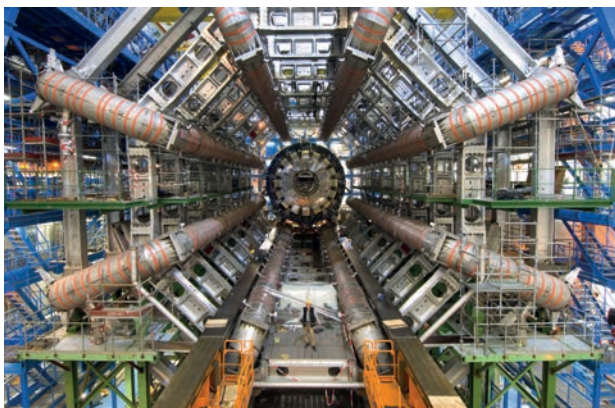
Rys. 11. Sprzężenie skalarnego bozonu  $\phi$  do masywnych bozonów cechowania i do elementarnych fermionów.Rys. 12. Sprzężenie skalarnego bozonu  $\phi$  do fotonów.

Rys. 13. Szkic umiejscowienia LHC.

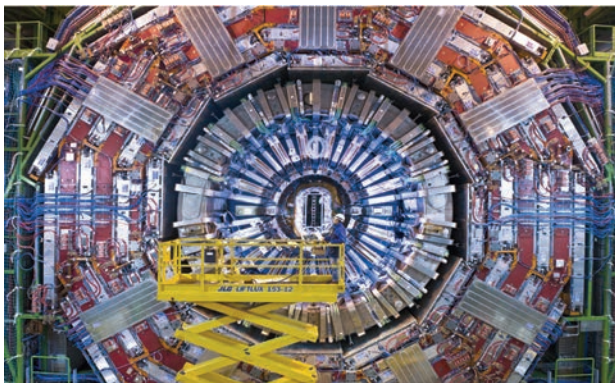




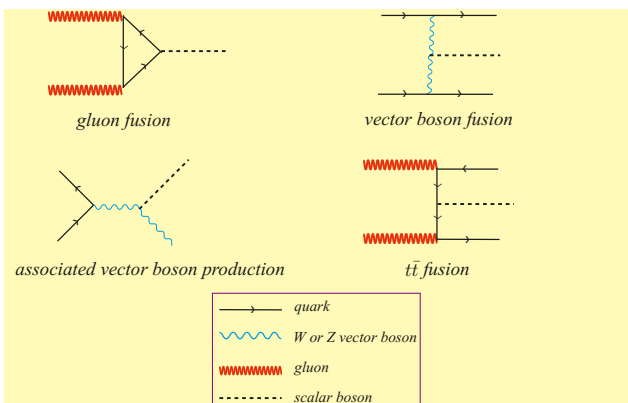
Rys. 14. Dipole magnesów LHC.



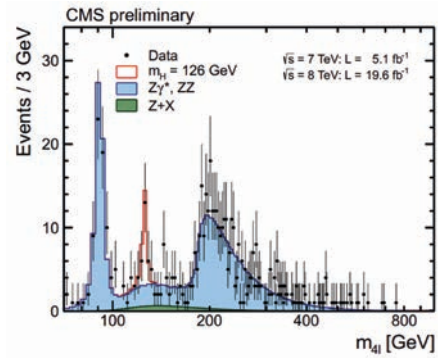
Rys. 15. Detektor ATLAS.



Rys. 16. Detektor CMS.



Rys. 17. Możliwe procesy produkcji skalaru modelu standardowego.



Rys. 18. Rozpad skalarnego bozonu na 4 leptony zachodzący poprzez rozpad na dwa Z.

nego przez tunel]. Zachodzące w ich wnętrzach zderzenia [przeciwbieżnych protonów] zostały wykorzystane przede wszystkim do zarejestrowania i zidentyfikowania skalarnego bozonu modelu standardowego (i ewentualnie innych [podobnych bozonów]). Z końcem roku 2012 zderzenia proton-proton zachodziły z częstością niemal  $10^9$  na sekundę, a energia protonów osiągnęła 8 TeV. Przy tych energiach do produkcji skalarnego bozonu mogą przyczyniać się wszystkie kwarki z rysunku 10 i wiążące je gluony. Dominujący produkcję proces jest zobrazowany na rysunku 17.

Rysunek 18 przedstawia, jako przykład danych zebranych przez CMS i ATLAS, dane dotyczące rozpadu [skalarnego bozonu] na 4 leptony, otrzymane przez grupę CMS przy końcu cyklu eksperymentalnego z 2012 roku. Obszar zaciemniony na niebiesko jest oczekiwanym tłem, tj. tworzą go te rozpad, które przewidywałby model standardowy, gdyby, przy danej całkowitej masie [niezmienniczej czterech leptonów], nie było przyczynku od rozpadów skalarnego bozonu. Czerwona krzywa jest miarą przyczynku, który mógłby być skutkiem rozpadów skalaru na dwa bozony wektorowe Z, które następnie – jak to zostało potwierdzone przez dalszą analizę – rozpadły się na leptony. Należy tu zauważyć, że tylko jedno Z jest rzeczywiste – drugie jest „wirtualne, co oznacza, że taki taki rozpad jest wzbroniony przez zachowanie energii, ale mimo to w teorii kwantowej może dawać przyczynę. Zbadanie innych kanałów rozpadu oraz analiza spinów pokazują, iż charakterystyki odkrytej cząstki są zgodne z właściwościami skalaru przewidywanego przez model standardowy i mającego masę  $m_H \approx 125$  GeV. Brak innych cząstek przy podobnych energiach, w połączeniu ze zgodnością danych z analizą opartą na uwzględniających pętle diagramach Feynmana, świadczą o elementarnym charakterze odkrytej cząstki, przynajmniej w badanym zakresie energii. Jest to pierwsza w ogóle odkryta bezspinowa cząstka elementarna [o dodatniej parzystości]. Jej odkrycie podnosi kwestię istnienia supersymetrii złama-

nej przy osiągalnych aktualnie energiach, choć jak dotąd nie ma innych danych, które by świadczyły na korzyść tej hipotezy.

Elementarny charakter skalara eliminuje od razu wiele modeli dynamicznego łamania symetrii i podnosi kwestię możliwej ekstrapolacji [przewidywań teoretycznych] poza zakres osiągalnych obecnie energii, do energii rzędu skali Plancka, przy których efekty grawitacyjne mogłyby odgrywać dominującą rolę. Omówienie tych spekulacji nie wchodzi jednak w zakres tego wystąpienia.

