

tom 60

zeszyt 2

rok 2009

nr indeksu 369721

cena 12 zł (0% VAT)

POSTĘPY FIZYKI

Dwumiesięcznik Polskiego Towarzystwa Fizycznego

Splątanie kwantowe

Gigantyczny magnetoopór

Wzrost kryształów



ISSN 0032-5430



9 770032 543004 >

40. ROCZNICA ŚMIERCI HENRYKA NIEWODNICZAŃSKIEGO



Dyrektorzy Instytutu Fizyki UJ profesorowie Andrzej Warczak i Stanisław Kistrzyn składają kwiaty na grobie Profesora Henryka Niewodniczańskiego



Prof. Adam Strzałkowski wygłasza referat na sesji



Aula Collegium Novum w czasie obrad sesji – w pierwszym rzędzie od lewej prof. Jerzy Niewodniczański z małżonką, JM Rektor UJ prof. Karol Musioł, kard. Franciszek Macharski, rektor Andrzej Pelczar, dziekan Jerzy Szwed

RADA REDAKCYJNA

Andrzej Kajetan Wróblewski (przewodniczący), Mieczysław Budzyński, Andrzej Dobek, Witold Dobrowolski, Zofia Gołąb-Meyer, Adam Kiejna, Józef Szudy

REDAKTOR HONOROWY

Adam Sobiczewski

KOMITET REDAKCYJNY

Jerzy Warczewski (redaktor naczelny), Ewa Lipka (sekretarz redakcji), Mirosław Łukaszewski, Magdalena Staszal, Barbara Wojtowicz

Adres Redakcji:

ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa, e-mail: postepy@fuw.edu.pl, Internet: postepy.fuw.edu.pl

KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

Maciej Piętko (Białystok), Aleksandra Wronkowska (Bydgoszcz), Wojciech Gruhn (Częstochowa), Tomasz Jarosław Wąsowicz (Gdańsk), Roman Bukowski (Gliwice), Beata Kozłowska (Katowice), Aldona Kubala-Kukuś (Kielce), Małgorzata Nowina Konopka (Kraków), Elżbieta Jartych (Lublin), Michał Szanecki (Łódź), Halina Pięta (Opole), Maria Potomska (Poznań), Małgorzata Pociąg (Rzeszów), Małgorzata Kuzio (Stupsk), Janusz Typek (Szczecin), Winicjusz Drozdowski (Toruń), Aleksandra Miłosz (Warszawa), Bernard Jancewicz (Wrocław), Joanna Borgensztajn (Zielona Góra)

POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

ZARZĄD GŁÓWNY

Reinhard Kulessa (prezes), Jacek M. Baranowski (sekretarz generalny), Roman Puźniak (skarbnik), Przemysław Dereń, Mirosław Trociuk i Jerzy Warczewski (członkowie wykonawczy), Bolesław Augustyniak, Maria Dobkowska, Stanisław Dubiel, Henryk Figiel, Jacek Przemysław Goc, Zofia Gołąb-Meyer, Bernard Jancewicz i Ewa Kurek (członkowie)

Adres Zarządu:

ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa, tel./fax: 022-6212668, e-mail: ptf@fuw.edu.pl, Internet: ptf.fuw.edu.pl

PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW PTF

Eugeniusz Żukowski (Białystok), Stefan Kruszewski (Bydgoszcz), Józef Zbrozarczyk (Częstochowa), Bolesław Augustyniak (Gdańsk), Bogusława Adamowicz (Gliwice), Wiktor Zipper (Katowice), Małgorzata Wysocka-Kunisz (Kielce), Stanisław Wróbel (Kraków), Jerzy Żuk (Lublin), Tadeusz Wibig (Łódź), Stanisław Waga (Opole), Roman Świetlik (Poznań), Małgorzata Klisowska (Rzeszów), Włodimir Tomlin (Stupsk), Adam Bechler (Szczecin), Grzegorz Karwasz (Toruń), Mirosław Karpierz (Warszawa), Bernard Jancewicz (Wrocław), Marian Olszowy (Zielona Góra)

REDAKTORZY NACZELNI INNYCH CZASOPISM

WYDAWANYCH POD EGIDĄ PTF

Witold D. Dobrowolski – *Acta Physica Polonica A*, Kacper Zalewski – *Acta Physica Polonica B*, Andrzej Jamiołkowski – *Reports on Mathematical Physics*, Marek Kordos – *Delta*, Zofia Gołąb-Meyer – *Foton*, Zbigniew Wiśniewski (redaktor prowadzący) – *Fizyka w Szkole*

Czasopismo ukazuje się od 1949 r.

Wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne

Dofinansowanie: Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Patronat: Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Skład komputerowy w redakcji

Opracowanie okładki: Studio Graficzne etNova Piotr Zenda i Wspólnicy sp.j., tel.: 022-8735520, e-mail: etnova@etnova.pl

Druk i oprawa: „UNI-DRUK”, Warszawa, ul. Buńczuk 7b

ISSN 0032-5430

SPIS TREŚCI

Od Redaktora Naczelnego	46
Nagroda FNP 2008 dla Ryszarda Horodeckiego	47
PTF	49
R. Horodecki – Różne oblicza splątania kwantowego ..	50
P.A. Grünberg – Od fal spinowych do gigantycznego magnetooporu (GMR) i dalej	55
ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI	66
K. Sangwal, E. Talik, A. Pajczkowska, S. Krukowski – Działalność Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów	69
WSPOMNIENIA: Czterdziesta rocznica śmierci Profesora Henryka Niewodniczańskiego	80
NOWI PROFESOROWIE	83
KRONIKA	85

Drodzy Czytelnicy,

Cztery wybitne postacie są głównymi bohaterami tekstów przedstawionych Wam do lektury. Są nimi: Ryszard Horodecki, Peter A. Grünberg, Jan Czochralski oraz Henryk Niewodniczański. Pierwszy z nich jest laureatem tzw. Polskiego Nobla, czyli Nagrody Fundacji na rzecz Nauki Polskiej w dziedzinie nauk ścisłych, którą otrzymał w roku 2008. Jego domeną jest informacja i informatyka kwantowa oparta na zjawisku splątania kwantowego. Drugi z naszych bohaterów laureat Nagrody Nobla 2007 w swoim wykładzie noblowskim bardzo dobrze przetłumaczonym przez Macieja Misiornego przedstawia teorię wyjaśniającą powstawanie magnetooporu gigantycznego – zjawiska mającego znaczenie dla zastosowań w pamięciach magnetycznych, w szczególności dla rozwoju napędów dysków twardych. Trzeci nasz bohater to legendarny uczony polski, który odkrył zjawisko wyciągania monokryształów z roztopu w kierunku przeciwnym do sił grawitacji i zaproponował metodę wzrostu kryształów opartą na tym zjawisku. Jest on patronem Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów, którego bardzo ciekawej genezie poświęcony jest obszerny czteroautorский artykuł. Czwarty wreszcie bohater to jeden z dwóch współtwórców powojennej krakowskiej szkoły fizyków (drugi to Marian Mięśowicz), którego postać przybliży uroczy, przyozdobiony fragmentami poezji prosto z „Piwnicy pod Baranami” essay niezastąpionej Małgosi Nowiny Konopki.

Prócz tego polecam niezawodne jak zwykle rubryki, takie jak Kronika, PTF, Ze Zjazdów i Konferencji, Nowi Profesorowie.

Jerzy Warczewski

Na okładce:

Twardy dysk – sztandarowy element spintroniczny, w którym wykorzystuje się zjawisko gigantycznego magnetooporu; patrz wykład noblowski Petera Grünberga na s. 55.

Szanowne Koleżanki, Szanowni Koledzy!

Mam zaszczyt zwrócić się do Państwa po raz pierwszy jako Redaktor Naczelny. Czynię to z wielką radością i entuzjazmem, ale zarówno ta radość jak i ten entuzjazm są w pewnym sensie wyciszone, gdyż wciąż rozpatruję niezbadane wyroki boskie, które spowodowały tak przedwczesne odejście mego znakomitego poprzednika, wspaniałego Człowieka, wielkiego Przyjaciela profesora Jurka Gronkowskiego.

Postępy Fizyki – dwumiesięcznik Polskiego Towarzystwa Fizycznego – są wydawane od 60 lat, ja zaś prenumeruję je od stycznia 1967 roku, tj. od momentu, kiedy zostałem członkiem Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Czytałem to czasopismo także w bibliotece już dziesięć lat wcześniej zanim zacząłem je prenumerować. To czasopismo stanowiło i stanowi dla mnie – a także dla wszystkich jego czytelników – swego rodzaju szkołę w dziedzinie fizyki, trzeba bowiem powiedzieć, że popularyzuje ono fizykę na poziomie uniwersyteckim ze szczególnym ukłonem do poziomu popularyzacji dla studentów i dla zdolnych uczniów szkół średnich. Jest to niezwykle ważne, ponieważ fizyka jest fundamentem naszej cywilizacji i kultury. Trzeba również dodać, że wszystkie nauki przyrodnicze, w tym medycyna, są działami fizyki, wszystkie zaś nauki techniczne są jej zastosowaniami. Fizyka jest w nieustannym rozwoju, w ciągu zaś ostatnich stuleci rozwój ten zachodzi z coraz to większym przyspieszeniem. Wspomnijmy tu GPS – najbardziej zdumiewający przyrząd naszych czasów, którego działanie wymaga precyzyjnego zastosowania trzech fundamentalnych teorii fizycznych: szczególnej teorii względności, ogólnej teorii względności oraz mechaniki kwantowej! Dzisiaj oczekujemy od fizyki globalnych rozwiązań w tak ważnych dla ludzkości dziedzinach, jak m.in. informacja i informatyka klasyczna oraz kwantowa, nanotechnologia, pozyskiwanie nowych rodzajów energii i energetyka, ochrona środowiska, przewidywanie zmian klimatycznych, a także przeciwdziałanie ewentualnym niekorzystnym skutkom tych zmian. Dział fizyki zwany kosmologią pozwala nam dzisiaj próbować rozwiązywać zagadki Wszechświata, w tym także objaśniać jego ewolucję począwszy od Wielkiego Wybuchu a skończywszy na obecnym stadium rozwoju wraz z podlegającym prawu Hubble'a niezwykłym rozbieganiem się galaktyk i towarzyszącym mu rozszerzaniem się samej przestrzeni. Duże zainteresowanie budzą zastosowania aparatu myślowego fizyki w innych dziedzinach, na przykład w socjologii, ekonomii (ekonofizyka), grach rynkowych itp. Niezwykłe powiązanie od zarania dziejów fizyki z filozofią zaowocowało rozwojem filozofii przyrody. O wszystkich tych sprawach – i jeszcze o wielu innych – dowiadujemy się z *Postępów Fizyki*, gdzie najwybitniejsi fizycy, zarówno polscy jak i zagraniczni, w tym laureaci Nobla, szczególnie ci wybrani w kolejnych ostatnich latach, przedstawiają je w możliwie przystępnym języku. Dzięki swemu rozległemu i atrakcyjnemu profilowi *Postępy Fizyki* są przeznaczone dla szerokiego kręgu odbiorców, mianowicie dla środowiska fizyków od studentów do profesorów, dla nauczycieli fizyki i zdolnych uczniów szkół średnich, dla przedstawicieli innych nauk przyrodniczych, dla matematyków, dla inżynierów i inteligencji technicznej i wreszcie dla wybranych grup humanistów (głównie dla tych, którzy zajmują się filozofią przyrody). Biorąc powyższe pod uwagę pragnę wyrazić przekonanie, że dalsze wydawanie i finansowanie tego tak świetnego i mającego tak wielkie zasługi czasopisma, jakim są *Postępy Fizyki*, jest uzasadnione najwyższym dobrem – dobrem Kultury Polskiej.

Pragnę spowodować, aby *Postępy Fizyki*:

- uzyskały nową szatę graficzną, tj. aby były drukowane w pełnych kolorach na papierze kredowym (podobnie jak np. *Świat Nauki*),
- były umieszczone na ministerialnej liście czasopism naukowych, co formalnie podniosłoby rangę czasopisma,
- służyły zatem także jako czasopismo, w którym mogliby drukować swoje prace nauczyciele w ramach swoich przewodów doktorskich,

- doczekały się właściwego finansowania i żeby cena ich zakupu mieściła się w składce rocznej przekazywanej przez członka PTF bezpośrednio na konto ZG PTF. Takiemu rozwiązaniu powinno jednak towarzyszyć pewne sponsorowanie ze strony jednostek macierzystych poszczególnych Oddziałów (podobnie jak to jest już realizowane w Oddziale Toruńskim). Wiąże się to z konieczną dyskusją ze wszystkimi Oddziałami PTF i może nastąpić tylko po pełnym uzgodnieniu takiej koncepcji między Oddziałami i ZG PTF.

W tym roku *Postępy Fizyki* obchodzą swoje sześćdziesiąte urodziny. Na lekturze *Postępów* kształciło się już kilka pokoleń fizyków polskich. Tak jak ewoluuje fizyka, tak też i to czasopismo powinno ewoluować i nadążać za jej rozwojem, aby sprostać wyzwaniom epoki i co więcej umieć spojrzeć zawsze z odpowiedniej perspektywy na całość tej fundamentalnej dyscypliny wiedzy. Podjąłem zatem na nowo akcję zapraszania fizyków polskich do przysyłania do *Postępów* swoich artykułów, czy nawet całych ich cykli w celu ukazania czytelnikowi nowych dziedzin fizyki. Tak więc na początek zwróciłem się do prof. Ryszarda Horodeckiego, aby on i jego trzej synowie przedstawili cykl artykułów przybliżających czytelnikowi tę nową dziedzinę fizyki XXI wieku, jaką jest informacja i informatyka kwantowa. Dziedzina ta zatem tworzy nowy dział w strukturze *Postępów* i pierwszy artykuł tego działu jest w niniejszym numerze. Zwróciłem się także do prof. Ewy Talik, przedstawicielki Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów w celu utworzenia działu tego Towarzystwa w *Postęпах*. Pierwszy artykuł tego działu jest w niniejszym numerze. Zaproponowałem prof. Jerzemu Łuczce, aby on i jego współpracownicy przedstawili cykl artykułów dotyczących zastosowań fizyki statystycznej w opisie zjawisk biologicznych. Pierwszy artykuł z tego cyklu już nadszedł i będzie drukowany w następnym numerze *Postępów*. Również w następnym numerze *Postępów* ukaże się pierwszy artykuł, którego autorami będą ks. prof. Michał Heller i ks. prof. Janusz Mączka SDB. Zwróciłem się do nich o prowadzenie w *Postęпах* działu filozofii przyrody oczywiście pod egidą Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych w Krakowie. Dodam jeszcze, że w następnym numerze ukaże się artykuł dr Jana Kulki o sekretach i cudach techniki związanych z budową LHC w CERN-ie. Tymczasem zwracam się do Państwa z dwiema prośbami dotyczącymi *Postępów*:

- Uprzejmie proszę o wyrażenie wszelkich uwag, sugestii, rad i oczekiwań na temat treści i formy *Postępów*. Co ewentualnie należałoby zmienić, co dodać, co ująć? Zależy nam na tym, aby to czasopismo służyło coraz lepiej wyżej wspomnianym kręgom czytelników poprzez szeroko pojętą popularyzację fizyki i jej osiągnięć oraz poprzez ukazanie jej roli w rozwoju naszej cywilizacji i kultury.
- Uprzejmie proszę o przesyłanie do druku w *Postęпах* tekstów artykułów (lub też tekstów cykli artykułów) na wybrane przez siebie tematy, tłumaczeń wybranych artykułów autorów obcojęzycznych, a także listów do Redakcji, relacji ze zjazdów i konferencji, recenzji, informacji PTF, danych do Kroniki oraz wszelkich innych informacji. W przypadku artykułów autorów obcojęzycznych będziemy również wdzięczni za wskazywanie nam tych artykułów do przetłumaczenia we własnym zakresie.

Jak widzą Państwo, jednym z głównych naszych celów jest stworzenie możliwie szerokiej więzi ze środowiskiem, i to zarówno z czytelnikami, jak też i potencjalnymi autorami. Bylibyśmy także bardzo wdzięczni, gdyby Państwo zechcieli przekazać te nasze prośby wszystkim osobom ze swojego środowiska. Prosimy kierować wszelką korespondencję na dwa adresy e-mailowe: postepy@fuw.edu.pl oraz jerzy.warczewski@us.edu.pl.

Wraz z najserdeczniejszymi pozdrowieniami
 prof. dr hab. Jerzy Warczewski
 Redaktor Naczelny

Nagroda FNP 2008 dla Ryszarda Horodeckiego

Nagrodę Fundacji na rzecz Nauki Polskiej w dziedzinie nauk ścisłych otrzymał w roku 2008 prof. Ryszard Horodecki z Instytutu Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki Uniwersytetu Gdańskiego. Nagrodę przyznano za „wkład laureata w stworzenie podstaw teoretycznych informatyki kwantowej, a w szczególności za wypracowanie podstaw praktycznej detekcji kwantowego splątania i odkrycie splątania związanego”. Za osiągnięcia w tej dziedzinie Ryszard Horodecki wraz ze swymi synami Pawłem i Michałem otrzymał w roku 2004 nagrodę im. Wojciecha Rubinowicza przyznaną przez Polskie Towarzystwo Fizyczne.



Ryszard Horodecki

Ryszard Horodecki urodził się w 1943 r. w Kowlu na Wołyniu. W roku 1944 jego rodzina uchodzi do Częstochowy, a w roku 1949 przenosi się do Sopotu. Od tego czasu przyszły laureat nagrody FNP pozostaje wierny Trójmiastu. Tu kończy studia na wydziale Elektroniki Politechniki Gdańskiej, a następnie doktoryzuje się z fizyki teoretycznej i rozpoczyna pracę w Instytucie Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki Uniwersytetu Gdańskiego. W roku 1997 habilituje się na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu, a jego rozprawa dotycząca korelacji pomiędzy układami kwantowymi stanowi ważny wkład w analizę własności stanów splątanych i rozwój podstaw teorii informacji kwantowej.

Korelacje kwantowe oraz stany splątane

Stany splątane zostały wprowadzone do mechaniki kwantowej przez Schrödingera we wczesnej fazie rozwoju

mechaniki kwantowej, lecz zostały spopularyzowane dopiero w słynnym artykule Einsteina, Podolskiego i Rosena [1] z roku 1935. W tej pracy pokazano, że mechanika kwantowa pozwala na istnienie stanu dwóch podukładów o dziwnych, nieklasycznych własnościach, w którym pomiar jednego podukładu fizycznego determinuje wynik pomiaru uzyskany w drugim podukładzie. To stwierdzenie, świadczące o nielokalności teorii kwantowej, nazwano *paradoksem EPR* i traktowano jako eksperyment myślowy, którego nie będzie łatwo potwierdzić w doświadczeniu. Badanie zjawisk nielokalności kwantowej zostało spopularyzowane w latach sześćdziesiątych dzięki pracom Johna Bella i jego nierówności [2], a istnienie stanów splątanych wykazali eksperymentalnie w roku 1982 Aspect, Dalibard i Roger [3].

Z punktu widzenia teorii ważne jest rozróżnienie pomiędzy kwantowym układem izolowanym a bardziej ogólnym przypadkiem układu oddziaływającego z otoczeniem. W pierwszym przypadku układ opisywać można poprzez stan czysty $|\varphi\rangle$, traktowany jako element przestrzeni Hilberta, podczas gdy w przypadku ogólnym stan układu opisuje się przez macierz gęstości ρ . Jeżeli układ złożony z dwóch podukładów A i B opisujemy poprzez stan czysty $|\psi\rangle$, to wystarczy rozróżnić dwa przypadki:

1) układ nie wykazuje żadnych korelacji i można go opisać stanem iloczynowym

$$|\psi\rangle = |\varphi_A\rangle \otimes |\varphi_B\rangle, \quad (1)$$

2) układ opisywany jest stanem, którego nie da się zapisać w postaci (1). Taki stan przedstawia korelacje kwantowe pomiędzy obydwoma podukładami i zwany jest *stanem splątany*. Najbardziej znanym przypadkiem jest *stan Bella*

$$|\psi^+\rangle = (|0\rangle \otimes |0\rangle + |1\rangle \otimes |1\rangle) / \sqrt{2}. \quad (2)$$

Używając ogólniejszego formalizmu macierzy gęstości, stany mieszane dzieli się na trzy klasy:

Ia) stany nieskorelowane (iloczynowe)

$$\rho_A \otimes \rho_B, \quad (3)$$

gdzie ρ_A i ρ_B opisują odpowiednio stany podukładów A oraz B,

Ib) stany skorelowane klasycznie (kombinacje wypukłe stanów iloczynowych)

$$\rho = \sum_i p_i (\rho_A)_i \otimes (\rho_B)_i, \quad (4)$$

gdzie $p_i > 0$ oraz $\sum_i p_i = 1$,

II) wszystkie inne stany, których nie da się przedstawić w postaci (4).

Stany z klasy Ia i Ib nazywamy separowalnymi, gdyż wykazują brak korelacji lub co najwyżej korelacje klasyczne. Natomiast stany z grupy II wykazują korelacje kwantowe i noszą nazwę stanów splątanych, gdyż stanowią uogólnienie klasy 2) na stany mieszane. Zauważmy, że powyższa definicja pochodząca od Wernera [4] jest elegancka matematycznie, ale mało przyjazna w użyciu, gdyż dla danej macierzy gęstości ρ trudno zobaczyć, czy postać (4) istnieje.

Kryteria kwantowej separowalności

W pracy [5] opublikowanej w roku 1994 Ryszard Horodecki przedstawił warunek konieczny, aby dany stan mieszany ρ był separowalny. Warto dodać, że już wtedy do współpracy nad problemem separowalności wciągnął swego najstarszego syna Pawła, wówczas studenta fizyki. Dalszy postęp w analizie problemu zawdzięczamy Peresowi, który zauważył [6], że każdy stan separowalny ma własność PPT (positive partial transpose), co oznacza

$$(\mathbb{1} \otimes T)\rho \geq 0, \quad (5)$$

gdzie T oznacza transpozycję macierzy, a $\mathbb{1}$ to operacja jednostkowa.

Kluczowym osiągnięciem Ryszarda Horodeckiego, dokonany nieco później wraz z synami Pawłem i Michałem [7], było udowodnienie twierdzenia odwrotnego, które pozwala na sformułowanie warunku koniecznego i wystarczającego na separowalność dowolnej macierzy gęstości ρ o wymiarze $d = 4$:

ρ jest separowalne wtedy i tylko wtedy, gdy ma własność PPT.

A więc macierz gęstości ρ przedstawia stan splątany układu dwóch kubitów, gdy częściowo transponowana macierz $(\mathbb{1} \otimes T)\rho$ nie jest dodatnio określona, co łatwo sprawdzić poprzez jej diagonalizację. Ten wynik wszedł do literatury światowej pod nazwą kryterium PPT Peresa–Horodeckich. Miło jest dodać, że wynik Horodeckich opiera się na własności rozkładalności odwzorowania dodatniego działającego na macierze gęstości o wymiarze dwa, udowodnioną już w roku 1973 przez prof. Stanisława Woronowicza [8] z Katedry Metod Matematycznych Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Kolejnym ważnym rezultatem laureata było wykazanie, że dla układów opisywanych w wyżej wymiarowych przestrzeniach Hilberta ($d \geq 8$) istnieją stany spełniające własność (5), a mimo to należące do stanów splątanych. Jednocześnie udowodniono, że takich stanów nie da się lokalnie przekształcić do postaci stanów Bella (2), a więc zjawisko to nazwano splątaniem związanym (*bound entanglement*). Takie nietypowe stany mogą być jednak przydatne w niektórych protokołach przetwarzania informacji kwantowej [9].

Świadczenie splątania kwantowego

Kryterium dodatniości (5) jest wygodne do zbadania separowalności macierzy gęstości wypisanej na tablicy, lecz częściowej transpozycji nie da się przeprowa-

dzić w laboratorium. Ryszard Horodecki wraz ze starszymi synami opracował też alternatywne kryterium separowalności o wielkim znaczeniu praktycznym. Dla każdego stanu splątanego ρ istnieje operator hermitowski W , zwany świadkiem splątania, taki że

$$\text{Tr}(W\rho) < 0, \quad (6)$$

podczas gdy dla każdego stanu separowalnego σ zachodzi relacja $\text{Tr}(W\sigma) \geq 0$. Ciekawym zbiegiem okoliczności ten wynik oparty jest na własnościach odwzorowań dodatnich oraz operatorów blokowo dodatnich badanych w pracy innego polskiego fizyka, prof. Andrzeja Jamiolkowskiego, w latach siedemdziesiątych [10]. W praktyce operator W można traktować jako obserwabłę, a więc mierząc ją w stanie ρ otrzymujemy kryterium realizowane doświadczalnie: ujemny wynik pomiaru dowodzi splątania badanego stanu. Pewnym wyzwaniem pozostaje odśledzenie świadka W , odpowiedniego dla analizowanego stanu ρ oraz przedstawienie go w postaci kombinacji wielkości mierzalnych. Te problemy da się jednak rozwiązać w praktyce, np. w doświadczeniach optycznych ze skorelowanymi fotonami [11].

Dorobek Laureata zawiera też wiele innych ważnych wyników dotyczących nieintuicyjnych własności stanów splątanych oraz możliwości ich wykorzystania w informacji kwantowej. Najciekawszym przykładem jest znalezienie przypadków, w których poprawnie zdefiniowana matematycznie informacja kwantowa może być ujemna, oraz wyjaśnienie tego zjawiska za pomocą stanów splątanych. Wieloletnie badania Laureata w tej dziedzinie zostały podsumowane w pracy przeglądowej „Quantum entanglement” [12], przyjętej do druku w prestiżowym czasopiśmie *Reviews of Modern Physics*. Warto podkreślić, że autorem tego artykułu, który już jako preprint znany był w środowisku pod nazwą H^4 , jest Ryszard Horodecki wraz z pełnym zbiorem swoich synów: Pawłem, Michałem oraz Karolem.

Krajowe Centrum Informatyki Kwantowej

Od roku 2007 Ryszard Horodecki jest profesorem zwyczajnym nauk fizycznych na Uniwersytecie w Gdańsku. Był inicjatorem powstania Krajowego Centrum Informatyki Kwantowej (KCIK), które w roku 2007 powstało w Trójmieście na mocy porozumienia siedmiu polskich uczelni oraz Polskiej Akademii Nauk. Aktualnie laureat nagrody FNP kieruje działalnością Centrum. Dzięki wynikom uzyskanym w ciągu ostatniej dekady przez prof. Horodeckiego oraz jego współpracowników Gdańsk jest powszechnie postrzegany jako jeden z czołowych na świecie ośrodków badań nad teorią przetwarzania informacji kwantowej.

Już od kilku lat w praktyce realizuje się kwantowe protokoły szyfrowania informacji, a w wielu ośrodkach trwają prace nad konstrukcją nowych algorytmów kwantowych oraz badania nad doświadczalną realizacją coraz bardziej złożonych bramek kwantowych. Jednakże do zbudowania komputera kwantowego, który rozwiązałby jakiś konkretny problem szybciej niż komputery klasyczne,

droga jeszcze daleka. Dzięki powstaniu KCIK w Gdańsku możemy jednak mieć nadzieję, że do powstania nowej techniki obliczeń kwantowych swoją cegiełkę dorzuci także uczeni z Polski.

Sum ergo cogito

Ryszard Horodecki jest autorem 66 artykułów opublikowanych w czasopismach z listy filadelfijskiej, które łącznie były cytowane prawie 3000 razy. Od roku 1999 kierował na Uniwersytecie Gdańskim czterema programami ramowymi UE dotyczącymi teorii informacji kwantowej. Uprawianie fizyki teoretycznej na prawdziwie światowym poziomie nie przeszkodziło mu w kontynuowaniu swego młodzieńczego zainteresowania filozofią oraz poezją. W roku 2003 opublikował tomik poezji [13], w którym doświadczenia egzystencjalne zostają powiązane z pragnieniem przenikania tajemnic przyrody.

- [1] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
- [2] J.S. Bell, *Physics* **1**, 195 (1964).

- [3] A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804 (1982).
- [4] R.F. Werner, *Phys. Rev.* **A40**, 4277 (1989).
- [5] Ryszard i Paweł Horodeccy, *Phys. Lett.* **A197**, 147 (1994).
- [6] A. Peres, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1413 (1996).
- [7] Michał, Paweł oraz Ryszard Horodeccy, *Phys. Lett.* **A223**, 1 (1996).
- [8] S. Woronowicz, *Commun. Math. Phys.* **51**, 243, (1976).
- [9] Paweł, Michał oraz Ryszard Horodeccy, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1056 (1999).
- [10] A. Jamiołkowski, *Rep. Math. Phys.* **3**, 275 (1972).
- [11] M. Barbieri i in., *Phys. Rev. Lett.* **91**, 227901 (2003).
- [12] Ryszard, Paweł, Michał i Karol Horodeccy, preprint quant-ph/0702225; *Rev. Mod. Phys.* (2009), w druku.
- [13] R. Horodecki, *Sum ergo cogito* (Wydawnictwo Marpress, Gdańsk 2003).

Karol Życzkowski

Instytut Fizyki UJ

Kraków

oraz Centrum Fizyki Teoretycznej PAN

Warszawa

PTF



Oddział Łódzki

15 grudnia 2008 r. na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego odbyło się zebranie sprawozdawczo-wyborcze członków Oddziału. Po udzieleniu absolutorium dotychczasowemu Zarządowi w tajnym głosowaniu wyłoniono nowy Zarząd w składzie: Tadeusz Wibig – przewodniczący, Magdalena Zych – sekretarz, Paweł Barczyński – skarbnik, Jolanta Prywer (z Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej) oraz Anna Piotrowska (XXIV LO im. Marii Skłodowskiej-Curie w Łodzi) – członkowie. Korespondentem Oddziału jest autor tej notki (z WFILS UŁ). W okresie sprawozdawczym (od 12 grudnia 2006 r. do 15 grudnia 2008 r.) liczba członków PTF w Oddziale Łódzkim zwiększyła się i wynosi aktualnie 103 osoby. Oddział organizował zebrania Zarządu zgodnie z wymogami statutu oraz prowadził inne formy działalności.

W gmachu WFILS Uniwersytetu Łódzkiego zostało ogłoszonych 8 tzw. referatów plenarnych. W ramach dzia-

łalności popularyzatorskiej wygłoszono w Łódzkim Domu Kultury 13 referatów dla młodzieży i mieszkańców Łodzi. Tradycyjnie (dwukrotnie, tj. w latach 2007 i 2008) Oddział ufundował nagrody książkowe dla najlepszych zawodników Olimpiady Fizycznej naszego regionu, a przewodniczący Oddziału brał udział w uroczystym zakończeniu i podsumowaniu zawodów II stopnia.

12 czerwca 2007 r. w Auli WFILS Uniwersytetu Łódzkiego odbył się III konkurs szkolny z fizyki pt. Fizyka da się lubić. W roku akademickim 2007/08 oraz 2008/09 Oddział wspólnie z Łódzkim Centrum Doskonalenia Nauczycieli i Kształcenia Praktycznego w Łodzi organizował (i organizuje) warsztaty dla nauczycieli, na których zajęcia prowadzili (i prowadzą) nauczyciele akademicy, w tym także członkowie naszego Oddziału.

Na zakończenie należy wspomnieć o intensyfikacji kontaktów ze szkołami, o czym świadczy udział przedstawicieli Oddziału w 5 imprezach ogólnoszkolnych poza terenem uczelni i organizowanych przez samych nauczycieli.

Michał Tadeusz Szanecki



Nowy Zarząd Oddziału Łódzkiego; od lewej Anna Piotrowska, Magdalena Zych, Tadeusz Wibig, Jolanta Prywer oraz Paweł Barczyński (fot. autor notki)

Różne oblicza splątania kwantowego*

Ryszard Horodecki

*Krajowe Centrum Informatyki Kwantowej, Zakład Optyki i Informacji Kwantowej
Instytut Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki, Uniwersytet Gdański*

Various faces of quantum entanglement

Abstract: We present one of the greatest intellectual adventures: the discovery and investigation of **a new resource of Nature**. It is responsible for its subtle organization on fundamental level. The resource called quantum entanglement is extraordinarily sensitive to environmental perturbations. It is the „fuel” for many fascinating effects including quantum teleportation and quantum cryptography and is **a key element of quantum computer theory**. We outline, in rather popular form, the methods of detection of entanglement and various faces of its intrinsic structure, which still offers new phenomena not only on the quantum but sometimes also on the classical level of physical reality.

W artykule prezentujemy jedną z największych przygód intelektualnych, jaką jest odkrycie i badanie **nowego zasobu Natury** odpowiedzialnego za jej subtelną organizację na poziomie fundamentalnym. Zasób ten, nazwany splątaniem, jest niezwykle czuły na zaburzenia środowiska. Stanowi on główne „paliwo” dla komputera kwantowego i wielu fascynujących zjawisk, włączając kryptografię kwantową i teleportację kwantową, a także jest **elementem kluczowym teorii komputerów kwantowych**. W możliwie zwartej i popularnej formie opisujemy metody detekcji splątania, a także różne oblicza jego struktury wewnętrznej, generujące wciąż nowe zjawiska nie tylko na poziomie kwantowym, lecz także niekiedy i na poziomie klasycznym rzeczywistości fizycznej.

