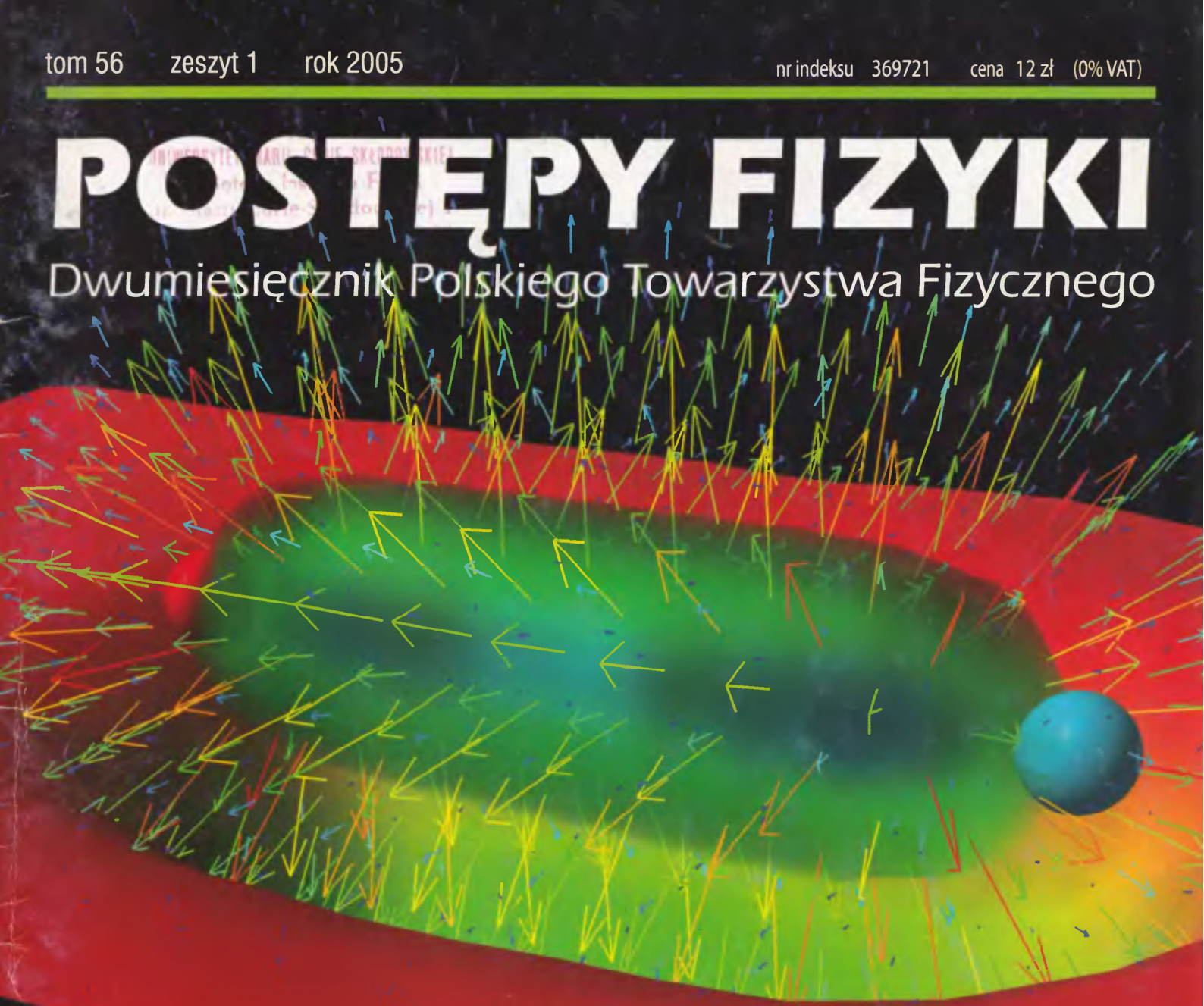
tom 56 zeszyt 1 rok 2005 nr indeksu 369721 cena 12 zł (0% VAT)

POSTĘPY FIZYKI

Dwumiesięcznik Polskiego Towarzystwa Fizycznego



Asymptotyczna swoboda

Kropki kwantowe

Egzotyczne hadrony

Światowy Rok FIZYKI 2005

XXXVIII ZJAZD FIZYKÓW POLSKICH

w Światowym Roku Fizyki

Warszawa, 11–16 września 2005 r.

Szanowni Państwo,

W imieniu Komitetu Organizacyjnego serdecznie zapraszam do uczestnictwa w XXXVIII Zjeździe Fizyków Polskich, który odbędzie się w tym roku w Warszawie. Jak wiadomo, rok 2005 został ogłoszony Światowym Rokiem Fizyki, dla upamiętnienia epokowych prac Alberta Einsteina sprzed 100 lat dotyczących teorii względności, zjawiska fotoelektrycznego oraz ruchów Browna. Liczymy, że tegoroczny Zjazd będzie kulminacją obchodów Światowego Roku Fizyki w Polsce. Oprócz odniesień historycznych tematyka Zjazdu będzie nawiązywać do najnowszych osiągnięć fizyki światowej i polskiej. Spodziewamy się udziału gości zagranicznych, w tym laureatów Nagrody Nobla. Ozdobą programu kulturalnego Zjazdu będzie uroczysta prapremiera w Filharmonii Narodowej utworu Wojciecha Kilara „Sinfonia de motu" (Symfonia o ruchu). W liście skierowanym do organizatorów Zjazdu artysta napisał, że swoją symfonię traktuje jako „swoisty prezent i hołd jednocześnie dla polskiej fizyki, polskich fizyków i dla fizyki w ogóle".

Zjazd odbywać się będzie w Gmachu Głównym Politechniki Warszawskiej oraz w pobliskich gmachach Wydziału Fizyki PW i Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Podczas Zjazdu odbędą się sesje plenarne, specjalistyczne i plakatowe, a także wystawy oraz imprezy towarzyszące. Sporo czasu poświęcimy dydaktyce fizyki. Zaplanowaliśmy także zwiedzanie laboratoriów naukowych warszawskich instytutów fizyki. Wykłady przeglądowe opublikowane będą po zakończeniu Zjazdu w Postępach Fizyki. Natomiast prezentacje z sesji specjalistycznych planujemy opublikować w Acta Physica Polonica, co jest nowością w porównaniu z poprzednimi zjazdami.

Przyjezdni uczestnicy Zjazdu zostaną zakwaterowani w domach studenckich położonych w pobliżu miejsca obrad. Będzie też możliwość rezerwacji miejsc w hotelach warszawskich, a wyżywienie zapewni pobliska stołówka PW.

Dalsze informacje dotyczące Zjazdu ukazywać się będą sukcesywnie na zjazdowej stronie internetowej (www.if.pw.edu.pl/zjazd2005), do której odwiedzenia gorąco Państwa zapraszam.

Łączę serdeczne pozdrowienia

Przewodniczący Komitetu Organizacyjnego
Prof. dr hab. Jerzy Garbarczyk

CZAS I MIEJSCE ZJAZDU	Warszawa, 11–16 września 2005 r.: Politechnika Warszawska – Gmach Główny (Pl. Politechniki 1) oraz Wydział Fizyki (ul. Koszykowa 75), Uniwersytet Warszawski – Wydział Fizyki (ul. Hoża 69)
TEMATYKA ZJAZDU	100-lecie epokowych prac Einsteina, fizyka jądrowa i cząstek elementarnych, fizyka atomowa, molekularna i optyka, fizyka fazy skondensowanej, geofizyka, biofizyka i fizyka środowiska, nowe obszary fizyki, nauczanie fizyki, fizyka dla poetów i w życiu codziennym
ORGANIZATORZY	Oddział Warszawski PTF, Politechnika Warszawska, Uniwersytet Warszawski, Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
ADRES ORGANIZATORÓW	Prof. dr hab. Jerzy Garbarczyk Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa tel.: (22) 660-7267, 629-6124, fax: (22) 628-2171, e-mail: zjazd2005@if.pw.edu.pl
REJESTRACJA	rejestracja on-line: http://www.if.pw.edu.pl/zjazd2005
KOSZT UCZESTNICTWA	Pełny koszt udziału w Zjeździe wynosi 850 zł, członkowie PTF z opłaconymi składkami – 750 zł, nauczyciele, doktoranci i studenci – 550 zł (członkowie PTF – 500 zł), osoby towarzyszące – 500 zł. Po 1 czerwca 2005 r. wszystkie opłaty wyższe o 150 zł.
KONTO BANKOWE	Bank PEKAO S.A. IV Oddział Warszawa, rachunek nr 81 1240 1053 1111 0000 0500 5664 (koniecznie z dopiskiem „Zjazd – 2005")
WAŻNE DATY	31 maja 2005 r. – ostateczny termin przysyłania streszczeń referatów zaproszonych 31 sierpnia 2005 r. – ostateczny termin rejestracji oraz opłacenia kosztów udziału w Zjeździe (do 1 czerwca 2005 r. niższe opłaty)
DALSZE INFORMACJE	można znaleźć na stronie: www.if.pw.edu.pl/zjazd2005

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 Gronkowski (redaktor naczelny), Mirosław Łukaszewski, Magdalena Staszel, Marek Więckowski, Barbara Wojtowicz

Adres Redakcji:
ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa, e-mail: postepy@fuw.edu.pl, Internet: www.fuw.edu.pl/~postepy

KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF
Maciej Piętka (Białystok), Marian Głowacki (Częstochowa), Ryszard Drozdowski (Gdańsk), Roman Bukowski (Gliwice), Krystian Roleder (Katowice), Małgorzata Wysocka-Kunisz (Kielce), Małgorzata Nowina Konopka (Kraków), Elżbieta Jartych (Lublin), Marcin Ostrowski (Łódź), Ewa Pawelec (Opole), Lidia Skibińska (Poznań), Małgorzata Klisowska (Rzeszów), Małgorzata Kuzio (Słupsk), Janusz Typek (Szczecin), Winicjusz Drozdowski (Toruń), Aleksandra Miłosz (Warszawa), Bernard Jancewicz (Wrocław), Justyna Jankiewicz (Zielona Góra)

POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

ZARZĄD GŁÓWNY
Maciej Kolwas (prezes), Katarzyna Chałasińska-Macukow i Reinhard Kulessa (wiceprezesi), Helena Białkowska (sekretarz generalny), Marek Kowalski (skarbnik), Bernard Jancewicz, Franciszek Krok, Maria Mucha, Andrzej Ptok, Barbara Sagnowska i Mirosław Trociuk (członkowie)

Adres Zarządu:
ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa, tel./fax: (22) 6212668, e-mail: ptf@fuw.edu.pl, Internet: ptf.fuw.edu.pl

PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW PTF
Andrzej Maziewski (Białystok), Stefan Kruszewski (Bydgoszcz), Danuta Płusa (Częstochowa), Marek Grinberg (Gdańsk), Andrzej Klimasek (Gliwice), Karol Kołodziej (Katowice), Janusz Braziewicz (Kielce), Reinhard Kulessa (Kraków), Jerzy Żuk (Lublin), Bogusław Broda (Łódź), Ryszard Pietrzak (Opole), Andrzej Dobek (Poznań), Aleksander B. Szymański (Rzeszów), Grzegorz Karwasz (Słupsk), Adam Bechler (Szczecin), Andrzej Bielski (Toruń), Jerzy Garbarczyk (Warszawa), Adam Kiejna (Wrocław), Andrzej Więckowski (Zielona Góra)

REDAKTORZY NACZELNI INNYCH CZASOPISM WYDAWANYCH POD EGIDĄ PTF
Jerzy Prochorow – *Acta Physica Polonica A*, Andrzej Staruszkiewicz – *Acta Physica Polonica B*, Andrzej Jamiołkowski – *Reports on Mathematical Physics*, Marek Kordos – *Delta*, Zofia Gołąb-Meyer – *Foton*, Adam Smólski – *Fizyka w Szkole*

Czasopismo ukazuje się od 1949 r.
Wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne
Zeszyt dofinansowany przez Komitet Badań Naukowych
Wydano pod patronatem Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
Skład komputerowy w redakcji
Opracowanie okładki: Amm Studio, tel.: (22) 6689990, e-mail: amm@amm.com.pl, Internet: www.amm.com.pl
Druk i oprawa: „UNI-DRUK", Warszawa, ul. Buńczuk 7b

ISSN 0032-5430

SPIS TREŚCI

Inauguracja Światowego Roku Fizyki 2

NAGRODA NOBLA 2004: Asymptotyczna swoboda – klucz do oddziaływań silnych i Teorii Standardowej 4

D. Frąckowiak, E. Staśkowiak, J. Łukasiewicz – Kropki kwantowe w biotechnologii i medycynie 12

A.R. Dzierba, C.A. Meyer, E.S. Swanson – Na tropie egzotycznych hadronów 20

Granty KBN z fizyki: XXVI i XXVII konkurs 32

NOWI PROFESOROWIE 36

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI 38

RECENZJE 41

KRONIKA 44

Drodzy Czytelnicy,

Tanecznym krokiem wstąpiliśmy w Światowy Rok Fizyki. W zeszycie znajdą Państwo relacje z imprez inauguracyjnych – w Paryżu i na Politechnice Warszawskiej.

Szczególnie polecamy obszerny artykuł Piotra Chankowskiego. Dowiadujemy się z niego, na czym polega doniosłość prac nagrodzonych w roku 2004 Nagrodą Nobla. Nie jest to jedyny tekst o fizyce cząstek – drukujemy też przekład niezwykle interesującego artykułu o poszukiwaniu egzotycznych hadronów.

Zachęcamy też Państwa do lektury ciekawego i bardzo aktualnego artykułu o zastosowaniach kropek kwantowych – całkiem materialnych – w biotechnologii i medycynie, autorstwa Danuty Frąckowiak i jej młodych kolegów.

Magda Staszel

Na okładce:
„Wypychanie próżni QCD" z obszaru między kwarkiem i antykwarkiem. Powierzchnia ilustruje spadek próżniowej gęstości działania w płaszczyźnie przechodzącej przez środki obu składników pary kwark–antykwark (symbolizowanych przez kulki: czerwoną i niebieską), a pole wektorowe – jego gradienty. Wydłużony obłok łączący parę kwarków pokazuje obszar przestrzeni, w którym działanie zmniejszyło się najbardziej, i odpowiada słynnej chromodynamicznej wiązce pola. Gdy odległość między kwarkami rośnie, długość wiązki się zwiększa, lecz jej średnica pozostaje prawie stała (patrz animacja: www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber/VisualQCD/ImprovedOperators). Ponieważ zmniejszenie próżniowych fluktuacji pola wymaga dodatkowej energii, w obszarze między kwarkami powstaje liniowy potencjał, który je więzi. [D.B. Leinweber, S. Bilson-Thompson, B. Lasscock, A.G. Williams, J. Zanotti, Centre for Subatomic Structure of Matter, University of Adelaide, Australia. © D.B. Leinweber. Used with permission]

Inauguracja Światowego Roku Fizyki...

...w Paryżu...

W dniach 13–15 stycznia 2005 r. odbyła się w Paryżu konferencja „Physics for Tomorrow (Launch Conference of the International Year of Physics)" rozpoczynająca obchody Światowego Roku Fizyki 2005. Wzięło w niej udział ponad 500 osób. Zasadniczym celem konferencji było wzbudzenie zainteresowania fizyką wśród szerokich grup społeczeństwa i polityków, którzy podejmują decyzje o finansowaniu nauki.

Organizatorzy zadbali o to, by do Paryża przybyły delegacje z całego świata. Na konferencjach fizycznych rzadko spotyka się uczestników z tak różnorodnych miejsc – z ponad 80 krajów; na ogół dominują fizycy z krajów wysoko rozwiniętych. Wśród uczestników konferencji można było wyraźnie rozróżnić dwie grupy. Do pierwszej należały wybitne osoby ze świata nauki, w tym nobliści, oraz przewodniczący towarzystw fizycznych itp. Drugą grupę stanowili ludzie młodzi, dopiero rozpoczynający karierę w fizyce, oraz ich opiekunowie. Wielu z tych młodych uczestników to laureaci Międzynarodowych Olimpiad Fizycznych oraz innych międzynarodowych konkursów fizycznych. Referaty wygłaszały naturalnie tylko osoby z pierwszej grupy.

W konferencji uczestniczyło 18 osób z Polski. Byli to laureaci Olimpiad Fizycznych z ostatnich lat oraz zwycięzcy Turnieju Młodych Fizyków. Ich opiekunami byli: Włodzimierz Natorf, nauczyciel fizyki z Liceum im. Klementyny Hoffmanowej w Warszawie, oraz niżej podpisany, przewodniczący Komitetu Głównego Olimpiady Fizycznej. Koszty pobytu polskiej delegacji pokryli organizatorzy, przejazd do Paryża – Zarząd Główny Polskiego Towarzystwa Fizycznego. W konferencji wziął też udział prof. Maciej Kolwas, prezes PTF.

Grupa polskich uczestników konferencji (fot. Jan Mostowski)

Grupa międzynarodowa (pierwszy z prawej autor notatki)

Poza rozbudowaną częścią oficjalną konferencja składała się z 11 jednogodzinnych referatów oraz 2 dwugodzinnych dyskusji okrągłego stołu. Wszystkie dotyczyły współczesnej fizyki, jej wpływu na inne aspekty ludzkiej działalności i zagadnień nauczania fizyki. Moja ocena referatów jest zróżnicowana. Z jednej strony wysłuchałem kilku doskonałych wykładów: Claude'a Cohen-Tannoudjiego (Nobel 1997) o niektórych zjawiskach kwantowych i ich współczesnych zastosowaniach w zegarach atomowych i laserowych żyroskopach, Żoresa Ałfiorowa (Nobel 2000) o technologiach półprzewodników i urządzeń półprzewodnikowych oraz Denisa Le Bihana o biologicznych zastosowaniach fizyki, przede wszystkim w badaniach mózgu. Z drugiej jednak strony kilka wykładów było, moim zdaniem, zupełnie nieudanych – nie zawierały one żadnych ciekawych myśli ani o roli fizyki w postępie technicznym, ani o nauczaniu fizyki.

Dwie dyskusje z udziałem wybitnych uczonych, m.in. Carla Rubbii (Nobel 1984), dotyczyły roli fizyki w zagadnieniach socjologicznych i ekonomicznych w nadchodzących latach oraz odbioru fizyki w społeczeństwie. W ich trakcie uczestnicy przedstawiali krótkie, 10-minutowe referaty, a następnie odpowiadali na pytania z sali. O ile przygotowane wypowiedzi miały swoją logikę i w większości były ciekawe, o tyle pytania z sali były na ogół nieprzemyślane.

W sumie konferencja była bardzo ciekawa. Można było się z niej dowiedzieć, w jaki sposób wielcy fizycy patrzą na rolę fizyki w świecie oraz jak starają się nawiązywać i podtrzymywać kontakty z politykami i ze społeczeństwem. To samo mogę powiedzieć o wrażeniach młodych polskich uczestników, dla których ponadto wielką atrakcją był sam pobyt w Paryżu. Czy jednak konferencja przyczyni się do zwiększenia roli fizyki, czy wpłynie na poprawienie społecznej percepcji fizyki – trudno mi

ocenić. Nie jestem też w stanie określić, czy argumenty używane przez uczestników trafiły do świadomości polityków i czy dotrą do szerokich grup społeczeństwa.

Szczegółowe informacje o konferencji i dalsze zdjęcia wykonane podczas jej trwania można znaleźć na stronie www.wyp2005.org/unesco/.

Jan Mostowski
Instytut Fizyki PAN
oraz Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego
Warszawa

...i Warszawie

Fizycy z całej Polski powitali Nowy Rok 2005 na uroczystym balu sylwestrowym, który odbył się w pięknej Auli Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej. Bal otworzył JM Rektor PW, prof. dr hab. inż. Stanisław Mańkowski, witając wszystkich gości, po czym tradycyjnym polonezem rozpoczął sylwestrową zabawę. Dziesięć minut przed północą prezes Polskiego Towarzystwa Fizycznego, prof. Maciej Kolwas, w krótkich słowach zapowiedział otwarcie Światowego Roku Fizyki 2005 w Polsce, a jego uroczystej inauguracji dokonał prof. Martin C.E. Huber, prezes Europejskiego Towarzystwa Fizycznego (EPS).

Bal uświetnili swym udziałem także: minister edukacji narodowej i sportu Mirosław Sawicki, prezes elekt EPS Ove Poulsen (Dania) oraz władze Wydziału i Uczelni. Po otwarciu Światowego Roku Fizyki rozpoczęły się pokazy laserowe, które przeniosły uczestników w inny wymiar. Zabawa trwała do rana.

Jan Grabski
Wydział Fizyki
Politechnika Warszawska

Otwarcie balu: JM Rektor PW prof. Stanisław Mańkowski i dziekan Wydziału Fizyki PW prof. Franciszek Krok (fot. Marek Barwiński)

Inauguracja ŚRF w Polsce: Maciej Kolwas i Martin Huber (fot. Marek Barwiński)

Goście balu: prezes elekt EPS Ove Poulsen, były prezes PTF Ireneusz Strzałkowski, prezes EPS Martin Huber i minister edukacji narodowej i sportu Mirosław Sawicki (fot. Maciej Kolwas)

W tanecznym korowodzie (fot. Stefania Elbanowska)

Liczne kolorowe fotografie, oddające atmosferę czwartego z kolei sylwestrowego Balu u Fizyków, tak jak poprzednie perfekcyjnie zorganizowanego przez dra Jana Grabskiego, ich inicjatora, można obejrzeć na stronie ilf.if.pw.edu.pl/bal/zdjecia. Dzięki uprzejmości autorów zdjęć kilka z nich zamieszczamy także na naszych łamach w wersji czarno-białej.