#### Literatura

- [1] F. Englert i R. Brout, „Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons”, *Phys. Rev. Letters* **13** (1964), 321.
- [2] P. W. Higgs, „Broken symmetries and the masses of gauge bosons”, *Phys. Rev. Letters* **13** (1964), 508.
- [3] L. D. Landau, „On the theory of phase transitions I”, *Phys. Z. Sowjet.* **11** (1937) 26 [JETP **7** (1937) 19].
- [4] Y. Nambu, „Quasi-particles and gauge invariance in the theory of superconductivity”, *Phys. Rev.* **117** (1960), 648.
- [5] Y. Nambu, „Axial vector current conservation in weak interactions”, *Phys. Rev. Letters* **4** (1960) 380.
- [6] Y. Nambu i G. Jona-Lasinio, „Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity I, II”, *Phys. Rev.* **122** (1961) 345, **124** (1961) 246.
- [7] P.W Anderson, „Random-phase approximation in the theory of superconductivity”, *Phys. Rev.* **112** (1958) 1900.
- [8] P.W Anderson, „Plasmons, gauge invariance and mass”, *Phys. Rev.* **130** (1963) 439.
- [9] J. Goldstone, „Field theories with ‘superconductor’ solutions II”, *Il Nuovo Cimento* **19** (1961) 154.
- [10] J. Goldstone, A. Salam i S. Weinberg, „Broken symmetries”, *Phys. Rev.* **127** (1962) 965.
- [11] F. Englert, „Broken symmetry and Yang-Mills theory”, in *50 years of Yang-Mills Theory*, pod red. G. ’t Hoofta, World Scientific (2005) ss. 65-95, hep-th/0406162.
- [12] S. Elitzur, „Impossibility of spontaneously breaking local symmetris”, *Phys. Rev.* **D12** (1975) 3978.
- [13] P. W. Higgs, „Broken symmetries, massless particles and gauge fields” *Phys. Lett.* **12** (1964) 132.
- [14] G. S. Guralnik, C. R. Hagen i T. W. B. Kibble, „Global conservation laws and massless particles” *Phys. Rev. Letters* **13** (1964) 585.
- [15] F. Englert, R. Brout i M. Thiry, „Vector mesons in presence of broken symmetry”, *Il Nuovo Cimento* **43A** (1966) 244; F. Englert, *Proceedings of the 1997 Solvay Conference, Fundamental Problems in Elementary Particle Physics*, Interscience Publishers J. Willey and Sons, s. 18.
- [16] G. ’t Hooft, „Renormalizable lagrangians for massive Yang-Mills fields”, *Nucl. Phys.* **B35** (1971) 167; G. ’t Hooft i M. Vetman „Regularization and renormalization of gauge fields”, *Nucl. Phys.* **B44** (1972) 189.
- [17] B. W. Lee i J. Zinn-Justin, „Spontaneously broken gauge symmetries”, *Phys. Rev.* **D5** (1972) 3121, 3137, 3155.
- [18] S. L. Glashow, „Partial-symmetries of weak interactions”, *Nucl. Phys.* **22** (1961) 579; S. Weinberg, „A model of leptons”, *Phys. Rev. Letters* **19** (1967) 1264; A. Salam, *Proceedings of the 8th Nobel Symposium, Elementary Particle Physics*, pod red. N. Svartholma (Almquist i Wiksell, Sztokholm) s. 367.
- [19] S. L. Glashow, J. Iliopoulos i L. Maiani, „Weak interactions with lepton-hadron symmetry”, *Phys. Rev.* **D2** (1970) 1285.
- [20] M. Kobayashi i T. Maskawa, „CP Violation in the renormalizable theory of weak interactions”, *Prog. Theor. Phys.* **49** (1973) 652.

Przekład Piotr Chankowski



# Obchodzenie twierdzenia Goldstone'a

Wykład noblowski Petera Higgsa (Uniwersytet w Edynburgu, Szkocja), 8 grudnia 2013<sup>1</sup>

Moja opowieść zaczyna się w roku 1960, w którym zostałem zatrudniony jako wykładowca fizyki matematycznej na uniwersytecie w Edynburgu. Zanim podjąłem obowiązki zostałem zaproszony do komitetu organizacyjnego pierwszej Letniej Szkoły Fizycznej Uniwersytetów Szkockich. Poproszono mnie bym był gospodarzem Szkoły w lipcu; moim głównym zadaniem miało być kupowanie wina, które miało być serwowane każdego wieczora podczas kolacji i doglądanie jego dostaw.

Wśród studentów uczestniczących w Szkole było czterech, którzy dyskutując o fizyce teoretycznej długo w nocy pozostawali w ogólnej sali koledżu Newbattle Abbey (będącej kryptą dawnego opactwa) i rzadko wstawali na porę, by zdążyć na pierwsze wykłady. Byli to doktorzy N. Cabibbo (z Rzymu), S.L. Glashow (z CERNu) oraz panowie D.W. Robinson (z Oksfordu) i M.J.G. Veltman (z Utrechtu). Po latach Cabibbo powiedział mi, że ich dyskusje były zakrapiane winem zabezpieczonym podczas kolacji, które chowali w wielkim zegarze znajdującym się w krypcie.

Jako że miałem inne rzeczy do roboty (m.in. zabezpieczanie wina) nie uczestniczyłem w tych dyskusjach i z tego powodu nie dowiedziałem się o napisanej wcześniej pracy Glashowa na temat elektroslabej unifikacji.

## Złamane symetrie

Pierwszego roku pracy w charakterze wykładowcy poszukiwałem jakiegoś programu badawczego, którym by warto było się zająć. W trakcie poprzednich czterech lat spędzonych w Londynie nieco się pogubiłem w fizyce cząstek i zacząłem się interesować kwantową grawitacją. Od czasów studenckich fascynowała mnie symetria byłem więc zdziwiony przybliżonymi symetriami (które dziś nazywamy symetriami zapachowymi) fizyki cząstek.