Wstęp

Na wstępie podkreśliłyśmy fakt, że przyroda daje się opisać, a nawet więcej, że opis pozwalający nam przewidywać rezultaty doświadczeń jest wysoce nietrywialny. Mogłoby być tak, że przyroda byłaby złośliwa i na pytania stawiane w laboratorium w ramach danej teorii nie ujawniałaby żadnych prawidłowości. Na szczęście tak nie jest. Kolejne teorie opisują coraz większą klasę zjawisk, które są eksperymentalnie weryfikowalne. Najlepszy opis świata jakim dysponujemy, odkryty na początku zeszłego stulecia został odgadnięty i zakodowany w zupełnie nieoczywisty sposób, tj. za pomocą abstrakcyjnej, zespolonej przestrzeni Hilberta.

W tym kontekście można zapytać, dlaczego i dla jakiej jej cechy Natura żąda abstrakcyjnego opisu w terminach przestrzeni Hilberta. Pierwszy a zarazem decydujący krok w rozwiązaniu tego problemu wykonali już w 1935 roku Einstein, Podolsky i Rosen (EPR) oraz Schrödinger. Odkryli oni dwie różne twarze – korelacyjną i informacyjną – osobliwej organizacji złożonych układów kwantowych, którą Schrödinger nazwał splątaniem.

Pojęcie splątania wiąże się ściśle z pojęciem podstawowym opisu kwantowego natury – stanem kwantowym. Czym jest stan kwantowy? Najprostsza odpowiedź brzmi: jest to dostępna informacja o układzie fizycznym. Kiedy mamy maksymalną informację o układzie, mówimy, że układ jest w stanie czystym Ψ . W rzeczywistości, nawet jeżeli na początku posiadamy maksymalną informację o układzie, to na skutek niekontrolowanego oddziaływania układu ze środowiskiem tracimy częściowo lub zupełnie tę informację. Mówimy wtedy, że układ przechodzi do stanu mieszanego ρ .

Badając stany układu złożonego Schrödinger odkrył, że układ taki jako całość może być w stanie czystym, podczas gdy jego podukłady nie znajdują się w żadnym określonym stanie czystym. Zjawisko to nazwane splątaniem ma zarówno przyczynę fizyczną, jak i formalną. Ta pierwsza jest związana z oddziaływaniem kwantowym między układami, które przeprowadza stan produktowy, opisujący układy niezależne, w stan splątany układu złożonego – opisujący kwantowe korelacje między podukładami. Przyczyna formalna leży w tym, że formalizm kwantowy używa opisu tensorowego układów złożonych w przestrzeni Hilberta i zasady superpozycji.

*Tłumaczenie Autora z jego oryginału angielskiego, który się ukazał w *Quantum Information Processing and Communication in Europe* (European Communities, Bruksela 2005).

Opis splątania. Definicja formalna

Aby zilustrować matematyczną „receptę” na stan splątany rozważmy prosty, ale paradygmatyczny, przykład złożonego układu dwóch cząstek o spinie $1/2$, np. pozytonu i elektronu powstałych z rozpadu neutralnego pionu π^0 . Iloczyn tensorowy pozwala nam myśleć o dwóch przypadkach: pozyton ma spin w górę, elektron – spin w dół, co oznaczamy przez $|\uparrow\rangle_p |\downarrow\rangle_e$, ale również $|\uparrow\rangle_e |\downarrow\rangle_p$, co oznacza: elektron ma spin w górę, pozyton – spin w dół. Natomiast zasada superpozycji pozwala nam superponować oba przypadki, tzn. utworzyć alternatywę kwantową nazwaną singletem,

$$|\Psi_{pe}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_p |\downarrow\rangle_e - |\uparrow\rangle_e |\downarrow\rangle_p) \neq |\Psi_p\rangle \otimes |\Psi_e\rangle. \quad (1)$$

Istotne jest, że stanu tego nie można przedstawić w postaci iloczynowej stanów opisujących poszczególne podukłady $|\Psi_p\rangle$ i $|\Psi_e\rangle$. W ogólności mówimy, że stan czysty jest splątany, jeśli nie można przedstawić go w postaci iloczynowej, tj. $|\Psi_{AB}\rangle \neq |\Psi_A\rangle \otimes |\Psi_B\rangle$.

W laboratorium ze względu na niekontrolowane zaburzenia mamy raczej do czynienia ze stanami mieszanymi niż czystymi. W dawniejszych czasach nie było zupełnie jasne, czy i w jakim stopniu stan mieszany ρ jest splątany.

Korelacyjna twarz kwantowego splątania: lokalny realizm i splątanie

EPR zauważyli, że formalizm kwantowy przewiduje silne korelacje między odległymi cząstkami, które oddziaływały ze sobą w przeszłości. Ścisłe mówiąc, analizowali oni korelacje między własnościami cząstek, takimi jak pęd i położenie. EPR założyli lokalność i próbowali wykorzystać tajemnicze losowe korelacje stanu singletowego, aby dowiedzieć, że własności powinny być „elementami rzeczywistości” w sensie, że one „siedzą” na układzie i stąd kwantowa mechanika jest niekompletna, ponieważ nie przewiduje takich własności, a oferuje jedynie ich rozkłady prawdopodobieństwa.

W tym czasie fizycy nie mieli jeszcze zbyt dużo powodów, aby wierzyć, że kwantowy opis natury jest „prawie” uniwersalny, to znaczy opisuje poprawnie wszystkie zjawiska z wyjątkiem grawitacji. Toteż splątanie traktowano jako nowinkę metafizyczną, która nigdy nie wejdzie do laboratorium.

Na szczęście, w 1964 r. Bell sformalizował ideę realizmu lokalnego w oparciu o starą ideę zmiennych ukrytych. Wkrótce po odkryciu mechaniki kwantowej, jako radykalnie różnego opisu świata, pewni ludzie mieli nadzieję, że prawdopodobieństwa kwantowe wynikające ze stanów kwantowych są wynikiem naszej niekompletnej wiedzy o mikroświecie. Wierzyli oni, że prawa fizyki są deterministyczne na głębszym poziomie i mogą być opisane przez pewne ukryte (deterministyczne) zmienne, do których na razie nie mamy dostępu. Podstawowym problemem było skonfrontowanie z doświadczeniem klasycznego i kwantowego opisu korelacji między odległymi podukładami, pochodzącymi z rozpadu pewnego układu kwantowego

(np. wymieniony wyżej rozpad pionu). Jak to można zrobić? Wyobraźmy sobie źródło, które wysyła w przeciwnym kierunku dwie cząstki, przy czym założymy, że cząstki te oddziaływały w przeszłości. Wyobraźmy sobie także dwóch obserwatorów, którzy w odległych laboratoriach mierzą pewne dychotomiczne obserwable, tj. takie które mogą przyjmować tylko wartości $+1$ albo -1 (to może być spin albo polaryzacja). Każdy z obserwatorów wykonuje pomiary wzdłuż dwóch dowolnych osi (Alicja a, a' ; Bob b, b'). Mając listę wyników, łatwo jest obliczyć korelacje między rezultatami na poszczególnych osiach. Są to po prostu wartości średnie iloczynów wyników na parach poszczególnych osi, tj. $\langle ab \rangle$, $\langle ab' \rangle$, $\langle a'b \rangle$, $\langle a'b' \rangle$. Zauważmy, że z tych średnich możemy zbudować średnią pewnej nowej obserwabl, zwanej obserwablą Bella $B \equiv ab + a'b + ab' - a'b'$, której – jak łatwo sprawdzić – wartość bezwzględna $|\langle B \rangle|$ nie może przekroczyć 2 (np. dla $a = 1$, $a' = -1$, $b = 1$, $b' = 1$, $B = 2$), co zapisujemy:

$$|\langle ab + a'b + ab' - a'b' \rangle| \equiv |\langle B \rangle| \leq 2 \quad (2)$$

lub równoważnie $|\langle 2 - B \rangle| \geq 0$,

gdzie symbol $\langle \rangle$ oznacza średnią braną po rozkładach zmiennych ukrytych, które nie są bezpośrednio dostępne doświadczeniu. W ten sposób wyprowadziliśmy nierówność typu Bella odkrytą przez Clausera, Horne’a, Shimony’ego i Holta (CHSH). Ogromną zasługą Bella jest to, że wartość średnia $\langle B \rangle$ może być obliczona na gruncie jakiegokolwiek teorii korelacji i niezależnie zweryfikowana w laboratorium.

Okazuje się, że jeśli obliczymy wartość średnią Bella obserwabl zgodnie z receptą kwantową, tzn. obserwablą Bella stanie się pewnym operatorem B , którego wartość liczymy w pewnym stanie kwantowym ρ , to nierówność CHSH może być łamana dla pewnych ustawień osi, to znaczy możemy mieć $\langle B \rangle_\rho > 2$.

W 1982 r. Aspect, Dalibard i Grangier wykonali przekonujące doświadczenie, które potwierdziło łamanie nierówności Bella. Od tego czasu wiele nowych nierówności Bella było wprowadzonych i testowanych i wszystkie one potwierdziły słuszność opisu kwantowego. Pomijając notoryczny problem tzw. lupholi, tj. dodatkowych założeń, które są konieczne do interpretacji wyników doświadczeń (np. nie wszystkie cząstki są rejestrowane w detektorze). Doświadczalne łamanie nierówności Bella oznacza, że opis korelacji (splątania) oparty na założeniach realizmu lokalnego jest sprzeczny z doświadczeniem.

Detekcja splątania kwantowego – świadkowie splątania

Ale czy jest to jedyny wniosek, jaki możemy wyciągnąć z łamania nierówności Bella? Na początku lat 90. pojawiło się wiele kwestii związanych z łamaniem nierówności Bella. Obserwablą Bella wygląda dosyć tajemniczo i nie jest niczym nagannym pytać się o jej sens fizyczny. Dalej, można zapytać o jej głębszy związek ze splątaniem. Wierzchołek góry lodowej został odkryty przez Wernera (1989) i Popescu (1995). Werner nie tylko dał precyzyjną

definicję separowalnych stanów mieszanych (to jest stanów mieszanych, które nie są splątane), ale również zauważył, że istnieją stany splątane, które podobnie jak stany separowalne dopuszczają model ukrytych zmiennych, a zatem nie łamią nierówności Bella. Popescu pokazał, że mając układ w takim stanie, można za pomocą lokalnych operacji filtrujących na podukładach wyznaczyć czasami nowy stan, który może być wykryty przez „świadka” Bella! Był to początek ery manipulacji splątaniem.

W tym czasie fizycy zastanawiali się nie tylko nad tym, czym jest splątanie, ale również do czego może się przydać. Pierwszym jawnym zastosowaniem był protokół kryptograficzny Ekerta (1991) oparty na stanach splątanych i nierównościach Bella. Wkrótce potem odkryto kilka osobliwych efektów, które były początkiem nowej dziedziny – kwantowej teorii informacji jako swoistej fuzji teorii informacji Shannona i mechaniki kwantowej. Były to: gęste kodowanie kwantowe, teleportacja kwantowa, wyłapywanie splątania, redukcja komunikacyjnej złożoności. Zasadniczo wszystkie te zjawiska były oparte na splątaniu i były zweryfikowane w pięknych doświadczeniach.

Okazało się, że splątanie jest nowym, daleko subtelniejszym zasobem niż energia, niezwykle czułym na zaburzenia przez środowisko. W rezultacie splątane stany czyste ulegają szybko degradacji, to znaczy stają się stanami mieszanymi ze słabszym splątaniem. Dlatego z punktu widzenia zastosowań praktycznych, doniosłym krokiem było odkrycie protokołu tzw. destylacji splątania przez Benneta i współpracowników, który pozwalał w pewnym sensie odwrócić ten proces degradacji. Mianowicie z n słabo splątanych par cząstek można za pomocą tzw. operacji lokalnej i komunikacji klasycznej (LOCC) otrzymać mniejszą liczbę m par, $m < n$, prawie maksymalnie splątanych par – dwukubitowych stanów singletów będących jednostkami splątania. Kiedy protokół jest optymalny, stosunek $m/n = D$ jest po prostu miarą splątania zawartego w zastrzeżonym stanie ρ i nazywa się splątaniem destylowalnym.

W tej sytuacji pojawiły się ważne pytania: i) Jak rozpoznać teoretycznie czy dany stan jest splątany? ii) Czy możliwa jest bezpośrednia detekcja splątania w laboratorium? Odpowiedź na te pytania przyszła w roku 1996. Mianowicie okazało się, że dwukubitowy stan ρ_{AB} jest splątany wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje taka wielkość obserwowalna W , że wartość średnia tej obserwabli w tym stanie jest ujemna, tj. $\langle W \rangle_\rho < 0$, podczas gdy dla wszystkich stanów separowalnych wartość ta jest zawsze nieujemna:

$$\langle W \rangle_{\rho_{\text{sep}}} \geq 0. \quad (3)$$

Terhal pierwsza badała szczegółowo powyższe kryterium w kontekście nierówności Bella i nazwała W – świadkiem splątania (2000). Wynikają stąd dwie ważne rzeczy. Po pierwsze, jeśli dostajemy od kogoś stan zapisany na papierze, to – aby sprawdzić czy on jest splątany, czy nie jest – należy rozstrzygnąć, czy istnieje świadek, który łamie powyższą nierówność.

Nie zawsze jest to proste, ale fizycy znaleźli różne metody radzenia sobie z tym problemem. Po drugie, spo-

dziewając się pewnego stanu w laboratorium, możemy znaleźć dla niego świadka i sprawdzić czy stan aktualnie wytworzony jest splątany, czy też nie. Ostatnio ulepszono koncepcję świadków splątania przez wprowadzenie tzw. nieliniowych świadków, którzy wykrywają bardzo słabe splątanie. W 2003 roku grupa De Martiniego przeprowadziła w Rzymie pierwszą detekcję świadka splątania. Ostatnio w Instytucie M. Plancka w Monachium we współpracy z grupą z Hanoweru skonstruowano i pomierzono świadków splątania dla stanów wielocząstkowych.

Koncepcja świadków splątania może znaleźć zastosowanie przy przetwarzaniu informacji w układach kwantowych, gdy niezbędna jest permanentna kontrola jakości splątania.

W kontekście świadków splątania pojawia się naturalne pytanie: Co ma wspólnego łamanie nierówności (3) przez stany splątane z łamaniem nierówności CHSH? Porównując obie nierówności znajdujemy, że obserwabla $2 - B$ w nierówności CHSH jest niczym innym jak tylko pewnym świadkiem splątania. Okazuje się, że Bell konstruując swoją nierówność odkrył historycznie pierwszego świadka splątania! Jednakże pod pewnym względem świadek Bella różni się od „normalnego” świadka splątania. Jest on nie tylko detektorem splątania, ale również detektorem łamania lokalnego realizmu. Ważnym rezultatem w tym kontekście było pokazanie, że każdy świadek Bella wykrywa stany, których można użyć jako zasobu dla redukcji kwantowej złożoności pewnego rozdzielonego zadania obliczeniowego (Bruckner i in. 2004). Bez wątpienia charakterystyka wszystkich świadków Bella będzie ważna zarówno z praktycznego, jak i teoretycznego punktu widzenia.

Operacje dodatnie jako detektory splątania. Splątanie związane

Okazuje się, że wszystkie znane obserwabli typu Bella są słabymi świadkami splątania w takim sensie, że wykrywają one niewiele stanów splątanych. Ale nawet świadkowie splątania, chociaż przydatni w eksperymencie, nie są teoretycznie najlepszymi narzędziami do detekcji splątania.

Jednakże każdemu świadkowi odpowiada pewne „dodatnie” odwzorowanie na stanach. Okazuje się, że odwzorowania dodatnie są z dużo silniejszymi detektorami splątania. Przykładem takiego odwzorowania jest transpozycja jednego z podukładów A lub B złożonego układu AB w stanie ρ_{AB} (częściowa transpozycja). Operację tę można interpretować jako inwersję czasu na podukładzie. Często zdarza się, że takie odwzorowanie niszczy stan w sensie, że przestaje być on dodatni, tracąc tym samym probabilistyczną interpretację (prawdopodobieństwa muszą być dodatnie!). Jednakże jeśli stan był separowalny, wówczas po takim odwzorowaniu on nadal pozostaje stanem.

W ten sposób można dokonać „detekcji” splątania stanu na papierze. Częściowa transpozycja jest bardzo silnym testem splątania odkrytym przez Ashera Peresa w 1996 roku. Tym niemniej, istnieją pewne stany niewykrywalne przez test Peresa. Istnienie takich stanów stano-

wiło z początku interesującą nowinkę matematyczną bez znaczenia fizycznego. Sytuacja zmieniła się dramatycznie, kiedy zadano sobie pytanie, czy wszystkie stany zawierające „zaszumione” splątanie są destylowalne, tzn. czy w wyniku operacji lokalnych i komunikacji klasycznej (LOCC) Alicja i Bob w swoich odległych laboratoriach mogą wydestylować czyste splątanie, np. singlety, które, jak już było wzmiankowane, są zasobem dla nowoodkrytych protokołów kwantowych.

Było dużym zaskoczeniem, gdy okazało się, że stany splątane niewykrywalne przez kryterium Peresa są niedestylowalne. Splątanie czyste użyte do budowy stanu za pomocą operacji LOCC jest całkowicie stracone, to znaczy że nigdy nie będzie można go odzyskać.

Z fizycznego punktu widzenia oznacza to, że istnieje rodzaj nieodwracalności, różniący się od tej w termodynamice, gdzie istnieje odwracalny cykl Carnota. Byłoby bardzo interesujące w tym kontekście przeprowadzić badania w dwóch kierunkach: (i) „termodynamiki splątania” będącej (niebezpośrednią) formalną analogią termodynamiki statystycznej, (ii) implikacji tej ostatniej wynikających ze splątania via słynna zasada Landauera.

Jak widać, struktura „zaszumionego” splątania jest niejednorodna. Istnieją przynajmniej dwa typy zaszumionego splątania: związane (niedestylowane) i swobodne (destylowalne). W przeciwieństwie do wieloukładowego splątania związanego splątanie dwuukładowe jest bardzo pasywne i trudno je wykorzystać do zadań nieklasycznych. Jeszcze w 1999 roku został odkryty tzw. efekt aktywacji, w którym splątanie jest „pompowane” ze stanu o splątaniu związanym do stanu zawierającego niewielką ilość splątania swobodnego.

W tym czasie panowało przekonanie, że nie można użyć splątania związanego do wyciągania bezpiecznego klucza kryptograficznego. Dlatego dużą niespodzianką było odkrycie stanów o splątaniu związanym, z których można wyciągnąć klucz kryptograficzny (rys. 1). Rodzi to nadzieję, że splątanie związane może w przyszłości znaleźć praktyczne zastosowania.

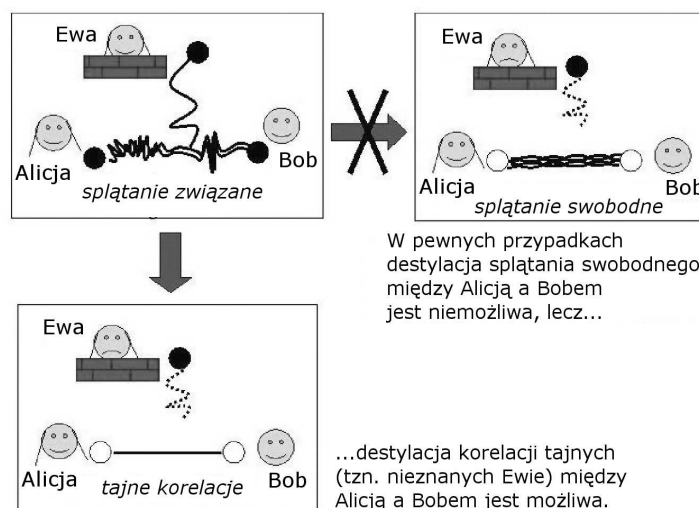
Kiedy odkryto splątanie związane, nikt nie wyobrażał sobie, że może mieć ono jakiś związek z kryptografią klasyczną. Jednakże w 2000 roku Gisin i Wolf, bazując na związkach między teorią splątania i kryptografią klasyczną przypuszczali, że istnieje informacja związana w kryptografii klasycznej. W 2003 roku Acin, Masanes i Cirac odkryli „informację związaną”. Istnienie tego rodzaju informacji nakłada fundamentalne ograniczenia na kryptografię klasyczną. Wydaje się, że jest to jeden z tych nielicznych przypadków, kiedy to fizyka kwantowa pozwoliła przewidzieć zjawiska w klasycznej teorii informacji.

Informacyjna twarz splątania

Jak wspomniano we wstępie, Schrödinger odkrył inną twarz splątania, która ujawnia głęboką różnicę między kwantowym i klasycznym opisem relacji między częścią i całością złożonego układu. To, co uderzyło Schrödingera, to była sprzeczność między klasyczną relacją dotyczącą pełnej informacji $H(A,B)$ o układzie złożonym i informacją o jego podukładach $H(A)$ i $H(B)$, a odpowiednią relacją, która wynikała z opisu kwantowego. Odkrycie Schrödingera można sformalizować bazując na klasycznej teorii informacji, co prowadzi do następujących entropowych nierówności: $H(A,B) \geq H(A)$ lub $H(A,B) - H(A) \geq 0$. Podobne nierówności zachodzą dla podukładu B. Mówią one, że maksymalna informacja Shannona o podukładach daje nam pełną wiedzę o układzie. Powyższe nierówności możemy traktować jako pewien analog nierówności Bella nie mający nic wspólnego z „lokalnym realizmem” poza tym, że wymagają klasycznej teorii prawdopodobieństwa. Ale czy istnieją stany, które spełniają powyższe nierówności? Okazuje się, że podobnie jak w przypadku nierówności Bella, nierówności entropowe są spełnione przez wszystkie stany separowalne. Wynikają stąd nierówności entropowe

$$S(\rho_{AB}) \geq S(\rho_A) \quad \text{lub} \quad S(\rho_{AB}) - S(\rho_A) \geq 0,$$

gdzie $S(\rho_{AB})$, $S(\rho_A)$, $S(\rho_B)$ są odpowiednio entropiami kwantowymi układu i podukładów.



Rys. 1

W ogólności, nierówności entropowe mogą być łamane przez stany splątane. Wynikają stąd dwa ważne wnioski. Po pierwsze nierówności te są detektorami splątania i co więcej, dla dwuukładowych stanów są silniejsze niż świadkowie Bella. Drugi wniosek wyraża to, co już Schrödinger zauważył, mianowicie relację kwantową między „porządkiem” w układzie a „porządkiem” w jego podukładach: pełna informacja o złożonym układzie kwantowym nie daje pełnej informacji o jego podukładach! W tym kontekście eksperymentalne łamanie bezpośrednie nierówności entropowych będzie nie tylko wyzwaniem technologicznym, ale również potwierdzeniem eksperymentalnym wysoce nieintuicyjnej relacji porządek–nieporządek w świecie kwantowym. Ostatnio znaleziono związek między entropowymi relacjami nieoznaczoności i splątaniem, który daje nowe kryteria separowalności.

Ale czy jest to wszystko, co można wyczytać z informacyjnej twarzy splątania? Okazuje się, że ta ostatnia mówi o czymś bardzo ważnym w kontekście fundamentalnych różnic między klasyczną i kwantową informacją. Rzeczywiście, to co decyduje o łamaniu nierówności entropowych, to są różnice $I_{AB/A} = S(\rho_{AB}) - S(\rho_A)$ oraz $I_{AB/B} = S(\rho_{AB}) - S(\rho_B)$ między pełną entropią układu a entropiami jego podukładów.

Zależnie od tego, czy stan łamie czy nie łamie nierówności entropowych, różnice te mogą być odpowiednio ujemne albo dodatnie i zero. Zatem ujemna wartość I jest manifestacją nieklasycznych cech informacji będących konsekwencją splątania zawartego w stanie. Istotnie, pokazano, że dla prostych układów dwukubitowych (1996), a ostatnio (2004) także dla dowolnych układów, stany z ujemną wartością I nadają się do komunikacji kwantowej (teleportacji). Wykazano również, że z takich stanów można wydestylować czyste splątanie w formie singletów. Wielkość $I_c = -I$ była wprowadzona w 1996 r. w różnych kontekstach i nazwana informacją koherentną. Badania prowadzone od 1998 r., a uwieńczone sukcesem w roku 2004 wykazały, że koherentna informacja stanowi w teorii transmisji kwantowej informacji wielkość centralną. Mianowicie, najważniejsza wielkość operacyjna w tej teorii – pojemność kanału zdefiniowana jako ilość wiernie przesłanych kubitów (na jedno użycie kanału) wyraża się przez informację koherentną.

Wniosek

Natura splątania kwantowego jest wysoce nieintuicyjna. Na przykład szczególna teoria względności nie dopuszcza przekazywania sygnałów nadświatlnych. Jednakże splątanie doskonale radzi sobie z tym ograniczeniem. Co prawda „generuje” ono natychmiastowe korelacje między zdarzeniami w odległych laboratoriach, jednakże zabrania kontroli nad takimi koincydencjami. Stąd nie mogą być one

wykorzystane do transferu informacji nadświatlnej. Inną osobliwą cechą splątania jest jego „monogamia”. Oznacza to, że jeśli mamy dwa układy A i B maksymalnie splątane, to nie mogą one być splątane z jakimkolwiek innym układem C. Można pokazać, że ta monogamia splątania jest odbiciem znanej zasady, mówiącej, że stany kwantowe nie mogą być klonowane.

Najważniejsze jest to, że splątanie kwantowe stanowi realny zasób, który pozwala wykonywać zadania, jakich nie można wykonać za pomocą zasobów standardowych, takich jak informacja klasyczna lub energia. Jak było wspomniane wyżej, zasób ten jest niesłuchanie wrażliwy na niszczący wpływ środowiska. Jednym z największych wyzwań technologii kwantowej jest znalezienie optymalnych metod czyszczenia splątania będącego „paliwem” podstawowym dla komputera kwantowego. Kończąc, można zaryzykować stwierdzenie, że splątanie jest nie tylko użytecznym zasobem, ale samo jego istnienie jest jedną z najbardziej fascynujących cech Natury. Nie można wykluczyć, że za kwantowym splątaniem kryje się jeszcze niejedna zagadka przyrodnicza.

Lista terminów i akronimów

Kubit: jednostka informacji kwantowej, jest odpowiednikiem bitu z klasycznej teorii informacji. Fizycznie jest reprezentowana jako dwupoziomowy układ, np. cząstka o spinie 1/2.

Komputer kwantowy: maszyna licząca (Feynman 1982, Deutsch 1985) oparta na prawach fizyki kwantowej, która mogłaby szybko rozwiązywać problemy trudne dla klasycznych komputerów.

Klasyczna (kwantowa) entropia: miara informacji niesionej przez dany klasyczny (kwantowy) obiekt.

Literatura

- D. Bouwmeester, A. Ekert, A. Zeilinger, *The Physics of Quantum Information* (Springer-Verlag, 2000).
- G. Alber, T. Beth, M. Horodecki, P. Horodecki, R. Horodecki, H. Weinfurter, R. Werner, A. Zeilinger, *Quantum Information* (Springer-Verlag, 2001).
- A. Peres, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1413 (1996).
- R. Horodecki, M. Horodecki, *Phys. Rev. A* **54**, 1838 (1996).
- B. Schumacher, M.A. Nielsen, *Phys. Rev. A* **54**, 2629 (1996).
- D. Bruss, *J. Math. Phys.* **43**, 4237 (2002).
- K. Audenaert, M.B. Plenio, J. Eisert, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 027901 (2003).
- B.M. Terhal, M.M. Wolf, A.C. Doherty, *Phys. Today* **56**(4), 46 (2003); przekład polski: *Postępy Fizyki* **56**, 75 (2005).
- R. Horodecki, M. Horodecki, P. Horodecki, *IBM J. Res.&Dev.* **48**, 139 (2004); www.research.ibm.com/journal/rd48-1.html.
- O. Guehne, M. Lewenstein, *Phys. Rev. A* **70**, 022316 (2004).

Od fal spinowych do gigantycznego magnetooporu (GMR) i dalej*

Peter A. Grünberg

Institut für Festkörperforschung, Forschungszentrum Jülich, Niemcy

From spin waves to giant magnetoresistance (GMR) and beyond

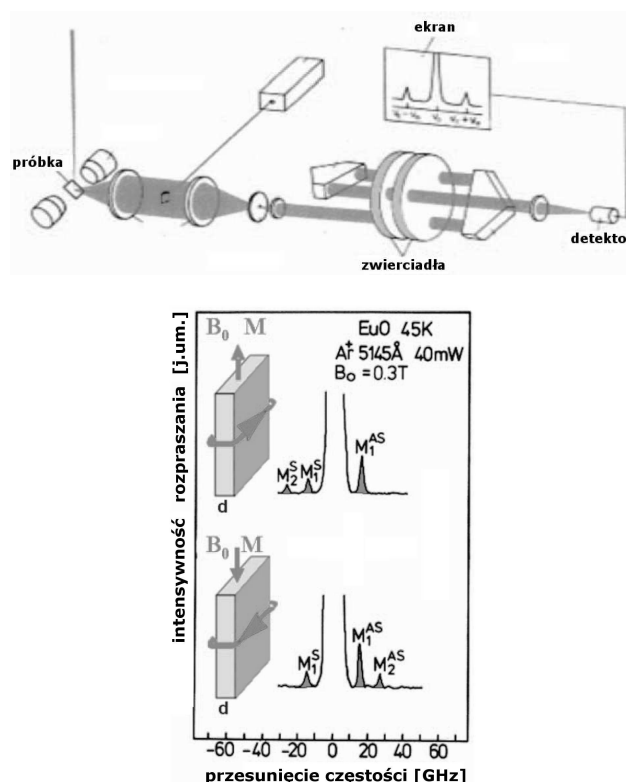
Nobel Lecture, 8 December 2007, Stockholm

Odkrycie rozpraszania światła na powierzchniowych falach spinowych Damona–Eshbacha

Instytut Magnetyzmu Oddziału Fizyki Ciała Stałego Centrum Badawczego w Jülich (Niemcy), do którego dołączyłem w 1972 r., został utworzony w roku 1971 z inicjatywy prof. W. Zinna. Głównym tematem badawczym były właściwości wzorcowych półprzewodników magnetycznych EuO oraz EuS o temperaturach Curie odpowiednio $T_C = 60$ K i $T_C = 17$ K. Z metodami opartymi na rozpraszaniu światła (LS – light scattering) miałem do czynienia, zanim jeszcze przybyłem do Jülich, byłem więc bardzo zainteresowany obserwacją fal spinowych w materiałach magnetycznych za pomocą metody LS.

Badania LS mogą być przeprowadzone przy użyciu spektrometrów siatkowych, nosząc wówczas nazwę spektroskopii ramanowskiej, lub alternatywnie za pomocą spektroskopii rozpraszania Brillouina (BLS). W tym drugim przypadku, do analizy częstości rozproszonego światła stosuje się interferometr Fábry’ego–Pérot’a (FP) (patrz rys. 1). Główna część spektrometru składa się z dwóch zwierciadeł FP, których wzajemna odległość jest systematycznie zmieniana w trakcie pracy urządzenia. Spektroskopię BLS wykorzystuje się, gdy przesunięcie częstości światła rozproszonego jest niewielkie (poniżej 100 GHz), tak jak można oczekiwać dla fal spinowych w ferromagnetykach.

We wczesnych latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia nastąpił znaczny postęp techniczny w obszarze metod BLS, a mianowicie wynalezienie układów wielokrotnego przebiegu, a później połączenie dwóch interferometrów wielokrotnego przebiegu w jeden zespół. Twórcą tego rozwiązania był dr J.A. Sandercock z Zurychu. Ponieważ mieliśmy możliwość urządzenia nowego laboratorium, nasz wybór padł na BLS i początkowo korzystaliśmy z pojedynczego urządzenia o potrójnym przebiegu, jak po-



Rys. 1. U góry: schemat spektrometru rozpraszania Brillouina używanego do detekcji fal spinowych. U dołu: widma rozpraszania na objętościowych falach spinowych (zaznaczone jako M_1) oraz powierzchniowych falach spinowych Damona–Eshbacha (zaznaczone jako M_2). Kierunek pola B_0 oraz namagnesowania M w części dolnej wykresu został odwrócony w stosunku do tego w części górnej (z pracy [1]).

kazano w górnej części rys. 1. Dzięki niemu rozpoczęliśmy badania fal spinowych w EuO.

Fale spinowe, których się spodziewaliśmy, można było znaleźć oraz rozpoznać jako maksima na rys. 1 (za-

*Wykład noblowski, wygłoszony 8 grudnia 2007 r. w Sztokholmie, został przetłumaczony za zgodą Fundacji Nobla. [Translated with permission. Copyright © 2007 by the Nobel Foundation]

znaczone jako M_1). Różnice w natężeniu sygnału po stronie stokesowskiej (S) i antystokesowskiej (AS) były znane z innych prac i wynikały z oddziaływań magneto optycznych między światłem i falami spinowymi.

Maksima oznaczone jako M_2 pozostawały jednakże przez pewien czas zagadką, dopóki nie zaczęło nam sprzyjać szczęście. W tym przypadku szczęściem okazała się awaria układu, naprawa i niezamierzona zamiana styków podczas ponownego podłączania magnesu do źródła napięcia. Ku naszemu zdziwieniu, strony S oraz AS wymieniły się miejscami. Aby zrozumieć, co to oznacza, należy pamiętać, że klasycznie rozpraszanie S i AS jest powiązane z kierunkiem rozchodzenia się obserwowanego modu, który jest przeciwny dla obu przypadków. Staje się to jasne, gdy rozważymy odpowiednie przesunięcie doplerowskie – ku wyższym częstotliwościom, kiedy fala porusza się w kierunku obserwatora, oraz ku niższym, gdy się od niego oddala. Położenie obserwatora w tym przypadku byłoby takie samo jak detektora na rys. 1. Pojawienie się maksimum M_2 w widmie wyłącznie po stronie S lub AS można wyjaśnić przez jednokierunkowe rozchodzenie się odpowiednich fal spinowych wzdłuż powierzchni próbki. Kierunek ten można odwrócić przez zmianę kierunku B_0 oraz M na przeciwny.