Redakcja

Asymptotyczna swoboda – klucz do oddziaływań silnych i Teorii Standardowej

Historia Hansa Castorpa, którą zamierzamy opowiedzieć – nie ze względu na niego (...), lecz gwoli samej tej historii, która wydaje się nam w wysokim stopniu godna opowiedzenia (...) – historia Hansa Castorpa jest już bardzo dawna, jest już, można powiedzieć, pokryta szlachetną patyną czasu (...)

Tomasz Mann, Czarodziejska góra[1]

W przyrodzie występują cztery rodzaje oddziaływań fundamentalnych. Dwa z nich – elektromagnetyczne i grawitacyjne – przejawiają się wyraźnie w skali makroskopowej, dlatego ich klasyczne teorie zostały opracowane najwcześniej. Stworzenie kompletnej teorii unifikującej elektryczność i magnetyzm w ramach jednolitej klasycznej teorii pola było zwieńczeniem badań nad tymi zjawiskami prowadzonych głównie w XIX w. Choć dokonanie tej syntezy przypisuje się zazwyczaj Maxwellowi, należy pamiętać, iż tworząc ją, opierał on się na wynikach badań wielu swoich poprzedników: Faradaya, Franklina i innych. Natomiast stworzona w początku XX w. klasyczna teoria grawitacji jest niemal w całości dziełem Einsteina.

W końcu XIX w. oraz w pierwszej połowie ubiegłego wieku, w miarę postępu badań doświadczalnych, stało się jasne, iż teoria Maxwella nie objaśnia wszystkich efektów związanych z oddziaływaniem elektromagnetycznym. Odkryto ponadto dwa inne oddziaływania przejawiające się bezpośrednio dopiero na poziomie kwantowym – oddziaływania słabe odpowiedzialne m.in. za obserwowane już w końcu XIX w. zjawiska promieniotwórczości oraz oddziaływania silne determinujące budowę jąder atomowych i wiele innych zjawisk obserwowanych dopiero później, po wynalezieniu urządzeń umożliwiających przyspieszanie cząstek, w zderzeniach protonów z protonami, jądrami atomowymi itd.

Wielkim osiągnięciem badań eksperymentalnych i teoretycznych prowadzonych w drugiej połowie XX w. przez wielu fizyków było poznanie struktury materii i zrozumienie oddziaływań nią rządzących do odległości rzędu 10^{-18} metra. Efektem tego zbiorowego wysiłku było stworzenie i doświadczalne przetestowanie kwantowej teorii tych trzech rodzajów oddziaływań fundamentalnych, których kwantowe własności są odpowiedzialne za zachowanie się materii na takich odległościach. Przyznaną w roku 2004 trzem amerykańskim uczonym: Davidowi Grossowi, H. Davidowi Politzerowi oraz Frankowi Wilczkowi Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki za – jak głosi oficjalny komunikat Komitetu Nobla – „odkrycie asymptotycznej swobody w teorii oddziaływań silnych"[2] można uważać za trzynastą (szóstą za osiągnięcia teoretyczne) Nagrodę za wkład wniesiony przez poszczególnych fizyków w tę wielką syntezę. W poprzednich latach otrzymali ją bowiem także T.D. Lee i C.N. Yang (1957), R.P. Feynman, J.S. Schwinger i S.-I. Tomonaga (1965), M. Gell-Mann (1969), B. Richter i S.C.C. Ting (1976), S.L. Glashow, A. Salam i S. Weinberg (1979), J.W. Cronin i V.L. Fitch (1980), C. Rubbia (1984), L.M. Lederman, M. Schwarz i J. Steinberger (1988), J.I. Friedman, H.W. Kendall i R.E. Taylor (1990), M.L. Perl (1995) i F. Reines (1995) oraz G. 't Hooft i M.J.G. Veltman (1999).

Będąca wynikiem tej syntezy Teoria Standardowa oddziaływań fundamentalnych opiera się w zasadzie na dwu podstawach. Jedną jest stworzona przez Glashowa, Salama i Weinberga zunifikowana teoria oddziaływań elektrosłabych (jej częścią jest elektrodynamika kwantowa). Drugą jej podstawę stanowi właśnie teoria oddziaływań silnych znana jako chromodynamika kwantowa. Teorie te ujmują oddziaływania fundamentalnych składników materii, jakimi są leptony i kwarki, w jednolity schemat kwantowej teorii pola z cechowaniem, w którym nośnikami sił są bozony wektorowe. Aby zrozumieć kluczową rolę nagrodzonego odkrycia w zaproponowaniu chromodynamiki kwantowej – teorii pola z cechowaniem nieabelowym (czyli tzw. teorii Yanga–Millsa) opartym na grupie SU(3) – jako właściwej teorii oddziaływań silnych oraz w stworzeniu Teorii Standardowej, trzeba przypomnieć sytuację w fizyce cząstek elementarnych sprzed kilkudziesięciu lat.

Teoria oddziaływań fundamentalnych – stan przed 1960 r.

Kwantowa teoria pola jako schemat rachunkowy umożliwiający obliczanie szybkości reakcji zachodzących między cząstkami elementarnymi święciła swój pierwszy wielki tryumf pod postacią elektrodynamiki kwantowej w połowie lat pięćdziesiątych, kiedy to dzięki pracom

[1] Przekład Józefa Kramsztyka (Czytelnik, Warszawa 1965).

[2] Formalną podstawę przyznania Nagrody stanowią cztery prace: D.J. Gross, F. Wilczek, „Ultraviolet Behaviour of Non-Abelian Gauge Theories", *Phys. Rev. Lett.* **30**, 1343 (1973), „Asymptotically Free Gauge Theories", *Phys. Rev. D* **8**, 3633 (1974); H.D. Politzer, „Reliable Perturbative Results for Strong Interactions?", *Phys. Rev. Lett.* **30**, 1346 (1973), „Asymptotic Freedom: an Approach to Strong Interactions", *Phys. Reports* **14C**, 129 (1974).

Feynmana, Schwingera, Tomonagi, F. Dysona i innych zrozumiano konieczność przeprowadzania renormalizacji i opracowano spójną procedurę jej realizacji. Jako teoria oddziaływań elektromagnetycznych elektrodynamika kwantowa znakomicie sprawdzała się w praktyce, umożliwiając niezwykle dokładne teoretyczne obliczenia takich wielkości, jak anomalne momenty magnetyczne elektronu i mionu, przesunięcie Lamba i in. (sukcesy te zyskały jej nawet miano najdoskonalszej teorii fizycznej). Podstawą tego jej sukcesu była mała wartość stałej struktury subtelnej, odgrywającej w tej teorii rolę parametru rozwinięcia w rachunku zaburzeń.

Druga kwantowa teoria pola, teoria Fermiego oddziaływań słabych, mająca postać oddziaływania kontaktowego (tj. o zerowym zasięgu) tzw. prądów zbudowanych z kwantowych pól oddziałujących cząstek, dobrze wprawdzie opisywała istniejące wówczas dane doświadczalne, ale nie była wewnętrznie spójna jako teoria kwantowa. W szczególności wiadomo było, że amplitudy procesów słabych obliczane w ramach tej teorii łamią warunki unitarności, gdy energie oddziałujących cząstek stają się duże (rzędu 100 GeV), oraz że schemat renormalizacji stosowany w elektrodynamice kwantowej nie prowadzi do usunięcia wszystkich nieskończoności pojawiających się w kolejnych rzędach rachunku zaburzeń. Mimo tych wewnętrznych problemów teoria Fermiego, systematycznie udoskonalana (tak by uwzględnić przewidziane teoretycznie przez Lee i Yanga, a odkryte doświadczalnie przez C.S. Wu i niezależnie przez Ledermana łamanie parzystości, tłumienie procesów zachodzących ze zmianą dziwności itd.), stanowiła wciąż podstawę rozumienia i opisu oddziaływań słabych.

Prawdziwy kryzys przechodziły natomiast w owym okresie próby ujęcia w ramy teorii oddziaływań silnych. Wprawdzie jeszcze w końcu lat czterdziestych Yukawa sformułował kwantową teorię pola mającą opisywać silne oddziaływania nukleonów za pośrednictwem wymiany mezonów π, które kilka lat po zaproponowaniu tej teorii odkryto doświadczalnie, ale szybko stało się oczywiste, że analogiczna do stałej struktury subtelnej w elektrodynamice bezwymiarowa stała sprzężenia, odgrywająca w rachunku zaburzeń w teorii Yukawy rolę parametru rozwinięcia, ma liczbową wartość wynoszącą kilkanaście i wobec tego nie można wierzyć wynikom uzyskiwanym w ramach rachunku zaburzeń. Co więcej, w miarę postępowania szybko rozwijających się badań doświadczalnych odkrywano coraz więcej nowych cząstek oddziałujących silnie – zwanych hadronami – oraz ich stanów rezonansowych. Nie było wiadomo, które z tych cząstek uznać za prawdziwie elementarne, a które tylko za ich stany rezonansowe. Z punktu widzenia kwantowej teorii pola nie było więc nawet jasne, jakie pola wprowadzić do teorii jako pola podstawowe, a wskutek oczywistej niestosowalności rachunku zaburzeń brak było narzędzia umożliwiającego testowanie hipotez.

Dodatkowo, jeszcze w połowie lat pięćdziesiątych, grupa fizyków radzieckich pracująca pod kierunkiem Landaua zwróciła uwagę na pewne wewnętrzne trudności najlepszej znanej kwantowej teorii pola – elektrodynamiki. Analizując pewne klasy przyczynków wyższych rzędów rachunku zaburzeń do amplitud rozpraszania, odkryli oni, że w teorii tej siła oddziaływania dwu ładunków elektrycznych, którą można przedstawić w postaci efektywnej stałej sprzężenia, rośnie wraz ze wzrostem energii oddziałujących ładunków i staje się nieskończenie duża już dla skończonej wartości energii. Wyciągano stąd wniosek, że elektrodynamikę można stosować przy dowolnie dużych energiach cząstek oddziałujących jedynie wtedy, gdy wyjściowa stała sprzężenia, tj. stała struktury subtelnej, ma wartość równą zeru (tzw. zero moskiewskie). Wprawdzie rzeczywista stała struktury subtelnej ma tak małą wartość, że załamywanie się elektrodynamiki następuje dopiero przy nierealistycznie wielkich energiach, ale – ekstrapolując wynik grupy Landaua na wszystkie modele kwantowej teorii pola – podejrzewano, iż w przypadku oddziaływań silnych (których stała sprzężenia była duża już przy małych energiach) podobny efekt może sprawiać, że kwantowa teoria pola załamuje się całkowicie.

Wszystkie te przyczyny spowodowały, że zarzucono niemal całkowicie kwantowopolowe podejście do teorii oddziaływań silnych, a badania teoretyczne poszły w kierunku poszukiwania alternatywnego ich opisu. Należy tu wspomnieć o podejściu, które rozwijał Geoffrey F. Chew (promotor pracy doktorskiej Grossa), będącym próbą bezpośredniej konstrukcji macierzy S dla oddziaływań silnych jedynie na podstawie jej własności analitycznych i warunku unitarności, teorię biegunów Reggego oraz tzw. modele dualne, które okazały się po prostu teorią strun i wiele lat później powróciły jako pierwsza całkowicie wewnętrznie spójna kwantowa teoria grawitacji.