Wówczas, w roku 1961, przeczytałem prace Nambu i Goldstone dotyczące modeli łamania symetrii w fizyce cząstek; modele te były oparte na analogii z nadprzewodnictwem. (Model Nambu był wzorowany na teorii Bardeena, Coopera i Schriefera wykorzystującej kondensację Bosego par elektronowych; Goldstone zaś wykorzystywał pola skalarne mające indukujący kondensację Bosego potencjał o kształcie butelki wina, taki jak we wcześniejszej teorii Ginzburga–Landaua). To co wydało mi się szczególnie pociągające, to koncepcja *spontanicznie* złamanej symetrii: takiej, która jest ścisłą symetrią podstawowej dynamiki, ale która wydaje się być łamana w obserwowanych zjawiskach z powodu asymetryczności stanu podstawowego (czyli w kwantowej teorii pola tzw. próżni).

W owym czasie większość teoretyków nie poświęcała specjalnej uwagi teoriom Nambu i Goldstone'a. Kwantowa teoria pola, mimo sukcesów elektrodynamiki kwantowej, wyszła z mody: nie radziła sobie ani z silnymi, ani ze słabymi oddziaływaniami.

Fizyka materii skonensowanej była zaś powszechnie postrzegana jako zupełnie odrębny obszar. Victor Weisskopf (jak wspomniał R. Brout) podczas seminarium w Cornell w 1961 r. miał powiedzieć:

„Fizycy od cząstek są obecnie tak zdesperowani, że muszą czerpać z nowych idei pojawiających się w fizyce układów wielu ciał, takich jak teoria BCS. Może coś z tego wyjdzie.”

## Twierdzenie Goldstone'a

W realizacji programu Nambu istniała pewna przeszkoda. Nambu pokazał był, w jaki sposób spontaniczne złamanie symetrii chiralnej może prowadzić do powstania mas cząstek o spinie 1/2, takich jak proton i neutron, ale jego model przewidywał także, w sprzeczności z danymi doświadczalnymi, istnienie neutralnych bezmasowych cząstek o spinie zero (piony?). (Jak to zauwa-

1. Opublikowano w języku polskim za zgodą Nobel Foundation ©The Nobel Foundation 2013.



zył Weinberg, cząstki takie dominowałyby w wypromieniowywaniu energii przez gwiazdy.) Goldstone zaś podał argument, że takie bezmasowe cząstki muszą zawsze być rezultatem wzbudzeń [pola]<sup>2</sup> wokół dna potencjału o kształcie butelki od wina.

W roku 1962, w praca Goldstone'a, Salama i Weinberga zatytułowana „Broken Symmetries” przyniosła dowód „twierdzenia Goldstone'a”, mówiącego, że jeśli lagrangian jawnie lorentzowsko niezmienniczej kwantowej teorii pola jest niezmienniczy względem jakiejś ciągłej symetrii to albo stan próżni jest niezmienniczy albo muszą istnieć bezspinowe cząstki o zerowej masie. Twierdzenie to zdawało się kłaść kres programowi Nambu.

### Czy można obejść twierdzenie Goldstone'a?

W roku 1963 Phil Anderson, teoretyk zajmujący się materią skondensowaną pokazał, że w nadprzewodniku dzięki długozasięgowemu oddziaływaniu coulombowskiemu, mod Goldstone'a staje się masywnym modem „plazmonowym” i że mod ten jest po prostu podłużnym partnerem poprzecznych modów elektromagnetycznych, które także są masywne. Anderson uczynił też uwagę, że „Trudność związana z goldstonowską zerową masą nie jest poważna, bo przypuszczalnie możemy ją skasować z (zrównoważyć?) podobnym problemem zerowej masy yang-millsowskiej.” Nie pokazał jednak, że twierdzenie Goldstone'a ma jakieś ograniczenia i *nie* przedyskutował żadnego modelu relatywistycznego, więc teoretycy od cząstek, takcy jak ja, przyjmowali jego uwagę sceptycznie.

W marcu 1964 roku Abe Klein i Ben Lee wysunęli myśl, że nawet w relatywistycznych teoriach pewien związek, który był kluczowy w dowodzie twierdzenia Goldstone'a, może być modyfikowany o dodatkowy człon, tak jak w teoriach materii skondensowanej. W lipcu jednak Wally Gilbert (który właśnie przerzucał się z fizyki teoretycznej na biologię molekularną, w której pracując zdobył później nagrodę Nobla z chemii) wykluczył występowanie tego członu jako łamiącego niezmienniczość Lorentzowską.

W tym to właśnie punkcie miała miejsce moja interwencja.

### Jak obejść twierdzenie Goldstone'a

Pracę Gilberta przeczytałem 16 lipca 1964 roku – opublikowana była ona miesiąc wcześniej, ale w tych czasach numery *Physical Review Letters* przychodziły na uniwersytet w Edynburgu drogą morską – i byłem nią rozczar-

rowany gdyż oznaczała, iż nie można uniknąć twierdzenia Goldstone'a.<sup>3</sup> Ale przez następny weekend zacząłem sobie przypominać, że już gdzie indziej widziałem podobne pozorne pogwałcenie niezmienniczości Lorentzowskiej: nie gdzie indziej, tylko w kwantowej elektrodynamice takiej, jak ją formułował Julian Schwinger.

Elektrodynamika kwantowa jest niezmiennicza względem przekształceń cechowania i cechowanie musi zostać ustalone, przed wprowadzeniem dobrze określonego formalizmu kwantowego. Modnym sposobem realizowania tego było wybieranie cechowania Lorentza, które jest jawnie zgodne ze niezmienniczością relatywistyczną. Cechowanie to ma jednak pewne niezadawalające właściwości i to skłoniło Schwingera do przedkładania nad nie cechowania Coulomba, które prowadzi do pozornego konfliktu z relatywistyką. Niemniej, było dobrze wiadomo, że wybór ten nie prowadzi do żadnej niezgodności przewidywań fizycznych z teorią względności.

Już w roku 1962 Schwinger opublikował był pracę, w której rozprawił się z powszechnym poglądem, że to sama niezmienniczość względem cechowania wymaga, by foton był bezmasowy. Pokazał, przykładowe właściwości teorii z cechowaniem i masywnymi „fotonami”, ale nie przedstawił szczegółów prowadzącej do tego dynamiki.

W trakcie weekendu 18–19 lipca uświadomiłem sobie, iż sposób, w jaki Schwinger formułował teorie z cechowaniem podważał aksjomaty wykorzystane przy dowodzie twierdzenia Goldstone'a. Zatem teorie z cechowaniem mogły ocalić program Nambu.