Jednokierunkowe zachowanie się fali można wytłumaczyć zasadami symetrii. W tym punkcie warto przypomnieć, że wektory osiowe występujące w naturze, takie jak B czy M w dolnej części rys. 1, zmieniają znak na przeciwny w wyniku odwrócenia czasu, i takiej samej zmianie podlega zwrot rozchodzenia się fali powierzchniowej, jak zaznaczono. Sytuacje górna i dolna są zatem powiązane przez symetrię odwrócenia czasu, która obowiązuje przy braku tłumienia. Stąd jednokierunkowe zachowanie odzwierciedla symetrię układu.

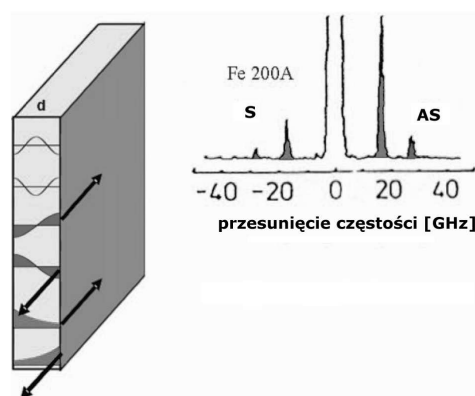
Ostatecznie, obserwowane fale zostały zidentyfikowane jako powierzchniowe mody Damona–Eshbacha (DE), znane z teorii oraz doświadczeń wykorzystujących mikro-fale.

Parametry magnetyczne EuO pozwalają przewidzieć, że w rozważanym przypadku głębokość wnikania dla modów DE powinna wynosić kilkadziesiąt Å. Grubość próbki d jest natomiast rzędu mm. Dlatego, dla obecnych celów, EuO jest nieprzezroczysty. W takim przypadku, fale rozchodzące się na tylnej ścianie próbki w kierunku przeciwnym do kierunku fali rozchodzącej się na ścianie przedniej nie mogą być obserwowane w omawianym doświadczeniu. BLS jest zawsze albo typu S, albo typu AS, ale nigdy nie obu naraz. Dzięki tym wszystkim wyjątkowym własnościom, wyniki zamieszczone na rys. 1 zostały również przedstawione w podręczniku [2] jako przykłady obecnych badań w obszarze magnetyzmu.

Rozpraszanie Brillouina (BLS) na falach spinowych w pojedynczych cienkich warstwach magnetycznych

W dalszym ciągu rozpatrujemy układ w geometrii wprowadzonej na rys. 1, ale o znacznie mniejszej gru-

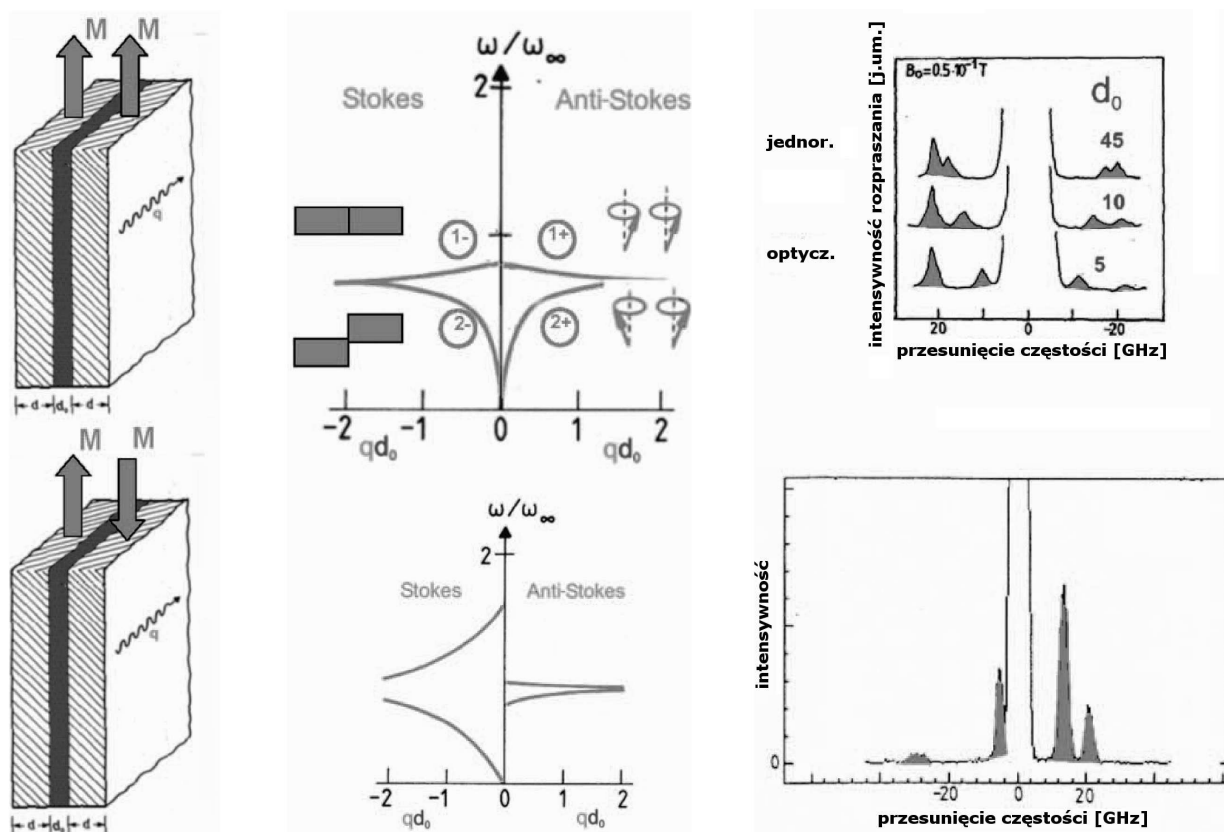
bości d , rzędu 200 Å. Jako materiał wybieramy Fe. Mody objętościowe ulegają teraz rozszczepieniu na szereg fal stojących i są przesunięte ku wyższym częstotliwościom. W układzie pokazanym na rys. 2 jedynie fale DE oraz pierwsza fala stojąca leżą w zakresie częstotliwości podlegających obserwacji. Schematy możliwych typów fal (po lewej) przedstawiają rozkłady amplitud, przy czym precesja lokalna jest na ogół eliptyczna. Mody DE o danym kierunku propagacji mają skończone amplitudy na obu powierzchniach i dlatego oba kierunki są widziane jako rozpraszanie S oraz AS. Podobnie jak na rys. 1, powierzchnia próbki, od której pochodzi przeważająca część zaobserwowanego rozpraszania, oznaczona jest jako ciemnoszara.



Rys. 2. Powierzchniowe fale spinowe DE i pierwsza fala stojąca w cienkiej warstwie Fe oraz ich obserwacja przy użyciu techniki BLS. Przeciwnie kierunki propagacji (czarne strzałki) odpowiadają rozpraszaniu S oraz AS. Fale stojące o wyższych częstotliwościach pokazane w górnej części po lewej stronie znajdują się poza zakresem możliwych do zaobserwowania częstotliwości [3].

Sprężone dipolowo fale DE w podwójnych warstwach magnetycznych o równoległym i antyrównoległym ustawieniu namagnesowania

Rozważymy teraz podwójne warstwy magnetyczne (zwane czasami także trójwarstwami), jak pokazano w lewej części rys. 3 [3]. W układzie tym są cztery powierzchnie magnetyczne i na każdej z nich mogą rozchodzić się fale DE, które oddziałują za pośrednictwem wytworzonych przez nie oscylujących pól rozproszonych. Obliczenia polegają na zastosowaniu zlinearyzowanego równania Landaua–Lifszycza z warunkami brzegowymi wynikającymi z równań Maxwella. Środkowa część rysunku pokazuje wynik dla częstotliwości fali w funkcji grubości przekładki międzywarstwowej d_0 pomnożonej przez wartość wektora falowego q fali. Wartość wektora q jest wyznaczona przez geometrię doświadczenia BLS, włączając w to także długość fali użytego światła lasera. Typowa wartość to $q = 1,73 \cdot 10^{-2} \text{ nm}^{-1}$. Stąd $qd_0 = 1$ odpowiada $d_0 = 58 \text{ nm}$. Jest to długość zaniku fali DE z dala od powierzchni próbki.



Rys. 3. Sprężone fale DE w podwójnej warstwie magnetycznej dla równoległego (część górna) oraz antyrównoległego (część dolna) ustawienia namagnesowania $\mathbf{M}$ [3]. Obliczenia przeprowadzono w granicy dipolowej. Dla uzyskania widma w ustawieniu antyrównoległym użyto próbki wykazującej uporządkowanie antyferromagnetyczne AF (omówione w dalszej części). Położenie maksimów określone jest głównie przez oddziaływanie dipolowe z małymi poprawkami wynikającymi ze sprzężenia wymiennego.

W przypadku ustawienia równoległego obliczenia dają wykres symetryczny, tzn. uzyskuje się te same częstotliwości dla obu znaków q . Natomiast dla ustawienia antyrównoległego otrzymane gałęzie nie są symetryczne, co znajduje również potwierdzenie w doświadczeniu.

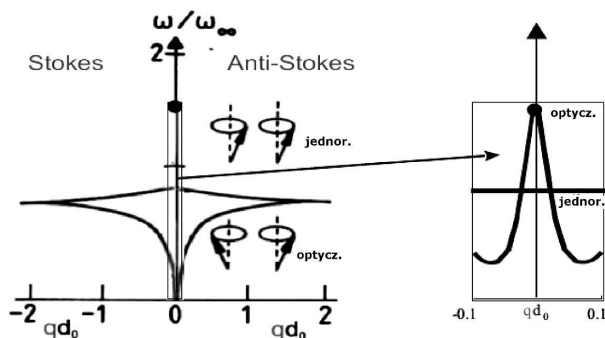
Rysunek 3 przedstawia ponadto kilka dodatkowych szczególnych właściwości omawianych fal. Środkowa część pokazuje, że górne gałęzie, $1+$ oraz $1-$, cechuje precesja w fazie namagnesowania $\mathbf{M}$, podczas gdy dolne gałęzie, $2+$ oraz $2-$, są przesunięte w fazie o 180° . W środkowej części po lewej stronie, właściwość ta jest ponownie zilustrowana przez pokazanie rozkładu amplitud wewnątrz przekroju poprzecznego, gdzie zaniedbane zostało tłumienie fal DE. Należy przy tym zwrócić uwagę na skok fazy o 180° w środkowej części struktury.

Podwójna warstwa z uwzględnionym międzywarstwowym oddziaływaniem wymiennym

Jakościowa zmiana zachowania modów dipolowych wskutek uwzględnienia ferromagnetycznego (F) oddziaływania wymiennego pomiędzy warstwami (IEC – interlayer exchange coupling) jest stosunkowo łatwa do przewidzenia. Dzieje się tak, ponieważ wynikiem pełnego sprzężenia

nia F jest pojedyncza warstwa, której własności już znamy, jak pokazano na rys. 2. Dlaczego zatem na rys. 4 pierwsza fala stojąca powstaje z dolnej gałęzi dipolowej, a nie z górnej? Staje się to jasne, kiedy rozważymy właściwości fal wynikające z symetrii, jak przedstawiono na środku górnej części rys. 3. Gdy IEC jest „włączone”, zgodnie z zasadą zachowania parzystości, mod o kształcie amplitudy ze skokiem fazy o 180° przekształca się w pierwszą falę stojącą. Zauważmy, że skok fazy o 180° prowadziłby do bardzo dużej energii wymiany, czemu zapobiega utworzenie się węzła (patrz rys. 2).

Na rysunku 3 rozważaliśmy możliwość antyrównoległego ustawienia wektorów namagnesowania warstw. Jednym ze sposobów, by to osiągnąć, może być antyferromagnetyczne (AF) sprzężenie wymienne między warstwami. Czego powinniśmy zatem oczekiwać, jeżeli chcemy odróżnić ten rodzaj sprzężenia na podstawie zachowania się fal spinowych? W tym miejscu trzeba wspomnieć, że większość naszych doświadczeń wykonywana jest w stanie nasycenia. Dlatego niezależnie od tego czy sprzężenie jest typu F, czy AF, w doświadczeniu typu BLS stosowalibyśmy odpowiednio silne pole magnetyczne, tak aby otrzymać ustawienie równoległe (z jednym ważnym wyjątkiem opisanym poniżej). Zaletą takiego podejścia jest dobrze określona sytuacja doświadczalna.



Rys. 4. Spodziewany wpływ ferromagnetycznego oddziaływania wymiennego między warstwami na gałęzie odpowiadające sprzężeniu dipolowemu. W granicy pełnej wymiany dla $d_0 = 0$ dolna gałąź zostaje zastąpiona przez kropkę, która przedstawia pierwszą falę stojącą w połączonej warstwie pojedynczej. Ogólne zachowanie dla małych d_0 pokazane jest po prawej stronie z uwzględnieniem wymiennego oddziaływania międzywarstwowego, tutaj tylko ferromagnetycznego. Dla dolnej gałęzi występuje z kolei przejście od przypadku, w którym przeważa oddziaływanie dipolowe, do przypadku, gdzie dominuje oddziaływanie wymienne między warstwami. Górna gałąź dla oddziaływań dipolowych staje się modem DE połączonej warstwy. W pokazanym obszarze małych d_0 jego częstość jest niemal stała (linia pozioma). Lewy rysunek pokazuje tylko międzywarstwowe oddziaływanie dipolowe.

W przypadku nasycenia magnetycznego górna gałąź dana jest przez jednorodną precesję całkowitego momentu i dlatego jest ona niezależna od IEC.

Kształt dolnej gałęzi można uzasadnić następująco. Dla wektorów namagnesowania ustawionych równolegle zarówno zewnętrzne pole, jak i ferromagnetyczne IEC powinny zwiększać siłę zwrotną (powodującą powrót układu do stanu równowagi), a stąd również częstość fal spinowych. W przeciwieństwie do omówionego zachowania, IEC typu AF powinno osłabiać wpływ pola zewnętrznego, prowadząc do zmniejszenia częstości. W obecnie rozważanym przypadku, oddziaływanie dipolowe działa w podobny sposób. Opierając się zatem na tych samych prostych argumentach można oczekiwać, że częstość dolnej gałęzi ulegnie dalszemu zmniejszeniu dla antyferromagnetycznego IEC oraz zwiększeniu dla ferromagnetycznego IEC, jak pokazano na rys. 4. Z drugiej jednak strony, jeżeli IEC jest antyferromagnetyczne, to dla dostatecznie małych pól zewnętrznych powinniśmy uzyskać ustawienie antyrównoległe. W takiej sytuacji gałęzie przedstawione w dolnej części rys. 3 mogłyby zostać wykorzystane do stwierdzenia antyrównoległego ustawienia wektorów namagnesowania.

Przedstawiony właśnie pomysł został później zbadany oraz szczegółowo przeanalizowany przez nasz zespół [4] oraz przez Cochran i Dutchera [5]. Druga ze wspomnianych prac jest źródłem, z którego przejęliśmy określenie „mod jednorodny” (ang. uniform mode) dla precesji w fazie oraz „mod optyczny” (ang. optic mode) dla precesji z przesunięciem fazy o 180° . Opisana zasada została także

użyta przez inne grupy do oszacowania sprzężenia wymiennego z doświadczeń wykorzystujących mikrofałę.

Dzięki dogłębniemu zrozumieniu opisanego zjawiska, na początku lat osiemdziesiątych XX w. zorientowaliśmy się, że dysponujemy niezwykle cennym narzędziem, którym można się posłużyć do rozpatrzenia pozostającego długo bez odpowiedzi pytania dotyczącego zjawiska sprzężenia w warstwowych układach magnetycznych. W owym czasie panowało przekonanie, że sprzężenie ferromagnetyczne może być powodowane przez otwórki i mostki ferromagnetyczne poprzez warstwę rozdzielającą. Jak pokazał Néel, przyczyną mogły być również skorelowane niejednorodności powierzchni warstwy rozdzielającej. Stąd efekt ten nazywano „efektem skórki pomarańczowej” lub sprzężeniem typu Néela. Sprzężenie antyferromagnetyczne mogłoby także wystąpić wskutek zjawisk brzegowych, takich jak na przykład zamykanie strumienia pola magnetycznego. Rzeczywiste mechanizmy rządzące sprzężeniem między warstwami, podobne do sprzężenia RKKY obecnego w rozrzedzonych stopach magnetycznych, nie były jeszcze wówczas znane.

Dodatkowym czynnikiem utrudniającym istniejący stan rzeczy były niewystarczająco rozwinięte technologie przygotowania próbek. Podczas naszej pierwszej próby zbadania sprzężenia oraz jego zależności od rodzaju materiału, z którego wykonano warstwę rozdzielającą, i od samej grubości warstwy, zaobserwowaliśmy jedynie sprzężenie ferromagnetyczne – prawdopodobnie wynikające z istnienia mostków.

Z różnych powodów skupiliśmy się wówczas na warstwach wykonanych z chromu (Cr). Po pierwsze, Cr sam w sobie jest antyferromagnetykiem. Biorąc pod uwagę jego strukturę magnetyczną dla dostatecznie cienkich warstw, można spodziewać się, że sprzężenie wymienne będzie oscylowało pomiędzy F i AF z okresem równym dwóm monowarstwom (ML – monolayers). Po drugie, Cr bardzo dobrze dopasowuje się do żelaza (Fe) pod względem własności krystalograficznych oraz termodynamicznych, co ma duże znaczenie w procesie wzrostu. Dlatego struktury Fe/Cr/Fe wydawały się najbardziej obiecujące.

Odkrycie sprzężenia antyferromagnetycznego (AF)

Miałem wówczas dużo szczęścia, gdyż pojawiła się przede mną szansa wzięcia urlopu naukowego i wyjazdu do Argonne National Laboratory w Stanach Zjednoczonych. W zespole skupionym wokół M. Brodsky'ego w Oddziale Nauki o Materiałach (Materials Science) znalazłem grupę o znacznym doświadczeniu w zakresie przygotowania próbek Fe/Cr/Fe na podłożu z łupanej soli kamiennej. Dla porównania sporządziliśmy także próbki Fe/Au/Fe.

Widma obu układów w odpowiednio silnym polu dla całkowitego nasycenia próbek pokazane są po lewej stronie rys. 5. Widmo dla $d_0 = 0$ przedstawia granicę pełnego sprzężenia ferromagnetycznego. Natomiast dwa widma u dołu odpowiadają czystemu sprzężeniu dipolowemu, jak na rys. 3. Porównując dane dla Fe/Au/Fe z rys. 4

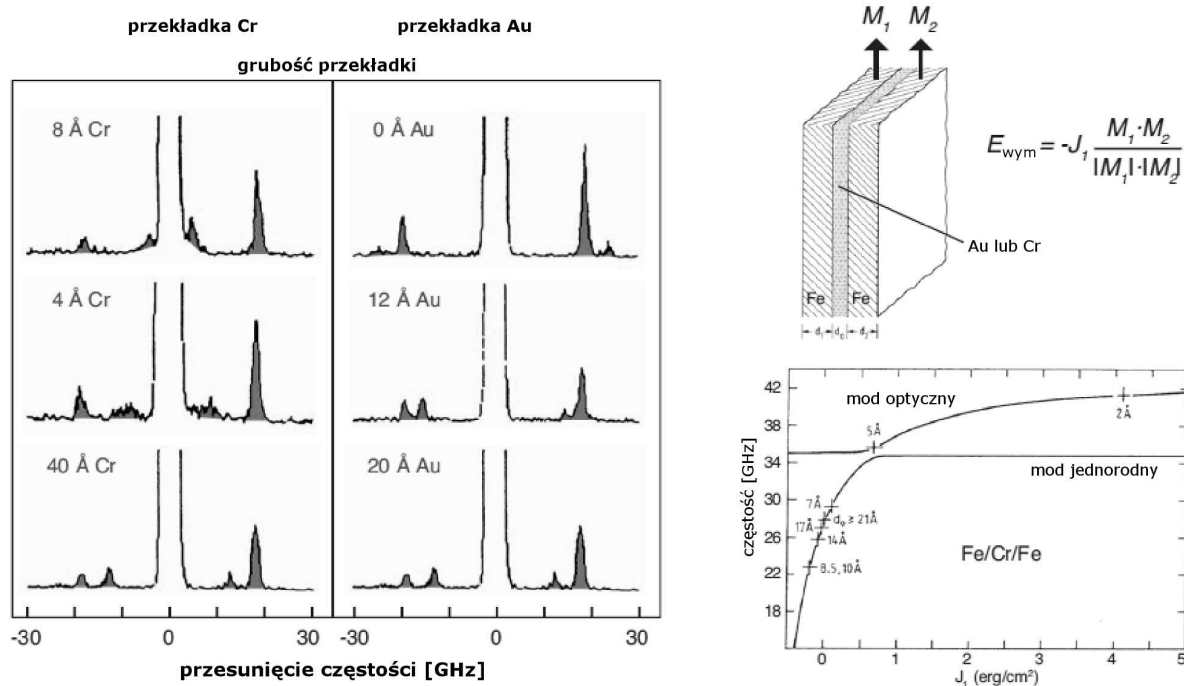
wywnioskowaliśmy, że sprzężenie dla warstw rozdzielających wykonanych z Au jest ferromagnetyczne. Jednakże patrząc na widmo w górnym rogu po lewej stronie dla warstw z Cr, czytelnik może podzielić wrażenie, jakie miałem, gdy po raz pierwszy oglądałem widmo BLS przedstawiające antyferromagnetyczne IEC.

W podejściu fenomenologicznym IEC opisane jest za pomocą powierzchniowej gęstości energii E_{wym} , jak przytoczono na rys. 5. Zgodnie z tym, co zostało dotychczas powiedziane, z przyczyn fizycznych mod optyczny zwiększa swą częstość dla sprzężenia ferromagnetycznego ($J_1 > 0$), a zmniejsza ją dla sprzężenia antyferromagnetycznego ($J_1 < 0$).

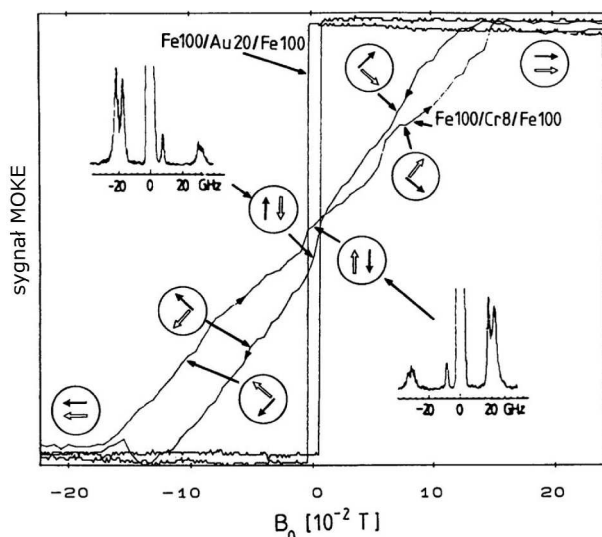
Rysunek 6 przedstawia wpływ sprzężenia F oraz AF na krzywą przemagnesowania (tzw. histerezę). Wykreślony jest sygnał magnetooptycznego zjawiska Kerra (MOKE) w funkcji zewnętrznego pola B_0 , który w przybliżeniu jest proporcjonalny do namagnesowania M . Widać silne nachylenie dla próbki Fe/Cr/Fe i jego brak dla drugiej próbki (Fe/Au/Fe), która wykazuje przemagnesowanie charakterystyczne dla niesprężonej lub ferromagnetycznie sprzężonej próbki o małym polu koercji. Nie można rozróżnić sprzężenia ferromagnetycznego i braku sprzężenia. Co więcej, należy zwrócić uwagę, że nachylenie krzywej histerezy nie jest niczym wyjątkowym. Jest to zjawisko występujące dość często i może mieć wiele przyczyn. Wykorzystanie bardziej zaawansowanych narzędzi badawczych – jak BLS – do wykonania pierwszych obserwacji nie jest żadnym luksusem. Zauważmy także, że informa-

cje dostarczane przez krzywe MOKE uzupełniane są przez widma BLS, co daje na tym etapie pewność, że mamy do czynienia z ustawieniem antyrównoległym wektorów namagnesowania. Jednakże, kiedy mamy pewność, że nachylenie pochodzi od sprzężenia AF, możemy równie dobrze posłużyć się prostszą metodą do uzyskania dużej ilości danych.

Na rysunku 7 widzimy wynik rozszerzonych badań nad sprzężeniem między warstwami, przedstawiony za pomocą częstości modów w funkcji grubości przekładki z chromu wyrażonej w angstrmach. Jest to pierwszy względnie kompletny wynik uzyskany w maju 1985 r., który został bezpośrednio skopiowany z mojego notatnika laboratoryjnego. Minima dla dolnej gałęzi wskazują na sprzężenie AF w rozważanym zakresie. Drugie, płytsze minimum początkowo okazało się niewystarczająco powtarzalne i dlatego nie zostało umieszczone w naszej pierwszej publikacji. Ponadto, byliśmy niezbyt zadowoleni z podłoża NaCl w związku z ich podatnością na wilgoć. Ponieważ w tym samym czasie dostępny stał się epitaksjalny GaAs, przeczuciliśmy się na podłoża wykonane z tego właśnie materiału. Ostatecznie, sprzężenie AF zostało zaobserwowane w sposób powtarzalny, a wynik z rys. 7 stał się bardziej charakterystyczny niż oczekiwany okres równy 2 ML. Jednakże wiele lat później, dzięki udoskonaleniu technologii wzrostu, można było zaobserwować [7] tę oraz inne wynikające z rozważań teoretycznych własności pochodzące od niewspółmiernej fali gęstości spinowej w Cr.



Rys. 5. Z lewej: reprezentatywne widma BLS dla fal spinowych w Fe/X/Fe, gdzie X = Cr lub Au [6]. Wykres z prawej przedstawia częstości modów w funkcji parametru międzywarstwowego sprzężenia wymiennego J_1 [4]; linie ciągłe pokazują wyniki teoretyczne.



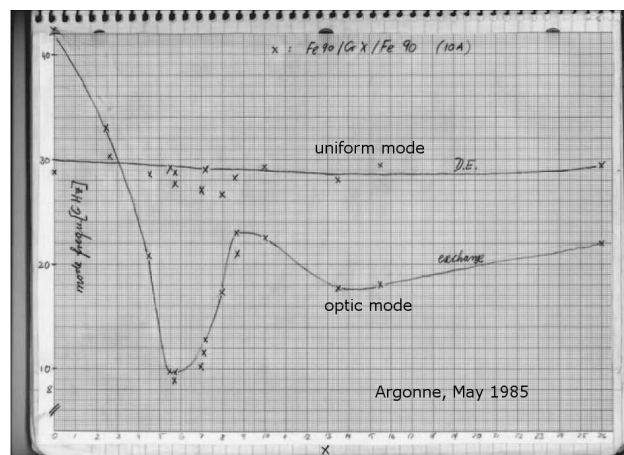
Rys. 6. Krzywe przemagnesowania próbek o sprzężeniu ferromagnetycznym (Fe/Au/Fe) oraz o sprzężeniu antyferromagnetycznym (Fe/Cr/Fe)

W 1986 r., kiedy opublikowaliśmy nasze wyniki [6], dostępne były dwa inne artykuły dotyczące sprzężenia wymiennego pomiędzy warstwami, a mianowicie dla Dy oraz dla Gd przez warstwy rozdzielające z Y, obserwowanego za pomocą rozpraszania neutronów (cytowane w publikacji [8]). Dla przykładu z Gd wykazano, że sprzężenie ma charakter oscylacyjny, jak pokazano na rys. 7, podobnie jak dla wielu innych przykładów, które następnie pojawiły się w literaturze.

Odkrycie gigantycznego magnetooporu

Sir Nevil Mott zaproponował dwukanałowy model przepływu prądu dla opisu oporu elektrycznego stopów magnetycznych. Model ten opiera się na fakcie, że opór jest wynikiem rozpraszania elektronów. W materiałach magnetycznych zależy ono od orientacji spinu. Wskutek kwantyzacji przestrzennej, będącej konsekwencją mechaniki kwantowej, orientacja ta może być jedynie równoległa lub antyrównoległa względem lokalnego wektora namagnesowania. Ponieważ odwrócenie spinu występuje niezwykle rzadko, dlatego każda z tych dwóch orientacji określa jeden kanał prądowy.

W ramach takiego opisu można się spodziewać dużych zmian oporu, jeżeli udałoby się zmienić kierunek lokalnego wektora namagnesowania w skali odległości odpowiadających średniej drodze swobodnej elektronów lub nawet krótszej. W przypadku, kiedy szybkości rozpraszania są różne, jest większa szansa, że całkowita szybkość rozpraszania wzrośnie. Ponieważ średnie drogi swobodne są rzędu 10 nm, odległość 1 nm, o jaką są rozdzielone warstwy magnetyczne, doskonale spełnia wspomniany warunek. Spodziewamy się zatem, że jeżeli względna orientacja wektorów namagnesowania zmieni się z równoległej na antyrównoległą, tak jak po lewej stronie rys. 8, to opór wzrośnie.



Rys. 7. U góry: pierwsze pomiary sprzężenia dla szerokiego zakresu grubości warstwy Cr, wyrażone za pomocą częstości fal spinowych. Warto zwrócić uwagę, że częstość modu DE pozostaje niemal stała, podczas gdy mody optyczne (wymienne) wykazują dwa minima, świadczące o sprzężeniu AF. U dołu: oszacowanie częstości dla innej próbki niewykazującej drugiego minimum względem parametru sprzężenia J_1 .

W celu poszerzenia możliwości doświadczalnych wykorzystaliśmy próbki przygotowane epitaksjalnie na powierzchni (110) GaAs. Płaszczyzna warstwy była równoległa do płaszczyzny atomowej (110) i wykazywała zarówno oś łatwą (EA – easy axis), jak i trudną (HA – hard axis). Jako grubość d pojedynczej cienkiej warstwy żelaza wybraliśmy $d = 12$ nm. Grubość warstwy Cr była $d_0 = 1$ nm, co odpowiadało pierwszemu maksimum dla sprzężenia AF. Naszym odnośnikiem była także pojedyncza warstwa Fe o grubości $d = 25$ nm, którą dla porównania wykorzystaliśmy do pomiaru efektu anizotropowego magnetooporu. Widziane z boku próbki miały kształt długiego paska z elektrodami dołączonymi na obu końcach.

Na rysunkach 8a oraz 8b możemy zobaczyć pętle histerezy otrzymane za pomocą MOKE dla podwójnych warstw ze sprzężeniem AF oraz B_0 skierowanym wzdłuż

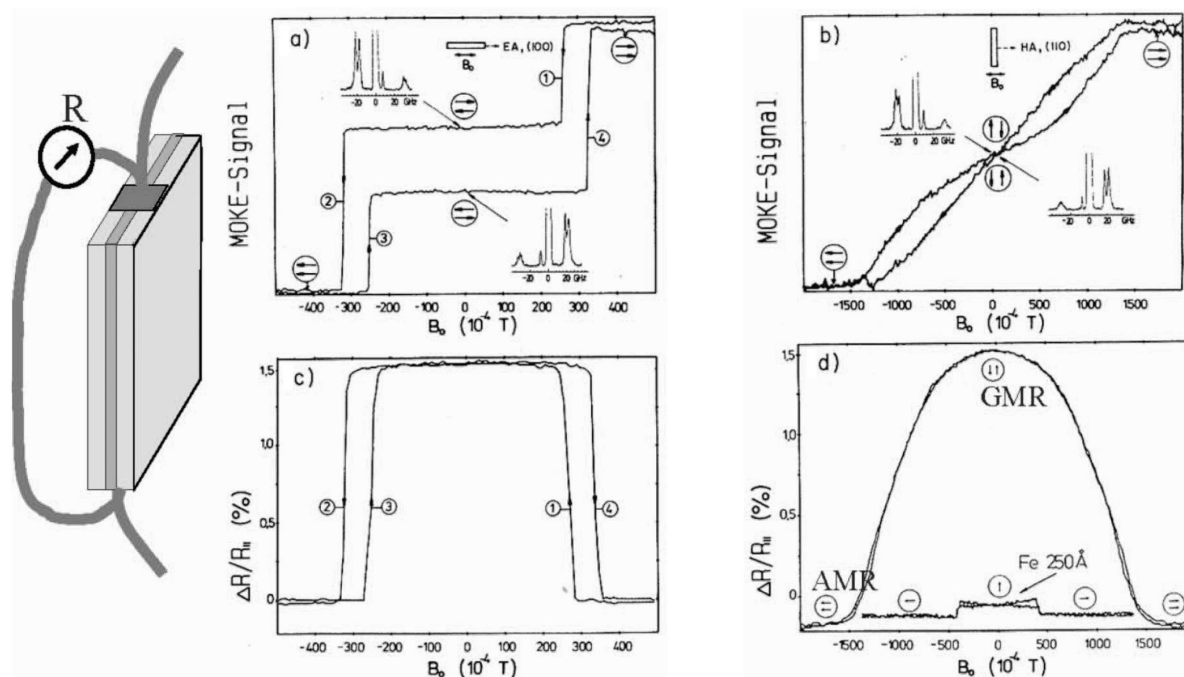
osi EA i HA. Kierunki wektorów namagnesowania oznaczone są przez umieszczone w kółkach pary strzałek. Informacja ta została uzyskana na podstawie analizy natężenia sygnału MOKE oraz przedstawionych widm LS. Jako przykład przedyskutujemy szczegółowo pętlę histerezy pokazaną na rys. 8a. Pole B_0 jest przyłożone wzdłuż osi EA, która jest długą osią paska. Oczywiście jest, że dla odpowiednio dużego B_0 próbka ulega nasyceniu wzdłuż kierunku pola (ustawienie równoległe). Jeżeli zaczynamy od ustawienia równoległego przy dodatnim kierunku pola i zmniejszamy B_0 , to przy pewnej, ale nadal dodatniej wartości B_0 namagnesowanie jednej z warstw obraca się poprzez ruch ścianek domenowych (punkt 1). Stąd dla małych pól występuje ustawienie antyrównoległe. W ujemnym polu, w punkcie 2, namagnesowanie drugiej warstwy również ulega odwróceniu i pojawia się nasycenie. Punkty 3 i 4 wskazują obrót namagnesowania, gdy B_0 jest przemiatane w kierunku przeciwnym.