SU(3), kwarki i algebra prądów

Istotnym krokiem naprzód w uporządkowaniu wydłużającej się szybko listy hadronów (barionów i mezonów) i zrozumieniu ich własności była wprowadzona w roku 1961 przez Gell-Manna i Y. Ne'emana klasyfikacja tych cząstek oparta na grupie symetrii SU(3). Według tej teorii hadrony o zbliżonych masach grupują się w multiplety grupy SU(3), podobnie jak stany atomu wodoru o tych samych energiach grupują się w multiplety grupy SU(2) trójwymiarowych obrotów. Zaproponowana przez Gell-Manna i Ne'emana klasyfikacja prowadziła w naturalny sposób do koncepcji kwarków (i antykwarków) – cząstek wypełniających niewystępujące wśród znanych hadronów tryplety i antytryplety grupy SU(3). Kwarki, traktowane z początku wyłącznie jak obiekty matematyczne, zostały szybko zaproponowane przez Gell-Manna i G. Zweiga jako rzeczywiste cząstki, z których zbudowane są hadrony. W istocie bowiem przyjęcie, iż są to trzy fermiony (oraz odpowiadające im trzy antyfermiony) o spinie połówkowym, ułamkowych ładunkach elektrycznych i liczbie barionowej równej $1/3$ (lub odpowiednio $-1/3$) pozwalało niemal od razu wyjaśnić bardzo wiele takich własności, jak spiny, ładunki i inne liczby kwantowe obserwowanych wówczas hadronów. Przyjęło się owe trzy wprowadzone przez autorów modelu kwarki (i trzy anty-

kwarki) oznaczać u ($q_{\mathrm{u}} = (2/3)e$, gdzie e jest ładunkiem elementarnym), d ($q_{\mathrm{d}} = -(1/3)e$) oraz s ($q_{\mathrm{s}} = -(1/3)e$) i nazywać odróżniającą je cechę zapachem. Grupa SU(3) uzyskuje wtedy interpretację grupy uogólnionych obrotów w abstrakcyjnej trójwymiarowej przestrzeni zapachu kwarków[3].

Zapachowa symetria SU(3) oraz koncepcja istnienia dodatkowej, częściowo naruszonej i dlatego niewidocznej bezpośrednio w widmie hadronów symetrii aksjalnej (razem z zapachową symetrią SU(3) tworzącej tzw. symetrię chiralną oddziaływań silnych) poprzez znane twierdzenie Noether dała początek innej ważnej idei teoretycznej, jaką była tzw. algebra prądów Gell-Manna. Jawna konstrukcja prądów Noether odpowiadająca realizacji tych symetrii w kwantowej teorii pola swobodnych kwarków pozwalała otrzymać ich własności algebraiczne, które następnie, już bez odnoszenia ich do kwarków, można było stosować do przewidywania zależności między amplitudami rozpraszania i rozpadów rzeczywistych hadronów. Koncepcja ta stała się szczególnie owocna, kiedy okazało się, że odpowiednie kombinacje liniowe prądów Noether symetrii SU(3) są tymi samymi prądami, które oddziałują słabo w teorii Fermiego. Pozwalało to na powiązanie niektórych wielkości charakteryzujących oddziaływania silne z wielkościami charakteryzującymi procesy słabe (słynna relacja Goldbergera–Treimana wiążąca stałą rozpadu mezonu π z wartością sprzężenia pion–nukleon) i wyraźnie wskazywało na istnienie jakiegoś głębszego związku między wszystkimi rodzajami oddziaływań. Wyniki te pośrednio przyczyniły się też do stopniowego powrotu do badań nad zastosowaniem kwantowej teorii pola w fizyce oddziaływań silnych.

Symetria SU(3) i dostarczający jej głębszego uzasadnienia model kwarkowy odniosły m.in. spektakularny sukces, jakim było przewidzenie istnienia i własności cząstki Ω^- odkrytej w komorze pęcherzykowej w Brookhaven w roku 1964. Sama koncepcja kwarków nie była jednak wolna od problemów. Największą trudność w uznaniu kwarków za rzeczywiste składniki hadronów stanowiło to, że doświadczalne poszukiwania swobodnych cząstek o ułamkowych ładunkach elektrycznych kończyły się zawsze fiaskiem. Zagadkę stanowiło, dlaczego kwarki – jeśli rzeczywiście istnieją – nie mogą wydostać się z hadronów (tak jak możliwe jest wydostanie się na zewnątrz pojedynczych protonów lub neutronów będących składnikami jąder atomowych). Druga trudność wiązała się z zakazem Pauliego, któremu jako fermiony powinny były podlegać kwarki: cząstka Δ^{++} o ładunku $2e$ i spinie $3/2$ (w jednostkach $\hbar$) powinna się składać z trzech kwarków u mających zerowy orbitalny moment pędu, co razem daje funkcję falową symetryczną ze względu na przestawienie kwarków, a nie antysymetryczną. Wprowadzenie przez O.W. Greenberga koloru jako dodatkowej liczby kwantowej kwarków, tj. przyjęcie, iż kwark każdego z zapachów może występować w trzech różnych stanach wewnętrznych („kolorach") stanowiących trójwymiarowy multiplet innej grupy SU(3), oraz postulatu, że jako całość bariony są zawsze „białe", tzn. stanowią singlety grupy SU(3) koloru, pozwoliło rozwiązać problem zakazu Pauliego i – jak się później okazało – było także koniecznym krokiem ku zrozumieniu problemu uwięzienia kwarków.

Rozpraszanie głęboko nieelastyczne – skalowanie i partony

Przełomowym wydarzeniem na drodze do zrozumienia oddziaływań silnych było wykonywane na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych w stanfordzkim centrum akceleratora liniowego (SLAC) doświadczenie z głęboko nieelastycznym rozpraszaniem elektronów o energii rzędu kilku GeV na protonach (Friedman, Kendall i Taylor). W doświadczeniu tym mierzono inkluzywne przekroje czynne, tj. przekroje zsumowane po wszystkich hadronowych stanach końcowych mogących powstawać w wyniku rozbicia początkowego protonu przez elektron rozpraszający się na nim pod dużym kątem. Nazwa „rozpraszanie głęboko nieelastyczne" pochodzi stąd, że przy dużej energii padającego elektronu i dużym kącie jego rozproszenia przekaz czteropędu Q^2 jest duży, co w przestrzennym obrazie procesu oznacza sondowanie przez elektron wewnętrznej struktury protonu na bardzo małych odległościach (przy rozproszeniu do przodu przekaz czteropędu jest mały i nawet gdy padający elektron ma dużą energię, „widzi" wnętrze protonu jedynie w dużej skali). Od strony teoretycznej inkluzywny przekrój czynny można sparametryzować za pomocą dwu czynników struktury F_1 i F_2 zależących a priori od dwu niezależnych zmiennych kinematycznych: przekazu czteropędu Q^2 od elektronu do protonu oraz zmiennej $\nu \equiv P \cdot Q$ gdzie P jest czteropędem początkowego protonu: $F_i = F_i(Q^2, \nu)$. W 1969 roku J.D. Bjorken, opierając się na algebrze prądów Gell-Manna i rozwijając pewne koncepcje m.in. Grossa i C.G. Callana, wysunął hipotezę skalowania mówiącą, że dla bardzo dużych przekazów czteropędu, tzn. dla $Q^2 \to \infty$, opisujące rozpraszanie czynniki struktury powinny zależeć nie od Q^2 i ν osobno, lecz od ich bezwymiarowej kombinacji $x = -Q^2/2\nu$ (zwanej odtąd zmienną Bjorkena): $F_i(Q^2, \nu) \to F_i(x)$. Doświadczenia wykonywane w SLAC-u istotnie potwierdziły hipotezę Bjorkena, ale interpretacja fizyczna skalowania pozostawała niejasna aż do czasu, kiedy Feynman, zapoznawszy się z wynikami, zrozumiał, iż świadczą one o występowaniu wewnątrz protonu punktowych składników zachowujących się jak cząstki swobodne. Do interpretacji wyników

[3] Późniejsze badania procesów zachodzących przy energiach wyższych niż były dostępne w owym okresie ujawniły istnienie dalszych trzech kwarków: c, b oraz t (i ich antykwarków). Kwarki c oraz b są w porównaniu z kwarkami u, d oraz s cięższe o odpowiednio ok. 1,5 GeV i ok. 4,5 GeV. Dlatego też symetrie SU(4), SU(5) nie odzwierciedlają się w widmie hadronów, w których skład wchodzą kwarki c oraz b. Odkryty dopiero w 1994 roku kwark t jest tak ciężki ($m_{\mathrm{t}} \approx 178$ GeV), że rozpada się dzięki oddziaływaniom słabym na lżejsze kwarki, zanim zdołałyby się uformować zawierające go hadrony.

zaproponował on model partonów, w którym głęboko nieelastyczne rozpraszanie elektronów jest efektem niekoherentnego ich rozpraszania na nieoddziałujących wzajemnie punktowych składnikach, nazwanych przez Feynmana partonami. W podejściu Feynmana zmienna x Bjorkena uzyskuje interpretację ułamka pędu protonu, jaki niesie parton, z którym oddziałuje wirtualny foton wyemitowany przez elektron, a czynniki struktury F_1 i F_2 dają się wyrazić przez prawdopodobieństwa $f_q(x)$ znalezienia w protonie partonu o ładunku elektrycznym q i ułamku x całkowitego czteropędu protonu.

Intuicyjny obraz, jakim posługiwał się Feynman, opierał się w zasadzie na dwóch logicznie niezależnych elementach: po pierwsze, jeśli istotnie proton zbudowany jest z punktowych składników, to w układzie spoczynkowym nadlatującego elektronu wszystkie ewentualne ruchy składników protonu ulegają znacznemu spowolnieniu wskutek relatywistycznej dylatacji czasu. Charakterystyczny odstęp czasu między wzajemnymi oddziaływaniami partonów jest przy dużych wartościach Q^2 dużo większy niż charakterystyczny czas oddziaływania partonów z wirtualnym fotonem, który przy ustalonym Q^2 oddziałuje z niejako „zamrożonym" rozkładem partonów wewnątrz protonu. Uzasadnia to, dlaczego rozpraszanie można przedstawić jako sumę niespójnych rozproszeń na partonach. Samo to rozumowanie nie wymaga jednak jeszcze, by partony zachowywały się jak cząstki swobodne. Jednakże gdyby wzajemne oddziaływania partonów były znaczące, rozkład partonów zmieniałby się szybko ze zmianą Q^2 wirtualnego fotonu, gdyż wraz ze zmianą Q^2 zmieniałoby się znacząco prawdopodobieństwo emisji wirtualnych par parton–antyparton i prawdopodobieństwo $f_q(x)$ znalezienia partonu o ładunku q i ułamku całkowitego pędu protonu x zależałoby silnie od Q^2. Dane doświadczalne potwierdzające z dobrą dokładnością skalowanie Bjorkena oznaczały więc, że dla $Q^2 \to \infty$ wzajemne oddziaływania partonów słabną i można je w dobrym przybliżeniu pominąć.