W następnym tygodniu napisałem o tym krótki artykuł. 24 lipca wysłałem do go *Physical Review Letters*, gdzie został przyjęty do druku.

W tym czasie wypisałem już (klasyczne) równania pola najprostszego modelu, jaki zdołałem wymyślić, ilustrującego [tę możliwość], będącego rezultatem wprowadzenia oddziaływania elektromagnetycznego do najprostszego skalarnego modelu Goldstone'a. Było jasne, że w tym modelu bezmasowy mod Goldstone'a stawał się podłużną poaryzacją masywnego „fotonu” o spinie 1, tak jak to sugerował Anderson.

Moje druga krótka praca zawierająca zwięzły opis tego modelu została wysłana do *Physics Letters* 31 lipca. Została ona odrzucona. Redaktor (z CERNu) zaproponował bym rozwinął jeszcze bardziej tę ideę i napisał kompletne sprawozdanie do *Il Nuovo Cimento*.

Byłem tym oburzony: wydawało mi się, że recenzent nie zrozumiał istoty pracy. (Później kolega, który wrócił z miesięcznego pobytu w CERNie, powiedział mi, iż

2. Wyrazy w nawiasach kwadratowych pochodzą od tłumacza (przyp. red.).

3. Raczej: konsekwencji twierdzenia Goldstone'a (przyp. tłum.).

tamtejsi teoretycy nie uważali, że jest ona ważna dla fizyki cząstek). Wydawało mi się także dziwne, że pierwsza praca została zaakceptowana, a jej bardziej fizyczna kontynuacja nie.

Postanowiłem uzupełnić pracę pewnymi uwagami dotyczącymi fizycznych konsekwencji i wysłać poprawioną wersję za Atlantykę do *Physical Review Letters*. Wśród dodanych uwag była następująca: „Warto zauważyć, że zasadniczą cechą tego rodzaju teorii jest przewidywanie istnienia niekompletnych multipletów skalarnych i wektorowych bozonów.”

*Physical Review Letters* otrzymało poprawioną pracę 31 sierpnia. Została przyjęta do druku. Recenzent poprosił mnie o skomentowanie jej związku z pracą Englerta i Brouta, która została opublikowana w tym samym czasie (redakcja otrzymała ją 22 czerwca). Do tego momentu nie byłem świadom ich pracy, ale dodałem do mojej pracy odpowiedni przypis, gdy tylko otrzymałem jej kopię. Dwadzieścia lat później, na konferencji w roku 1984, spotkałem Nambu, który zdradził mi, iż to on był recenzentem obu tych prac.

### Postscriptum

Minęło trochę czasu, nim prace Englerta i Brouta oraz moja (a także praca Guralnika, Hageny i Kibble'a, opublikowana przez nich nieco później) znalazły uznanie.

Moja dłuższa praca (z roku 1966) została napisana jesienią 1965 r. w Chapel Hill w Północnej Carolinie, gdzie dzięki memu zainteresowaniu kwantową grawitacją spędziłem naukowy urlop zaproszony przez Bryce'a DeWitta. Jej preprint który wysłałem Freemanowi Dy-

sonowi spotkał się z pozytywnym odzewem: Dyson zaprosił mnie do wygłoszenia seminarium w Instytucie Studiów Zaawansowanych w Princeton. Tam, w marcu 1966 roku stanąłem przed słuchaczami, wśród których byli teoretycy od aksjomatycznej kwantowej teorii pola, nadal przekonani, iż od twierdzenia Goldstone'a nie może być wyjątków.

Następnego dnia wygłosiłem seminarium na Harvardzie (zorganizowane przez Stanley'a Desera) dla innego sceptycznie nastawionego audytorium, w którym zasiadał Wally Gilbert. I to jakoś przetrzymałem. Po seminarium Shelly Glashow pochwalił mnie za wymyślenie „ładnego modelu”, ale nie dostrzegł jego znaczenia dla jego własnej teorii elektrosłabej – okazja została stracona!

Nasza szóstka, tj my, którzy opublikowaliśmy prace w roku 1964, mieliśmy nadzieje, podobnie jak Nambu, że zastosujemy nasze idee do złamanej symetrii zapachowej oddziaływań silnych. To jednak nie działało. Właściwe ich zastosowanie znaleźli Weinberg i Salam dopiero w roku 1967.

Jeszcze cztery lata minęły zanim Gerard 't Hooft, kontynuując program Veltmana udowodnił renormalizowalność takich teorii<sup>4</sup> i następne dwa, nim odkrycie tzw. prądów neutralnych pokazało, iż elektrosłaba unifikacja Glashowa była poprawna. A w roku 1976 Ellis, Gaillard i Nanopoulos z CERNu przekonali eksperymentatorów, iż warto szukać masywnych bezspinowych bozonów przez przewidywanych przez teorię.

---

4. Tzn. takich jakie zaproponował Weinberg – przyp. tłum.



---

# Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego

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

## GRUDZIEŃ 2018

**Kraków.** 18 grudnia 2018 w Collegium Maius UJ odbyło się uroczyste podpisanie trójstronnego porozumienia pomiędzy Uniwersytetem Jagiellońskim, Narodowym Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS, a Hochschule Niederrhein-Uniwersytetem Nauk Stosowanych w Krefeld oraz Instytutem Promieniowania Synchrotronowego w Tajlandii. Jest to kolejna międzynarodowa współpraca dotycząca rozwoju synchrotronu. Sygnatariuszami dokumentu byli Prof. Dr. Hans-Henning von Grünberg – prezydent niemieckiej jednostki, Prof. Wng. Cmdr. Dr. SarawutSujitjorn – dyrektor tajlandzkiego instytutu oraz prorektor ds. badań naukowych i funduszy strukturalnych UJ – prof. dr hab. Stanisław Kistryn. Honorowych gości powitał dyrektor NCPS SOLARIS – prof. dr hab. Marek Stankiewicz.

Celem powołanego konsorcjum jest budowa nowej linii badawczej, a dokładnie - wspólne zaprojektowanie oraz wytwarzanie komponentów i oprogramowania planowanej linii eksperymentalnej i jej stacji badawczej. Linia spektroskopii absorpcyjnej promieniowania rentgenowskiego będzie dostarczać fotony o szerokim zakresie energii, co pozwoli przeprowadzać pomiary na krawędziach absorpcji wielu pierwiastków. Stacja badawcza będzie zatem przeznaczona do badań materiałowych, zarówno o charakterze podstawowym, jak i aplikacyjnym.