Przebieg magnetooporu (MR) przedstawiony jest na rys. 8c oraz 8d. Wykreślono na nich względną zmianę oporu $(R - R_{\uparrow\uparrow})/R_{\uparrow\uparrow}$, jaką otrzymujemy w wyniku przebiegu pętli histerezy. $R_{\uparrow\uparrow}$ jest oporem dla stanu nasycenia wzdłuż osi EA. Na rysunku 8d pokazujemy także magnetoopór pojedynczej warstwy Fe, zmierzony dla B_0 wzdłuż HA. Ponieważ dla dużych B_0 namagnesowanie ustawia się wzdłuż kierunku $[110]$, a dla małych B_0 wzdłuż kierunku $[100]$, maksymalna zmiana R zaobserwowana na wykresie przedstawia magnetoopór anizotropowy $MR = (R_{\perp} - R_{\parallel})/R_{\parallel}$ dla warstwy żelaza o grubości 25 nm. Wartość $-0,13\%$ pozostaje w zgodzie z wartością literaturową $-0,2\%$. Dla pojedynczej warstwy oraz B_0 wzdłuż osi EA, nie występował mierzalny MR. Przyczyna tego jest

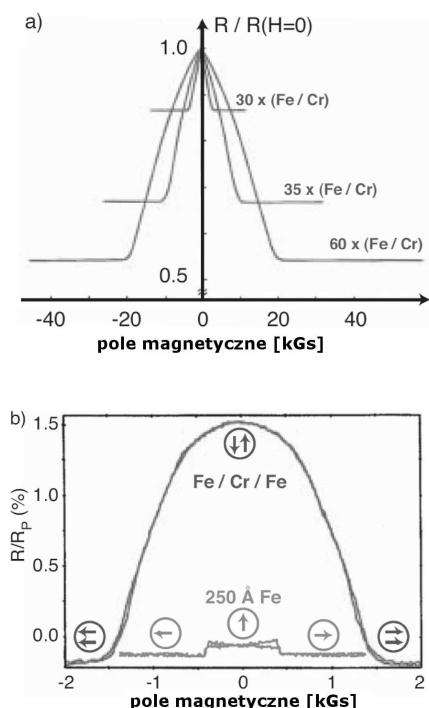
oczywista: wektor namagnesowania jest zawsze ustawiony równolegle względem EA i jego obrót odbywa się jedynie poprzez ruch ścianek domenowych. Na rysunku 8d dla warstwy Fe/Cr/Fe efekt MR występuje zarówno wskutek anizotropii (wartości ujemne), jak i ustawienia antyrównoległego (wartości dodatnie). Poziom zerowy wykresu jest zdefiniowany przez $R = R_{\parallel}$.

W okresie, kiedy został odkryty GMR, było powszechnie wiadomo, że czołowe firmy z branży komputerowej planowały rozwinąć AMR w taki sposób, aby można go było wykorzystać w głowicach odczytujących napędów dysków twardych (HDD). Porównanie pomiędzy AMR a nowo odkrytym zjawiskiem (w późniejszym okresie termin GMR został powszechnie zaakceptowany) zachęciło nas do złożenia wniosku o patent dotyczący wykorzystania GMR w HDD.

Na rysunku 9 [10] możemy zobaczyć porównanie wyników pomiarów przeprowadzonych na wielowarstwie w Orsay oraz na podwójnej warstwie w Jülich. Wartość GMR bliska 80% uzyskana w Orsay dla wielowarstwy stała się podstawą do wprowadzenia określenia „gigantyczny”. Okazuje się, że przewyższa ją jedynie wartość TMR około 500% dla układów zawierających barierę wykonaną z MgO. Należy przy tym być bardzo ostrożnym, ponieważ ogromne znaczenie ma to, czy w badaniach wykorzystujemy izolatory, półprzewodniki, czy metale. Na przykład, półprzewodnik magnetyczny EuS poniżej punktu Curie zmienia swój opór o wiele rzędów wielkości. Jeżeli ograniczymy naszą dyskusję wyłącznie do układów metalicznych, co będzie miało pewne ważne konsekwencje dla zastosowań, użycie określenia „gigantyczny” będzie nadal uzasadnione.



Rys. 8. a) oraz b) – krzywe MOKE oraz widma BLS otrzymane w celu określenia orientacji magnetycznej warstw, jak pokazano za pomocą strzałek; c) oraz d) – względna zmiana oporu odpowiadająca zmianie ustawienia [9]



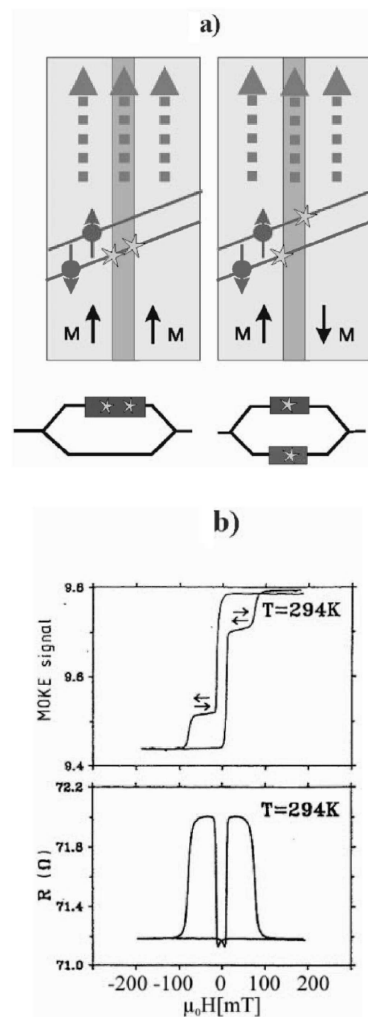
Rys. 9. Zjawisko GMR w wielowarstwie (a) oraz w podwójnej warstwie Fe rozdzielonej warstwą Cr (b). W części b dla porównania pokazano także efekt AMR w warstwie Fe o grubości 250 Å.

Wartość GMR 1,5% dla podwójnej warstwy pokazana na rys. 9b jest mniejsza, ale nadal duża w porównaniu z efektem AMR dla Fe (krzywe u dołu wykresu). Na rysunku 8 pokazano wyniki pomiarów w różnych konfiguracjach ustawienia pola zewnętrznego względem osi anizotropii kryształu, wykonane w celu upewnienia się, że zjawisko jest rzeczywiście wynikiem wzajemnej orientacji wektorów namagnesowania. Małe wartości efektu GMR z rys. 8 i 9b nie są konsekwencją słabej jakości próbek, lecz są typowe dla grubości użytych warstw.

Efekt GMR może być obserwowany w geometrii z prądem płynącym w płaszczyźnie próbki (CIP – current in plane) lub w geometrii z prądem prostopadłym do płaszczyzny próbki (CPP – current perpendicular to plane). Powszechnie stosowaną geometrią jest CIP, także dla większości zastosowań w czujnikach (patrz poniżej). Uważa się, że konfiguracja CPP odegra znaczącą rolę przy projektowaniu czujników przyszłych generacji.

U podstaw mikroskopowego wytłumaczenia zjawiska GMR leży zależność szybkości rozpraszania elektronów od orientacji ich spinów (równoległej lub antyrównoległej) względem kierunku lokalnego namagnesowania; wniosek ten postawili Albert Fert i jego zespół już w swym pierwszym artykule, a następnie zostało to potwierdzone przez analizę liczbową wielu wyników doświadczalnych [12].

Rozważmy teraz sytuację przedstawioną na rys. 10a. Pokazane są tam dwie struktury – jedna o równoległym, a druga o antyrównoległym ustawieniu wektorów nama-



Rys. 10. a) Wytłumaczenie zjawiska GMR w geometrii CIP: zależne od spinu rozpraszanie elektronów oraz zmiana miejsc, w których zachodzą procesy rozpraszania, w wyniku zmiany ustawienia wektorów namagnesowania. Ustawienie antyrównoległe może zostać uzyskane przez antyferromagnetyczne sprzężenie wymienne, jak na rys. 9, lub dzięki wykorzystaniu efektu histerezy, jak na rys. 10b.

gnesowania. W przypadku wyidealizowanym zakładamy, że elektrony o spinach równoległych do lokalnego kierunku namagnesowania nie są rozpraszane. Na rysunku tylko jedna trajektoria elektronu od powierzchni lewej do prawej jest przedstawiona jako reprezentatywna dla całego ruchu elektronów. Przy tak uproszczonym obrazie elektrony, które nie są rozpraszane, powodowałyby zwarcie. Zwarcie zostaje usunięte, gdy wektor namagnesowania jednej z warstw zostaje odwrócony i elektrony o spinie w górę wchodząc do tej warstwy mają spiny skierowane przeciwnie do lokalnego namagnesowania. Obwody zastępcze dla różnych przypadków ustawienia wektorów namagnesowania warstw pokazano w dolnej części rysunku i przedstawiają one wzrost oporu wskutek usunięcia zwarcia. W rzeczywistości oczywiście oba typy elektronów ulegają rozpraszaniu. Wówczas wystarcza, że elek-

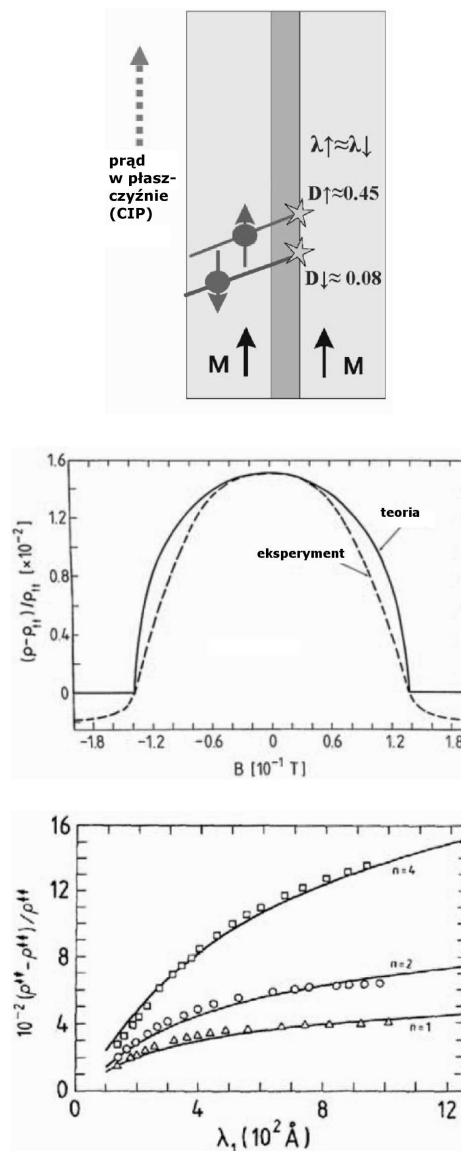
trony o jednej orientacji spinów są rozpraszane bardziej niż elektrony o spinach przeciwnych, aby opór wzrósł dzięki antyrównoległemu ustawieniu wektorów namagnesowania. Z symetrii konfiguracji CIP wynika, że zależny od spinu współczynnik odbicia na powierzchni rozdzielającej warstwy nie ma wpływu na efekt. Przyczyną tego jest brak zmiany pędu w kierunku prądu spowodowany symetrią translacyjną podczas rozpraszania na płaszczyznach rozdzielających warstwy. Sytuacja wygląda inaczej w geometrii CPP, gdzie zarówno zależne od spinu rozpraszanie, jak i zależny od spinu współczynnik odbicia na powierzchni rozdzielającej warstwy mają swój udział w powstaniu zjawiska GMR.

Największa różnica oporu pojawia się wówczas, gdy przy użyciu pola zewnętrznego ustawienie antyrównoległe jest zmieniane w ustawienie równoległe. Ustawienie antyrównoległe można zapewnić dzięki antyferromagnetycznemu sprzężeniu wymiennemu między warstwami, jak w przypadku próbek na rys. 9, lub przez różne pola koercji kolejnych warstw, a w szczególności przez „przyszpilenie” namagnesowania, wykorzystując do tego celu tzw. anizotropię wymienną, jaka występuje w przypadku bezpośredniego kontaktu z materiałem antyferromagnetycznym. Jeżeli zjawisko GMR otrzymane jest za pomocą jednej z dwóch ostatnich metod, a nie na drodze antyferromagnetycznego sprzężenia warstw, to zazwyczaj takie układy w literaturze określa się jako „zawór spinowy”, przy czym wszystkie trzy wspomniane sytuacje nie różnią się pod względem mechanizmu powstania samego zjawiska GMR. Przypadek zaworu spinowego przedstawiony jest na rys. 10b (zobacz także artykuł przeglądowy [10]). Układ składa się ze struktury warstwowej Co/Au/Co o jednej warstwie Co osadzonej bezpośrednio na podłożu z GaAs. Ponieważ warstwa ta podlega dużo większym naprężeniom aniżeli warstwa Co znajdująca się na warstwie rozdzielającej z Au, charakteryzuje się ona większym polem koercji. Podczas obrotu namagnesowania całego układu, wektor namagnesowania tej warstwy obraca się później aniżeli wektor drugiej warstwy, wynikiem czego jest mały zakres pól, dla których może wystąpić antyrównoległe ustawienie wektorów namagnesowania warstw. Na rysunku 10b w górnej jego części, zakres ten jest oznaczony przez antyrównoległe strzałki. Krzywa w dolnej części rys. 10b pokazuje opór elektryczny $R(H)$ i jego wzrost przy antyrównoległym ustawieniu wektorów namagnesowania warstw. Dwie różne metody uzyskania ustawienia antyrównoległego prowadzą do dwóch odmiennych koncepcji wykorzystania zjawiska GMR w czujnikach, jak to zostanie przedstawione w części poświęconej zastosowaniom.

GMR: model Camleya–Barnasia

W okresie kiedy zostało odkryte zjawisko GMR, zbiegiem okoliczności gościłem w moim zespole w Jülich dwóch naukowców, Józefa Barnasia z Poznania w Polsce oraz Boba Camleya z Colorado Springs w Stanach Zjednoczonych. Obaj byli teoretykami, z którymi współpracowałem od kilku lat w zakresie fal spinowych. Opracowali oni

wspólnie metodę opisu zjawiska GMR za pomocą odpowiednich parametrów. Metoda przez nich zaproponowana korzysta z równania Boltzmanna w ramach przybliżenia czasu relaksacji i wkrótce stała się znana jako model Camleya–Barnasia [11] (rys. 11).



Rys. 11. Porównanie wyników doświadczenia z modelem teoretycznym Camleya–Barnasia. U góry: asymetria parametrów rozpraszania dyfuzyjnego, danych przez $D_{\uparrow} \approx 0,45$ oraz $D_{\downarrow} \approx 0,08$. W środku: zmiana oporu względem pola zewnętrznego przy założeniu sprzężenia AF oraz anizotropii kubicznej. U dołu: zmiana oporu względem średniej drogi swobodnej dla układu wielowarstwowego (n – liczba warstw Cr).

Przełączanie magnetyczne indukowane prądem (CIMS)

Indukowane prądem przełączanie magnetyczne można uważać za zjawisko odwrotne do zjawiska GMR. W układzie trójwarstwowym jedna warstwa jest przygoto-

wana tak, że ma ustalony kierunek wektora namagnesowania $\mathbf{M}_{\text{ust}}$, natomiast wektor namagnesowania drugiej warstwy magnetycznej może się swobodnie obracać ($\mathbf{M}_{\text{swob}}$). Wykorzystanie techniki litografii elektronowej pozwala tak uformować próbkę, że prostopadle do jej płaszczyzny może przepływać duży prąd. Można wówczas pokazać, że niezależnie od warunków początkowych, jeśli kierunek prądu będzie taki, że elektrony płyną z warstwy o $\mathbf{M}_{\text{ust}}$ do warstwy o $\mathbf{M}_{\text{swob}}$, to $\mathbf{M}_{\text{swob}}$ przełączy się do stanu o orientacji równoległej. Gdy prąd płynie w przeciwnym kierunku, $\mathbf{M}_{\text{swob}}$ przełącza się do orientacji antyrównoległej. Opisane zjawisko zostało przewidziane przez J. Slonczewskiego oraz L. Bergera, a zaobserwowane po raz pierwszy przez Katine'a i współpracowników. Odnośniki do tych prac podane są w artykule [13], w którym przedstawiony jest także przykład „odwrotnego” zjawiska CIMS, gdzie rola dwóch kierunków prądu została zamieniona.

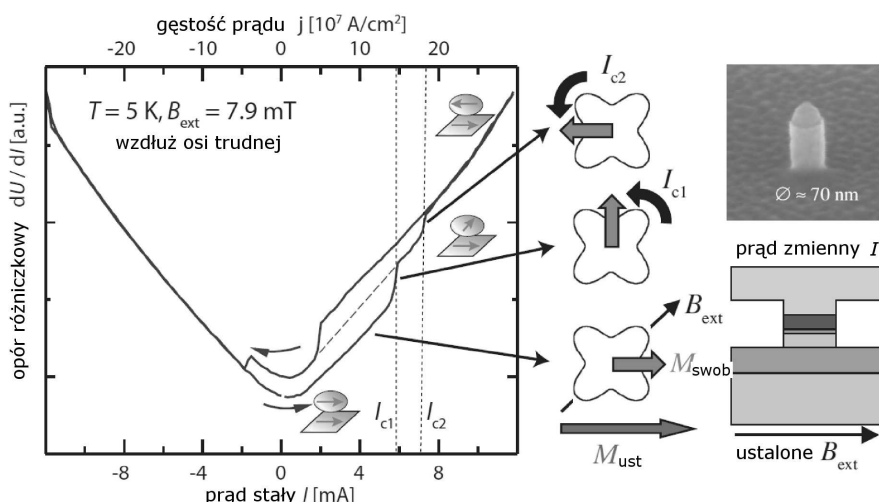
Rysunek 12 przedstawia przykład CIMS uzyskanego niedawno w Jülich dla otrzymanych metodą epitaksjalną próbek Fe/Ag/Fe o czterokrotnej anizotropii kubicznej w płaszczyźnie warstwy. Krzywe o ogólnym kształcie litery U pokazują opór próbki w geometrii CPP. Znaczny wzrost oporu po obu stronach wykresu wynika z grzania się próbki wskutek przepływu prądu o dużym natężeniu. Różne schodki występujące na krzywych są skutkiem przełączania kierunków wektorów namagnesowania pomiędzy różnymi konfiguracjami, jak to pokazano na rysunku, oraz związanych z nimi zmian w efekcie CPP-GMR. Kształty przypominające liście konicyny w środkowej części rysunku przedstawiają anizotropię kubiczną. Wektory namagnesowania ulegają przełączaniu pomiędzy kierunkami wyznaczonymi przez oś łatwą, które zaznaczono przez minima na wykresie biegunowym.

Zastosowania

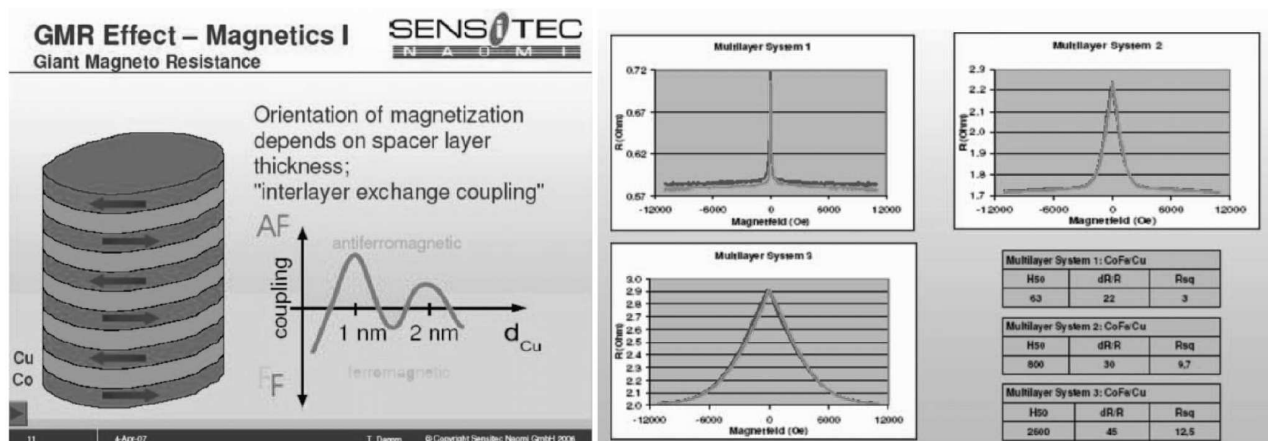
Przejdźmy teraz do zastosowań omówionych zjawisk. Można spokojnie powiedzieć, że zainteresowanie, z jakim

spotkało się zjawisko GMR, wynika głównie z jego znaczenia dla pamięci magnetycznych, w szczególności dla rozwoju napędów dysków twardych. Od czasu wprowadzenia czujników wykorzystujących zjawisko GMR jako elementów odczytujących, około roku 1997, pojemność zapisu wzrosła w przybliżeniu stokrotnie. Wprowadzenie czujników z GMR w napędach twardych dysków odbyło się niezwykle szybko, ponieważ drogę utorowały im głównie magnetoopory korzystające ze zjawiska anizotropowego magnetooporu (AMR). Dzięki temu, że zjawisko GMR przynajmniej w części jest wynikiem zjawisk występujących na granicy warstw (zauważmy, że na rys. 10 procesy rozpraszania celowo zostały zaznaczone na granicach warstw), możliwe stało się wyprodukowanie głowic GMR cieńszych niż korzystające z AMR. Cieńsza warstwa jest mniej podatna na zjawiska prowadzące do jej rozmagnesowania aniżeli warstwa gruba, co jest istotne gdy chcemy zmniejszyć wymiary poprzeczne głowicy w celu uzyskania możliwości odczytu węższej ścieżki. W innych dziedzinach, gdzie małe rozmiary nie są czynnikiem decydującym, AMR oraz GMR mogą nadal współistnieć przez pewien czas. Należy się także spodziewać, że na dłuższą metę stosowanie elementów opartych na zjawisku GMR pozwoli ograniczyć koszty, choćby dlatego, że pojedyncza próbka klinowa pozwala na wyprodukowanie większej liczby czujników.

Zasadniczo istnieją dwie proste koncepcje budowy czujników działających z wykorzystaniem zjawiska GMR, które związane są z dwiema metodami pozwalającymi na uzyskanie antyrównoległego ustawienia wektorów namagnesowania warstw, jak pokazano na rys. 9 oraz 10b. W przypadku czujnika pokazanego na rys. 13 użyto wielu warstw Co/Cu, gdzie grubość warstwy Cu była dobierana tak, aby wystąpiło sprzężenie antyferromagnetyczne. Jego siła oraz inne powiązane z nią własności mogą być dobrane na podstawie krzywych doświadczalnych sprzężenia, również przedstawionych na rysunku. Umieszczone na rysun-



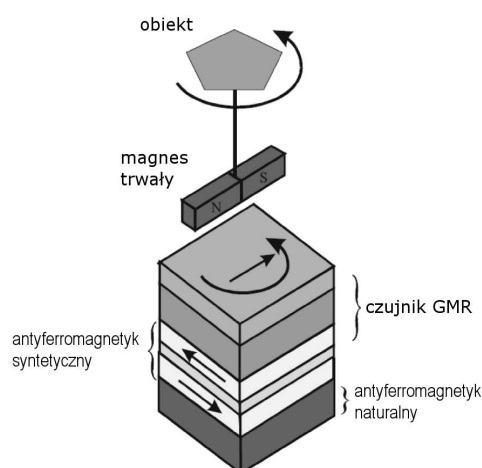
Rys. 12. Dwustopniowy proces indukowanego prądem przełączania magnetycznego w Fe/Ag/Fe. Cztery stany o niemal identycznych energiach stanowią źródło przełączania dwustopniowego [14].



Rys. 13. Zasada działania oraz dane czujnika wykorzystującego zjawisko GMR z antyferromagnetycznym sprzężeniem warstw (dzięki uprzejmości NAOMI-Sensitech, Niemcy)

ku trzy różne wykresy oraz tabela opisują wspomniane własności, w szczególności pole nasycenia oraz czułość. Zaletą tego typu czujnika jest znaczny sygnał, ponieważ można wykorzystać wiele warstw, natomiast wadą to, że jest on unipolarny (dodatnie i ujemne pola dają ten sam sygnał, co również pokazano na wykresach). Czujniki takie nie mogą zatem być wykorzystane do zapisu magnetycznego, gdzie biegunowość pola zawiera zasadniczą informację. Jednakże okazuje się, że istnieje wiele innych zastosowań, jak na przykład wykrywanie położenia i ruchu obiektów, które są magnetyczne lub magnetycznie oznaczone przez doczepienie do nich małego magnesu trwałego. Zastosowania te sięgają od wykrywania zębów obracających się kół zębatych po śledzenie samochodów czy nawet samolotów na potrzeby kontroli ruchu. W przyszłości na parkingach każde miejsce postojowe będzie wyposażone w czujnik wykorzystujący zjawisko GMR, co pozwoli na przekazanie kierowcy przy wjeździe na parking informacji dotyczącej dostępności wolnych miejsc.

Innym typem czujnika GMR, dostępnym także na rynku, jest czujnik o strukturze zaworu spinowego (rys. 14). Składa się on z warstwy o ustalonym kierunku wektora namagnesowania oraz warstwy swobodnej, której wektor namagnesowania może podążać za kierunkiem przyłożonego pola magnetycznego. Istnieje wiele sposobów stabilizowania warstwy ustalonej, jak na przykład wykorzystanie do jej produkcji syntetycznych antyferromagnetyków o zrównoważonym całkowitym namagnesowaniu, tak że nie reagują one na przyłożone pole. Warstwy takie można stabilizować również przez zastosowanie naturalnych antyferromagnetyków oraz wykorzystanie dobrze znanego zjawiska „anizotropii wymiennej”. Wadą opisanego rozwiązania jest to, że zwiększenie liczby warstw nie zmienia efektu. Sygnał GMR w takich układach rzadko kiedy przekracza 10%. Z drugiej strony, największą zaletą takich układów jest ich bipolarność, a więc mogą one być użyte do zapisu magnetycznego oraz w kompasach elektronicznych.



Rys. 14. Zasada działania czujnika wykorzystującego zjawisko GMR w geometrii zaworu spinowego, użytego tutaj do pomiaru kątów obrotu

Zastosowanie sprzężenia antyferromagnetycznego zostało już wcześniej omówione (antyferromagnetyki syntetyczne) w przypadku wykorzystania w czujnikach. Jednakże nośniki stosowane do zapisu magnetycznego w dyskach twardych również wykorzystują odkrycie sprzężonych antyferromagnetycznie (AFC) ośrodków o zwiększonej stabilności przechowywanych informacji.

Tłumaczył Maciej Misiorny
Wydział Fizyki
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
Poznań

Literatura

- [1] P. Grünberg, F. Metawe, „Light Scattering from Bulk and Surface Spinwaves in EuO”, *Phys. Rev. Lett.* **39**, 1561 (1977).
- [2] H. Ibach, H. Lüth, *Solid State Physics* (Springer, 1995), s. 186; wydanie polskie: *Fizyka ciała stałego* (PWN, 1996), s. 216.

- [3] P. Grünberg, „Light Scattering from Spinwaves in Layered Magnetic Structures”, w: *Light Scattering in Solids V*, red. M. Cardona, G. Güntherodt, *Appl. Phys.* **66** (1989).
- [4] J. Barnaś, P. Grünberg, „Spin waves in exchange coupled epitaxial double layers”, *J. Magn. Magn. Mat.* **82**, 186 (1989).
- [5] J.F. Cochran, J.R. Dutcher, „Calculation of Brillouin light scattering intensities from pairs of exchange coupled films”, *J. Appl. Phys.* **64**, 6092 (1988).
- [6] P. Grünberg, R. Schreiber, Y. Pang, M.B. Brodsky, H. Sowers, „Layered Magnetic Structures: Evidence for antiferromagnetic coupling of Fe layers across Cr-interlayer”, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2442 (1986).
- [7] J. Unguris, R.J. Celotta, D.T. Pierce, „Observation of two different oscillation periods in the exchange coupling of Fe/Cr/Fe(100)”, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 140 (1991).
- [8] D.E. Bürgler, P. Grünberg, S.O. Demokritov, M.T. Johnson, „Interlayer Exchange Coupling in Layered Magnetic Structures”, w: *Handbook of Magnetic Materials*, t. 13, red. K.H.J. Buschow (Elsevier, New York 2001).
- [9] G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn, „Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange”, *Phys. Rev. B* **39**, 4828 (1989).
- [10] A. Fert, P. Grünberg, A. Barthelemy, F. Petroff, W. Zinn, „Layered magnetic structures: interlayer exchange coupling and giant magnetoresistance”, *J. Magn. Magn. Mat.* **140-144**, 1 (1995).
- [11] R.E. Camley, J. Barnaś, „Theory of Giant Magnetoresistance Effects in Magnetic Layered Structures with Antiferromagnetic Coupling”, *Phys. Rev. Lett.* **63**, 664 (1989).
- [12] J. Barnaś, A. Fuss, R. E. Camley, P. Grünberg, W. Zinn, „Novel magnetoresistance effect in layered magnetic structures: theory and experiment”, *Phys. Rev. B* **42**, 8110 (1990).
- [13] P. Grünberg, D.E. Bürgler, H. Dasso, A.D. Rata, C.M. Schneider, „Spin-transfer phenomena in layered magnetic structures: physical phenomena and materials aspects”, *Acta Materialia* **55**, 1171 (2007).
- [14] R. Lehdorff, M. Buchmeier, D.E. Bürgler, A. Kakay, R. Hertel, C.M. Schneider, „Asymmetric spintransfer torque in single-crystalline Fe/Ag/Fe nanopillars”, *Phys. Rev. B* **76**, 214420 (2007).

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

Pierwiastki superciężkie

W dniach 18–20 grudnia 2008 r. odbyło się w Krakowie sympozjum „Super Heavy Element Research – Prospects for the Next Decade” zorganizowane przez Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego. Bezpośrednimi organizatorami byli: Tomasz Kozik, Zbigniew Sosin i Andrzej Wieloch (przewodniczący).

Było to spotkanie robocze uczestników europejskiej sieci EURONS-SHE (SHE to akronim od Super-Heavy Elements) oraz zaproszonych gości, którzy prowadzą badania nad pierwiastkami superciężkimi, a nie są bezpośrednimi uczestnikami sieci. Obecność tych osób pozwoliła na uzyskanie pełniejszego obrazu aktywności w tej dziedzinie. Razem w spotkaniu wzięło udział 40 osób z 6 krajów (Polska, Francja, Niemcy, Finlandia, Słowacja, Szwecja). Odczuwało się wyraźny brak przedstawiciela Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych w Dubnej (który należy do sieci), gdzie prowadzi się intensywne prace nad syntezą i badaniem własności jąder superciężkich. Zaproszony Yu.Ts. Oganessian, główny animator tych badań, nie mógł przybyć. Sieć EURONS-SHE obejmuje 14 instytutów europejskich (w tym Instytut Fizyki UJ) oraz jeden japoński (Konan University w Kobe). Zadaniem jej jest wyznaczanie wspólnych celów badawczych w zakresie fizyki i chemii najcięższych (transfermowych) pierwiastków oraz organizacja i koordynacja ich realizacji. Dysponuje ona pewnymi funduszami dla organizacji spotkań roboczych, finansowania krótkich wizyt naukowych itp. Obecnie główne obowiązki w zakresie koordynacji tej działalności spełnia insty-

tut GANIL (Francja) z przewodniczącą dr Christelle Stodel. Planuje się, że co jeden rok lub dwa obowiązki te będzie przejmował inny instytut należący do sieci.

Celem spotkania było omówienie obecnego stanu badań nad jądrami i pierwiastkami superciężkimi oraz perspektyw tych badań w najbliższym dziesięcioleciu, z pewnym nawiązaniem jednak także do dorobku lat ubiegłych. W niniejszej notatce postaramy się zorientować Czytelnika w głównych zagadnieniach omówionych w czasie spotkania.

Jądrami (i odpowiednio pierwiastkami) superciężkimi nazywamy jądra (i pierwiastki), które istnieją dzięki ich strukturze powłokowej (podobnej do struktury atomu). Bez tej struktury, najcięższe jądra rozpadłyby się natychmiast wskutek silnego odpychania kulombowskiego. Obliczenia teoretyczne, oparte na różnych modelach jądra, wskazują, że są to jądra o liczbie atomowej większej (lub równej) od ok. $Z = 104$. Jądra superciężkie zatem to jądra transaktynowcowe, gdyż aktynowce kończą się na $Z = 103$ (lorens).