Mimo iż Feynman nie precyzował, czym są wprowadzone przezeń partony, naturalne było ich utożsamienie z kwarkami Gell-Manna i Zweiga. Stało się to jeszcze bardziej oczywiste, gdy dzięki pomiarowi zasugerowanemu w jednej z prac Callana i Grossa wykazano, że punktowe składniki protonu mają spin równy $1/2$ oraz gdy porównanie otrzymanych w CERN-ie wyników rozpraszania neutrin na nukleonach z przewidywaniami wyprowadzonymi przez C. Llewellyn-Smitha i Grossa z modelu partonowego i algebry prądów wykazało, iż mają one liczbę barionową równą $1/3$. (Późniejsze doświadczenia wykazały, że same kwarki jako składniki protonu nie wystarczają: część pędu początkowego protonu musi być niesiona przez inne jego składniki, które dziś utożsamiamy z gluonami – bozonami cechowania przenoszącymi w chromodynamice kwantowej oddziaływania między kwarkami). Jedyną zagadkę stanowiło to, że z jednej strony siły wzajemnego oddziaływania kwarków powinny być na tyle duże, by uniemożliwiać wydostawanie się swobodnych kwarków z hadronów, a z drugiej strony interpretacja doświadczeń z głęboko nieelastycznym rozpraszaniem leptonów na hadronach wymagała, by wzajemne oddziaływania kwarków były pomijalnie słabe. Zagadka ta nie była jednak nierozwiązywalna. Zdawano sobie bowiem sprawę, że w ramach kwantowej teorii pola problem słabnięcia wzajemnych oddziaływań kwarków ze wzrostem Q^2 jest problemem ich oddziaływania na coraz mniejszych odległościach, podczas gdy uwięzienie kwarków w hadronach dotyczy właściwości tych oddziaływań na dużych odległościach.

Grupa renormalizacji i konieczność asymptotycznej swobody

Metody badania w kwantowej teorii pola zmienności siły oddziaływania wraz z odległością (skalą energii lub przekazem pędu) były już wtedy dość dobrze rozpracowane. Opierały się one na wykorzystaniu techniki grupy renormalizacji wprowadzonej do badania elektrodynamiki przez E. Stueckelberga i A. Petermanna oraz Gell-Manna i F. Lowa, a później rozwiniętej przez N.N. Bogoliubowa i D.W. Szirkowa oraz Callana i K. Symanzika (metodę tę później jeszcze bardziej rozwinął K.G. Wilson, a jej zastosowanie w teorii zjawisk krytycznych przyniosło mu w roku 1982 Nagrodę Nobla). Mówiąc w pewnym uproszczeniu, metoda ta w kwantowej teorii pola polega na wprowadzeniu odpowiedniej, zależnej od przekazu czteropędu (lub skali energii) stałej sprzężenia (nazywanej często biegnącą stałą sprzężenia) determinującej siłę oddziaływania. Obliczając amplitudy rozpraszania, musimy zawsze jakoś zdefiniować „zrenormalizowaną" stałą sprzężenia α, będącą parametrem rozwinięcia amplitud rozpraszania w szereg potęgowy przy ich obliczaniu w rachunku zaburzeń. Zrenormalizowaną stałą α będącą funkcją przekazu czteropędu Q_0^2 definiuje się zazwyczaj przez wartość amplitudy jakiegoś ustalonego procesu rozpraszania dla pewnego ustalonego przekazu czteropędu[4]. Wyrażenie obliczanej w rachunku zaburzeń amplitudy rozpraszania dowolnego innego procesu przez tak zdefiniowaną zrenormalizowaną stałą $\alpha(Q_0^2)$ powoduje w teorii renormalizowalnej (takiej jak elektrodynamika kwantowa) zniknięcie wszystkich nieskończoności dla dowolnych wartości pędów cząstek rozpraszanych (jest to istota procedury renormalizacji). Jeśli jednak używając stałej $\alpha(Q_0^2)$ będziemy obliczać amplitudy rozpraszania cząstek dla przekazów czteropędów $Q^2 \gg Q_0^2$, to przyczynki od kolejnych rzędów rachunku zaburzeń będą zawierały potęgi dużych liczbowo logarytmów stosunku Q^2/Q_0^2, które mogą kompensować tłumienie tych

[4] Znana wartość ok. $1/137$ stałej struktury subtelnej α jest wartością otrzymywaną przy zdefiniowaniu α poprzez wartość przekroju czynnego procesu Comptona dla spoczywającego elektronu i dążącego do zera pędu (tj. częstości) fotonu. Stałą α można jednak zdefiniować poprzez amplitudę innego procesu i dla innej wartości zmiennych kinematycznych. Ma ona wówczas inną wartość liczbową.

przyczynków przez wyższe potęgi stałej sprzężenia. Metoda grupy renormalizacji, sprowadzająca się do używania zrenormalizowanej stałej sprzężenia $\alpha(Q^2)$ zdefiniowanej przy odpowiedniej dla danego procesu skali Q^2 (zamiast $Q_0^2 \ll Q^2$), efektywnie wysumowuje przyczynki postaci $[\alpha(Q_0^2)\log(Q^2/Q_0^2)]^n$, $\alpha(Q_0^2)[\alpha(Q_0^2)\log(Q^2/Q_0^2)]^n$, $\alpha^2(Q_0^2)[\alpha(Q_0^2)\log(Q^2/Q_0^2)]^n$ itp., gdzie $n = 0, 1, \ldots$, ze wszystkich rzędów rachunku zaburzeń. Przy rozwinięciu względem potęg $\alpha(Q^2)$ poprawki wyższych rzędów do amplitud rozpraszania z przekazem pędu rzędu Q^2 nie zawierają już owych kłopotliwie dużych logarytmów i o tym, czy wnoszą one istotne przyczynki do amplitudy decyduje już tylko wartość $\alpha(Q^2)$.

Metoda grupy renormalizacji pozwala znaleźć związek między stałymi sprzężenia przy różnych skalach energii. Jest on dany równaniem różniczkowym (zwanym równaniem grupy renormalizacji)

$$Q^2 \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}Q^2}\,\alpha(Q^2) = \beta(\alpha(Q^2)) \qquad (1)$$

z warunkiem początkowym wyznaczonym (przez porównanie z danymi doświadczalnymi) przy jakichś energiach rzędu Q_0^2. Stosując rachunek zaburzeń, można znaleźć funkcję $\beta(\alpha)$ w postaci rozwinięcia w szereg potęgowy

$$\beta(\alpha) = \frac{1}{4\pi}\,\beta_0\alpha^2 + \frac{1}{16\pi^2}\,\beta_1\alpha^4 + \ldots \qquad (2)$$

Uwzględniając w rozwinięciu (2) tylko wyraz z β_0, otrzymuje się rozwiązanie równania (1) w postaci

$$\alpha(Q^2) = \frac{\alpha(Q_0^2)}{1 - (1/4\pi)\beta_0\alpha(Q_0^2)\log(Q^2/Q_0^2)}. \qquad (3)$$

W elektrodynamice kwantowej współczynnik β_0 funkcji $\beta(\alpha)$ jest dodatni[5], co formalnie prowadzi do nieskończonej wartości sprzężenia dla dużych (ale skończonych) wartości Q^2, czyli na małych odległościach. Jest to właśnie wspomniany już wynik grupy Landaua (pominięcie β_1 i dalszych członów po prawej stronie równania (1) przestaje być uzasadnione, gdy $\alpha(Q^2) \gtrsim 1$). Z drugiej strony przy Q^2 dążącym do zera efektywna siła oddziaływania elektromagnetycznego maleje do zera. Nazywa się to stabilnością teorii w podczerwieni. Efekt ten tłumaczy się zazwyczaj tym, że gdy badamy oddziaływanie elektromagnetyczne na dużych odległościach, „goły" ładunek elektryczny jest ekranowany przez polaryzację powstających z próżni wirtualnych par cząstka–antycząstka. Gdyby jednak współczynnik β_0 był ujemny, siła oddziaływania malałaby dla coraz większych przekazów czteropędu Q^2, czyli na coraz mniejszych odległościach, a wzrastałaby na odległościach coraz większych. Tę własność kwantowej teorii pola nazywa się jej asymptotyczną swobodą lub jej stabilnością w nadfiolecie.

Sporo fizyków, w szczególności Symanzik, zdawało sobie sprawę, że konieczne dla wytłumaczenia danych ze SLAC-u słabnięcie wzajemnych oddziaływań składników protonu przy wielkich energiach wymaga, by w kwantowej teorii pola kwarków funkcja $\beta(\alpha)$ (a przynajmniej β_0) była ujemna. Do takiego samego wniosku doszli też w bardziej sformalizowany sposób Callan i Gross, analizując za pomocą rozwinięcia operatorowego i grupy renormalizacji konsekwencje ewentualnej asymptotycznej swobody modeli kwantowej teorii pola. Jednak obliczenia funkcji $\beta(\alpha)$ podejmowane w wielu różnych modelach kwantowej teorii pola dawały zawsze $\beta_0 > 0$, tak jak w elektrodynamice kwantowej. W tej sytuacji Gross postanowił sprawdzić to bardziej systematycznie, spodziewając się, że uogólni ten negatywny wynik na dowolny model kwantowej teorii pola i tym samym wykaże niestosowalność kwantowej teorii pola do opisu procesów głęboko nieelastycznego rozpraszania. I istotnie, we współpracy z S. Colemanem dowiódł tego przypuszczenia dla dowolnej teorii, w której skład nie wchodzą nieabelowe pola Yanga–Millsa.

Nieabelowe teorie Yanga–Millsa są asymptotycznie swobodne!

Przełom lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych był okresem renesansu kwantowej teorii pola, wtedy to bowiem dokonał się przełom w teorii oddziaływań słabych. Glashow, Salam i Weinberg, wykorzystując nową w relatywistycznej kwantowej teorii pola ideę, jaką było podówczas spontaniczne naruszenie symetrii cechowania i mechanizm Higgsa, oraz opierając się na bogatych danych fenomenologicznych, zaproponowali zunifikowaną teorię oddziaływań elektrosłabych. Teoria ta, opisująca w pierwotnej wersji tylko słabe oddziaływania leptonów, opierała się na wykorzystaniu nieabelowych teorii Yanga–Millsa. W roku 1972 Veltman wraz ze swoim doktorantem 't Hooftem udowodnili renormalizowalność najpierw teorii Yanga–Millsa z nienaruszoną symetrią cechowania, a następnie takich teorii, jak teoria Glashowa, Salama i Weinberga ze spontanicznie naruszoną symetrią cechowania. Podejmowano też (Y. Nambu, Gell-Mann) próby zastosowania nieabelowych teorii Yanga–Millsa do zbudowania kwantowej teorii pola kwarków i sił je wiążących. W szczególności, w 1972 r. H. Fritzsch i Gell-Mann rozważali m.in. możliwość, iż nośniki tych sił mogą nie być singletami grupy SU(3) koloru.