Zagraniczni partnerzy krakowskiego synchrotronu to doświadczeni badacze, wykorzystujący od wielu lat tę zaawansowaną technikę badawczą. Tajlandzki instytut jest operatorem SiamPhotonLaboratory, czyli pierwszego synchrotronu w tym azjatyckim kraju. Z kolei stronę niemiecką reprezentowali przede wszystkim przedstawiciele tamtejszego Instytutu Badań Powierzchniowych. Liderem i głównym inwestorem projektu jest Uniwersytet w Krefeld, któremu NCPS SOLARIS zagwarantuje preferencyjny dostęp do przyszłej linii badaw-

czej. W przeważającej części (75%) aparatura służyć będzie polskiemu środowisku naukowemu i udostępniana będzie na drodze otwartych konkursów. Jak podkreśla społeczność użytkowników, budowa linii w synchrotronie SOLARIS będzie źródłem znaczących korzyści naukowych w wielu kluczowych obszarach badań stosowanych, przyczyniając się również do bezpośredniego rozwoju przedsiębiorstw.

Udostępnienie nowej linii eksperymentalnej w Centrum SOLARIS powinno nastąpić w perspektywie dwóch lat.

## STYCZEŃ 2019

**Kraków.** 2 stycznia 2019 Polskie Towarzystwo Fizyczne objęło patronatem honorowym dwa organizowane cyklicznie wydarzenia edukacyjne dla młodzieży: *Ogólnopolski Konkurs Fizyczny „Lwiątko”* (16. edycja organizowana przez Akademię Młodych Fizyków) oraz *Eksperyment Łańcuchowy* (7. edycja organizowana przez Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ).

**Świat.** 8 stycznia 2019 Międzynarodowa Unia Astronomiczna (IAU) ogłosiła plan ogólnoswiatowych akcji związanych z astronomią, które zostaną przeprowadzone w roku 2019. Początek akcji został zainicjowany już w styczniu w formie „globalnego pikniku astronomicznego” zatytułowanego: „100 Hours of Astronomy 2.0”. Rok 2019 będzie obfitował w wiele innych ciekawych inicjatyw.

Jak na razie w ramach IAU100 zarejestrowano ponad 700 wydarzeń, które odbędą się w 72 krajach (w tym w Polsce), przy czym liczba ta będzie rosła w kolejnych tygodniach.

**Warszawa.** 14 stycznia 2019 w ramach konwersatorium im. Jerzego Pniewskiego i Leopolda Infelda odbyło się seminarium dr Agaty Cygan z Uniwersytetu Mikołaja

Kopernika w Toruniu, Laureatki Nagrody im. prof. Stefana Pieńkowskiego za rok 2018. Seminarium poprzędziło uroczyste wręczenie nagrody przez jej fundatora dra Marka Pieńkowskiego. W czasie wykładu, zatytułowanego: „ULTRA-ACCURATE FREQUENCY-BASED SPECTROSCOPY IN AN OPTICAL CAVITY”, przedstawiona została jednowymiarowa metoda spektroskopowa CMDS (cavity mode-dispersion spectroscopy) oparta na częstotliwościowym pomiarze dyspersyjnego przesunięcia modów wnęki optycznej. Technika ta jest oparta na pomiarze tylko jednej wielkości fizycznej - częstości, który może być obecnie zrealizowany z dokładnością względną sięgającą  $10^{-18}$ . Dzięki temu prezentowana metoda jest dokładniejsza od wszystkich innych technik spektroskopowych i stwarza możliwość łatwego odniesienia mierzonego widma do atomowego wzorca częstości. Wśród licznych potencjalnych zastosowań najważniejsze dotyczą współczesnych badań atmosfery. W tym przypadku nawet niewielkie błędy systematyczne danych służących do interpretacji pomiarów mogą prowadzić do sprzecznych wniosków. Opracowana metoda może być również kluczowa dla metrologii, bardzo dokładnych pomiarów struktury molekuł i ilościowego stosunku izotopów, badań atmosfer egzoplanet i poszukiwania pozaziemskiego życia, a także do testowania elektrodynamiki kwantowej oraz poszukiwania zjawisk wykraczających poza Model Standardowy.

**Warszawa.** 17 stycznia 2019 w Gmachu Fizyki Politechniki Warszawskiej odbyła się okolicznościowa sesja upamiętniająca stulecie powstania Towarzystwa Fizycznego w Warszawie, które w roku 1920 przekształcone zostało w Oddział Warszawski Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Sesję zorganizowano w tym samym gmachu, w którym 100 lat temu powstało Towarzystwo Fizyczne w Warszawie. Wspomniane w sesji zebranie organizacyjne Towarzystwa miało miejsce 13 stycznia 1919 roku w Zakładzie Fizycznym Politechniki Warszawskiej. Warto w tym miejscu dodać, że statut Towarzystwa przyjęto 28 stycznia tego samego roku.

Organizatorami sesji, która spotkała się z żywym zainteresowaniem środowiska fizyków warszawskich, studentów oraz przedstawicieli nauk pokrewnych, były: Wydział Fizyki PW oraz Oddział Warszawski PTF. Wśród blisko 250 obecnych gości byli m.in. JM rektor Uniwersytetu Warszawskiego prof. Katarzyna Chałasińska-Macukow, JM rektor Politechniki Warszawskiej, prof. Włodzimierz Kurnik, prezes Stowarzyszenia Elektryków Polskich dr inż. Piotr Szymczak i wielu innych.

Sesję otworzył Dziekan Wydziału Fizyki PW prof. Mirosław Karpierz, który po powitaniu gości przekazał głos animatorowi sesji prof. Jerzemu Garbarczykowi,

który w swoim krótkim wystąpieniu przypomniał, że zarówno Towarzystwo Fizyczne w Warszawie, jak i Polskie Towarzystwo Fizyczne powstały w Gmachu Fizyki PW przy ulicy Koszykowej. Zakomunikował również, że w 2020 roku w Gmachu Fizyki PW zostanie otwarty Nadzwyczajny Zjazd Fizyków Polskich związany z obchodami stulecia powstania PTF.