Problem jąder superciężkich został podniesiony w połowie lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku, a więc ponad 40 lat temu. Początkowe oszacowania teoretyczne czasów życia tych jąder były bardzo optymistyczne. Dla jąder z otoczenia jądra o zamkniętej powłoce zarówno protonowej (przewidywanej przy liczbie protonów $Z = 114$) jak i neutronowej (przewidywanej przy liczbie neutronów $N = 184$) oszacowania te dawały czasy porównywalne z wiekiem Ziemi lub nawet większe. W konsekwencji, oprócz prób syntezy jąder superciężkich w laboratorium na drodze reakcji jądrowych, prowadzono intensywne poszukiwania

ich w naturze (w starych szklach ołowiowych, lodowcach górskich, śniegach polarnych, konkracjach wydobywanych z dna oceanów, meteorytach i in. oraz w promieniowaniu kosmicznym). Poszukiwania w przyrodzie nie dały pozytywnego wyniku. Natomiast synteza pierwiastków w laboratorium doprowadziła do wytworzenia i obserwacji ich aż do liczby atomowej $Z = 118$ (z wyjątkiem jedynie $Z = 117$). Tę ponad 40-letnią historię badań jąder superciężkich przypominał w swym wystąpieniu Jan Błocki (Instytut Problemów Jądrowych, Świerk). Przypomnienie to rozciągnął on nawet na lata jeszcze wcześniejsze, przedstawiając historię syntezy wszystkich pierwiastków transuranowych. Pierwszy z nich, neptun ($Z = 93$), został wytworzony w Berkeley w 1940 r.

Głównym instytutem europejskim zajmującym się problemem jąder superciężkich (obok Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych w Dubnej, Rosja) jest instytut ciężkich jonów GSI w Darmstadt (RFN). Zostało tam wytworzonych wiele nowych nuklidów superciężkich, w tym sześć nowych pierwiastków o $Z = 107$ (bohr), 108 (has), 109 (meitner), 110 (darmstadt), 111 (roentgen) i 112 (nie ma jeszcze nazwy). O obecnie prowadzonych tam badaniach mówili Dieter Ackermann (Darmstadt, RFN), Stanislav Antalic (Bratysława, Słowacja) i Lise-Lotte Andersson (Lund, Szwecja). Wiele uwagi poświęcili oni badaniom spektroskopowym ciężkich jąder. Badania te, dostarczające bardzo subtelnej, szczegółowej wiedzy o jądrach zaczynają wchodzić obecnie w obszar jąder superciężkich. Jest to zarówno spektroskopia α jak i γ . Wyniki tych badań są bardzo cenne dla teoretyków, gdyż stanowią subtelny test i dają możliwość ulepszeń modeli teoretycznych używanych do opisu i przewidywania własności najcięższych jąder. Spektroskopia α jest od dawna już stosowana w badaniach jąder superciężkich. Dostarcza ona głównego sposobu identyfikacji tych jąder. Możliwość stosowania jej do badania jąder, które wytwarzane są w bardzo małych ilościach (często pojedynczych nuklidów) pochodzi stąd, że efektywność rejestracji cząstek α w stosowanych układach detekcyjnych jest duża (ok. 80%). Inaczej jest z kwantami γ . Efektywność ich rejestracji była jeszcze do niedawna bardzo mała, rzędu (3–5)%. Stosowane teraz układy detekcyjne podwyższyły tę wydajność do ok. 10%, a budowane obecnie (np. europejski układ AGATA i amerykański GRETA) mają mieć wydajność aż ok. 50%. Stąd duży i ciągle w ostatnich latach trwający postęp w stosowaniu spektroskopii γ do badania najcięższych jąder. O spektroskopii γ jąder transferowych, uprawianej w Finlandii, mówił Paul Greenless (Jyväskylä, Finlandia).

O przyszłości instytutu GSI mówił Zbigniew Majka (Uniwersytet Jagielloński, Kraków oraz GSI, Darmstadt). Instytut ten ma stać się wkrótce udziałowcem ze strony niemieckiej tworzonego obecnie Międzynarodowego Ośrodka do Badań Antyprotonami i Jonami o nazwie FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research). Profesor Majka pełni obecnie funkcję dyrektora ds. badań w tymczasowym zarządzie realizacji tego projektu. Koszt rozbudowy ośrodka, przewidzianej na 8 lat, ma wynieść 1,2 G€ (miliarda euro), przy czym przynajmniej 25% ma pochodzić spoza Nie-

miec. Laboratorium to stanie się więc dużym międzynarodowym centrum badawczym, i to nie tylko europejskim. Wymieńmy dla przykładu 10 krajów w kolejności ich wkładu do tej rozbudowy: Niemcy (705 M€), Rosja (178 M€), Włochy (42 M€), Indie (36 M€), Polska (23,74 M€), Hiszpania (19 M€), Francja (18 M€), Chiny (12 M€), Rumunia (11,78 M€), Szwecja (10 M€). Stosunkowo nieduży wkład takich krajów jak Chiny czy Francja pochodzi stąd, że rozbudowują one własne laboratoria w pokrewnej tematyce. Wkład poszczególnych krajów polegać będzie głównie na dostarczeniu odpowiednich urządzeń do budowy ośrodka oraz aparatury badawczej (tzw. wkład rzeczowy). Planowany wkład monetarny ze strony polskiej wyniesie jedynie 25% deklarowanej kwoty. Tematyka badawcza FAIR będzie bardzo szeroka: od chromodynamiki kwantowej, poprzez strukturę jądra, reakcje jądrowe, astrofizykę, fizykę atomową, fizykę plazmy, do zastosowań w biologii, biofizyce, badaniach materiałowych i innych. Badania nad najcięższymi jądrami i pierwiastkami stanowiąc będą naturalnie tylko mały fragment tego programu.

Ważnym europejskim ośrodkiem, w którym także prowadzi się badania nad jądrami superciężkimi jest instytut GANIL w Caen, na północy Francji. Zostało tam wytworzonych kilka superciężkich nuklidów. Stanowiło to jednak tylko potwierdzenie wyników otrzymanych wcześniej w innych laboratoriach. Obecnie trwają tam intensywne prace nad przygotowaniem nowego, dużego projektu (tzw. SPIRAL2). Realizacja jego stworzy nowe możliwości przyspieszania ciężkich jonów, zarówno trwałych jak i radioaktywnych, oraz wytwarzania, separacji i detekcji różnorodnych jąder, w tym jąder bardzo egzotycznych. Częścią tego wielkiego przedsięwzięcia jest tzw. projekt S3 (Super Separator Spectrometer), obejmujący zagadnienia budowy tarczy, separatora produktów reakcji oraz detektorów. Zarówno cały projekt SPIRAL2, jak i jego fragment S3, prowadzone są w bardzo szerokiej współpracy międzynarodowej, nie tylko europejskiej (z istotnym mianowicie udziałem fizyków amerykańskich). Biorą w nich udział także fizycy polscy w ramach bardzo dobrze rozwijającej się od wielu już lat współpracy polsko-francuskiej. Postępy w realizacji projektu S3 szeroko omówiła Christelle Stodel (Caen, Francja), która jest główną osobą odpowiedzialną za projekt tarczy. Z punktu widzenia jąder superciężkich, ważnym walorem nowego urządzenia ma być bardzo duża intensywność wiązki ciężkich jonów (do ok. 10^{14} jonów/s). Takie natężenie pozwoli na obserwację ok. 36 jąder superciężkich dziennie (a więc bardzo dużo), których przekrój czynny na syntezę wynosi zaledwie 1 pb (pikobarn). Tak duże natężenie stwarza naturalnie wiele trudnych problemów, przede wszystkim problem budowy tarczy, która wytrzymałaby tak silny strumień padających na nią cząstek, oraz separatora oddzielającego powstałe jądra superciężkie od ogromnego strumienia innych jąder, przede wszystkim jąder wiązki, które przeszły przez tarczę bez zderzenia z jądrami jej atomów. Na wielu trudnych problemach technicznych, jakie stwarza budowa tego nowego urządzenia, skupił się Antoine Druart (Saclay, Francja), który jest jednym z naukowych koordynatorów projektu S3. Zagad-

nienie budowy detektora gazowego, który minimalizowałby tło przy detekcji jąder superciężkich omówił Przemysław Bańka (UJ, Kraków). Za budowę tego detektora odpowiedzialni są fizycy krakowscy.

Głównymi zagadnieniami w badaniu jąder superciężkich są: ich struktura i mechanizm ich wytwarzania. Ze strukturą związane są podstawowe ich własności, takie jak masa, sposób rozpadu, energia rozpadu, czas życia, itd. Z mechanizmem wytwarzania zaś wiąże się prawdopodobieństwo ich produkcji, mierzone zwykle wartością przekroju czynnego.

Dla jąder superciężkich, poza strukturą podobną do struktury jąder lżejszych, istnieje możliwość struktury bardzo egzotycznej, związanej przede wszystkim z dużym ich ładunkiem elektrycznym. Silne odpychanie kulombowskie uprzywilejowuje jądra o strukturze np. bańki mydlanej lub torusa. Przy takiej strukturze, energia odpychania kulombowskiego jest bardzo obniżona. Niektóre obliczenia teoretyczne wskazują, że jądra o $Z > 130$ powinny mieć taką właśnie budowę. Zagadnienie doświadczalnej obserwacji jąder o strukturze torusa przedyskutował Roman Płaneta z Uniwersytetu Jagiellońskiego. Omówił on problem podania parametrów związanych z wytwarzaniem jąder toroidalnych, które mogłyby być wyznaczone doświadczalnie. Odpowiednie doświadczenia prowadzone są w instytucie fizyki jądrowej w Catanii na Sycylii.

Możliwość dodatkowego wiązania jąder (w tym także superciężkich), pochodząca od specyficznej symetrii, jaką mogłyby one mieć, przedyskutowała Katarzyna Mazurek (Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Kraków). Chodzi tu o tzw. symetrię tetrahedralną, odpowiadającą kształtowi czworoscianu foremego, tj. o czterech jednakowych ścianach. Obliczenia wskazują, że dla niektórych jąder wkład do energii wiązania pochodzący od takiej symetrii mógłby być znaczący.

Mechanizmem wytwarzania jąder superciężkich, obserwowanym dotychczas, jest łączenie się (fuzja) dwóch zderzających się jąder, jądra pocisku z jądrem tarczy. Możliwość innego, dwustopniowego mechanizmu przedyskutował Andrzej Wieloch z Uniwersytetu Jagiellońskiego. Polegałby on na bombardowaniu jąder rozszczepialnych (np. toru) jądrami ciężkimi (np. złota). Zderzenie ich powodowałoby rozszczepienie toru, a jeden z powstałych fragmentów rozszczepienia łączyłby się z jądrem pocisku dając różne produkty, w tym jądro superciężkie, zależnie od fragmentu rozszczepienia. Pewne szanse na zajście takiego procesu stwarza okoliczność, że fragmenty rozszczepienia to właściwie wszystkie jądra lżejsze od jądra rozszczepiającego się, i o szerokim widmie energii kinetycznej. Do połączenia się z jądrem pocisku wybierałaby zatem niejako sama „natura” te fragmenty, dla których prawdopodobieństwo połączenia się jest największe. Odpowiednie doświadczenia, których inicjatorami są fizycy z Texas A&M University, INFN Legnaro oraz Uniwersytetu Jagiellońskiego, prowadzone są od roku 2003 w Instytucie Cyklotronowym Uniwersytetu

Texas A&M w College Station (USA). Wstępne wyniki zdają się wskazywać na zachodzenie takiego procesu ze stosunkowo dużym przekrojem czynnym (ok. 10 do 100 pb). Jeśli zostaną one potwierdzone, to będzie to bardzo dużym wydarzeniem w badaniach syntezy jąder superciężkich.

Adam Maj (Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Kraków) opisał badania gigantycznego rezonansu dipolowego w silnie wzbudzonych jądach superciężkich. Badania te wskazują na ważność dynamiki procesu syntezy już w samym kanale wejściowym. Nalatujące jądro, oddziałując z jądrem tarczy, może wzbudzać je (np. powodować jego drganie) i samo też ulegać wzbudzeniu, a dla tak wzbudzonych jąder bariera na ich połączenie jest inna niż dla jąder w stanie podstawowym. Zderzenie zachodzi więc nie w jednym, ale w kilku kanałach (i to sprzężonych ze sobą). Mamy zatem do czynienia nie z jedną barierą, ale z wieloma, z całym rozkładem barier.

Zagadnienie rozkładu barier na syntezę jąder omówił Ernest Piasecki (Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów, Warszawa). Ten ważny dla opisu mechanizmu reakcji problem badany jest na razie dla jąder lżejszych, dla których przekrój czynny na syntezę jest duży i jego zależność od energii zderzenia (tj. funkcja wzbudzenia) może być zmierzona bardzo dokładnie.

Podsumowania sympozjum dokonali Christelle Stodel i jeden z autorów (A.S.) niniejszej notatki. Konspekty wykładów można znaleźć na stronie internetowej: <http://confer.uj.edu.pl/sheresearch>.

Poza programem naukowym zorganizowane zostało zwiedzanie Muzeum Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz wycieczka do Kopalni Soli w Wieliczce.

Na podkreślenie zasługuje bardzo dobra organizacja sympozjum. Dobrze dobrany i intensywnie realizowany program naukowy pozwolił w zaledwie półtora dnia dobrze zorientować się w bieżącym stanie tej stosunkowo wąskiej, ale bardzo szybko rozwijającej się dziedziny. Ważny był oczywiście dobór aktywnych obecnie i kompetentnych wykładców oraz sporo czasu przeznaczonego na dyskusję. Zajęcia, łącznie z posiłkami, odbywały się w jednym miejscu (w Instytucie Fizyki UJ przy ul. Reymonta). Przyjezdni goście mieszkali w bardzo dobrze prowadzonym domu gościnnym UJ (tzw. „Pigoniówce”) przy ul. Garbarskiej, położonym w niedużej, „spacerowej” odległości od Instytutu.

Wszyscy uczestnicy, z którymi rozmawialiśmy, wyrażali chęć, by spotkania tej serii częściej odbywały się właśnie w Krakowie.

Autorzy niniejszej notatki pragną podziękować profesorowi Zbigniewowi Majce i doktorowi hab. Andrzejowi Wielochowi za cenne uwagi.

Witold Męczyński

Instytut Fizyki Jądrowej
im. H. Niewodniczańskiego PAN, Kraków

Adam Sobiczewski

Instytut Problemów Jądrowych
im. A. Sołtana, Warszawa

Działalność Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów

Keshra Sangwal¹, Ewa Talik², Anna Pajączkowska³, Stanisław Krukowski⁴

¹Katedra Fizyki Stosowanej, Politechnika Lubelska

²Instytut Fizyki, Uniwersytet Śląski, Katowice

³Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, Warszawa

⁴Instytut Wysokich Ciśnień PAN, Warszawa

Activities of the Polish Society for Crystal Growth

Abstract: The Polish Society for Crystal Growth (PSCG) was constituted during its first general assembly held on 23 May 1991 in Częstochowa. The general assembly formed a part of the First Polish Conference on Crystal Growth (PCCG-I) held in the Pedagogical University of Częstochowa during 23–24 May 1991. The PCCG-I was organised by Keshra Sangwal, then a university professor in Częstochowa, while the PSCG was constituted at the initiative of Anna Pajączkowska (then an associate professor at the Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw) and Keshra Sangwal. Organisation of the Polish Society for Crystal Growth is based on the Constitution of PSCG, where 3 year period of the Governing Board elected by the General Assembly of the PSCG participants was approved. It is now a rule that the General Assembly is organised jointly with the Polish Conference on Crystal Growth. Main aims of the PSCG are: strengthening communication between PSCG members, thereby raising the general level of crystallization science in Poland, promotion of results of Polish crystal growers to the public and activating its interest in crystallization and active participation in the international movement related with the field of crystal growth, especially close cooperation with the International Organisation for Crystal Growth. Polish and German Societies for Crystal Growth will organize „The 17th International Conference on Crystal Growth” in 2013 in Warsaw.

Polskie Towarzystwo Wzrostu Kryształów (w skrócie PTWK; przyjęta angielska nazwa: Polish Society for Crystal Growth, PSCG) zostało powołane do życia podczas pierwszego Walnego Zebrania, w czasie trwania Pierwszej Polskiej Konferencji Wzrostu Kryształów (First Polish Conference on Crystal Growth; PCCG-1), które odbyło się 23 Maja 1991 roku w Częstochowie z inicjatywy A. Pajączkowskiej i K. Sangwala. Patronem Towarzystwa jest profesor Jan Czochralski, wynalazca i wybitny naukowiec, prekursor rozwoju światowej elektroniki. Polskie Towarzystwo Wzrostu Kryształów opiera swoją działalność na Statucie PTWK, w którym zdecydowano o trzyletniej kadencji Zarządu Głównego wybieranego na Walnym Zebraniu wszystkich członków. Jest już regułą, że Walne Zebranie członków PTWK jest organizowane podczas Polskiej Konferencji Wzrostu Kryształów. Głównymi celami PTWK są: wspieranie współpracy między członkami PTWK, a przez to podnoszenie ogólnego poziomu wiedzy z dziedziny krystalizacji, upowszechnianie wyników polskich naukowców zajmujących się hodowlą kryształów wśród społeczeństwa oraz pobudzanie jego zainteresowania tą dziedziną nauki, aktywny udział w międzynarodowym ruchu związanym ze wzrostem kryształów, a szczególnie utrzymanie ścisłych kontaktów z Międzynarodową Organizacją Wzrostu Kryształów (International Organisation for Crystal Growth). PTWK wraz z Niemieckim Towarzystwem Wzrostu Kryształów (DGKK) jest organizatorem światowej konferencji „The 17th International Conference on Crystal Growth” w połączeniu z „The 15th International Conference on Vapor Growth and Epitaxy” (ICCG-17 & ICVGE-15)”, która odbędzie się w dniach 11–16 sierpnia 2013 r. w Warszawie oraz szkoły „The 15th International Summer School on Crystal Growth” planowanej na 6–10 sierpnia 2013 r. w Gdańsku.

Towarzystwa naukowe przyczyniają się do rozwoju nauki poprzez upowszechnianie osiągnięć, rozwijanie współpracy naukowej, kształcenie młodej kadry i wreszcie popularyzację danej dziedziny nauki. Polskie Towarzystwo

Wzrostu Kryształów (PTWK) należy do prężnie działających Towarzystw.

Historia Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów

Międzynarodowy ruch związany ze wzrostem kryształów ma długą historię, jednakże ruch ten nabierał przyspieszenia odkąd powstała Międzynarodowa Organizacja Wzrostu Kryształów (International Organization for Crystal Growth; IOCG) w 1966 roku i wraz z jej powstaniem został uruchomiony cykl Międzynarodowych Konferencji Wzrostu Kryształów w różnych krajach organizowanych przez towarzystwa wzrostu kryształów tych krajów. Z powodu ustroju politycznego i podporządkowania nauki o wzroście kryształów Komitetowi Krystalografii Akademii Nauk środowisko zajmujące się otrzymaniem kryształów w Polsce długo nie miało możliwości skupiania się w formie towarzystwa współpracującego z IOCG – mimo jej silnego poparcia i zachęty. Dopiero w roku 1990 w związku z koordynacją napisania podręcznika dotyczącego wzrostu kryształów w języku polskim pod redakcją Keshry Sangwala przy współpracy Mariana A. Hermana (Instytut Fizyki PAN, Warszawa), Anny Pajączkowskiej (Instytut Fizyki PAN, Warszawa) i Antoniego Modrzejewskiego (Instytut Energii Atomowej, Świerk) rodziła się koncepcja założenia takiego towarzystwa. W realizacji tej inicjatywy obok Keshry Sangwala od początku aktywnie uczestniczyła Anna Pajączkowska, a następnie m.in. Julian Auleytnier (Instytut Fizyki PAN) i Stanisław Hodorowicz (Uniwersytet Jagielloński).

Polskie Towarzystwo Wzrostu Kryształów (w skrócie PTWK; przyjęta angielska nazwa: Polish Society for Crystal Growth, PSCG) zostało powołane do życia podczas pierwszego Walnego Zebrania, w czasie trwania **Pierwszej Polskiej Konferencji Wzrostu Kryształów** (First Polish Conference on Crystal Growth; PCCG-1), które odbyło się 23 maja 1991 roku w Częstochowie. To Walne Zebranie było częścią wyżej wymienionej konferencji, przygotowanej pod roboczą nazwą „Pierwsze Spotkanie Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów”, organizowanej w Wyższej Szkole Pedagogicznej w Częstochowie w dniach 23–24 maja 1991 roku. PCCG-1 została zorganizowana przez Keshrę Sangwalę, wówczas profesora WSP w Częstochowie, a językiem konferencji był język polski. Rysunek 1 pokazuje okładkę książki abstraktów tej konferencji.

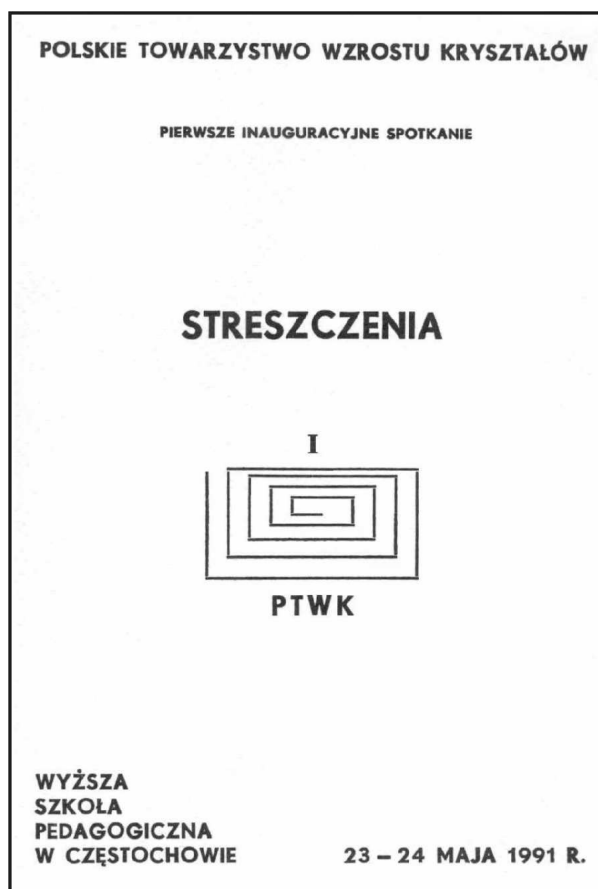
Pierwsze Walne Zebranie zatwierdziło zarys statutu Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów (PTWK), mającego swoją siedzibę przy Uniwersytecie Jagiellońskim. Walne Zebranie zaaprobowало dwuletnią kadencję **Zarządu Głównego** i wybrało następujących jego członków: Anna Pajączkowska (IF PAN, Warszawa), prezes; Stanisław Hodorowicz (UJ, Kraków), prezes-elekt (na okres 1993–95); Waldemar Giersz, sekretarz; Keshra Sangwal, sekretarz-elekt (na okres 1993–95); Ryszard Kubiak, skarbnik.

Ponadto, następujące osoby zostały wybrane do **Komisji Rewizyjnej** PTWK: Stanisław Bednarski (Instytut

Energii Atomowej, Świerk), przewodniczący; Ewa Mielniczek (WSP, Częstochowa), członek; Ewa Talik (Uniwersytet Śląski), członek.

Jednym z najbardziej znaczących wydarzeń PCCG-1 było nazwanie wykładu inauguracyjnego „Wykładem Czochralskiego” w celu upamiętnienia wkładu Jana Czochralskiego (profesora Politechniki Warszawskiej w latach 1929–45) w dziedzinę wzrostu kryształów. W rzeczywistości ten symboliczny gest miał na celu przypomnienie młodej generacji Polaków, że Czochralski był z pochodzenia i poczucia narodowego Polakiem, wobec nieprawdźwanych danych w literaturze naukowej i skazaniu na niesławę ze strony Polskiego Rządu komunistycznego za rzekomą kolaborację w czasie okupacji hitlerowskiej. Wykład Czochralskiego został wygłoszony przez prof. Juliana Auleytnera, czołowego autorytetu w kraju w dziedzinie charakteryzacji kryształów techniką dyfrakcji rentgenowskiej. Krótki życiorys i zarys naukowych dokonań prof. Czochralskiego przedstawił dr Paweł Tomaszewski (Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych, Wrocław).

Jeśli chodzi zarówno o liczbę uczestników jak i zaprezentowanych prac naukowych, PCCG-1 była konferencją stosunkowo małą. Ogółem wzięło w niej udział 29 uczestników, wygłoszono 5 wykładów (łącznie z dwoma wymienionymi powyżej) oraz 19 komunikatów.



Rys. 1. Okładka książki abstraktów pierwszej, inauguracyjnej konferencji wzrostu kryształów

Bezpośrednio po PCCG-1 dokumenty podpisane przez Annę Pajczkowską, Ryszarda Kubiaka, Stanisława Hodorowicza, Keshrę Sangwala i Ewę Talik, jako członków-założycieli PTKW, zostały złożone w Sądzie Wojewódzkim w Krakowie w celu oficjalnej rejestracji Towarzystwa. Na podstawie decyzji I Wydziału Sądu Wojewódzkiego w Krakowie, PTKW zostało zarejestrowane pod numerem Ns. Rej. ST 39/92 w dniu 08.06.1992.

W czerwcu 1992 roku w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie została zorganizowana przez Annę Pajczkowską jednodniowa konferencja (PCCG-2). Na tej konferencji zaprezentowano tylko wykłady. Wykład Czochralskiego wygłosił prof. Cornelius S.F. Woensdregt (Uniwersytet w Utrechcie, Holandia), znany specjalista w dziedzinie morfologii kryształów, zwłaszcza w zakresie teorii łańcuchów wiązań periodycznych (Periodic Bond Chain theory; PBC theory) sformułowanej przez Hartmana i Perdoka w 1955 roku.

PCCG-3 została zorganizowana przez Annę Pajczkowską w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie w dniach 27–28 maja 1993 r. Podczas PCCG-3 Walne Zebranie wybrało prezesa-elekta, sekretarza-elekta i skarbnika, podczas gdy, zgodnie ze uchwalonym w Częstochowie statutem PTKW, prezes-elekt i sekretarz-elekt z poprzednich wyborów w Częstochowie przejęli pełnienie obowiązków w Zarządzie Głównym nowej kadencji. Odbyły się ponadto wybory do Komisji Rewizyjnej.

Zarząd Główny: Stanisław Hodorowicz (UJ, Kraków), prezes; Marian A. Herman (IF PAN, Warszawa), prezes-elekt (na kadencję 1993–95); Keshra Sangwal (Politechnika Lubelska), sekretarz; Tadeusz Łukasiewicz (ITME, Warszawa), sekretarz-elekt (na kadencję 1993–95); Jan M. Olchowik (Politechnika Lubelska), skarbnik.

Komisja Rewizyjna: Stanisław Bednarski (Instytut Energii Atomowej, Świerk), przewodniczący; Ewa Mielniczek (WSP, Częstochowa), członek; Ewa Talik (Uniwersytet Śląski), członek.

W porównaniu z PCCG-1, PCCG-3 była konferencją dużo większą, a językiem obowiązującym na konferencji był język angielski. Oprócz Wykładu Czochralskiego wygłoszonego przez prof. Romana Pampucha (AGH, Kraków), czołowego specjalistę z dziedziny ceramiki, miało miejsce 14 wykładów zaproszonych oraz 5 komunikatów ustnych. Ponadto, odbyła się sesja posterowa z 30 prezentowanymi pracami. Liczba wszystkich uczestników wyniosła około 90, w tym 8 z zagranicy.

Na Zebraniu Zarządu Głównego PTKW w Krakowie wiosną 1994 roku podjęto ważne decyzje. Dotyczyły one organizowania imprez naukowych przez Towarzystwo. Zdecydowano, że w przyszłości nazwę „PCCG” i odpowiedni numer będą miały tylko te cykliczne konferencje, które będą połączone z Walnym Zjazdem Członków PTKW. Wszystkie inne konferencje i seminaria mające miejsce w czasie kadencji Zarządu będą traktowane jako dodatkowe imprezy organizowane przez Towarzystwo.

PCCG-4 została zorganizowana w Krakowie w dniach 7–9 maja 1995 roku przez Stanisława Hodorowicza z Wydziału Chemii UJ. Wykład Czochralskiego wygłosił

prof. Andrzej Kisiel (Uniwersytet Jagielloński). W czasie Walnego Zebrania Członków zaaprobowano kilka zmian w statucie i strukturze Zarządu Głównego. Zmiany te miały dalekosiężne konsekwencje. Pierwsza zmiana dotyczyła kadencyjności Zarządu. Wobec 3-letniego okresu działania Rady Międzynarodowej Organizacji Wzrostu Kryształów (IOCG Council), gdzie PTKW jest reprezentowana przez swojego prezesa, i cyklicznej, trzyletniej organizacji Międzynarodowej Konferencji Wzrostu Kryształów, Walne Zebranie przyjęło trzyletni okres pełnienia obowiązków przez Zarząd Główny. Druga zmiana dotyczyła działalności w ramach Towarzystwa czterech sekcji: 1) kryształów objętościowych, 2) mikrostruktur krystalicznych, 3) charakterystyki kryształów i struktur krystalicznych oraz 4) kryształów ciekłych i molekularnych, z przewodniczącymi odpowiednio: prof. Anną Pajczkowską (ITME, Warszawa), prof. Maciejem Oszwałdowskim (Politechnika Poznańska), prof. Andrzejem Kisiem (UJ, Kraków) i prof. Józefem Żmiją (WAT, Warszawa). Trzecia zmiana dotyczyła zwiększenia liczby członków Zarządu. Walne Zebranie przyjęło poprawkę w statucie, że Zarząd Główny powinien być reprezentowany przez: prezesa, prezesa-elekta, przewodniczących poszczególnych sekcji, sekretarza i skarbnika. Ta poprawka była uznana za niezbędną dla sprawnego funkcjonowania Towarzystwa. Walne Zebranie zaleciło, by sekretarz i skarbnik pochodzili z tej instytucji, gdzie Towarzystwo ma swoją siedzibę. Wybory wyłoniły grono osób, wymienione poniżej:

Zarząd Główny: Marian A. Herman (Instytut Technologii Próżniowej, Warszawa), prezes; Keshra Sangwal (Politechnika Lubelska), prezes-elekt (na kadencję 1998–2001); Stanisław Hodorowicz (Uniwersytet Jagielloński), eks-prezes; Andrzej Olech (Uniwersytet Jagielloński), sekretarz; Barbara Borzęcka-Prokop (Uniwersytet Jagielloński), skarbnik; Anna Pajczkowska (ITME, Warszawa), członek; Maciej Oszwałdowski (Politechnika Poznańska), członek; Andrzej Kisiel (Uniwersytet Jagielloński), członek; Józef Żmija (WAT, Warszawa), członek; Tadeusz Łukasiewicz (ITME, Warszawa), członek.

Komisja Rewizyjna: Wojciech Sadowski (Politechnika Gdańska), przewodniczący; Ewa Talik (Uniwersytet Śląski, Katowice), członek; Izabela Pracka (ITME, Warszawa), członek.

Podczas PCCG-4 zaprezentowano 10 wykładów zaproszonych oraz 5 krótkich komunikatów ustnych. Sesja posterowa liczyła 30 prac. Niestety, abstrakty nie zostały wydrukowane w formie książki abstraktów. Jednakże niektóre artykuły zostały później wydane w zeszycie ITME Materiały Elektroniczne (1996). Liczba uczestników wynosiła około 50, w tym 1 z zagranicy. W okresie 1995–98 Sekcje Kryształów Objętościowych oraz Mikrostruktur Krystalicznych rozpoczęły swoją działalność i organizowały sympozja. Prof. Andrzej Kisiel uznał, że nie ma zapotrzebowania na organizowanie Sekcji Charakterystyki.

Piąta Polska Konferencja Wzrostu Kryształów (PCCG-5) została zorganizowana w Nałęczowie w dniach 10–14 maja 1998 roku przez Keshrę Sangwala. Wykład Czochralskiego został wygłoszony przez prof. Wła-

dysława Piekarczyka (Instytut Fizyki PAN, Warszawa), czołowego specjalistę z dziedziny syntezy warstw diamentowych. Walne Zebranie odbyło się 11 maja. Jedną z dwóch najważniejszych decyzji podjętych na tym zebraniu było przeniesienie siedziby Towarzystwa z Krakowa do Warszawy, głównie z uwagi na niedogodności odczuwane przez ówczesny Zarząd. Następna decyzja dotyczyła ustalenia składu Zarządu Głównego PTWK. Uchwalono, że w skład Zarządu Głównego wchodzi: prezes, prezes-elekt, eks-prezes (czyli prezes z poprzedniej kadencji) i przewodniczący sekcji specjalistycznych, dwaj sekretarze i skarbnik oraz przewodniczący Komisji Rewizyjnej jako obserwator (rozdział V, § 23, p. 1).

Zgodnie z propozycją prezesa prof. M.A. Hermana Walne Zebranie powierzyło zadanie animacji Sekcji Kryształów Ciekłych i Molekularnych prof. Stanisławowi Kłosowiczowi (WAT, Warszawa). W trakcie odrębnych zebrań trzech sekcji wybrano ich przewodniczących i zastępców. W wyborach zastosowano prostą procedurę. Spośród zgłoszonych kandydatów, kandydat z największą ilością oddanych na niego głosów zostawał przewodniczącym, a drugi w kolejności jego zastępcą. Wynik był następujący: Kryształy Objętościowe – prof. Władysław Piekarczyk i prof. Stanisław Krukowski; Mikrostruktury Krystaliczne – prof. Maciej Oszwałdowski i prof. Zbigniew Żytkiewicz; Kryształy Ciekłe i Molekularne – prof. Stanisław Kłosowicz i dr Andrzej Olech.

Poniżej podano spis wybranych członków Zarządu Głównego i Komisji Rewizyjnej.