Naturalne było więc podjęcie próby zbadania możliwości otrzymania skalowania Bjorkena w takich teoriach. Rachunek mający na celu obliczenie funkcji $\beta(\alpha)$ w nieabelowych teoriach Yanga–Millsa przedsięwziął Gross wraz ze swoim doktorantem z uniwersytetu w Princeton, Wilczkiem, w końcu roku 1972. Równolegle (z trochę innego powodu) takie same obliczenia podjął Politzer pracujący na Uniwersytecie Harvarda pod kierunkiem Colemana. Obie grupy pozostawały ze sobą w kontakcie. Obliczony w końcu przez Grossa i Wilczka oraz niemal w tym samym czasie przez Politzera współczynnik β_0 w teorii Yanga–Millsa bez fermionów i skalarów okazał

[5] Zwiększa się on za każdym razem, gdy wartość $\sqrt{Q^2}$ staje się większa niż masa kolejnego fermionu, tj. mionu, kwarków u, d, s, c, taonu, kwarka b.

się ujemny! Wyniki ten był znany już nieco wcześniej 't Hooftowi (na konferencji w Marsylii w 1972 r. na pytanie Symanzika o znak funkcji β w nieabelowej teorii Yanga–Millsa 't Hooft odpowiedział, że jest on ujemny), który jednak, pracując nad innymi zagadnieniami, nie był świadom wagi tego wyniku. W przeciwieństwie do 't Hoofta, Gross i Wilczek oraz Politzer doskonale zdawali sobie sprawę z tego, iż ujemny znak β_0 zapewniający stabilność dla $Q^2 \to \infty$ tzw. punktu stałego $\alpha = 0$ w teorii oddziaływań silnych może tłumaczyć sukces naiwnego modelu partonowego Feynmana i obserwowane w eksperymentach w SLAC-u skalowanie Bjorkena. Co więcej, dzięki wcześniejszym wynikom Colemana i Grossa rozumieli, że nieabelowe teorie Yanga–Millsa są jedynymi, które mogą takie skalowanie wyjaśnić.

Samo obliczenie współczynnika β_0 przeprowadzone przez zeszłorocznych laureatów jest dziś standardowym rachunkiem wykonywanym w ramach ćwiczeń do wykładu z kwantowej teorii pola. W tamtym czasie były to jednak pionierskie i trudne rachunki. Donoszące o wynikach, niezależnie napisane prace Politzera (była to pierwsza jego opublikowana praca!) oraz Grossa i Wilczka ukazały się jedna po drugiej w najbardziej prestiżowym wówczas dla fizyki wysokich energii czasopiśmie *Physical Review Letters*. Ich wynik dla współczynnika β_0 funkcji $\beta(\alpha)$ dyktującej zależność od skali energii (odległości) oddziaływań przenoszonych przez bozony wektorowe (bozony o spinie 1) w najogólniejszej kwantowej teorii Yanga–Millsa ma postać

$$\beta_0 = -\frac{11}{3}\, C_2(G) + \frac{2}{3}\sum_F S_2(F) + \sum_S \frac{1}{3}\, S_2(S). \quad (4)$$

We wzorze tym właśnie ujemny czynnik w pierwszym składniku, w którym $C_2(G)$ jest wartością operatora Casimira grupy cechowania, jest specyficzny dla teorii Yanga–Millsa: $C_2(G) \neq 0$ dla nieabelowych grup cechowania (np. dla grup SU(N) mamy $C_2(\mathrm{SU}(N)) = N$); czynnik ten jest równy zeru w teoriach z abelową grupą cechowania, takich jak elektrodynamika (i dlatego współczynnik β_0 jest w elektrodynamice dodatni). Z fizycznego punktu widzenia ta zasadnicza różnica między abelowymi i nieabelowymi teoriami z cechowaniem bierze się stąd, że równania pola klasycznej elektrodynamiki są liniowe, analogiczne zaś klasyczne równania pola nieabelowych teorii Yanga–Millsa są nieliniowe. Na poziomie kwantowym przejawia się to w tym, że kwant pola elektromagnetycznego – elektrycznie obojętny foton – nie oddziałuje bezpośrednio sam ze sobą, natomiast kwanty nieabelowych pól cechowania niosą ładunki nieabelowe. I właśnie przyczynki pochodzące od ich wzajemnych oddziaływań są odpowiedzialne za znak pierwszego czynnika we wzorze (4). Efekt ten można interpretować jako antyekranowanie ładunków nieabelowej teorii z cechowaniem przez wirtualne pary kwantów pól Yanga–Millsa powstające z próżni. Dwa następne wyrazy we wzorze (4) są przyczynkami od wszystkich fermionów i cząstek skalarnych oddziałujących z kwantami pola Yanga–Millsa. Dodatni znak tych przyczynków oznacza, że im więcej takich cząstek, tym wolniej siła oddziaływania maleje ze wzrostem energii (na mniejszych odległościach), a zbyt duża liczba takich cząstek w teorii może, zmieniając znak β_0, spowodować wręcz zmianę charakteru zależności siły oddziaływania od odległości.

W obu pracach opublikowanych w *PRL* ich autorzy wysunęli hipotezę, że właściwym sformułowaniem teorii oddziaływań silnych jest oddziaływanie kwarków z bozonami wektorowymi jakiejś nieabelowej grupy cechowania. W sposób naturalny jako właściwa grupa cechowania narzucała się oczywiście grupa SU(3) koloru, której wprowadzenie było wcześniej konieczne dla rozwiązania problemu zakazu Pauliego w modelu kwarkowym (dodatkowego potwierdzenia występowania trzech kolorów kwarków dostarczyło obliczenie szybkości zachodzenia rozpadu $\pi^0 \to 2\gamma$ oparte na rozważaniu tzw. anomalii oraz pomiary stosunku $\sigma(\mathrm{e^+e^-} \to \text{hadrony})/\sigma(\mathrm{e^+e^-} \to \mu^+\mu^-)$ w SLAC-u). Za taką hipotezą przemawiało to, że w tym czasie pomiary funkcji struktury nukleonów w doświadczeniach z głęboko nieelastycznym rozpraszaniem leptonów na hadronach dość wyraźnie wskazywały już na występowanie w hadronie także obojętnych elektrycznie składników (partonów).

Chromodynamika kwantowa i Teoria Standardowa

Początkowo nie było jednak jasne, czy kolorowa symetria cechowania powinna być symetrią ścisłą (tak jak symetria U(1) w elektrodynamice), co pociągałoby za sobą zerową masę bozonów o spinie 1 przenoszących oddziaływania, czy też powinna być symetrią spontanicznie naruszoną, tak jak symetria SU(2)×U(1) w modelu Glashowa, Salama i Weinberga elektrosłabych oddziaływań leptonów. Za drugą opcją przemawiał sukces tego ostatniego modelu oraz fakt, że istnieją silnie oddziałujące bozony wektorowe o niezerowej masie (mezony ρ, ω, ϕ), a nie istnieją żadne hadrony o masie zerowej. Zarówno Gross oraz Wilczek, jak i Politzer zauważali jednak, że jedyną możliwością byłoby dynamiczne naruszenie tej symetrii, gdyż wprowadzenie do teorii silnie oddziałujących cząstek skalarnych (realizujących naruszenie symetrii cechowania w taki sposób, jak w teorii oddziaływań elektrosłabych), ze względu na wymóg renormalizowalności teorii, pociągałoby za sobą wprowadzenie ich samooddziaływań, które psułyby jej asymptotyczną swobodę. Zdawali sobie także sprawę z tego, że ten sam ujemny znak β_0, który jest konieczny do wyjaśnienia sukcesu modelu partonowego, jednocześnie powoduje, że siła oddziaływania między kwarkami rośnie przy $Q^2 \to 0$, tj. gdy rośnie odległość między nimi. Oczywiście gdy stała sprzężenia staje się rzędu jedności, traci sens obliczana w rachunku zaburzeń funkcja $\beta(\alpha)$ (w szczególności nie można było wykluczyć a priori takiej możliwości, że pełna nieperturbacyjna funkcja $\beta(\alpha)$ ma drugie zero, dla jakiejś skończonej wartości $\alpha = \alpha_0$; w takim przypadku siła oddziaływania $\alpha(Q^2)$ dążyłaby przy $Q^2 \to 0$ do α_0), ale jasne było, iż prawdziwe widmo stanów fizycznych teorii może być

zupełnie inne niż to, które ujawnia się w rachunku zaburzeń. Dlatego też w drugiej z wymienionych przez Komitet Noblowski prac Gross i Wilczek wysunęli hipotezę, że symetria kolorowa SU(3) jest nienaruszona, a rosnąca nieograniczenie z odległością siła oddziaływania wiąże kwarki w taki sposób, że skończone masy mogą mieć tylko „białe" układy kwarków. Mechanizm taki mógł, ich zdaniem, jakościowo tłumaczyć uwięzienie kwarków. Nad problemem zastosowania nieabelowej teorii Yanga–Millsa do oddziaływań silnych poprzez grupę koloru pracował też równolegle od kilku lat Gell-Mann ze współpracownikami. Ich praca (Gell-Mann, Fritzsch i H. Leutwyler), a także praca H. Lipkina dostarczyły ważnych argumentów na rzecz hipotezy wysuniętej przez Grossa i Wilczka. Dość szybko więc zrozumiano, że jest ona zgodna z niemal wszystkim, co wiedziano o oddziaływaniach silnych, i powszechnie ją zaakceptowano. W ten sposób teoria oddziaływań silnych przyjęła swoją współczesną postać chromodynamiki kwantowej, w której nośnikami sił między kolorowymi kwarkami jest osiem bezmasowych gluonów o spinie 1.

Ponieważ w kwantowej nieabelowej teorii Yanga–Millsa stała sprzężenia $\alpha(Q^2)$ nie jest ściśle równa zeru, a jedynie dąży do tej wartości asymptotycznie dla $Q^2 \to \infty$, nowa teoria oddziaływań silnych przewidywała odstępstwa od ścisłego skalowania Bjorkena. Dzięki małej wartości $\alpha(Q^2)$ poprawki do przewidywań naiwnego modelu partonowego można było obliczać stosując rachunek zaburzeń. Chromodynamika przewiduje słabą, policzalną w rachunku zaburzeń, logarytmiczną zależność funkcji struktury $f_q(x)$ od Q^2. Wniosek ten, sformułowany jeszcze przed odkryciem asymptotycznej swobody w pracy Callana i Grossa, został przypomniany w pracy Grossa i Wilczka. Ilościowe potwierdzenie przewidywanej przez chromodynamikę zależności przez dokładne pomiary funkcji struktury $f_q(x)$ przy różnych wartościach Q^2, jakie przyniosły lata późniejsze, a także niemal bezpośrednie zaobserwowanie kwarków i gluonów w postaci dżetów hadronowych, których rozkłady kątowe zgadzały się z przewidywaniami opartymi na rachunku zaburzeń w chromodynamice, stanowiły ważne dowody poprawności idei leżących u podstaw tej teorii.