Głównym punktem okolicznościowej sesji był referat prof. Andrzeja Kajetana Wróblewskiego pt. „Zanim powstało Polskie Towarzystwo Fizyczne”. W swoim wykładzie prof. Wróblewski przybliżył okoliczności powstania PTF, przytaczając wiele nieznanych szerzej faktów z historii fizyki w Warszawie. Niespodzianką było pokazanie prawdopodobnie najwcześniejszej fotografii audytorium w gmachu fizyki. Wzmiankowane zdjęcie pochodzi z Tygodnika Ilustrowanego datowanego na grudzień 1915 – patrz fotografia poniżej. Odczyt zainspirował obecnych do licznych pytań i interesującej debaty. Podczas dyskusji przewodniczący OW PTF prof. Andrzej Wymolek podkreślił historyczne związki łączące fizyków z ulicy Hożej (UW) i Koszykowej (PW) od początku istnienia Towarzystwa Fizycznego w Warszawie.



GABINET FIZYCZNY W POLITECHNICIE. WYKŁAD PROF. MARYANA GROTOWSKIEGO. Fot. Saryusz Wołak

Po zakończeniu części oficjalnej w Auli Gmachu Fizyki dyskusje kontynuowano przy lampce wina podczas spotkania towarzyskiego uczestników sesji (fot. Tomasz Pietrzak).



LUTY 2019

**Zakopane-Kraków.** W dniach 4-8 lutego 2019 odbyły się warsztaty dla młodych naukowców zatytułowane „Winter Workshop on Complex Systems 2019” (<http://wwwcs2019.org/>). W trakcie warsztatów, które co roku są organizowane w innym miejscu, małe grupy doktorantów i post-doców pracują nad wybranymi projektami badawczymi, które (co jest głównym celem warsztatów) przeradzają się później w długoterminową współpracę międzynarodową. Ostatniego dnia uczestnicy prezentują swoje pomysły. W tym roku prezentacje odbyły się 8 lutego 2019 w Krakowie na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH.

**Poznań.** 21 lutego 2019 na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu odbyło się seminarium dra Susmita Saha z Department of Materials, ETH Zurich, Zurich, Switzerland and Paul Scherrer Institut z Villigen ze Szwajcarii zatytułowane: „Skyrmion Confinement and Damping Modulation in Magnetic Thin Films”. Seminarium rozpoczęło cykl wykładów na Wydziale Fizyki poświęconych badaniom materiałów 2D.

**Warszawa.** 25 lutego 2019 odbyło się konwersatorium im. Jerzego Pniewskiego i Leopolda Infelda w czasie którego wygłoszone zostało seminarium Prof. Claudii Draxl, „Einstein profesor” z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Humboldta w Berlinie, zatytułowane: „From electronic-structure theory to data-driven science”. Profesor Draxl kieruje grupą teorii ciała stałego, a Jej zainteresowania naukowe koncentrują się wokół tzw. spektroskopii teoretycznej (opis oddziaływania materii z promieniowaniem) oraz badań materiałowych między innymi w ramach projektu NOMAD (Novel Materials Discovery), którego jednym z celów jest poszukiwanie nowoczesnych materiałów o zadanych własnościach poprzez analizę statystyczną dużych baz danych zawierających wyniki symulacji komputerowych.

**Poznań.** 26 lutego 2019 w ramach seminarium Instytutu Akustyki odbył się odczyt mgra Dawida Niemca zatytułowany: „Kryminalistyczna weryfikacja mówcy w ujęciu klasycznym i współczesnym”. Celem wystąpienia było przybliżenie zarówno klasycznego ujęcia problematyki kryminalistycznej weryfikacji mówcy przy użyciu zestawu narzędzi składającego się na metodę językowo-pomiarową, jak i bardziej współczesnego podejścia do prezentowanego zagadnienia. W czasie referatu zostały przedstawione wyzwania jakim aktualnie stawiają czoła zarówno praktycy fonoskopii, jak i badacze zajmujący się tematyką dźwięku w kryminalistyce od strony akademickiej.

MARZEC 2019

**Poznań.** 6 marca 2019 w sali Rady Wydziału prof. Deji Akinwande z Texas University w Austin wygłosił seminarium zatytułowane: „Adventures with 2D Materials: From Flexible Devices to Atomic Memories and Electronic Tattoo Sensors”, które było częścią cyklu referatów poświęconych tematyce badań materiałów dwuwymiarowych (2D). Więcej informacji można znaleźć pod adresem: (<http://zon8.physd.amu.edu.pl/~miran/seminars.html>).

**Poznań.** W dniach 8-9 marca 2019 na Wydziale Fizyki UAM w Poznaniu odbyła się XV Ogólnopolska Konferencja Filozofii Fizyki pt.: „DOSWIADCZENIE W NAUCE” której patronat objęły Sekcja Filozofii Przyrody Polskiego Towarzystwa Filozoficznego oraz Poznański Oddział Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Więcej informacji na temat programu można znaleźć pod adresem:  
<http://www.fizyka.amu.edu.pl/dla-pracownika/content-wf-pracownika/379248-xv-ogolnopolska-konferencja-filozofii-fizyki>

**Poznań.** 12 marca 2019 na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu w ramach seminarium z cyklu pt. „Zagadnienia Fizyki Medycznej i Biofizyki” swój referat zatytułowany: „The Achilles heel of LINEs. A newly discovered regulatory mechanism of human mobile genetic elements”, wygłosił dr Zbigniew Warkocki z Instytutu Chemii Bioorganicznej PAN w Poznaniu.

**Warszawa.** 19 marca 2019 na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego odbył się kolejny wykład z serii „Zapytaj fizyka” zatytułowany „Universe according to neutrinos, Nobel prizes, breakthroughs and future”, który wygłosił prof. Chang Kee Jung (więcej na stronie: <https://zapytajfizyka.fuw.edu.pl/wyklady/chang-kee-jung/>).

**Poznań.** 21 marca 2019 w Auli Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu odbyło się uroczyste wręczenie medalu Homini Vere Academico profesorowi Wojciechowi Nawrockowi z Wydziału Fizyki UAM w Poznaniu. Serdecznie gratulujemy!

**Warszawa.** 25 marca 2019 w ramach konwersatorium im. Jerzego Pniewskiego i Leopolda Infelda odbyło się seminarium prof. Roberta Iskandera z Politechniki Wrocławskiej we Wrocławiu zatytułowane „Fizyka oka ludzkiego w XXI wieku”.

Zaproszony wykładowca jest specjalistą m. in. w zakresie biomedycznego przetwarzania sygnału, optyki widzenia i działania ludzkiego oka, a także konstrukcji oprzyrządowania optometrycznego i okulistycznego (jest autorem kilkunastu patentów w tej dziedzinie).