Zarząd Główny: Keshra Sangwal (Politechnika Lubelska), prezes; Anna Pajczkowska (ITME, Warszawa), prezes-elekt (na kadencję 2001–04); Marian A. Herman (Instytut Technologii Próźniowej, Warszawa), eks-prezes; Tadeusz Łukasiewicz (ITME, Warszawa), sekretarz; Wiesław Polak (Politechnika Lubelska), sekretarz techniczny; Dorota Pawlak (ITME, Warszawa), skarbnik; Władysław Piekarczyk (Instytut Fizyki PAN, Warszawa), członek; Maciej Oszwałdowski (Politechnika Poznańska), członek; Stanisław Kłosowicz (WAT, Warszawa), członek.

Komisja Rewizyjna: Wojciech Sadowski (Politechnika Gdańska), przewodniczący; Krystyna Wokulska (Uniwersytet Śląski), członek; Krystyna Mazur (ITME), członek.

W PCCG-5 brało udział około 80 uczestników, w tym 20 z zagranicy. Na Konferencji zaprezentowano 20 wykładów na zaproszenie, w tym Wykład Czochrańskiego wygłoszony przez prof. Władysława Piekarczyka (Instytut Fizyki PAN, Warszawa), 15 komunikatów i 43 postery. Artykuły oparte na pracach prezentowanych na Konferencji zostały opracowane przez prof. Keshrę Sangwala i opublikowane w specjalnym zeszycie czasopisma *Crystal Research and Technology*, vol. 34 (5–6), 1999.

Podczas kadencji 1998–2001 sekcje kryształów objętościowych i mikrostruktur krystalicznych aktywnie uczestniczyły w organizowaniu sympozjów krajowych i konferencji międzynarodowych, jednakże aktywność sekcji kryształów molekularnych i ciekłych była słaba. Jednym z najważniejszych osiągnięć tej kadencji było uruchomie-

nie strony internetowej PTWK z podstawową informacją o Zarządzie Głównym, członkach towarzystwa i ich adresach, konferencjach organizowanych przez PTWK oraz innych pokrewnych imprezach. Dr Wiesław Polak podjął i wykonał żmudne zadanie uruchomienia tej strony.

Szósta Polska Konferencja Wzrostu Kryształów (PCCG-6) została zorganizowana w ośrodku wypoczynkowo-rekreacyjnym Malta w Poznaniu w dniach 20–23 maja 2001 roku przez Macieja Oszwałdowskiego. Wykład im. Czochrańskiego wygłosiła prof. Bożena Hilczer (Instytut Fizyki Molekularnej PAN, Poznań), światowej sławy specjalista z dziedziny dielektryków i ferroelektryków. Walne Zebranie PTWK odbyło się 21 maja. Wśród ważniejszych uchwał Walnego Zebrania należy wyliczyć: 1) decyzję o dalszym istnieniu Sekcji Kryształów Ciekłych i Molekularnych mimo jej skromnej aktywności w ostatniej kadencji, 2) powołanie pięcioosobowej Kapituły do przyznawania nagród PTWK za wyróżniające się prace magisterskie i doktorskie. Na wniosek przewodniczącego Sekcji Kryształów Ciekłych i Molekularnych, dr. Waldemara Kłosowicza (WAT), Walne Zebranie upoważniło Zarząd do podjęcia ostatecznej decyzji w tej sprawie po Międzynarodowej Konferencji Ciekłych Kryształów we wrześniu 2001 roku (Seksja ta ostatecznie została rozwiązana 22 października 2001 r. na Zebraniu Zarządu).

Podczas odrębnych zebrań pozostałych sekcji wybrano ich przewodniczących i zastępców. Wyniki tych wyborów były następujące: Kryształy Objętościowe – prof. Marek Kozielski (przewodniczący) i prof. Keshra Sangwal (wiceprzewodniczący), Mikrostruktury Krystaliczne – prof. Maciej Oszwałdowski (przewodniczący) i prof. Zbigniew Żytkiewicz (wiceprzewodniczący).

Poniżej podano spis wybranych członków Zarządu Głównego, Komisji Rewizyjnej i Kapituły Nagród.

Zarząd Główny: Anna Pajczkowska (ITME, Warszawa), prezes; Stanisław Krukowski (CBW PAN, Warszawa), prezes-elekt (na kadencję 2004–07); Keshra Sangwal (Politechnika Lubelska), eks-prezes; Marek Berkowski (IF PAN, Warszawa), sekretarz; Barbara Kaczmarek (ITME, Warszawa), skarbnik; Marek Kozielski (Politechnika Poznańska), członek; Maciej Oszwałdowski (Politechnika Poznańska), członek.

Komisja Rewizyjna: Wojciech Sadowski (Politechnika Gdańska), przewodniczący; Dobrosława Kasprowicz (Politechnika Poznańska), członek; Jarosław Kisielewski (ITME, Warszawa), członek.

Kapituła nagród: Bożena Hilczer (Inst. Fizyki Molekularnej PAN, Poznań); Maciej Oszwałdowski (Politechnika Poznańska); Antoni Rogalski (WAT, Warszawa); Keshra Sangwal (Politechnika Lubelska) Stanisław Krukowski (CBW PAN, wszedł w skład Kapituły z urzędu jako prezes-elekt).

W PCCG-6 brało udział ponad 120 uczestników, w tym 38 z zagranicy. Ogółem na konferencji zaprezentowano 18 wykładów na zaproszenie, w tym Wykład im. Czochrańskiego wygłoszony przez prof. B. Hilczer i specjalny wykład dotyczący historii wzrostu kryształów jako dyscypliny naukowej, wygłoszony przez prof. Ray-

monda Kerna (Francja), 13 komunikatów i ponad 80 posterów. Należy przypomnieć tutaj, że prof. Kern był jednym z pierwszych prezesów Międzynarodowej Organizacji Wzrostu Kryształów (International Organization for Crystal Growth; IOCG).

Artykuły oparte na pracach przedstawionych na Konferencji zostały opublikowane w specjalnym zeszycie czasopisma *Crystal Research and Technology*, vol. 36 (8–10), 2001, pod redakcją gościnną Keshry Sangwala.

Wspólnie z Instytutem Fizyki Stosowanej Wojskowej Akademii Technicznej Polskie Towarzystwo Wzrostu Kryształów zorganizowało w dniach 14–18 października 2002 roku w WDW Kościelisko w Zakopanem Trzecią Międzynarodową Konferencję Kryształów Stałych – Materiałoznawstwo i Zastosowania (Third International Conference on Solid State Crystals – Materials Science and Applications; ICSSC-3). Konferencję zorganizował Antoni Rogalski, a zakres tematyczny konferencji obejmował: wzrost kryształów, charakteryzację i zastosowania materiałów w postaci ciał stałych, materiały i warstwy nanostrukturalne, przyrządy optoelektroniczne oraz organiczne materiały dla elektroniki.

W powyższej konferencji brało udział 140 uczestników z dziesięciu krajów. Ogółem na konferencji zaprezentowano 25 wykładów zaproszonych, 32 komunikatów i ponad 136 posterów. Z racji szerokiego zakresu tematów konferencji organizatorzy wydali artykuły oparte na materiałach prezentowanych na konferencji w specjalnym zeszycie *Proceedings SPIE*, tom 5136, 2002, pod redakcją gościnną Antoniego Rogalskiego oraz w specjalnym zeszycie czasopisma *Crystal Research and Technology*, vol. 38 (3–5) 2003, pod redakcją gościnną Keshry Sangwala. Podczas tej konferencji podjęto ważną decyzję, że w przyszłości konferencje z cyklu ICSSC będą organizowane przez PTWK, oraz że zostaną zorganizowane w połączeniu z konferencjami z cyklu PCCG.

Połączona konferencja ICSSC-4/PCCG-7 była zorganizowana przez Annę Pajczkowską w dniach 16–20 maja 2004 roku w Kościelisku-Zakopanem. Wykład im. Czochralskiego wygłosił prof. Robert F. Sekerka (Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA), prezydent IOCG, najbardziej znany jako twórca kryterium niestabilności morfologicznej Mullinsa-Sekerki. 17 maja odbyło się Walne Zebranie PTWK, na którym wybrano prezesa-elekt na kadencję 2007–10. Podczas odrębnych zebrań pozostałych sekcji wybrano ich przewodniczących i zastępców. Wyniki tych wyborów były następujące: Kryształy Objętościowe – prof. Ewa Talik (przewodniczący) i prof. Sławomir Mielcarek (wiceprzewodniczący), Mikrostruktury Krystaliczne – prof. Michał Leszczyński (przewodniczący) i prof. Grzegorz Gładyszewski (wiceprzewodniczący).

Poniżej podano spis wybranych członków Zarządu Głównego, Komisji Rewizyjnej i Kapituły Nagród.

Zarząd Główny: Stanisław Krukowski (CBW PAN, Warszawa), prezes; Wojciech Sadowski (Politechnika Gdańska, prezes-elekt na kadencję 2007–10); Anna Pajczkowska (ITME, Warszawa), eks-prezes; Dorota Paw-

lak (ITME, Warszawa), sekretarz; Tomasz Klimczuk (Politechnika Gdańska), sekretarz techniczny; Bolesław Łuczniak (CBW PAN, Warszawa), skarbnik; Ewa Talik (Uniwersytet Śląski, Katowice), członek; Michał Leszczyński (CBW PAN, Warszawa), członek.

Komisja Rewizyjna: Marek Kozielski (Politechnika Poznańska), przewodniczący; Dobrosława Kaspro- wicz (Politechnika Poznańska), członek; Zygmunt Wo- kulski (Uniwersytet Śląski, Katowice), członek; Zbigniew Żyt- kiewicz (IF PAN, Warszawa).

Kapituła nagród: Bożena Hilczer (Inst. Fizyki Mole- kularnej PAN, Poznań); Bogusław Mróz (Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Poznań); Marek Godlewski (IF PAN, Warszawa); Keshra Sangwal (Politechnika Lubelska) Woj- ciech Sadowski (Politechnika Gdańska, wszedł w skład Kapituły z urzędu jako prezes-elekt).

Połączona Konferencja ICSSC-4/PCCG-7 była naj- większym spotkaniem w Polsce obejmującym większość zagadnień dotyczących wzrostu i zastosowań materiałów krystalicznych. Celem połączonej konferencji było zapew- nienie interdyscyplinarnego forum naukowcom i inżynie- rom do wymiany wyników badań i doświadczenia w róż- nych dziedzinach otrzymywania i zastosowania kryształów objętościowych i cienkich warstw w opto- i nanotechnolo- gii. Konferencja obejmowała następujące tematy: 1) wzrost kryształów, 2) charakteryzacja i zastosowania materiałów stałych, 3) materiały i filmy nanostrukturalne oraz 4) przy- rządy opto- i mikroelektroniczne.

Kapituła ds. Nagród przyznała w drodze konkursu po- raz pierwszy nagrodę za pracę doktorską. Laureatką kon- kursu została dr Magdalena Skutecka (promotor: prof. Ewa Talik, Uniwersytet Śląski). Dr Skutecka zaprezentowała tezy oraz wyniki swojej pracy na konferencji PCCG-7 & ICSSC-4.

W połączonej konferencji ICSSC-4/PCCG-7 brało udział 175 uczestników, w tym ponad 70 uczestników nie- polskich z ponad dwunastu krajów. Ogółem na Konferen- cji zaprezentowano 21 wykładów zaproszonych, w tym Wykład im. Czochralskiego wygłoszony przez prof. Ro- berta F. Sekerkę (USA), 18 komunikatów ustnych i 120 posterów. Liczba uczestników ogółem była o 30% wyż- sza od liczby uczestników w ICSSC-3 zorganizowanej w 2002 roku i około 50% wyższa od liczby uczestników w PCCG-3 zorganizowanej w 2001 roku. Prezentacje do- tyczyły: 1) kryształów objętościowych, 2) warstw epitak- sjalnych, wielowarstw i nanokryształów. Z racji ogromnej różnorodności tematów artykuły przeglądowe i oryginalne oparte na zaproszonych wykładach oraz ustnych i postero- wych prezentacjach były opublikowane w dwóch czasopi- smach: *Opto-Electronic Review*, tom 11 (1,2), 2003, oraz *Crystal Research and Technology*, tom 40 (4–5), 2005, od- powiednio z Antonim Rogalskim i Keshrą Sangwalem jako ich gościnnymi redaktorami.

Połączona Konferencja ICSSC-5/PCCG-8 była zorga- nizowana przez Stanisława Krukowskiego w dniach 20–24 maja 2007 roku w Kościelisku-Zakopanem. Wykład im. Czochralskiego wygłosił prof. Georg Müller (Universität Erlangen-Nürnberg, Niemcy), światowej sławy specjalista

z dziedziny procesów transportu w fazie roztopionej podczas wzrostu. Walne Zebranie PTWK odbyło się 21 maja i wybrano na nim prezesa-elekta PTWK. Na zebraniach sekcji wybrano ich przewodniczących i zastępców. Wyniki tych wyborów w sekcjach były następujące: Kryształy Objętościowe – dr Dorota Pawlak (ITME, Warszawa – przewodnicząca) i prof. Anna Pajęczkowska (ITME, Warszawa – wiceprzewodnicząca); Mikrostruktury Krystaliczne – prof. Zbigniew Żytkiewicz (IF PAN, Warszawa – przewodniczący) i prof. Michał Leszczyński (IWC PAN, Warszawa – wiceprzewodniczący).

Poniżej podany jest spis wybranych członków Zarządu, Komisji Rewizyjnej i Kapituły Nagród.

Zarząd Główny: Wojciech Sadowski (Politechnika Gdańska), prezes; Ewa Talik (Uniwersytet Śląski, Katowice), prezes-elekt na kadencję 2010–13; Stanisław Krukowski (IWC PAN, Warszawa), eks-prezes; Ludwika Lipińska (ITME, Warszawa), sekretarz; Dorota Pawlak, przewodniczący Sekcji Kryształów Objętościowych; Zbigniew Żytkiewicz, przewodniczący Sekcji Mikrostruktur Krystalicznych.

Komisja Rewizyjna: Dobrosława Kasprowicz (Politechnika Poznańska), członek; Marek Kozielski (Politechnika Poznańska), przewodniczący; Zygmunt Wokulski (Uniwersytet Śląski, Katowice), członek.

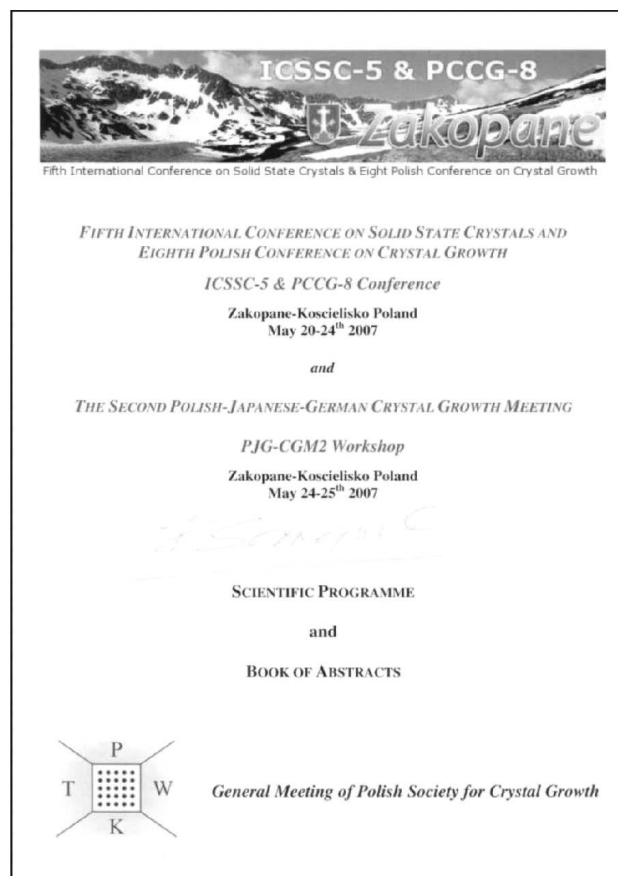
Kapituła nagród: Jadwiga Bąk-Misiuk (IF PAN, Warszawa); Mirosław Drozdowski (Politechnika Poznańska); Włodzimierz Kucharczyk (Politechnika Łódzka); Tadeusz Łukasiewicz (ITME, Warszawa); Anna Pajęczkowska (ITME, Warszawa); Ewa Talik (Uniwersytet Śląski, weszła w skład Kapituły z urzędu jako prezes-elekt).

Konferencja ICSSC-5/PCCG-8 była zorganizowana po raz drugi przez PTWK. Tak jak w poprzedniej konferencji, konferencja ta obejmowała następujące tematy: 1) wzrost kryształów, 2) charakterystyka i zastosowania materiałów stałych, 3) materiały i filmy nanostrukturalne oraz 4) przyrządy opto- i mikroelektroniczne.

Kapituła ds. Nagród przyznała po raz drugi nagrody za prace doktorskie: dr Jarosławowi Borcowi (promotor prof. Keshra Sangwał, Politechnika Lubelska) oraz dr Iwonie Jóźwik (promotor prof. Jan M. Olchowik, Politechnika Lubelska). Dr Borec zaprezentował tezy oraz wyniki swojej pracy na konferencji PCCG-8 & ICSSC-5. Ze względu na nieobecność w kraju dr Jóźwik nie zaprezentowała wyników swojej pracy na konferencji.

W połączonej konferencji ICSSC-5/PCCG-8 brało udział 160 uczestników, w tym 60 uczestników zagranicznych. Na konferencji zaprezentowano Wykład im. Czochralskiego wygłoszony przez prof. Georga Müllera (Niemcy), 23 wykłady zaproszone, 15 komunikatów ustnych i 153 postery. Tak jak w poprzedniej połączonej konferencji zawartość prezentacji dotyczyła: 1) kryształów objętościowych, 2) warstw epitaksjalnych, wielowarstw i nanokryształów. Z racji ogromnej różnorodności tematów artykuły przeglądowe i oryginalne oparte na zaproszonych wykładach oraz ustnych i posterowych prezentacjach były opublikowane w dwóch czasopismach: *Opto-Electronic Review*, tom 16 (1), 2008, pod go-

ścienną redakcją Antoniego Rogalskiego oraz *Crystal Research and Technology*, tom 42 (12), 2007, pod gościenną redakcją Keshry Sangwała. Rysunek 2 pokazuje okładkę książki abstraktów, a rys. 3 pokazuje grupowe zdjęcie uczestników tej ostatniej połączonej konferencji ICSSC-5/PCCG-8.



Rys. 2. Okładka książki abstraktów konferencji ICSSC-5/PCCG-8 zorganizowanej przez PTWK w 2007 roku, tj. po szesnastu latach od założenia PTWK

Następna połączona konferencja z cyklu ICSSC/PCCG (tj. ICSSC-6/PCCG-9) zostanie zorganizowana przez Wojciecha Sadowskiego w maju 2010 roku w Gdańsku. Ponadto obecnie prace nad przygotowaniem 17. Międzynarodowej Konferencji Wzrostu Kryształów (Seventeenth International Conference on Crystal Growth; ICCG-XVII) oraz Fifteenth International Summer School on Crystal Growth (ISSCG-XV) w Polsce są w toku. Imprezy te będą organizowane wspólnie przez Polskie i Niemieckie Towarzystwa Wzrostu Kryształów. Powierzenie organizacji tych imprez Polsce jest uznaniem przez Międzynarodową Organizację Wzrostu Kryształów (IOCG) zasług i aktywności PTWK na arenie międzynarodowej w kultywowaniu i propagowaniu tradycji współpracy i wzajemnego oddziaływania w dziedzinie wzrostu, charakterystyki i zastosowań materiałów krystalicznych.



Rys. 3. Grupowe zdjęcie uczestników połączonej konferencji ICSSC-5/PCCG-8 zorganizowanej przez PTWK w 2007 r. Zdjęcie dzięki uprzejmości czasopisma *Cryst. Res. Technol.* **42**, 1147 (2007), copyright Wiley-VCH.

* * *

Metoda Czochralskiego wzrostu kryształów



Rys. 4. Profesor Jan Czochralski (1885–1953), wynalazca i wybitny naukowiec, prekursor rozwoju światowej elektroniki, patron Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów

Bez wynalazku profesora Jana Czochralskiego nie-możliwy byłby postęp cywilizacyjny w obecnym kształcie. W ubiegłym roku minęło 90 lat od ukazania się publikacji opisującej nową metodę wyciągania monokryształów z fazy ciekłej przez profesora Jana Czochralskiego w czasopiśmie *Zeitschrift für physikalische Chemie* **92**, 219 (1918). Profesor wynalazł metodę, nazywaną jego nazwiskiem, podczas badań szybkości krystalizacji metali.

Profesor Jan Czochralski jest patronem Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów (PTWK) oraz na zjazdach PTWK, które odbywają się co trzy lata, wykład wprowadzający, honorowy, nazwano imieniem prof. Jana Czochralskiego. Te wykłady są powierzane uznanym naukowcom o światowej renomie z dziedziny wzrostu kryształów. Należy wyjaśnić, dlaczego Zjazd PTWK podjął takie decyzje. Otóż prof. J. Czochralski w roku 1916 zaproponował metodę wyciągania kryształów z roztopu w kierunku przeciwnym do sił grawitacji. Pierwotnie metoda ta była stosowana do krystalizacji metali, dopiero w latach pięćdziesiątych zeszłego stulecia została zastosowana do materiałów półprzewodnikowych: najpierw germanu, potem krzemu i dalej do związków dwu- i wieloskładnikowych. Istotnym warunkiem zastosowania tej metody jest stapianie kongruentne (bez rozłożenia) krystalizowanych materiałów. W ostatnich latach metoda została szeroko rozwinięta tak pod względem technicznym, aparaturowym jak i rozmiarów otrzymywanych kryształów.

Profesor Jan Czochralski jest uznanym światowej sławy uczonym. Urodził się w 1885 roku, w Kcyni, na ziemi Pałuckiej, w rodzinie rzemieślniczej. W tym czasie te tereny były pod zaborem pruskim. Po wstępnej nauce w Kcyni wyjechał do Berlina celem podjęcia pracy i dalszej nauki. Studiował na Politechnice w Charlottenburgu. Na terenie Niemiec uczył się i pracował do roku 1928. Do Kcyni powracał wielokrotnie, gdyż tam mieszkała jego matka i tam miał swój letni dom. W okresie pobytu w Niemczech był twórcą wielu patentów oraz organizatorem i prezesem Niemieckiego Towarzystwa Metaloznawczego. W 1928 r. prof. Ignacy Mościcki, ówczesny prezydent Rzeczypospolitej Polskiej, chemik, profesor Politechniki Warszawskiej, zaprosił Jana Czochralskiego do powrotu do kraju. Czochralski objął Katedrę Metalurgii i Metaloznawstwa na Wydziale Chemii Politechniki Warszawskiej, a następnie powierzono mu organizację Instytutu Metalurgii i Metaloznawstwa przy Politechnice. Współpracował z wieloma firmami oraz działał w wielu towarzystwach naukowych. Do wybuchu II wojny światowej pracował na Politechnice Warszawskiej. Wraz z wybuchem wojny działalność Politechniki jako uczelni została zawieszona. W czasie wojny pracował w zakładzie badawczym na terenie Politechniki. Po wojnie powrócił do Kcyni. Umarł w Poznaniu 22 kwietnia 1953 r. i jest pochowany w Kcyni.

Zainteresowania naukowe Profesora, jego publikacje i patenty są związane z szeroko pojętą metalurgią. Zajmował się konstrukcją urządzeń, adaptacją różnych metod do badania metali, prowadził badania nad krystalizacją metali i ich stopów, wyznaczał wykresy fazowe, prowadził badania metalograficzne, mikroskopowe i rentgenowskie, wykorzystywał trawienie do badania korozji i wytrąceń innych faz. Był jednym z pionierów, którzy zastosowali metody rentgenowskie do badania metali i ich stopów.

Dzisiaj jego nazwisko wiąże się z metodą otrzymywania monokryształów, którą zapoczątkował w 1916 r., kiedy prowadził badania nad krystalizacją metali. Badał szybkość krystalizacji metali przez zanurzanie kapilary w tyglu z roztopionym metalem i powolne jej przesuwanie ku górze. W wyniku tego procesu wyciągania cieczy z tygla i chłodzenia otrzymywał wykrysztalizowany metal w postaci pręcika o średnicy ok. 1 mm i długości kilkudziesięciu mm. Ten pomysł po wielu latach, bo w 1950 r., wykorzystali amerykańscy uczeni G.K. Teal i J.B. Little z Bell Labs do wyciągania monokryształów germanu i metodę nazwali metodą Czochralskiego. Monokryształ ten zastosowano do budowy pierwszego tranzystora warstwowego. Potem metoda została zastosowana do krzemu, a następnie do otrzymywania wielu innych monokryształów związków roztworów stałych, stosowanych szeroko do dzisiaj w mikroelektronice. Zaletą tej metody jest to, że można otrzymywać kryształy bardzo dużych rozmiarów i o różnych kształtach (profilowane). Obecnie istnieje wiele modyfikacji tej metody, która jest dostosowywana do właściwości otrzymywanych materiałów, a jednocześnie badane są mechanizmy towarzyszące procesom wzrostu tych kryształów. Właśnie ze względu na to szerokie zastosowanie metody

krystalizacji i otrzymywania kryształów o najwyższej jakości strukturalnej nazwisko Jana Czochralskiego znalazło trwałe miejsce w literaturze i jest częściej cytowane w literaturze światowej niż niejedno nazwisko laureata Nagrody Nobla. Dlatego mówimy, że profesor Czochralski był prekursorem rozwoju światowej elektroniki.

Od końca II wojny światowej, a najintensywniej od 1990 r. i od czasu powstania Towarzystwa były podejmowane liczne działania w celu upowszechnienia osoby i dorobku Profesora. PTWK inicjowało i współorganizowało wiele spotkań i konferencji naukowych w Kcyni, Toruniu i w Warszawie, było współfundatorem pomnika Jana Czochralskiego, który znajduje się w Kcyni. Działania te były podejmowane z wieloma instytucjami i ze społecznością miasta Kcyni wraz z udziałem Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych. Opis tej działalności może znaleźć czytelnik na stronie internetowej PTWK (www.ptwk.org.pl). Należy tu zaznaczyć działalność prof. Anny Pajczkowskiej wyróżnionej w 2003 roku tytułem honorowej obywatelki i zasłużonej dla miasta Kcyni (www.kcynia.pl).

Zastosowanie metody Czochralskiego w Polsce

Metoda opracowana przez profesora Czochralskiego jest stale rozwijana, ulepszana oraz dostosowywana do rodzaju wyciąganego materiału. Materiały wyjściowe stapiane są w zależności od potrzeb, np. w piecach oporowych, indukcyjnych lub łukowych.

Hodowla monokryształów metodą Czochralskiego w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ITME, prowadzi tematykę badawczą w zakresie rozwoju i wytwarzania materiałów, a także wytwarzania ich struktur krystalicznych oraz przyrządów dla mikro-, opto- i piezoelektroniki. Prowadzi również działalność produkcyjną. ITME jest instytutem w Polsce, który prowadzi na największą skalę krystalizację metodą Czochralskiego.

Metoda Czochralskiego jest szeroko stosowana na świecie do otrzymywania monokryształów do celów badawczych i dla zastosowań w urządzeniach elektronicznych. Polega na wyciąganiu monokryształu z cieczy. Stosowane są różne materiały tyglowe, dopasowane do rodzaju cieczy i nie reagujące z nią.

Laboratorium im. Jana Czochralskiego Zakładu Technologii Monokryształów Tlenkowych ITME zostało wybudowane w 1992 roku w postaci nowoczesnej hali technologicznej (wyposażonej w klimatyzację i ekranowanej od zakłóceń zewnętrznych). Wszystkie urządzenia są ustawione na antywstrząsowych fundamentach. Odpowiada to standardom światowym i spełnia wymagania stawiane nowoczesnym laboratoriom tego typu. Zaplecze laboratorium to nowoczesne klimatyzowane pomieszczenia wyposażone w dygestoria, stoły antywibracyjne, stanowiska do naważania oraz mieszania materiałów tlenkowych. Laboratorium posiada pięć urządzeń do monokrysztalizacji kryształów



Rys. 5. Prof. Anna Pajęczkowska i inż. Jarosław Kisielewski przy urządzeniu Czochralskiego w czasie wzrostu kryształu

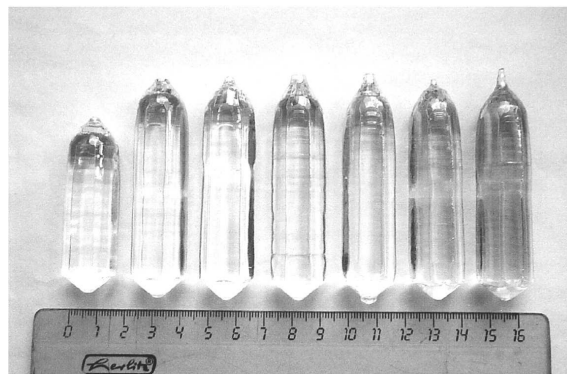
tlenkowych metodą Czochralskiego. Wszystkie urządzenia badawcze sterowane są komputerowo. Urządzenia do monokrystalizacji tlenków zaopatrzone są w czułe wagi elektroniczne, które ważą rosnący kryształ. Sterowane komputerowo silniki krokowe zapewniają automatyczną regulację średnicy kryształu. Dokładność zachowania założonej średnicy kryształu jest jednym z warunków otrzymania kryształu o niskim stopniu zdefektowania.

Na opisanych wyżej urządzeniach opracowano warunki krystalizacji takich grup materiałów monokryсталicznych, jak: laserowe materiały aktywne (YAG domieszkowane m.in. Nd, Pr, Er, Yb, Eu, Tm, Sm, V, Cr; YVO₄ domieszkowane Nd, Tm, Er, Ho, Yb; GdCOB domieszkowane Nd, Yb; YAP domieszkowane Nd), kryształy do pasywnej modulacji dobroci rezonatora (YAG:Cr; YAG:V; YAG:Co), monokryształy na podłoża pod wysokotemperaturowe warstwy nadprzewodzące (NdGaO₃, SrLaAlO₄, SrLaGaO₄, CaNdAlO₄), niedomieszkowane oraz domieszkowane kryształy (LiNbO₃; LiTaO₃; SrBaNb₂O₆), kryształy nieliniowe (NLO) do generacji wyższych harmonicznych (BaB₂O₄ (BBO); LiB₄O₇; GdCOB domieszkowane Nd, Pr, Tm), kryształy piezoelektryczne (LuAlO₃ domieszkowane Ce, Pr; YAlO₃ domieszkowane Ce, Pr; BGO; BSO), kryształy akustooptyczne TeO₂, monokryształy na podłoża pod warstwy GaN (Al₂O₃; NdGaO₃).

W innych laboratoriach ITME znajdują się również urządzenia Czochralskiego wykorzystywane do krystalizacji związków półprzewodnikowych III–V (InP, GaAs, GaP, InAs) oraz krzemu (Si).

Wysoko wyspecjalizowane laboratoria charakteryzują otrzymane monokryształy powyższych materiałów, m.in. za pomocą metod spektroskopii: FTIR, EPR, ICP, RBS, IR, UV, DLTS, PITS, HDR-Xray, Mössbauera). Dokonują również charakteryzacji produkowanych podzespołów elektronicznych i optoelektronicznych (pomiar: impedancyjne, mocy, czułości, widm promieniowania i szumów).

Materiały te są wykonywane zarówno dla odbiorców krajowych, jak i na zamówienia odbiorców zagranicznych.



Rys. 6. Monokryształy YAG:Yb wyhodowane metodą Czochralskiego w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie

Wyniki prac badawczych są publikowane w czasopismach o zasięgu międzynarodowym.

Takim najbardziej spektakularnym jest zastosowanie jednego z kryształów o własnościach scyntylacyjnych, Lu₂AlO₅:Ce (LAO:Ce), jako detektora w tomografii PET (Positron Emission Tomography). Urządzenie to jest stosowane w medycynie do wykrywania zmian nowotworowych.

Hodowla monokryształów metodą Czochralskiego na Uniwersytecie Śląskim

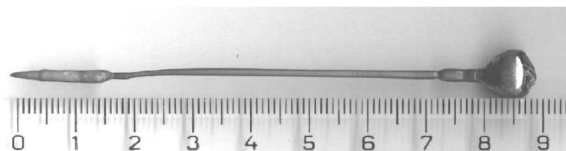
W Zakładzie Fizyki Ciała Stałego Instytutu Fizyki Uniwersytetu Śląskiego stosuje się metodą Czochralskiego do hodowli monokryształów związków międzymetalicznych. Między innymi ważnych dla przyszłych zastosowań w chłodziarkach magnetycznych czy spintronice.



Rys. 7. Profesor Ewa Talik i mgr Monika Klimczak przy urządzeniu Czochralskiego w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Śląskiego

Metoda opracowana przez Czochralskiego została przystosowana do hodowli bardzo reaktywnych, trudno-topliwych, najczęściej posiadanych w małych ilościach (masa około grama), kosztownych materiałów. Proces wy-

ciągania monokryształów przebiega w komorze wypełnionej bardzo czystym argonem, jako gazem ochronnym, aby nie nastąpiło utlenianie się materiału podczas procesów topienia i hodowli. Stosuje się grzanie indukcyjne i cewkę lewitacyjną zamiast tygla. Stopiony materiał wyjściowy lewituje w wyniku oddziaływania przeciwnie skierowanych pól magnetycznych w cewce i materiale wsadowym. Dzięki temu nie odprowadza ciepła do cewki oraz nie następuje zanieczyszczenie hodowanego kryształu materiałem tygla.