Uznanie kwarków za obiekty podstawowe, które pociągało za sobą zaakceptowanie chromodynamiki kwantowej, miało także doniosłe konsekwencje dla teorii oddziaływań elektrosłabych. Potwierdzało bowiem, że znane z algebry prądów Gell-Manna prądy wyrażone przez kwantowe pola kwarków są właśnie tymi, do których powinny się sprzęgać bozony wektorowe w teorii Glashowa, Salama i Weinberga. Ponadto przyjęcie, iż oddziałujące z bozonami wektorowymi prądy kwarkowe mają dokładnie taką samą strukturę chiralną jak prądy leptonowe, nie prowadziło do żadnych sprzeczności z danymi (wcześniej dla zapewnienia zgodności z danymi prądy słabe wyrażane za pomocą pól hadronów musiały mieć wyraźnie inną strukturę). Umożliwiło to niemal natychmiast ich włączenie do teorii oddziaływań elektrosłabych. Co więcej, zauważono też (Weinberg), że krótkozasięgowość tych ostatnich powoduje, iż rachunek zaburzeń chromodynamiki może być stosowany także do obliczania (niektórych) poprawek od oddziaływań silnych do amplitud procesów zdeterminowanych oddziaływaniami słabymi. Dzięki temu perturbacyjna chromodynamika jest współcześnie znakomicie testowana także w oddziaływaniach słabych, a zwłaszcza w niektórych procesach rzadkich, np. rozpadzie mezonów zawierających kwark b: $B \to X_s\gamma$ (gdzie X_s oznacza wszystkie możliwe stany hadronowe zawierające kwark s).

Właściwym jednak polem zastosowań perturbacyjnej chromodynamiki jest fizyka tzw. procesów twardych, w których partony (kwarki i gluony) oddziałują przy dużych przekazach czteropędów Q^2. Dysponujemy dziś wielorakimi ilościowymi testami perturbacyjnej chromodynamiki potwierdzającymi jej poprawność i stosowalność do obliczania przewidywań dla takich procesów. W szeregu potęgowym (2) przedstawiającym funkcję $\beta(\alpha)$ w chromodynamice znane są już cztery pierwsze wyrazy, a przeprowadzane w wielu laboratoriach na całym świecie pomiary α dla różnych wartości Q^2 zgadzają się z zależnością $\alpha(Q^2)$ otrzymywaną z równania (1). Przy wzrastających energiach cząstek przyspieszanych w akceleratorach wzrasta stale, dzięki asymptotycznej swobodzie, zakres, w którym perturbacyjna chromodynamika pozwala na otrzymywanie ilościowych przewidywań efektów oddziaływań silnych. Umożliwia to coraz dokładniejsze testowanie tej teorii. Chromodynamika kwantowa stała się też niezbędnym narzędziem badawczym przy poszukiwaniu w zderzeniach cząstek o wysokich energii nowych zjawisk (tzw. nowej fizyki), których Teoria Standardowa nie obejmuje. Służy ona tu do szacowania tzw. tła pochodzącego od znanych już procesów. Bez zaufania do jej przewidywań poszukiwania takie byłyby bardzo utrudnione lub wręcz niemożliwe. Wreszcie, dzięki szybko rosnącym możliwościom komputerów coraz realniejsze staje się badanie długozasięgowych efektów oddziaływań silnych za pomocą zaproponowanego przez Wilsona i A.M. Poliakowa podejścia wykorzystującego obliczenia na sieciach. Jakkolwiek wyników tych rachunków wciąż jeszcze nie można uznać za ostateczny dowód słuszności hipotezy uwięzienia kwarków, to nie ujawniają one niczego, co byłoby z nią sprzeczne. Wykonywane zaś tą techniką obliczenia elementów macierzowych operatorów pomiędzy stanami hadronowymi dostarczają dziś informacji niezbędnych przy badaniu przewidywań teorii elektrosłabej dla procesów, w których uczestniczą hadrony. Rosną nadzieje, że za pomocą takich rachunków uda się w końcu obliczyć widmo mas i własności hadronów bezpośrednio z chromodynamiki.

Przed czym stoimy?

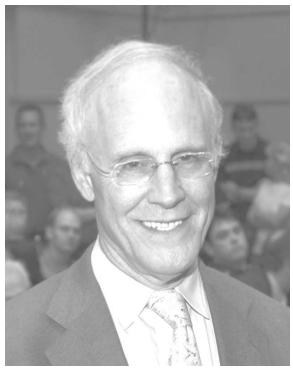
W perspektywie historycznej odkrycie, którego dokonali trzej zeszłoroczni laureaci Nagrody Nobla, miało podwójne znaczenie. Z jednej strony stanowiło ono klucz do ujęcia oddziaływań silnych w ramy kwantowej teorii pola i zidentyfikowania warunków fizycznych, w których możliwe jest uzyskiwanie ilościowych przewidywań z tej teorii za pomocą rachunku zaburzeń. Z drugiej strony

odkrycie to umożliwiło rozciągnięcie teorii oddziaływań elektrosłabych Glashowa, Salama i Weinberga na cząstki silnie oddziałujące i ujawniło jednolitą strukturę tej teorii. Struktura ta, jak się zdaje, w dość wyraźny sposób sugeruje, że oba człony dzisiejszej Teorii Standardowej – teoria oddziaływań elektrosłabych i chromodynamika – mogą stanowić tylko efektywne niskoenergetyczne przybliżenie jakiejś bardziej podstawowej teorii, w której zarówno oddziaływania silne, jak i elektrosłabe są tym samym oddziaływaniem. Dzięki asymptotycznej swobodzie hipoteza taka nie kłóci się z obserwowaną dysproporcją siły oddziaływań elektrosłabych i silnych przy obecnie dostępnych energiach: siła tych ostatnich maleje bowiem szybko wraz ze zwiększaniem się energii oddziałujących cząstek i biegnące stałe sprzężenia obu rodzajów oddziaływań istotnie dążą – jak się wydaje – do wspólnej wartości przy energiach rzędu 10^{16} GeV. Jeśli jednak unifikacja miałaby następować przy aż tak wysokiej skali energii, to – jak się dziś powszechnie uważa – sama minimalna wersja Teorii Standardowej, czyli Model Standardowy, wymaga najprawdopodobniej pewnych modyfikacji przy energiach, które powinny się stać dostępne w eksperymentach już w najbliższej przyszłości.

Podejmowane w ostatnich latach liczne próby wprowadzenia takich modyfikacji ukazują wyraźnie piękno i prostotę minimalnej wersji Teorii Standardowej. Wszystkie bowiem jej uogólnienia i rozszerzenia mają poważne trudności z naturalnym opisem ustalonych już faktów doświadczalnych (może w najmniejszym stopniu zarzuty te dotyczą supersymetrycznej wersji Teorii Standardowej). Trudności te coraz wyraźniej uświadamiają, iż podobnie jak w przeszłości, także dziś, bez nowych danych doświadczalnych, których powinien wkrótce dostarczyć budowany w CERN-ie wielki zderzacz hadronowy (LHC), trudno będzie odnaleźć właściwą ideę umożliwiającą dalszy postęp teoretyczny.

Autor pragnie podziękować prof. S. Pokorskiemu oraz dr. Z. Ajdukowi za przeczytanie rękopisu i cenne uwagi.

Piotr H. Chankowski
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Warszawski



DAVID JONATHAN GROSS, ur. w 1941 r., ukończył Hebrajski Uniwersytet w Jerozolimie, doktoryzował się w 1966 r. w Berkeley pod kierunkiem Geoffreya F. Chew. W roku 1973 pracował na uniwersytecie w Princeton. Obecnie jest dyrektorem nowo powstałego na uniwersytecie w Santa Barbara (Kalifornia) Instytutu Fizyki Teoretycznej ufundowanego przez F. Kavliego. Wniósł olbrzymi wkład w stworzenie teoretycznego opisu procesów głęboko nieelastycznego rozpraszania leptonów na hadronach opartego na zastosowaniu asymptotycznie swobodnej kwantowej teorii pola oraz tzw. rozwinięciu operatorowym. Innym jego doniosłym osiągnięciem było sformułowanie (wraz ze współpracownikami) w 1984 r. modelu supersymetrycznej struny heterotycznej, który do dziś odgrywa ważną rolę w próbach zastosowania teorii strun do fizyki wysokich energii. Zajmował się także badaniami różnych teoretycznych aspektów teorii superstrun, dwuwymiarowych modeli kwantowej grawitacji oraz niekomutatywnych teorii Yanga–Millsa. Za swe osiągnięcia otrzymał Medal Diraca (1988), Medal Oscara Kleina (2000), izraelską nagrodę Harvey Prize of the Technion (2000), Nagrodę Europejskiego Towarzystwa Fizycznego (EPS, 2003), a także francuskie odznaczenie Grande Médaille d'Or (2004). Członek Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego, Amerykańskiej Akademii Sztuk i Nauk, amerykańskiej Narodowej Akademii Nauk oraz Amerykańskiego Stowarzyszenia Popierania Nauk.

HUGH DAVID POLITZER, ur. w 1949 r., ukończył uniwersytet w Michigan w 1969 r., doktoryzował się na Uniwersytecie Harvarda pod kierunkiem S. Colemana. Obecnie jest profesorem w Caltechu w Pasadenie. Przyczynił się do rozwoju opisu głęboko nieelastycznego rozpraszania leptonów na hadronach oraz procesów elektroprodukcji przy użyciu nieabelowych teorii pola z cechowaniem. Wraz z T. Appelquistem przewidział szerokość rozpadu kwarkonium $c\bar{c}$, czyli mezonu będącego stanem związanym kwarków c oraz $\bar{c}$. Zajmował się także zastosowaniami symetrii chiralnych do opisu oddziaływań silnych i teoretycznymi aspektami kwantowych teorii pola. Piastował ważne stanowiska w administracji Caltechu. W roku 2003 otrzymał Nagrodę EPS.