Przez dużą część swojej pracy zawodowej był związany z Queensland University of Technology w Australii. Od 2011 pracuje na Politechnice Wrocławskiej, gdzie kieruje Zespołem Przetwarzania Sygnałów Biomedycznych.

Jak się okazuje, oko ludzkie nie jest systemem statycznym, lecz skomplikowanym, dynamicznym układem optycznym, w którym obserwujemy czasowe zmiany aberracji czoła fali spowodowane mikrofluktuacjami akomodacji, pulsacją oka czy też czasowymi zmianami charakterystyk powierzchni oka (np., dynamika filmu łzowego, deformacje rogówki). Pomimo zaobserwowanej dynamiki, obecna korekcja wzroku (okulary, soczewki kontaktowe czy chirurgia refrakcyjna) jest statyczna. Dopóki nie będziemy mogli zastosować dynamicznej korekcji wzroku poza laboratoriami, dynamika optyki ludzkiego oka musi być dobrze zrozumiana, aby obiektywnie ustalić optymalną korekcję statyczną. Dlatego ważne są badania nad dynamiką aberracji frontu falowego w oku ludzkim. Z drugiej strony, warto zastanowić się, czy idealnie skorygowany układ optyczny oka, na przykład, za pomocą optyki adaptatywnej będzie najlepszym rozwiązaniem w procesie widzenia. Minęło ponad 50 lat od czasu pracy Lohmanna i Parisa, którzy badali wpływ drgań wzdłużnych (periodycznych zmian w położeniu obrazu względem ogniska) w idealnym systemie optycznym. Co ciekawe, odkryli, że zintegrowana jakość obrazu umieszczonego poza ogniskiem wzrasta w obecności wibracji rozogniskowania. Obecność takiego mechanizmu w oku była od lat spekulowana przez prelegenta. Ostatnio wykazaliśmy eksperymentalnie, że zarówno symulowana jakość obrazu siatkówkowego, jak i eksperymentalnie zmierzona ostrość wzroku poprawiają się, gdy wibracje rozogniskowania są dodawane do niemiernego oka. Konwersatorium zakończy otwarte dyskusyjne pytanie: czy naturalnie występująca w oku mała wartość rozogniskowania przyczynia się do lepszego widzenia?

**Poznań.** 28 marca w ramach cyklu seminariów Modern Trends in Physics Research, prof. Vladislav Demidov z Institute for Applied Physics and Center for Nanotechnology z Uniwersytetu w Muenster z Niemiec przedstawił referat zatytułowany „Excitation and amplification of coherent spin waves by spin currents”. Więcej informacji dotyczących tego cieszącego się ogromnym zainteresowaniem cyklu znajdziecie Państwo na stronach Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. ([www.amu.edu.pl](http://www.amu.edu.pl))

#### KWIECIEŃ 2019

**Poznań.** 2 kwietnia 2019 w Instytucie Akustyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu odbyło się

seminarium zatytułowane „Nanocząstka magnetyczna w rotującym polu magnetycznym. Aparatura do generacji RMF wysokiej częstotliwości”, które wygłosił prof. Andrzej Skumiel z Instytutu Akustyki UAM.

**Poznań.** 2 kwietnia 2019 na Wydziale Fizyki UAM odbyło się pierwsze Poznańsko-Krakowskie Seminarium Fizyczne, na którym pracownicy Zakładu Badan Materii Miękkiej Instytutu Fizyki Jądrowej w Krakowie oraz Zakładu Radiospektroskopii Wydziału Fizyki UAM przedstawiali najnowsze wyniki badań dotyczących głównie substancji czynnych farmaceutycznie.

**Warszawa.** 5 kwietnia 2019 odbyła się Ogólnopolska Konferencja dla Nauczycieli Fizyki i Chemii.

Prelekcje poprowadzili min: prof. dr hab. inż. Grzegorz Karwasz, dr Wojciech Glac, Dawid Łasiński (Pan Belfer), Monika Kokosza oraz założyciele zespołu naukowo-dydaktycznego „Centrum Chemii w Małej Skali”. Program konferencji obejmował m.in.: przykłady metod nauczania, które przyciągną uwagę uczniów (nauczanie przez dociekanie, praca online, „storytelling”, metoda przypadków), a także pomysły na pracę z uczniem znużonym, wymagającym oraz przygotowującym się do konkursów i olimpiad. W czasie konferencji uczestnicy mieli okazję także zobaczyć eksperymenty z fizyki, takie jak: „Elektrostatyczny odkurzacz”, „Prosty silnik magnetyczny” i „Pływające magnesy”, „Leniwa równia” czy doświadczenia z maszyną elektrostatyczną.

**Poznań.** 3 kwietnia 2019 w ramach cyklu seminariów Modern Trends in Physics Research, dr hab. Michał Michałowski z Obserwatorium Astronomicznego Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu wygłosił referat zatytułowany: „The discovery of a hot cocoon around an exploding supernova”.

**Warszawa.** 15 kwietnia 2019 w ramach konwersatorium im. Jerzego Pniewskiego i Leopolda Infelda odbyło się seminarium prof. Rudolfa Grimma z Uniwersytetu w Innsbrucku i Austriackiej Akademii Nauk zatytułowane „Ultracold fermions”. Prof. Grimm specjalizuje się w badaniach ultra-zimnych gazów atomowych poszukując w nich nowych, niezwykłych stanów kwantowych materii.

**Warszawa.** 16 kwietnia 2019 na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego odbył się wykład z serii „Zapytaj fizyka” zatytułowany „Teoria kwantowa vs. czarne dziury”, który wygłosił dr hab. Andrzej Dragan z Wydziału Fizyki UW w Warszawie (<https://zapytajfizyka.fuw.edu.pl/wyklady/andrzej-dragan/>). Autor referatu zagrościł także na łamach obecnego numeru „Postępów Fizyki”.

**Poznań.** 17 kwietnia 2019 w ramach cyklu seminariów Modern Trends in Physics Research, dr Konrad J. Kapcia z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie wygłosił referat zatytułowany: „Exactphase diagram of the infinite-dimensional extended Falicov–Kimball model”.