Rys. 8. Monokryształ wyhodowany metodą Czochralskiego w Zakładzie Fizyki Ciała Stałego Uniwersytetu Śląskiego

W ostatnich latach prowadzone są badania mające na celu znalezienie odpowiednich materiałów dla nowego typu chłodziarek magnetycznych. Związki międzymetaliczne, zwłaszcza na bazie pierwiastków ziem rzadkich, stanowią ważną klasę tego typu materiałów. Przewiduje się, że w ciągu najbliższych 10 lat lodówki takie będą dostępne w sprzedaży, będą bardziej wydajne i bezpiecznie dla środowiska niż konwencjonalne. Cykl chłodzenia w pobliżu temperatury pokojowej będzie realizowany dzięki zjawisku magnetokalorycznemu, polegającemu na zmianie temperatury materiału pod wpływem pola magnetycznego. Wykorzystuje się obniżenie entropii układu złożonego z momentów magnetycznych po przyłożeniu pola magnetycznego. W polu magnetycznym momenty magnetyczne ulegają uporządkowaniu. Powstałe w tym procesie ciepło jest odprowadzane do otoczenia. Taki stan odpowiada niższej entropii układu. Po wyłączeniu z kolei pola magnetycznego momenty magnetyczne ponownie rozporządkowują się, a temperatura układu obniża się. Poszukuje się nowych materiałów, zawierających pierwiastki o odpowiednio dużym momencie magnetycznym i wysokiej temperaturze uporządkowania magnetycznego. W dotychczas badanych tego typu materiałach stwierdzono istnienie wielu struktur krystalicznych, przejść krystalograficznych oraz bogactwo zachowań magnetycznych, których natura nie jest dotąd dostatecznie poznana. Istotną rolę odgrywa anizotropia oraz struktura elektronowa. Własności fizyczne, zwłaszcza ich anizotropia, mogą być jednoznacznie określone dopiero przy dysponowaniu monokryształami dobrej jakości, co umożliwia właśnie metoda Czochralskiego.

Wspólna inicjatywa Polskiego i Niemieckiego Towarzystw Wzrostu Kryształów

Polskie i Niemieckie Towarzystwa Wzrostu Kryształów łączy postać wybitnego uczonego profesora Jana Czochralskiego.

Podczas światowej konferencji wzrostu kryształów „The 15th International Conference on Crystal Growth” w połączeniu z „The 13th Conference on Vapor Growth and Epitaxy Organometallic Vapor Phase Epitaxy”, która odbyła się w dniach 12–17 sierpnia 2007 r. w Salt Lake City, Utah, USA, Polskie Towarzystwo Wzrost Kryształów wygrało w rywalizacji z innymi krajami, np. z Wielką Brytanią, prawo do organizacji wraz z Niemieckim Towarzystwem Wzrostu Kryształów (DGKK) światowej konferencji „The 17th International Conference on Crystal Growth” w połączeniu z „The 15th International Conference on Vapor Growth and Epitaxy” (ICCG-17 & ICVGE-15), która odbędzie się w dniach 11–16 sierpnia 2013 r. w Warszawie oraz szkoły „The 15th International Summer School on Crystal Growth” planowanej na 6–10 sierpnia 2013 r. w Gdańsku.



Rys. 9. Pierwsza strona prezentacji i broszury przedstawionej Międzynarodowej Organizacji Wzrostu Kryształów

Należy podkreślić, że uzyskanie organizacji konferencji jest dużym sukcesem Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów i polskiego środowiska wzrostu kryształów. Przez cały okres działalności Towarzystwo wykazywało dużą aktywność naukową i organizacyjną, poprzez organizację wielu konferencji i sympozjów z udziałem wielu znanych naukowców światowych. Między innymi dlatego zapadła decyzja o przyznaniu Polsce tej prestiżowej konferencji. Jest to pierwsza tego typu konferencja organizowana w krajach Europy Środkowej. Konferencje te, organizowane co trzy lata, gromadzą w zasadzie wszystkich liczących się badaczy z całego świata w dziedzinie wzrostu kryształów i ich charakteryzacji. Fakt, że bezpośrednio przed konferencjami są organizowane szkoły wzrostu kryształów, umożliwia kontakt wielu studentom, doktorantom i młodym pracownikom naukowym z wiodącymi ekspertami w tej dziedzinie. Daje te ogromne korzyści dla wielu młodych uczestników tych szkół. W tym wypadku głównymi beneficjentami będą polscy i niemieccy młodzi pracownicy nauki.

Prezentacja konferencji została przygotowana wspólnie przez Polskie i Niemieckie Towarzystwa Wzrostu Kryształów. Ze strony polskiej prezentację przygotował zespół w składzie: Stanisław Krukowski, Michał Leszczyński, Dorota Anna Pawlak, Ewa Talik i Zbigniew Żytkiewicz oraz Jochen Friedrich ze strony niemieckiej.

W ostatnim roku kontakty Polskiego i Niemieckiego Towarzystwa wzrostu kryształów były, w dużym stopniu, poświęcone planom organizacji przyszłej Konferencji i Szkoły. W ramach przygotowań do konferencji PTWK wyłoniło polską część komitetu organizacyjnego konferencji ICCG-17 w składzie: S. Krukowski, Z. Żytkiewicz, M. Leszczyński, E. Talik oraz D.A. Pawlak. Również DGKK wyłoniło niemiecki zespół wchodzący w skład komitetu organizacyjnego konferencji: R. Fornari, T. Beck, A. Croell, P. Gille oraz M. Heuken. W dniu 4 marca 2009 r., podczas konferencji rocznej DGKK w Dreźnie odbyło się spotkanie polskich i niemieckich członków Komitetu Organizacyjnego Konferencji. Podczas spotkania zaproponowano i uzgodniono podstawową strukturę Konferencji ICCG-17 i zasady jej organizacji. Konferencja będzie organizowana wspólnie z wyraźnie zaznaczonym podziałem na sesje tematyczne. Sesje będą względnie niezależne, organizowane przez przewodniczących, nominowanych przez PTWK albo przez DGKK. Podział sesji będzie symetryczny, w którym obydwaj partnerzy zajmą się identyczną liczbą sesji. Dodatkowo, zgodnie z warunkiem IOCG, zaproszone zostanie Brytyjskie Stowarzyszenie Wzrostu Kryształów (BACG – British Association for Crystal Growth), które zajmie się sesjami na temat wzrostu kryształów organicznych i ich zastosowaniu w farmakologii i innych dziedzinach nauki i technologii. Współprzewodniczącymi wszystkich sesji będą przedstawiciele innych krajów nominowani przez agendy Międzynarodowej Organizacji Wzrostu Kryształów (IOCG): Komitet Wykonawczy i Radę. Organizatorzy Sesji utworzą Komitet Programowy Konferencji, pod przewodnictwem dwu współprzewodniczących programowych. Organizatorzy sesji mogą liczyć na pomoc Międzynarodowego Komitetu Doradczego (IAC – International Advisory Committee), którego rolą będzie proponowanie tematów i prezydentów wykładów zaproszonych oraz prezentacji ustnych. Nad całością organizacji konferencji będzie czuwał Komitet Organizacyjny, złożony z członków już obecnie nominowanych przez Towarzystwa. Wstępnie ustalono, że prace Konferencji zostaną opublikowane przez Elsevier Ltd. w *Journal of Crystal Growth*, co było w zasadzie regułą podczas organizacji poprzednich konferencji z tego cyklu. Nad edycją prac czuwać będzie 4 edytorów nominowanych symetrycznie przez PTWK oraz DGKK. Edytorzy prac również wejdą w skład Komitetu Organizacyjnego. Ustalony został podział innych kompetencji w ramach organizacji konferencji: PTWK zajmie się lokalną organizacją Konferencji w Warszawie i obsługą jej uczestników, natomiast DGKK będzie odpowiadać za uzyskiwanie funduszy na organizację konferencji, zarówno w ramach Unii Europejskiej jak i od sponsorów prywatnych. Przedstawiciele PTWK poinformowali, że zapewniona została rezerwacja pomieszczeń

kampusu Politechniki Warszawskiej na okres trwania Konferencji. Władze Politechniki Warszawskiej zaakceptowały zaproszenie do współorganizacji Konferencji, poprzez pomoc organizacyjną na terenie kampusu Uczelni.

Dodatkowo został sformułowany zakres tematyczny konferencji, poprzez specyfikację tematów sesji i ich charakteru. W ramach konferencji będą organizowane sesje ogólne poświęcone globalnemu omówieniu podstaw fizyki i technologii wzrostu kryształów, oraz sesje taktyczne zajmujące się szczególnie silnie rozwijającą się dziedziną wzrostu kryształów. W sposób szczególny zostaną uwzględnione nowe dziedziny wiedzy, w tym osiągnięcia nanotechnologii i tworzenia nowych materiałów.

Innym interesującym aspektem współpracy tych towarzystw jest organizacja 15 Letniej Szkoły Wzrostu Kryształów, planowanej na 6–10 sierpnia 2013 roku w Gdańsku. PTWK założyło komitet organizacyjny Szkoły: W. Sadowski, E. Talik, D.A. Pawlak, oraz L. Lipińska. Ze strony niemieckiej Szkołą zajmować się będą: J. Friedrich oraz P. Wellmann. W ramach spotkania w Dreźnie dyskutowane były również organizacyjne problemy Szkoły. Zaplanowano że Szkoła będzie organizowana w oparciu o bazę dydaktyczną i bytową Politechniki Gdańskiej. Niestety ze względu na nieobecność prof. Sadowskiego, część organizacyjna została dopracowana tylko w części ogólnej. Niektóre szczegóły organizacyjne zostaną uzgodnione później.

Zaplanowano również dalszy tok przygotowań do organizacji konferencji. W ramach tych przygotowań członkowie DGKK zostaną zaproszeni do udziału w konferencji PTWK w maju 2010 roku w Gdańsku, gdzie również odbędzie się posiedzenie Komitetów Organizacyjnych Konferencji i Szkoły. Do tego czasu zostanie przygotowana prezentacja przygotowań do Konferencji ICCG-17. Zostaną sformułowane raporty na temat przygotowań do organizacji Konferencji i Szkoły. Raporty te zostaną przedstawione agendom IOCG: Komitetowi Wykonawczemu oraz radzie podczas posiedzeń tych agend na Konferencji ICCG-16 w Pekinie. Sformułowanie raportów jest istotnym warunkiem akceptacji organizacji tych imprez w Warszawie i Gdańsku.

PTWK bierze udział w szeregu inicjatyw rozślawiających imię i dorobek prof. Czochralskiego, w tym w przyznawaniu dorocznej Nagrody Czochralskiego, wspólnie z Europejskim Towarzystwem Badań Materiałowych (EMRS), Polską Akademią Nauk (PAN) oraz Polskim Towarzystwem Badań Materiałowych (PTBM), w ramach cyklicznej międzynarodowej konferencji EMRS Fall Meeting.

Działania Towarzystwa są życzliwie wspierane od wielu lat przez dyrektora Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych dr Zygmunta Łuczyńskiego oraz dawniejszy Komitet Badań Naukowych i obecnie Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Autorzy dziękują za udostępnienie materiałów:

- strona internetowa PTWK: www.ptwk.org.pl/eng/sitemap.html,
- Paweł Tomaszewski, „Jan Czochralski and his method” (2003).

Czterdziesta rocznica śmierci Profesora Henryka Niewodniczańskiego

Uroczystości dla uczczenia 40. rocznicy śmierci Profesora Henryka Niewodniczańskiego (1900–1968) zorganizował Uniwersytet Jagielloński oraz Instytut Fizyki UJ 20 grudnia 2008 r. Rozpoczęła je msza św. odprawiona przez kardynała Franciszka Macharskiego w kolegiacie św. Anny, po czym zebrani pojechali na Cmentarz Rakowicki i złożyli wiązanki kwiatów na grobie Profesora. W auli Collegium Novum odbyło się uroczyste posiedzenie naukowe, na które zaproszono uczniów i współpracowników Profesora z Krakowa oraz przedstawicieli wszystkich ważnych ośrodków fizyki w Polsce. Wziął w nim także udział kardynał Franciszek Macharski, dzieci Profesora: córka Justyna Blinowska i syn prof. Jerzy Niewodniczański z żoną.

Kiedy umierał Profesor Henryk Niewodniczański, w Instytucie Fizyki UJ przy ul. Reymonta swoje przeboje śpiewała „Piwnica pod baranami”.

*Przychodzimy, odchodzimy,
leciuteńko na paluszkach...*

Wtedy nikt się nie spodziewał, że to już, że z tak, zdawałoby się, błahego powodu, leciuteńko na paluszkach przeszedł do wieczności Inicjator, wieloletni Opiekun, a obecnie Patron krakowskiej nowoczesnej fizyki eksperymentalnej, a fizyki jądrowej w szczególności.

– Profesor Henryk Niewodniczański był Europejczykiem w pełnym tego słowa znaczeniu. Znał doskonale kilka języków, jeździł do wielu krajów europejskich, gdzie pracował w najlepszych laboratoriach fizycznych. Tam nawiązywał współpracę, kontakty towarzyskie i przyjaźnie ze zdolnymi fizykami. Miał nieprawdopodobne wyczucie i rozeznanie ważności najnowszych zagadnień w dziedzinie fizyki uprawianych na świecie – powiedział otwierając posiedzenie w auli Collegium Novum prof. Karol Musioł, JM Rektor Uniwersytetu Jagiellońskiego – Profesor angażował się w najciekawsze tematy i rozwijał je w Polsce. Budował nowoczesne urządzenia mimo trudnych czasów dla zrujnowanego wojną kraju. Uważał, że bez zaplecza aparaturowego nie może powstać liczący się w świecie ośrodek naukowy. Stawiał na młodzież, umożliwiając swoim pracownikom rozwój i karierę naukową. Każdy fizyk po doktoracie wyjeżdżał za granicę do jednego z najnowocześniejszych ośrodków fizyki, gdzie mógł nabierać doświadczenia i uczyć się od najlepszych mistrzów. Pod jego opieką wszyscy czuli się bezpiecznie.

*Ta nasza młodość z kości i krwi,
Ta nasza młodość, co z czasu kpi,
Co nie ustoi w miejscu zbyt długo,
Ona co pierwszą, jest potem drugą,
Ta nasza młodość, ten szczęsny czas,
Ta para skrzydeł zwiniętych w nas...*



JM Rektor Uniwersytetu Jagiellońskiego prof. Karol Musioł otwiera obrady sesji w auli Collegium Novum Uniwersytetu

Uczniowie Profesora przeżywają obecnie już kolejną młodość, ale najlepiej wspominają tę pierwszą, potem drugą. Wtedy rozwijali skrzydła pod troskliwą opieką swego Mistrza – Papy Niewodniczańskiego. Kiedy Profesor przyjechał do Krakowa w 1946 r. i zaczął tworzyć nowoczesny ośrodek fizyki, obecni na sesji seniorzy byli studentami. Kiedy umierał, stanowili już kadrę młodych profesorów. Tamte lata były dla nich okresem wchodzenia w dorosłe życie, pierwszych sukcesów naukowych i osobistych.

Tuż po wojnie krakowska fizyka wyglądała zupełnie inaczej. Instytut Fizyki mieścił się w zdewastowanym przez okupanta budynku uniwersyteckim przy ul. Gołębiej 13. Nie było aparatury. Wkrótce po przyjeździe do Krakowa Niewodniczański wraz z Janem Weyssenhoffem zorganizowali trzy wyprawy berlińskie – wspominał prof. Adam Strzałkowski – Za polską kiełbasę, wódkę i pewną kwotę pieniędzy pozostawioną w Polsce przez władze okupacyjne, kupowali w Berlinie różne elementy do aparatury naukowej oraz materiały. Przywiezione zdobywcze, jak lampy radiowe czy specjalne kondensatory, Profesor trzymał w zamkniętej szafie i starannie wydzieliał dla potrzeb badawczych. Ileż emocji się z tym wszystkim wiązało! Podczas każdej zagranicznej wyprawy obowiązkiem uczestników było również zwiedzanie kraju i poznawanie jego kultury.

*...Od początku zbudujemy
Miasta nasze, domy nasze,
Sprzęty nasze, lampy nasze,
Zeby wiatr miał czym kołysać...*

Profesor Niewodniczański miał swoją wizję krakowskiej fizyki. Zamierzał rozwijać optykę atomową – dyscyplinę swojej młodości, fizykę jądrową oraz te jej zasto-

sowania, które dawały możliwości badania struktury ciała stałego i cieczy, jak np. magnetyczny rezonans jądrowy czy rozpraszanie neutronów.

Opowiadanie o historii powstania Instytutu Fizyki Jądrowej prof. Andrzej Hryniewicz rozpoczął od wspomnienia okresu budowy małego cyklotronu jeszcze w instytucie na Gołębiej. Wtedy młodzi fizycy wraz z profesorem Niewodniczańskim własnoręcznie pogłębiali piwnice, by urządzenie się zmieściło. Wykopywali więc ziemię i wiadrami po schodach wynosili ją na zewnątrz. To były tony ziemi! Andrzej Hryniewicz przypomniał mrozące krew w żyłach wydarzenie. Podczas wprowadzania do piwnicy wielotonowe jarzmo magnesu cyklotronu zaklinowało się. Niewodniczański zbiegł na dół, by zobaczyć, gdzie się zaklinowało i w którą stronę należy je przesunąć. Zobaczył i natychmiast chciał wrócić, żeby pokierować spuszczanym ciężarem. Zdążył jednak jedynie wykonać kilka kroków, gdyż nagle w jakiś sposób blokada się uwolniła i jarzmo runęło dokładnie w miejsce, gdzie przed sekundą stał! Dzięki tej sekundzie nie stracił życia... Musiała czuwać nad nim Opatrzność.

Wybudowany własnymi siłami cyklotron C48 stanowił bazę aparaturową dla fizyki jądrowej. Uruchomienie go było dla całej grupy wielkim wydarzeniem. Żeby to uczcić, Profesor Niewodniczański wszystkim pracownikom postawił wino!

Mały cyklotron został wkrótce przeniesiony do Bronowic, gdzie służył do badań w dziedzinie fizyki stosowanej i niektórych prac spektroskopii jądrowej. Jego działanie w latach pięćdziesiątych istotnie wpłynęło na decyzję rządu o zlokalizowaniu w Krakowie, zakupionego w Związku Radzieckim cyklotronu U120, który uruchomiono w listopadzie 1958 r.

– Pierwsza wiązka jonów wyprowadzona z cyklotronu U120 wyglądała jak świecąca miotła o długości kilkudziesięciu cm, była grubsza na końcu i pachniała ozonem – wspominał prof. Kazimierz Grotowski – Pierwszy eksperyment wykonałem razem z Andrzejem Budzanowskim przy nieoddanym jeszcze formalnie do użytku cyklotronie. Zmierzyliśmy wtedy polaryzację spinową neutronów emitowanych z reakcji strippingu deuteronów na jądrach węgla ^{12}C .

Badania fazy skondensowanej zasugerował prof. Niewodniczański Jerzemu Janikowi. Polecił mu, by w ramach pracy nad doktoratem zajął się absorpcją neutronów. – Skonstruowałem zatem źródło neutronów oparte na reakcji (γ, n) w berylu, korzystając z igieł radowych wypożyczonych, dzięki pomocy Profesora, z Instytutu Onkologii w Krakowie – przypomniał prof. Jerzy Janik. Jak twierdził, ani wybrana reakcja, ani zmontowana przez niego aparatura detekcyjna nie były optymalne. Niemniej działały. W wyniku otrzymał niemonotonicznie zmieniające się współczynniki absorpcji. Ten stosunkowo drobny fakt stał się odpowiedzialny za odejście Jerzego Janika od pierwotnego zamiaru skoncentrowania się na neutronowej fizyce jądrowej, a zajęcie się wykorzystaniem neutronów jako narzędzia do badania materii skondensowanej. Profesor Niewodniczański był człowiekiem takiego formatu, że

niczego nie tłumił, a zawsze pomagał – podkreślił Jerzy Janik.

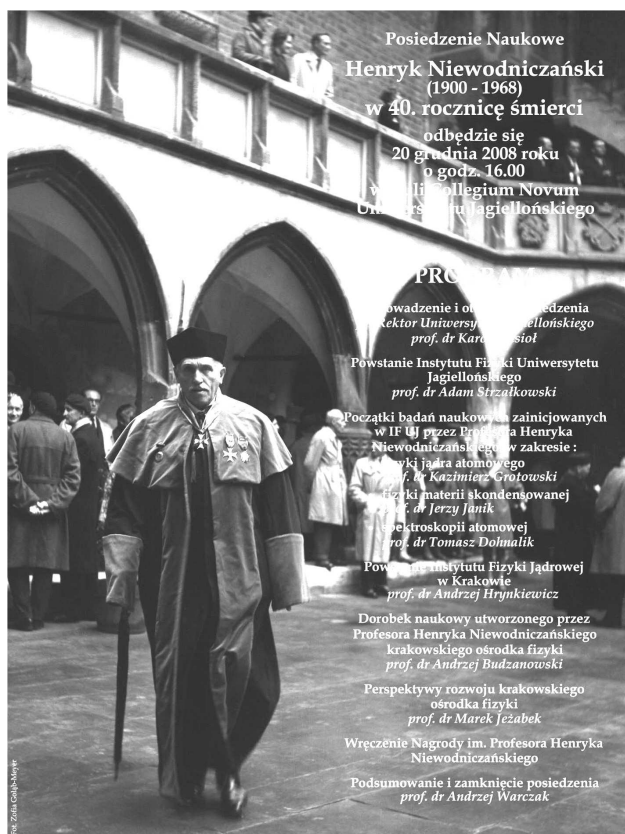
Szczególnie bliskie sercu Niewodniczańskiego były zainicjowane przez niego w Krakowie badania z zakresu spektroskopii atomowej. Prof. Tomasz Dohnalik przypominał, jak zmieniała się organizacja Instytutu Fizyki UJ. Cztery Zakłady: Optyki Atomowej, Fizyki Doświadczalnej, Fizyki Ogólnej i Fizyki Jądrowej utworzone przez Papę Niewodniczańskiego z czasem łączyły się lub zmieniały nazwy. Zmieniali się też ich kierownicy. Zakład Optyki Atomowej przejął po swej habilitacji prof. Danuta Kunisz, a po jej śmierci w roku 1980 zastąpił ją Tomasz Dohnalik. Przez pewien czas działał Zakład Spektroskopii Wysokiej Zdolności Rozdzielczej kierowany przez Franciszka Lesia. Obecnie istnieją, rozwijają się i odnoszą sukcesy trzy zakłady zajmujące się zagadnieniami spektroskopii atomowej: Zakład Fotoniki kierowany przez prof. Wojciecha Gawlika, Fizyki Nanostruktur i Nanotechnologii kierowany przez prof. Marka Szymońskiego i Optyki Atomowej prof. Tomasza Dohnalika.

Na temat dorobku naukowego krakowskiego ośrodka fizyki, utworzonego przez Henryka Niewodniczańskiego, w dziedzinie fizyki jądrowej mówił prof. Andrzej Budzanowski. Przypominał, że w latach 60. najciekawsze wyniki eksperymentalne były publikowane w instytutowych raportach i rozsyłane natychmiast do wszystkich ważnych centrów fizyki jądrowej.

– To skutkowało! Zaobserwowane przez nas (Budzanowski, Grotowski, Strzałkowski) i opisane w raporcie pod koniec lat 60. silne wzmocnienie przekroju czynnego dla sprężystego rozpraszania cząstek α o energii 24,7 MeV na jądrach ^{40}Ca pod wstecznymi kątami spotkało się z szybką reakcją Amerykanów. Otrzymaliśmy nieoczekiwane list od N. Jarmiego i H.C. Bryanta z University of Colorado zawierający wytłumaczenie tego nowego eksperymentu jako efektu glorii w rozpraszaniu cząstek alfa, analogicznego do dyfrakcyjnego rozpraszania fal świetlnych na kropelkach wody. Członkowie „Wielkiej Trójcy” poczuli się prawdziwymi odkrywcami.

Henryk Niewodniczański wymagał od swoich uczniów poprawnego posługiwania się językami obcymi i nawiązywania jak najszerzej współpracy międzynarodowej. W latach 70. otworzyły się możliwości praktycznie nieograniczonej współpracy z ośrodkami niemieckimi w Jülich, Heidelbergu, Karlsruhe, Monachium i Hamburgu. Później z ośrodkami amerykańskimi w Berkeley, na Uniwersytecie Stanforda, w Chicago (Fermilab) i Brookhaven. W Krakowie budowano aparaturę, np. detektory PHOBOS czy BRAHMS, a pomiary wykonywano za granicą. Na przykład przy relatywistycznym zderzaczu RHIC o najwyższej osiągniętej dotychczas energii w zderzeniu $U + U$ (to jest 200 GeV w układzie środka masy) wytworzono najgęstszy stan materii wykazujący wyraźne ubytki lepkości (tarcia wewnętrzne).

Współpraca krakowskiego ośrodka fizyki rozszerzała się również na wschód poprzez Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych w Dubnej i jeszcze dalej aż po Japonię.



Sesja nie ograniczyła się jedynie do wspomnień. Było też miejsce na spojrzenie w przyszłość. Dyrektor IFJ PAN prof. Marek Jeżabek przedstawił perspektywę rozwoju ośrodka krakowskiego. Wizja Niewodniczańskiego stworzenia w Krakowie silnego i doskonale wyposażonego centrum fizyki powoli, ale jednak jest realizowana. W najbliższych latach w Bronowicach powstanie Narodowe Centrum Terapii Hadronowej. Oprócz leczenia nowotworów, badań klinicznych i dozymetrii będą tam rozwijane badania w zakresie radiobiologii i fizyki jądrowej. Skonstruowany w IFJ cyklotron AIC144 spełni podobną rolę jak kiedyś C48: da początek terapii czerniaka oka, po czym zostanie zastąpiony najnowocześniejszym cyklotronem przyspieszającym protony do energii 250 MeV, koniecznej przy leczeniu nowotworów zlokalizowanych w głębszych ośrodkach organizmu człowieka.

Siłami krakowskich fizyków powstaje kalorymetr PARIS (Photon Array for studies with Radioactive Ion and Stable beams), który będzie pracował na wiązkach radioaktywnych budowanego akceleratora SPIRAL2 zarówno we Francji, jak i w Polsce – w SLCJ Warszawa i w Krakowie. Jest to projekt nowatorskiego wielolicznikowego kalorymetru gamma dla szerokiego zakresu energii fotonów: od 100 keV do 50 MeV. Składać się on będzie z dwu koncentrycznych warstw – wewnętrznej o dużej granulacji, zbudowanej z nowych materiałów scyntylacyjnych LaBr₃, które charakteryzują się jednocześnie zarówno bardzo dobrą czasową i energetyczną zdolnością rozdzielczą,

jak i wysoką wydajnością na kwanty gamma. Warstwa zewnętrzna, o mniejszej granulacji, składać się będzie z konwencjonalnych detektorów scyntylacyjnych.

Profesor Andrzej Warczak, dyrektor Instytutu Fizyki UJ, mówił o budowie nowej siedziby IF i Wydziału FAIS powstającej w Pychowicach na Kampusie 600-lecia Odnowienia Uniwersytetu. Pokazywał zdjęcia imponującego projektu autorstwa Pracowni Architektonicznej WASKO-projekt. Budowa będzie realizowana w latach 2009–11. Podał też pewne szczegóły dotyczące projektu synchrotronu.

W marcu 2008 r. powstało krajowe konsorcjum pod nazwą Polski Synchrotron, do którego weszło 30 uczelni i instytutów naukowych. Koordynatorem projektu jest Uniwersytet Jagielloński. W Krakowie na kampusie uniwersyteckim powstanie pierwsze w Polsce źródło promieniowania elektromagnetycznego o szerokim zakresie widmowym – od dalekiej podczerwieni do twardego promieniowania rentgenowskiego. Urządzenie jest źródłem nadzwyczaj intensywnych wiązek fotonów, wytwarzanych przez ultraszybkie elektrony, które krążą w specjalnie do tego celu konstruowanych akceleratorach o średnicy od kilkadziesiąt do kilkuset metrów. Uruchomienie urządzenia jest planowane na 2013 r. Krakowski synchrotron będzie miał obwód około 250 metrów i energię elektronów około 3 GeV. Koszt inwestycji, na którą składa się budynek z odpowiednią infrastrukturą, akcelerator i pierścień akumulujący oraz siedem linii pomiarowych, szacowany jest na 130 mln euro.

Podczas sesji odbyło się uroczyste wręczenie Nagrody im. Profesora Henryka Niewodniczańskiego dla najlepszego absolwenta UJ, przyznanej przez Kapitułę Nagrody złożoną z profesorów fizyki. Laureatem został dr Bartłomiej Dybiec, adiunkt w zakładzie Fizyki Statystycznej UJ.

Powiało optymizmem:

...Od początku zbudujemy
Miasta nasze, domy nasze,
Sprzęty nasze, lampy nasze,
Żeby wiatr miał czym kołysać...

Wiatr będzie miał czym kołysać: są zdolni ludzie, są wielkie projekty, jest duch fizyki w wielopokoleniowej rzeszy uczniów i współpracowników Profesora Henryka Niewodniczańskiego. Jest serdeczna współpraca pomiędzy nimi. Utworzony przez Profesora ośrodek fizyki w Krakowie trwa i rozwija się.

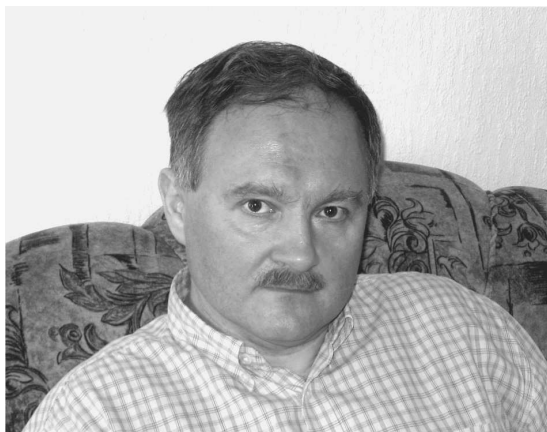
Uroczystości zakończyły się spotkaniem towarzyskim zebranych przy choince, opłatku i lampce wina.

Autorami poezji cytowanych w tekście są Janusz Jęczyk („Przychodzimy, odchodzimy”) i Tadeusz Śliwiak („Ta nasza młodość”). Są to słowa do piosenek, do których muzykę napisał Zygmunt Konieczny, piosenki zaś były wykonywane w kabarecie „Piwnica pod Baranami” w Krakowie.

Małgorzata Nowina Konopka
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
Kraków

■ Adam Gadomski

Urodził się w 1959 r. w Katowicach. Studiował fizykę techniczną na Politechnice Śląskiej w Gliwicach. Studia te ukończył w roku 1984, specjalizując się w fizyce powierzchni ciała stałego. W 1986 r. podjął pracę na PŚI. Rozprawę doktorską „Metody konstruowania modeli dyfuzyjnego formowania agregatów”, wykonaną pod kierunkiem prof. Zbigniewa J. Grzywny, obronił w 1992 r. Od roku 1989 pracował na Uniwersytecie Śląskim, a po stażu w Austrii (Graz, 1993–94) – od roku 1995 w Zakładzie Fizyki Teoretycznej Instytutu Matematyki i Fizyki Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy (obecnie Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego). W okresie 1996–97 przebywał w Instytucie Fizyki na Uniwersytecie Humboldta w Berlinie, zajmując się procesami stochastycznymi w fazie skondensowanej. W 1999 r. habilitował się na UŚI w Katowicach na podstawie prac nt. zastosowań teorii heterogenicznych przemian fazowych w układach złożonych umiarkowanie zaglomerowanych. Od roku 2001 jest profesorem nadzwyczajnym UTP. Tytuł profesora nauk fizycznych otrzymał 13 stycznia 2009 r.



Jest autorem ponad 90 prac w międzynarodowych wydawnictwach recenzowanych, współorganizatorem trzech sympozjów międzynarodowych (oraz redaktorem ich materiałów opublikowanych jako specjalne zeszyty *Physica A*, *Intern. J. Mod. Phys. C* oraz *BioSystems*), a także współautorem monografii *Applications of Statistical Physics* (2000), autorem wielu wystąpień konferencyjnych. W latach 2003–05 przebywał w Queens University Belfast, gdzie zajmował się zagadnieniem agregacji koloidalnych w wymiarze przestrzennym $d = 2$. Od roku 2008 jest kierownikiem Zakładu Modelowania Procesów Fizykochemicznych w UTP Bydgoszcz, gdzie zajmuje się modelowaniem (bio)materiałów z nieliniową odpowiedzią lepko-sprężystą.

Jest żonaty od 1994 r. i mieszka w Żninie; ma żonę Ewę (prawnika) i 11-letnią córkę Magdalenę. Jego zainteresowania pozanaukowe obejmują zajęcia rekreacyjno-wypoczynkowe, zwiedzanie wybranych zakątków w kraju i za granicą, a także słuchanie muzyki (poezja śpiewana: Stare Dobre Małżeństwo; polski rock: Dżem).

■ Marek Trippenbach

Urodził się w 1958 r. w Warszawie. W roku 1982 ukończył studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego i rozpoczął studia doktoranckie w Polskiej Akademii Nauk. Pracę doktorską z dziedziny fizyki teoretycznej obronił w 1988 r. (promotor prof. Kazimierz Rzążewski) i rozpoczął pracę w Zakładzie Optyki IFD UW. Obecnie pracuje w Katedrze Fizyki Atomowej i Optyki Kwantowej w Instytucie Fizyki Teoretycznej UW. Tytuł naukowy otrzymał 13 stycznia 2009 r.