**Kuala-Lumpur.** W dniach 19-25 kwietnia 2019 Młodzież Grupy Twórczej Quark z Pracowni Fizyki Pałacu Młodzieży w Katowicach reprezentowała Polskę na Międzynarodowej Konferencji Młodych Naukowców ICYS

2019, która odbyła się w tym roku w Malezji. W konferencji uczestniczyli uczniowie z 26 krajów rywalizując w 6 kategoriach: fizyka, inżynieria, ekologia, matematyka, informatyka oraz nauki przyrodnicze. Reprezentanci Polski są laureatami Ogólnopolskiej Konferencji Młodych Naukowców – wywalczyli 4 medale: Złoty Medal w kategorii Fizyka, 3 Brązowe Medale w kategorii Inżynieria oraz 2 wyróżnienia specjalne. Redakcja *Postępów Fizyki* serdecznie gratuluje nagrodzonym!



# NAGRODY POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO

W 2018 roku Polskie Towarzystwo Fizyczne przyznało następujące nagrody i wyróżnienia:

**1. Nagrodę Naukową PTF im. Wojciecha Rubinowicza** otrzymał **prof. dr hab. Marek Biesiada** (Uniwersytet Śląski) za nowatorskie badania dotyczące soczewek grawitacyjnych i zwartych radioźródeł jako nowych narzędzi kosmologii i fizyki fundamentalnej.

**2. Nagrodę PTF za rozprawę doktorską** otrzymał **dr Krzysztof Szerenos** (Wydział Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku) za pracę zatytułowaną „Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in dielectrics”, za wagę zaprezentowanych w pracy badań związanych z zaobserwowaniem i wyjaśnieniem mechanizmu szybkiego przełączania magnetyzacji prowadzącego do możliwości fotomagnetycznego zapisu informacji. Promotorem pracy jest dr hab. Andrzej Stupakiewicz, profesor nadzwyczajny Uniwersytetu w Białymstoku.

Kapituła **wyróżniła pracę doktorską dr. Pawła Gruszeckiego** (Wydział Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza), zatytułowaną „Theoretical Study of the Spin Wave Beams in Thin Ferromagnetic Films”, która powstała pod opieką prof. dr hab. Macieja Krawczyka. Kapituła podkreśliła wagę zaprezentowanych w pracy doktorskiej badań związanych z dynamiką fal spinowych w cienkich warstwach ferromagnetycznych.

**3. Nagrodę PTF za pracę magisterską im. Arkadiusza Piekary** otrzymał **mgr Bartłomiej Rzeszotarski** (Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej). Tytuł pracy: „Transport prądu i spinu we wstęgach grafenu z adatomami fluoru”. Praca została napisana pod opieką prof. dr hab. inż. Bartłomieja Szafrana z WFILS AGH Kraków.

**Wyróżnienie za pracę magisterską** otrzymała **mgr Marta Przychodnia** (Wydział Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej), za pracę pt. „Charakteryzacja struktur Gd na Pt(111) metodami STM/STS”. Promotorem pracy był dr inż. Wojciech Koczorowski.

**Nagrodę PTF za Popularyzację Fizyki i medal im. Krzysztofa Ernsta** otrzymał **dr Witold Zawadzki** (Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego). Kapituła podkreśliła skalę, a zwłaszcza różnorodność działań prowadzonych przez Laureata, obejmujących organizację konkursów o zasięgu ogólnopolskim, prowadzenie warsztatów, wykładów, pokazów dla dzieci, młodzieży, studentów i dorosłych z Krakowa i okolic oraz różnych miejsc na terenie całego kraju.

**5. Nagrodę PTF I stopnia im. Grzegorza Białkowskiego dla wyróżniających się nauczycieli i Medal im. Grzegorza Białkowskiego** otrzymała **mgr Maria Dobkowska** (Szkoła Podstawowa Integracyjna nr 339 im. Raoula Wallenberga w Warszawie). Nagrodę przyznano

za szczególne zasługi w promowaniu nowatorskich rozwiązań dydaktycznych w Polsce i w Europie, w propagowaniu pracy metodą projektów, w tworzeniu multimedialnych materiałów do nauczania fizyki oraz za wzorcowe przekazywanie wiedzy i umiejętności przyszłym nauczycielom fizyki, a także za wieloletnie aktywne działania w Zarządzie Głównym Polskiego Towarzystwa Fizycznego (2006–2017) i innych strukturach Towarzystwa na rzecz poprawy nauczania fizyki w Polsce.

**Nagrodę PTF II stopnia dla wyróżniających się nauczycieli** otrzymała **mgr Janina Kula** (IV LO im. KEN w Bielsku-Białej, obecnie nauczycielka w V LO w Bielsku-Białej) za znaczące osiągnięcia w pracy z młodzieżą zainteresowaną fizyką.

**Nagrodę PTF III stopnia dla wyróżniających się nauczycieli** otrzymała **mgr Anna Danuta Zdunko** (nauczycielka fizyki w V LO im. Jana III Sobieskiego w Białymstoku) za wprowadzenie innowacyjnych metod nauczania oraz tworzenie autorskich programów nauczania i ich wdrażanie w nauczaniu fizyki i informatyki.

**6. Nagrodą Specjalną Polskiego Towarzystwa Fizycznego za 2018 rok** został uhonorowany **prof. dr hab. Bogdan Cichocki** w uznaniu istotnego wkładu merytorycznego i organizacyjnego do obchodów 100 rocznicy śmierci Mariana Smoluchowskiego.



Nagrodzeni i wyróżnieni w 2018 roku przez Polskie Towarzystwo Fizyczne (fot.W. Kaszub)



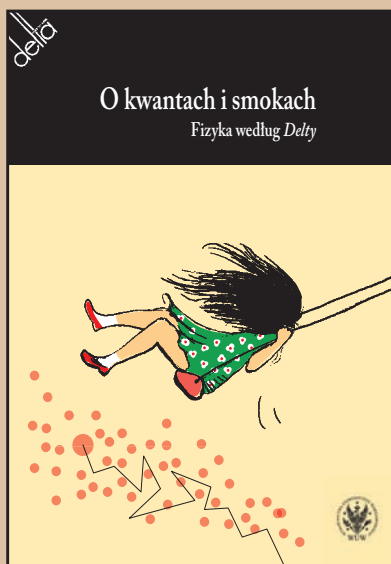
## Magdalena Fikus O życiu na żywo Biologia według Delty

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

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



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



## O kwantach i smokach Fizyka według Delty

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

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

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

ze Wstępu



## O twierdzeniach i hipotezach Matematyka według Delty

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

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

ze Wstępu