Wielokrotnie prowadził badania za granicą. W 1989 r. wyjechał na staż do Joint Institute for Laboratory Astrophysics, gdzie pracował nad teorią zderzeń zimnych atomów pod kierunkiem prof. J. Coopera. Następnie przebywał na Uniwersytecie w Rochester w grupie prof. S. Mukamela. Od 1995 do 1999 r. na Uniwersytecie Ben Guriona w Beer Shevie zajmował się wraz z prof. Yehudą Banded teorią propagacji ultrakrótkich impulsów laserowych w ośrodkach nieliniowych oraz procesami nieliniowymi w kondensatach Bosego–Einsteina. W tym czasie współpracował też z grupą doświadczalną prof. Williama Phillipsa w NIST w USA, gdzie w wyniku tej współpracy przeprowadzono w roku 1999 pierwszy eksperyment z mieszaniem czterech fal w kondensacie (*Nature* **398**, 218 (1999)).



Jego zainteresowania koncentrują się wokół optyki kwantowej i nieliniowej oraz teorii zimnych atomów. Współpracuje z wieloma ośrodkami zagranicznymi. Jest autorem około 100 prac naukowych opublikowanych w czasopiśmie z listy filadelfijskiej, licznych wystąpień konferencyjnych oraz kierownikiem grantów naukowych, w tym grantu europejskiego EuroQuam. W 2006 r. otrzymał nagrodę im. Wojciecha Rubinowicza za osiągnięcia w dziedzinie optyki nieliniowej fotonów i atomów.

Od 2008 r. jest prodziekanem ds. badań naukowych i współpracy z innymi ośrodkami na Wydziale Fizyki UW. Pełni funkcje Dyrektora Centrum Inżynierii Kwantowej Atomów i Światła, akredytowanej przy Uniwersytecie Warszawskim, jest członkiem PTF oraz Fellow Institute of Physics. Uprawia aktywnie sport, szczególnie siatkówkę i narciarstwo.

■ Aleksander Sęk

Urodził się w 1957 r. w Turku. Studiował fizykę na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza; tytuł magistra otrzymał w roku 1981. Stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki uzyskał na Wydziale Matematyki i Fizyki UAM w 1990 r. (promotor prof. Edward Ozimek), a stopień doktora habilitowanego nauk fizycznych w zakresie fizyki, akustyki i akustyki psychofizjologicznej na Wydziale Fizyki UAM w roku 1996. Tytuł naukowy profesora nauk fizycznych otrzymał 13 stycznia 2009 r.



Od 1981 r. do chwili obecnej pracuje w Instytucie Akustyki UAM. Odbił staże naukowe w Hearing Laboratory, Department of Experimental Psychology (Cambridge University, UK, 1992–98 oraz 2007–08) i w Research Institute of Electrical Communication (Tohoku University, Sendai, Japonia, 2002–03).

Jego zainteresowania naukowe to: akustyka psychofizjologiczna, mechanizmy funkcjonowania słuchu, projektowanie i wdrażanie nowych metod diagnostycznych słuchu (w tym testy zrozumiałości mowy), akustyka mowy, algorytmy poprawy zrozumiałości mowy, ślepa separacja sygnałów, cyfrowa analiza sygnałów, algorytmy pracy cyfrowych aparatów słuchowych i implantów ślimakowych, wpływ środków farmakologicznych na stan układu słuchowego człowieka, otoemisje akustyczne, diagnozowanie uszkodzeń słuchu typu martwy obszar, odbiorcze uszkodzenia słuchu.

Obecnie bada test psychofizyczny analizujący stopień wykorzystania chwilowych zmian ciśnienia akustycznego dla częstotliwości powyżej 5 kHz oraz szybką metodę wyznaczania psychofizycznych krzywych strojenia w diagnozowaniu martwych obszarów ślimaka ucha wewnętrznego.

Zainteresowania pozanaukowe: muzyka, strunowe instrumenty muzyczne; plany na przyszłość: napisanie książki dotyczących akustyki psychofizjologicznej oraz analizy sygnałów dla studentów akustyki na UAM.

■ Andrzej Prus-Czarnecki

Urodził się w roku 1964 w Krakowie. Uczył się w V Liceum im. Witkowskiego w klasie, w której matematyki i fizyki uczyli pracownicy Uniwersytetu Jagiellońskiego, dr Antoni Leon Dawidowicz i dr Adam Starnawski. W czasie studiów na UJ przez rok był w Niemczech na stypendium organizacji GFPS. Pracę doktorską, rozpoczętą pod kierunkiem prof. Marka Jeżabka, ukończył w Kanadzie, na Uniwersytecie Alberty, gdzie opiekował się nim prof. Abdul Naim Kamal. Po doktoracie pracował w Niemczech, w Moguncji i w Karlsruhe, a następnie w USA, w laboratorium Brookhaven. W roku 2000 powrócił do Alberty, gdzie jest teraz profesorem fizyki.



Zajmuje się teorią cząstek elementarnych, w szczególności precyzyjnym opisem własności cząstek w teoriach z symetrią cechowania. Miał szczęście współpracować z grupą wybitnych ludzi skupionych wokół Konstantina Chetyrkina i Johanna Kühna w Karlsruhe, gdzie poznał nowoczesne metody kwantowej teorii pola. Z Williamem Marciano i Kirylem Melnikovem, a także innymi współpracownikami, zastosował je do opisu wielu procesów w fizyce mionu, ciężkich kwarków oraz stanów związanych (prostych atomów). W przyszłości chciałby lepiej zrozumieć własności efektów kwantowych, tzw. poprawek radiacyjnych, zwłaszcza w wysokich rzędach rachunku zaburzeń. Chciałby także zbadać wpływ przyspieszenia cząstek na te efekty. W dalszej perspektywie marzy o zrozumieniu pochodzenia symetrii cechowania, a raczej znalezieniu opisu oddziaływań wolnego od niej.

Oprócz pracy naukowej prowadzi dodatkowe zajęcia z fizyki i matematyki z uczniami szkół średnich i pomaga im przygotować się do Olimpiad Fizycznych. Poza fizyką interesuje się historią, szczególnie nauki, a także językami. Obecnie jednak stara się spędzać jak najwięcej czasu z czworgiem dzieci, zainteresować ich sportami i poznawaniem świata.

■ Tytuły profesorskie

Tytuł naukowy profesora nauk fizycznych nadany przez Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej otrzymali w dniu 11 lutego 2009 r.: Grażyna Chełkowska (UŚ), Stanisław Dobieślak Głazek (UW), Andrij Kityk (PCz), Andrzej Kołodziejczyk (PW), Andrzej Jan Prus-Czarnecki (U. of Alberta, Kanada), Teresa Rząca-Urban (UW) oraz Jerzy Antoni Sannet (PKr); w dniu 13 marca 2009 r.: Danuta Magdalena Kielczewska (UW) i Grzegorz Jacek Wrochna (IPJ).

<http://isip.sejm.gov.pl>

■ Prezes ESF o wspólnym finansowaniu

W czasopiśmie *Physics World* ukazał się artykuł Iana Hallidaya, prezesa Europejskiej Fundacji Nauki (ESF), w którym wskazuje on na konieczność wspólnego finansowania europejskich projektów badawczych. Wprawdzie Unia Europejska w swoich programach ramowych łoży na wielkie międzynarodowe projekty, a także poprzez Europejską Radę Badań (ERC) wspiera indywidualnych naukowców, to jednak obecne finansowanie jest bardzo rozczłonkowane, co ogranicza konkurencję i nie jest drogą do osiągnięcia europejskiego sukcesu naukowego. Udział budżetu na naukę w poszczególnych państwach jest bardzo różny. Zmieniający się charakter nowoczesnej nauki w wielu dziedzinach, od medycyny do fizyki, wymaga dostępu do funduszy w bardzo różnych skalach. Politycy zwracają uwagę na zjawisko powielania. Agencje finansujące badania w poszczególnych krajach na ogół nie wiedzą o projektach podejmowanych w innych państwach, co prowadzi do dublowania wysiłków. Konieczny jest lepszy, międzynarodowy system recenzowania wniosków. Narodowe agencje powinny przyjąć na siebie większą odpowiedzialność. W wielu krajach system recenzji jest biurokratyczny, skomplikowany i nieudolny. Zmiana na lepsze wymaga współdziałania europejskich ministrów nauki. Trzeba też wziąć pod uwagę, że gros pieniędzy przeznaczonych na badania pozostaje w gestii agencji krajowych. Sukces w nauce nie jest tylko funkcją oddziaływania indywidualnych geniuszy, ale silnie zależy od krajowych agencji finansujących naukę i od systemu uniwersyteckiego.

Phys. World 21, nr 5 (2008)

B. W.

■ START

Fundacja na rzecz Nauki Polskiej, jak co roku, w swoim programie START przyznała stypendia młodym naukowcom, którzy nie przekroczyli trzydziestego roku życia. Napłynęły 872 zgłoszenia. Na podstawie konkursu przyznano 106 osobom stypendia roczne w wysokości 24 tys. zł. Wśród zwycięzców jest 10 fizyków, jedna biofizyczka i jeden astronom.

Oto laureaci: fizycy – Mikołaj Chojnacki (IFJ PAN), Maciej Dems (PŁ), Maria Goryl (UJ), Michał Heller (UJ), Ewa Kamińska (UŚ), Lech Wiktor Piotrowski (UW), Paweł Podemski (PW), Piotr Sułkowski (IPJ, Świerk), Mar-

cin Syperek (PW) oraz Maciej Szkulmowski (UMK); biofizyczka – Joanna Chwiej (AGH); astronom – Radosław Wojtak (CAMK).

Wręczenie dyplomów odbyło się 25 kwietnia 2009 r. na Zamku Królewskim w Warszawie.

www.fnp.org.pl

B. W.

■ Nagroda im. Henryka Niewodniczańskiego Instytutu Fizyki UJ

W roku 1978 w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego ustanowiono Nagrodę im. Henryka Niewodniczańskiego dla najlepszego absolwenta fizyki UJ. Nagroda jest przyznawana nieregularnie, co kilka lat, przez specjalnie powołaną Komisję złożoną z profesorów Instytutu Fizyki UJ. Ogłoszenie wyników i wręczenie Nagrody odbywa się w grudniu w rocznicę śmierci Niewodniczańskiego. Poprzednio laureatami byli kolejno: w 1978 – Lesław Frasiński, 1983 – Maciej Nowak, 1988 – Henryk Witala, 1993 – Wojciech Florkowski, 1997 – Jacek Kołodziej, 2000 – Paweł Moskal, 2003 – Paweł Starowicz i w 2006 – Roman Skibiński.

W roku 2008 konkurs na Nagrodę odbył się po raz dziewiąty. Zgłosiło się do niego osiem osób. Ze względu na niezwykle wysoki poziom naukowy wszystkich kandydatów, wyłonienie najlepszego z najlepszych nie było prostym zadaniem. Laureatem został dr Bartłomiej Dybiec – adiunkt w zakładzie Fizyki Statystycznej UJ.



Bartłomiej Dybiec

Dr Bartłomiej Dybiec przedstawił do oceny 27 publikacji. W 21 przypadkach jest ich pierwszym, a w pozostałych sześciu – drugim autorem. Prace dotyczyły przede wszystkim wpływu fluktuacji i szumów na ewolucję i stan uporządkowania nieliniowych układów dynamicznych. Komisja podkreśliła dużą samodzielność prac wykonanych przez kandydata. Za godne szczególnej uwagi uznano wykorzystanie rozwiniętych przez niego metod analizy, w ba-

daniach interdyscyplinarnych obejmujących poza fizyką układy biologiczne, ekonomię i socjologię. Doskonałym przykładem tego są prace na temat modeli epidemiologicznych oraz na temat synchronizacji i aktywacji rezonansowej w układach biologicznych.

Bartłomiej Dybiec studiował fizykę na Uniwersytecie Jagiellońskim w latach 1997–2001. Pracuje w zespole badawczym prof. Ewy Gudowskiej-Nowak, która promowała zarówno jego pracę magisterską („Wpływ kształtu potencjału na aktywację rezonansową”) jak i doktorską. Studia doktoranckie ukończył w roku 2005 przedstawiając dysertację „Resonant Effects Driven by Stable Noises”. Jego osiągnięcia naukowe zostały nagrodzone przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej, której stypendystą był w latach 2005 i 2006.

Dr Dybiec przebywał na stażu naukowym w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Humboldta w Berlinie, gdzie w ramach programu Marii Curie TOK COCOS zajmował się badaniem układów zaburzanych szumami stabilnymi. Natomiast w Instytucie Nielsa Bohra w Kopenhadze, w ramach stypendium wyjazdowego FNP, badał modele epidemiologiczne i stochastyczne strategie poszukiwawcze. Badane modele stanowiły połączenie układów zaburzanych szumami Léwiego z układami epidemiologicznymi. Każdy pobyt Bartłomieja Dybca w zagranicznym ośrodku kończył się publikacją w recenzowanym czasopiśmie fizycznym o zasięgu międzynarodowym, a także prowadził do podejmowania kolejnych projektów badawczych. Ostatnie badania laureata koncentrują się na badaniu zjawisk transportu w układach nierównowagowych.

Laureat prowadzi szeroką współpracę zagraniczną z Monash University, Risø, Cambridge University, University of Stirling, Instytutem Fizyki Uniwersytetu Humboldta, Instytutem Nielsa Bohra, Instytutem Fizyki w Augsburgu. Jest współorganizatorem „Marian Smoluchowski Symposium on Statistical Physics”. Uczestniczy w pracach popularnonaukowych swojego zakładu: wygłasza referaty konferencyjne i seminaryjne. W wolnych chwilach chodzi po górach i jeździ na nartach.

Małgorzata Nowina Konopka

■ Latsis Prize dla astrofizyka

Europejska Fundacja Nauki (ESF) przyznała w roku 2008 Nagrodę Latsisa (European Latsis Prize) Simonowi White, dyrektorowi Instytutu Maxa Plancka Astrofizyki w Garching, za jego wybitny wkład w dziedzinę astrofizyki.

White jest pionierem symulacji ewolucji rozkładu materii kosmicznej. Wykazał, że dominacja zimnej ciemnej materii (Cold Dark Matter – CDM) może wyjaśnić wielkoskalową strukturę obserwowaną w rozkładzie galaktyk. Według niego ciemna materia nie jest utworzona z neutronów, lecz z nowego rodzaju cząstek elementarnych, które być może będą odkryte na Ziemi.

Obecnie zajmuje się symulacją tworzenia galaktyk i wielkich struktur, starając się wyjaśnić naturę ciemnej materii.

White studiował matematykę w Cambridge i astronomię na Uniwersytecie w Toronto. Jest członkiem Royal Society i innych towarzystw naukowych, jak amerykańskiej Academy of Sciences czy Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina.

Nagroda Lastisa jest finansowana przez Fundację Lastisa w Genewie i przyznawana przez ESF osobom lub grupom badawczym, które dokonały wielkiego wkładu w poszczególne dziedziny badań europejskich. W roku 2008 wysokość Nagrody wyniosła 65 tys. euro.

www.esf.org

B. W.

■ Nagroda IFJ PAN dla Mikołaja Chojnackiego

Nagroda Naukowa im. Henryka Niewodniczańskiego została ustanowiona przez Radę Naukową IFJ w roku 1996. Przyznawana jest co roku młodym pracownikom Instytutu lub studentom Międzynarodowego Studium Doktoranckiego IFJ PAN, za wybitne i twórcze prace w zakresie działalności Instytutu opublikowane w ostatnich trzech latach. Rozstrzygnięcie konkursu na Nagrodę odbywa się w jesieni każdego roku, a ogłoszenie werdyktu jury i wręczenie dyplomu w dniu święta Instytutu, obchodzonego w grudniu w okresie rocznicy śmierci Patrona Nagrody. Podczas uroczystości Laureat wygłasza referat na temat uzyskanych wyników.

Mikołaj Chojnacki otrzymał Nagrodę za cykl siedmiu publikacji i pięciu komunikatów konferencyjnych poświęconych zastosowaniu relatywistycznej hydrodynamiki do opisu skrajnie relatywistycznych zderzeń ciężkich jonów. W pracach została wyjaśniona zagadka promieni charakteryzujących funkcje korelacji pionów zmierzone w eksperymentach ciężkojonowych przy akceleratorze RHIC (Relativistic Heavy-Ion Collider w Brookhaven National Laboratory), powszechnie określana jako „RHIC HBT puzzle”. W pracach przedstawionych do Nagrody udało się opisać jednocześnie i w sposób konsystentny najważniejsze dane opisujące tzw. miękką fizykę: widma cząstek, przepływy kolektywne oraz rozmiary źródła, czyli właśnie wspomniane promienie funkcji korelacji.

Mikołaj Chojnacki jest najmłodszym spośród kilku autorów nagrodzonych prac. Pozostali – z wyjątkiem dr Adama Kisiela – są profesorami z dużym dorobkiem i autorytetem naukowym. Jednak to wkład Mikołaja Chojnackiego zadecydował o ostatecznym sukcesie. Laureat opracował nowy oryginalny kod numeryczny rozwiązujący równania hydrodynamiki relatywistycznej i połączył go z programem Monte Carlo opisującym emisję hadronów. Tylko dzięki jego wybitnym zdolnościom i pracowitości było możliwe połączenie wielu platform rachunkowych w jedną skutecznie działającą całość. Stworzył i przetestował realistyczne równanie stanu dla gazu hadronowego i plazmy kwarkowo-gluonowej. W publikacjach z prof. Andrzejem Białasem, udział Mikołaja Chojnackiego polegał na opracowaniu specjalnej wersji jego programów, służącej do analizy równań opisujących ekspansję materii stermalizowanej tylko w kierunku poprzecznym. W ten sposób rozwi-

nał model wczesnej ewolucji hydrodynamicznej w zderzeniach jądrowych wielkich energii.

Mikołaj Chojnacki ma 28 lat i jest doktorantem Międzynarodowego Studium Doktoranckiego IFJ PAN. Promotorem przygotowywanej przez niego rozprawy doktorskiej jest prof. Wojciech Florkowski. Mimo młodego wieku mgr Chojnacki ma już znaczący dorobek naukowy. Prezentował swoje wyniki na międzynarodowych konferencjach i sympozjach jak Quark Matter 2008 czy Strangeness in Quark Matter 2007, gdzie otrzymał drugą nagrodę za najlepszy referat wygłoszony przez młodego naukowca. Jego wyniki wzbudziły zainteresowanie i uznanie fizyków światowych zajmujących się obliczeniami hydrodynamicznymi. Od początku studiów doktoranckich wygłosił już aż 16 referatów dla różnych gremiów fizyków. W najbliższych miesiącach odbędzie się obrona jego rozprawy doktorskiej.



Mikołaj Chojnacki

Laureat najlepiej odpoczywa pracując, jak jego rodzice, przy renowacji zabytków, np. przy odnawianiu zniszczonych ołtarzy. Jest to wspaniała odskocznia od komputera. Lubi cały dzień przesiadywać na rusztowaniach i odnawiać zniszczone elementy z drewna bądź z kamienia, np. ołtarzy, portali czy rzeźb. Wymaga to sporej cierpliwości i dokładności, zwłaszcza jeżeli na końcu na powierzchni ma być wykonane złocenie. Te umiejętności przydają mu się również, gdy projektuje i wykonuje z drewna różnego rodzaju pudełka, skrzynki itp., a niekiedy przy czyszczeniu swojego motoroweru „Komar II” z 1969 r. i doprowadzeniu go do stanu używalności. Niestety powyższym pracom może się poświęcić jedynie, gdy jest w rodzinnych Kielcach.

W Krakowie rozwinął działalność jako członek Stowarzyszenia Młodych Wolnomysłlicieli. Udziela się także w projektach sygnowanych przez Polskie Towarzystwo Racjonalistyczne jak np. Dyskusyjne Kino Racjonalistów. Niezależnie od pory roku uwielbia chodzenie po górach: nie-

ważne czy są to rodzime Góry Świętokrzyskie, Bieszczady czy Tatry.

Małgorzata Nowina Konopka

■ Grafan

Grafen, czyli pojedyncza warstwa atomowa grafitu, znana i badana od kilku lat, ma dzięki swojej niezwyklej strukturze pasmowej różne interesujące właściwości. Informacje o tym były już w *Postępiech* (58, 250 (2007), 59, 232 (2008)). Niedawno na University of Manchester podjęto pomyslną próbę wytworzenia związku grafenu z atomowym wodorem, czyli grafanu. Próbkę grafenu były poddawane działaniu zimnej plazmy wodoru. Badania transmisijną mikroskopią elektronową wykazały, że w ten sposób uzyskuje się krystaliczny grafan o strukturze heksagonalnej.

Reakcja z wodorem jest odwracalna i z grafanu można przez podgrzewanie powrócić do grafenu. W perspektywie stwarza to możliwość magazynowania wodoru, np. do napędu silników samochodowych.

Science 323, nr 5914 (2009)

B. W.

■ Chińskie źródło promieniowania synchrotronowego

Kończy się budowa chińskiego źródła promieniowania synchrotronowego SSRF (Shanghai Synchrotron Radiation Facility). Jest to źródło trzeciej generacji. Akcelerator liniowy przyspiesza do energii 150 MeV elektrony, które są wprowadzane do pierścienia i dalej przyspieszane do 3,5 GeV, a następnie trafiają do pierścienia magazynującego o średnicy 432 m, z którego pobiera się 60 wiązek promieniowania rentgenowskiego o dużym natężeniu i długości fali od 0,01 nm do 10 nm.

Promieniowania o wyższej energii dostarczają jedynie źródła w Hyogo (Japonia) – 8 GeV, Argonne (USA) – 7 GeV i europejskie w Grenoble – 6 GeV. W projektowaniu i budowie chińskiego źródła korzystano z doświadczeń innych ośrodków, m.in. brytyjskiego. SSRF stanie się zapewne ważnym krokiem stworzenia azjatycko-oceanicznego centrum badań promieniowania synchrotronowego.

Phys. World 21, nr 5 (2008)

B. W.

■ Gdy recesja – rób doktorat!

Uczelnie amerykańskie odnotowały duży napływ zgłoszeń na studia doktoranckie w dziedzinie fizyki i nauk technicznych. Duży, tzn. o kilkanaście procent większy niż w poprzednich latach. Podobny wzrost zgłoszeń zauważono przy poprzedniej recesji w początku tego stulecia. Skąd się bierze ta rosnąca chęć robienia doktoratu, wtedy gdy rozpoczyna się recesja? Można przypuszczać, że absolwenci uczelni wolą kontynuować studia niż już teraz podejmować ryzyko znalezienia pracy.

Władze uniwersyteckie są zadowolone, gdyż przy większej liczbie zgłoszeń rośnie możliwość wybrania lepszych kandydatów do tych studiów. Z drugiej jednak strony jest obawa, czy recesja nie utrudni doktorantom uzyskiwania pożyczek na studia.

Nature 457, nr 7230 (2009)

B. W.

NOWE KSIĄŻKI

- Zbigniew Jacyna-Onyszkiewicz, *Kosmogeneza kwantowa*, Wyd. Naukowe UAM, Poznań 2008, s. 138,
- Bernard Ziętek, *Lasery*, Wyd. Naukowe UMK, Toruń 2008, s. 752.
- Jan Godlewski, *Wstęp do elektroniki molekularnej*, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008, s. 188.
- Andrzej Hałas, Piotr Szewmin, *Podstawy techniki próżni*, Wyd. Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2008, s. 184.
- Michał Heller, *Kosmologia Lemaître'a*, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2008, s. 136.
- Zbigniew Kamiński, Wincenty Kamiński, *Fizyka dla kandydatów na wyższe uczelnie techniczne*, wyd. XVII zmienione, tom I i II, s. 911 + płyta CD, WNT, Warszawa 2009.

POSTĘPY FIZYKI W INTERNECIE

<http://postepy.fuw.edu.pl>

- ARCHIWUM
spisy treści wszystkich zeszytów
- ARTYKUŁY DO POBRANIA
m.in. przekłady wykładów noblowskich (od roku 2001)
oraz wykłady z ostatnich Zjazdów Fizyków Polskich
- MATERIAŁY DODATKOWE
uzupełnienia niektórych artykułów

WKRÓTCE W POSTĘPACH

- *Marcin Kostur i Jerzy Łuczka o motorach molekularnych (biologicznych)*
- *Pierre Ranson, Robert Ouillon i Jean-Paul Pinan-Lucarré – W stulecie Nagrody Nobla z fizyki za rok 1908 przyznanej Gabrielowi Lippmannowi za fotografię barwną*
- *Andrzej Kosiński o modelach kosmologicznych i niektórych związanych z nimi nieporozumieniach*

PRENUMERATA

Postępy Fizyki można zaprenumerować w jeden z następujących sposobów.

► PRZEZ ODDZIAŁY PTF (tylko prenumerata krajowa dla członków PTF i studentów):

Cena rocznej prenumeraty krajowej w 2009 r. wynosi 48 zł. Dostawa *Postępów* odbywa się za pośrednictwem Oddziałów.

► PRZEZ ZARZĄD GŁÓWNY PTF (tylko prenumerata krajowa):

Wpłaty należy dokonać na konto Zarządu Głównego PTF: 19 1020 1097 0000 7802 0001 3128 (PKO BP IX O/Warszawa) lub w Biurze Zarządu Głównego PTF.

Cena rocznej prenumeraty krajowej w 2009 r. wynosi 60 zł. Dostawa *Postępów Fizyki* następuje drogą pocztową pod wskazany adres.

► PRZEZ PRZEDSIĘBIORSTWA KOLPORTAŻU PRASY:

RUCH (<http://www.prenumerata.ruch.com.pl>)

KOLPORTER (<http://sa.kolporter.com.pl>)

GARMOND PRESS (<http://www.garmond.com.pl>)

Cena rocznej prenumeraty krajowej w 2009 r. wynosi 72 zł.

Prenumerata ze zleceniem dostawy za granicę – patrz <http://www.ruch.pol.pl>.

Dostępne są również zeszyty archiwalne – prosimy o kontakt z redakcją.

INFORMACJE DLA AUTORÓW

Artykuły powinny mieć charakter przeglądowy i być dostępne dla ogółu fizyków. Prace należy nadsyłać pod adresem redakcji. O przyjęciu pracy do druku decyduje komitet redakcyjny. Prac niezamówionych i niezakwalifikowanych do druku redakcja nie zwraca. Bardziej szczegółowe informacje na temat układu i sposobu przygotowania pracy znajdują się na stronie internetowej *Postępów Fizyki*.

REKLAMA W POSTĘPACH FIZYKI

Zapraszamy – szczególnie przedstawicieli producentów aparatury oraz sprzętu i oprogramowania komputerowego, wydawców podręczników i książek naukowych oraz popularnonaukowych – do zamieszczania ogłoszeń reklamowych w *Postęпах Fizyki*. Nasze czasopismo dociera do większości polskich fizyków, z których wielu decyduje o bieżących zakupach uczelni, instytutów i szkół. Zainteresowanych prosimy o kontakt z redakcją pod adresem: postepy@fuw.edu.pl.

POSTĘPY FIZYKI (ADVANCES IN PHYSICS)

Founded in 1949, published bimonthly in Polish with titles in English by the Polish Physical Society with a support of the Ministry of Science and Higher Education and the Physics Faculty of the Warsaw University.

INFORMATION FOR SUBSCRIBERS

A subscription order can be sent through the local press distributor or directly to „RUCH” S.A. Oddział Krajowej Dystrybucji Prasy, ul. Jana Kazimierza 31/33, skrytka pocztowa 12, 00-958 Warszawa, Poland (for details see <http://www.ruch.pol.pl>).

NARODOWE LABORATORIUM TECHNOLOGII KWANTOWYCH

25 marca 2009 r. Uniwersytet Warszawski reprezentujący konsorcjum, w skład którego wchodzi także: Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie, Politechnika Wrocławska, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu oraz Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, podpisał z Ministerstwem Nauki i Szkolnictwa Wyższego umowę o dofinansowanie Projektu „Narodowe Laboratorium Technologii Kwantowych”, realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, lata 2007–2013, Priorytet 2. Infrastruktura sfery B + R, Działanie 2.2 „Wsparcie tworzenia wspólnej infrastruktury badawczej jednostek naukowych”.

Celem projektu jest utworzenie Narodowego Laboratorium Technologii Kwantowych (NLTK) i wyposażenie tworzących go jednostek naukowych w sprzęt niezbędny do prowadzenia wspólnych badań naukowych oraz badawczo-rozwojowych na światowym poziomie.

NLTK tworzą wiodące w skali kraju jednostki naukowe prowadzące badania w zakresie technologii kwantowych, w tym informatyki kwantowej, inżynierii kwantowej oraz dziedzin pokrewnych. W ramach realizowanego projektu, w pięciu jednostkach naukowych utworzone zostaną 4 pracownice naukowe, a kolejnych 15 zostanie zmodernizowanych poprzez zakup około 370 sztuk aparatury naukowej. Zakłada się, iż działania inwestycyjne przewidziane w projekcie zostaną zakończone do 31 marca 2011 roku.

NLTK jest organizacją otwartą. Jego powstanie umożliwi szeroki udział polskich naukowców, także spoza jednostek tworzących konsorcjum, w badaniach doświadczalnych nad technologiami kwantowymi, prowadzonych z użyciem najnowszej aparatury. Ponadto NLTK będzie prowadziło szkolenia kadry młodych naukowców w zakresie eksploatacji i zarządzania dużą infrastrukturą badawczą dedykowaną dziedzinie nauki, która już wkrótce może zrewolucjonizować podstawy technologiczne przetwarzania i przesyłania informacji, metrologii i diagnostyki.

Koordynator Projektu
Narodowego Laboratorium Technologii Kwantowych
Profesor Czesław Radzewicz

Szkolenia w zakresie inżynierii i technologii kwantowej

dla magistrantów, doktorantów i młodych badaczy
prowadzone przez profesorów z Centrum Inżynierii Kwantowej Atomów i Światła

KURS PODSTAWOWY 22 czerwca – 17 lipca 2009 r.

- Mechanika klasyczna – Jan Mostowski (IF PAN)
- Mechanika kwantowa – Kazimierz Rzażewski (CFT PAN)
- Elektrodynamika – Mariusz Gajda (IF PAN)
i Marek Trippenbach (UW)
- Laboratorium optyczne – Piotr Wasylczyk (UW),
Yurij Stepanenko (IChF PAN) i Paweł Wnuk (UW)

KURS ZAAWANSOWANY 31 sierpnia – 25 września 2009 r.

- Optyka kwantowa – Jan Mostowski i Mariusz Gajda (IF PAN)
- Teoria zimnych atomów – Kazimierz Rzażewski (CFT PAN)
i Marek Trippenbach (UW)
- Informatyka kwantowa – Konrad Banaszek (UMK)
- Doświadczalne techniki chłodzenia i pułapkowania atomów
– Wojciech Gawlik (UJ)

Wykłady prowadzone będą po angielsku. Każdego dnia przewidziane są 2 dwugodzinne wykłady (z dwóch cykli), a po południu zajęcia fakultatywne z wybranych zagadnień omawianych na wykładach. Planowane też są jednodniowe wyjazdy do laboratoriów w Toruniu (FAMO) i Krakowie (zimne atomy).

Uczestnicy obu kursów będą mieli opłacone noclegi w Warszawie i otrzymają zaświadczenie o ukończeniu kursu. Na koniec każdego wykładu dla chętnych zorganizowany będzie egzamin konkursowy i najlepsi otrzymają nagrody. Dalsze informacje i zapisy na stronie internetowej www.fuw.edu.pl/~cikas.



INNOWACYJNA GOSPODARKA
INICJATOREM STRATEGII SPÓŁNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka



XL ZJAZD FIZYKÓW POLSKICH

Komitet Honorowy:

Stanisław Kardynał Dziwisz
Arcybiskup Metropolita Krakowski
Prof. dr hab. Andrzej Białaś
Prezes Polskiej Akademii Umiejętności
Prof. dr hab. Marek Jeżabek
Dyrektor IFJ PAN w Krakowie
Prof. dr hab. Michał Kleiber
Prezes Polskiej Akademii Nauk
Prof. dr hab. Maciej Kolwas
President Elect of the European
Physical Society
Prof. dr hab. Karol Musioł
JM Rektor Uniwersytetu Jagiellońskiego

Współorganizatorzy

Oddział Krakowski PTF, Akademia Górniczo-Hutnicza, Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Politechnika Krakowska,
Uniwersytet Jagielloński, Uniwersytet Pedagogiczny

Kontakt: XL ZJAZD FIZYKÓW POLSKICH, Oddział Krakowski PTF, Instytut Fizyki UJ, ul. Reymonta 4, PL-30059 Kraków;

telefon: +48 12 663 56 84; fax: +48 12 633 84 94;

Małgorzata Nowina-Konopka (IFJ) — tel. 012 662 82 63; e-mail: malgorzata.nowina-konopka@ifj.edu.pl

Rejestracja i informacja: [www: http://www.ptf.agh.edu.pl/XL-zjazd/](http://www.ptf.agh.edu.pl/XL-zjazd/); Anna Tylek — tel. 012 663 38 58 lub 012 663 38 29;
Joanna Hoszko — tel. 012 663 38 58 lub 012 663 38 29

Komitet Programowy:

Marek Demiański UW
Robert Gałązka IFJ PAN — przewodniczący
Wojciech Gawlik UJ
Ryszard Horodecki Uniw. Gdański
Marek Kuś CFT PAN
Roman Mienias UAM Poznań
Stefan Pokorski UW
Maria Różańska IFJ Kraków
Józef Sznajd INTBS PAN Wrocław
Józef Szudy UMK Toruń
Andrzej Twardowski UW
Karol Wysokiński UMCS Lublin