FRANK WILCZEK, ur. w 1951 r., polskiego pochodzenia. Ukończył uniwersytet w Chicago, obecnie pracuje w Massachusetts Institute of Technology w Cambridge. Jako doktorant Grossa na uniwersytecie w Princeton pracował nad zastosowaniem nieabelowych teorii z cechowaniem do opisu oddziaływań silnych na małych odległościach. Wniósł istotny wkład w zrozumienie fizycznych i kosmologicznych konsekwencji ewentualnego występowania w przyrodzie tzw. aksjonów. Odkrył niekonwencjonalne statystyki kwantowe (eniony) znajdujące zastosowanie w teorii fazy skondensowanej i znacznie przyczynił się do ich zbadania. Zajmuje się też własnościami materii hadronowej w bardzo wysokich temperaturach i gęstościach. Zaproponował i aktywnie rozwija nowe podejście (zwane „colour-flavour locking") do badania naruszenia symetrii chiralnej w chromodynamice kwantowej i jej struktury fazowej. Za swe osiągnięcia uhonorowany został Medalem Diraca (1994), Nagrodą im. Michelsona–Morleya (2002), Medalem Lorentza Królewskiej Holenderskiej Akademii Sztuk i Nauk (2002), a w roku 2003 Nagrodą Lilienfelda Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego i Nagrodą EPS. Jest członkiem amerykańskiej Narodowej Akademii Nauk, Amerykańskiej Akademii Sztuk i Nauk oraz Holenderskiej Akademii Nauk.

Kropki kwantowe w biotechnologii i medycynie

Danuta Frąckowiak, Ewa Staśkowiak, Jędrzej Łukasiewicz

Wydział Fizyki Technicznej, Politechnika Poznańska

Quantum dots in biotechnology and medicine

Abstract: The structure and optical properties as well as the corresponding absorption and fluorescence spectra of small semiconductor nanocrystalline balls also known as quantum dots are described. Their emerging applications in biotechnology, biology and medicine are reviewed.

Danuta Frąckowiak dedykuje ten artykuł, łącząc wyrazy wdzięczności, profesorowi Józefowi Hurwicowi, który przed laty cierpliwie publikował w Problemach jej pierwsze popularnonaukowe notatki.

Wstęp

Co się kryje pod nieco niepoważną, lecz przemawiającą do wyobraźni nazwą kwantowych kropek? Chodzi tu o półprzewodnikowe kuleczki o średnicy zwykle kilku nanometrów[1]. Te krystaliczne, kolorowo świecące obiekty są w ostatnich latach ogromnie modne, o czym można się łatwo przekonać, pytając w internetowej wyszukiwarce o „quantum dots" (QDs – to ich angielska nazwa). Prac na ten temat ukazuje się ostatnio bardzo dużo i wszystkie są bardzo optymistyczne – wychwalają kwantowe kropeczki i wróżą im szerokie zastosowania. Niniejszy artykuł opiera się przede wszystkim na przeglądowych publikacjach [1–5].

Różne nanokryształki zabarwione samoistnie lub sztucznie – przez przyłączenie barwników – znajdują liczne zastosowania techniczne. Na przykład, koloidalne warstwy zawierające nanokryształy TiO_2 lub Al_2O_3 pokryte warstewkami barwników, np. naturalnego pigmentu roślinnego – chlorofilu – lub syntetycznego barwnika – ftalocyjaniny – są stosowane z powodzeniem w układach konwersji energii świetlnej na elektryczną (ang. DSSC, dye sensitized solar cells). Warstwy takie podczas ich oświetlania wydajnie wytwarzają prąd elektryczny [6]. Nanokryształy znajdują też wiele zastosowań w mikroelektronice i technologii materiałów.

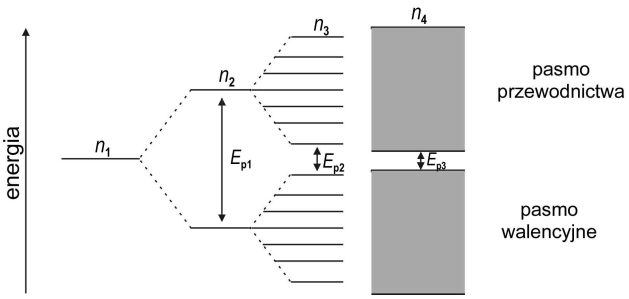
W tym artykule zajmiemy się jedynie zastosowaniami półprzewodnikowych nanokryształów – kropek kwantowych – w biologii, biotechnologii i medycynie. Jakie to są lub mogą być zastosowania? Po pierwsze, we fluorescencyjnej mikroskopii do badania struktury komórek różnych organizmów i jej zmian. Jeśli kropki o różnych rozmiarach, świecące – w wyniku oświetlenia falą o tej samej długości – różnymi barwami, przygotujemy w ten sposób, że będą się przyłączać do rozmaitych elementów komórki, i zrobimy zdjęcia przez odpowiednie filtry przepuszczające światło kropek tylko jednego typu, to potem możemy otrzymać pseudobarwne zdjęcie próbki, nakładając na siebie odbitki tych zdjęć [1]. Jeśli zrobimy serię takich zdjęć w różnych chwilach po błysku lasera oświetlającego próbkę, to możemy prześledzić kinetykę szybkich reakcji zachodzących w komórce. Przyłączając do kropek molekuły, które zmieniają ich świecenie w wyniku reakcji zachodzącej ze składnikami próbki, możemy ustalić obecność badanych substancji w próbce i ich stężenie. Jest to pożyteczne np. przy badaniu zatrucia środowiska, bo można w jednej próbce umieścić wiele rozmaitych kropek-wskaźników i sprawdzać jednocześnie obecność różnych szkodliwych związków. Bada się też substancje zawarte w cytoplazmie komórek nowotworowych. Wykonywano udane próby zastosowania kropek w fotodynamicznej diagnostyce (ang. PDD) nowotworów do lokalizacji komórek nowotworowych w organizmach zwierząt. Można też badać błony biologiczne, przyłączając różne typy kropek do podjednostek membrany, bada się również ważne w genetyce i biologii procesy, którym podlega DNA, oddziaływanie enzymów z różnymi makromolekułami itp. Przed wejściem w modę kwantowych kropek do wszystkich tych celów używano fluorescencyjnych znaczników, barwników syntetycznych lub naturalnych.

Własności optyczne kropek kwantowych

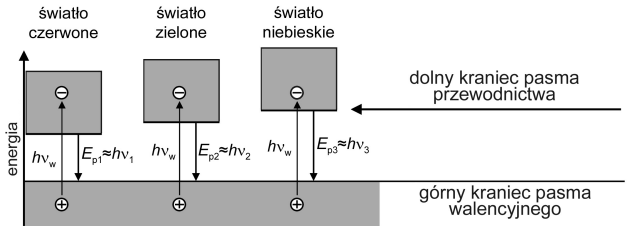
Aby dziwne własności kropek stały się zrozumiałe, musimy najpierw je choćby w wielkim skrócie i w bar-

[1] Kropki kwantowe to także popularna nazwa struktur o ograniczonej geometrii (quasipunktowych) wytwarzanych na podłożach kryształów półprzewodnikowych (patrz np. *Postępy Fizyki* **49**, 1 (1998)) – red.

dzo przybliżony sposób opisać. W wyniku oddziaływania elektronów z innymi elektronami i atomami oraz zakazu Pauliego, niepozwalającego na współistnienie w układach zamkniętych (atomach, cząsteczkach lub całych kryształach) elektronów o identycznych wszystkich liczbach kwantowych, poziomy energetyczne elektronów w kryształach ulegają rozszczepieniu i przesunięciom. Efekty te zależą od liczby wzajemnie oddziałujących molekuł (rys. 1). Przy ich dużej liczbie, w „dużym" nanokryształku, tworzą się z tych bardzo bliskich dozwolonych poziomów energetycznych całe pasma. Te kryształki lub zlepki molekuł są jednak duże tylko z punktu widzenia atomowego mikroświata. W makroskopowych kryształach zamiast dyskretnych poziomów energetycznych elektronów w atomach powstają ciągłe pasma: pasmo walencyjne i pasmo przewodnictwa. W półprzewodnikach przerwa energetyczna E_p jest stosunkowo wąska, więc do przeniesienia elektronu do pasma przewodnictwa wystarczy foton wzbudzający o niewielkiej energii $h\nu_\mathrm{w} > E_\mathrm{p}$ (rys. 2). Zmniejszenie liczby molekuł w układzie zwiększa tę przerwę (rys. 1), co potwierdzają doświadczenia z kropkami.



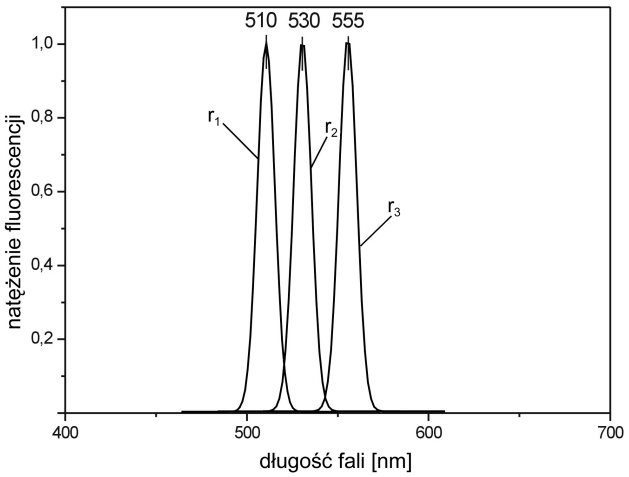
Rys. 1. Rozszczepienie poziomów energetycznych elektronów w układzie n oddziałujących atomów; $n_1 = 1$, $n_2 = 2$, $n_3 > n_2$, $n_4 \gg n_3$ (E – szerokość przerwy energetycznej)



Rys. 2. Zmiana barwy emitowanego światła przy zmniejszaniu rozmiaru kropek; $h\nu_\mathrm{w}$ – energia fotonu wzbudzającego, $E_{\mathrm{p}i}$ – szerokość przerwy energetycznej, $h\nu_i$ – energia emitowanych fotonów, $\oplus$ – dziura, $\ominus$ – elektron

Elektrony przeniesione do pasma przewodnictwa wskutek pochłonięcia kwantu energii wzbudzającej fali świetlnej $h\nu_\mathrm{w}$ mogą się poruszać – ruchy te są zależne od temperatury oraz pól: elektrycznego i magnetycznego. Długość fali de Broglie'a związanej z tymi elektronami zależy od warunków brzegowych. Załóżmy w bardzo dużym przybliżeniu, że elektron w pasmie przewodnictwa można traktować jak cząstkę swobodną i że jego praca wyjścia z półprzewodnikowego kryształka jest nieskończenie duża. Wtedy elektron jest zamknięty w pudle potencjału o rozmiarach kryształka, a długość fali z nim związanej maleje wraz z rozmiarami pudła. Przy tym rośnie energia elektronu, więc dolny kraniec pasma przewodnictwa przesuwa się w kierunku większych energii.

Zmniejszenie energii elektronu w pasmie przewodnictwa zwykle nie powoduje emisji światła. Gdy więc elektron spada z powrotem z tego pasma do pasma walencyjnego i łączy się z dziurą, wysyłany jest foton o energii w przybliżeniu równej szerokości przerwy energetycznej: $h\nu \approx E_\mathrm{p}$. Przy powrocie do pasma walencyjnego elektron emituje zatem falę, której długość zależy od szerokości przerwy energetycznej, a więc barwa emitowanego światła zależy od rozmiarów kropki – im mniejsza kropka, tym krótsza fala (rys. 2). Położenie pasm emisji możemy więc regulować przez zmianę rozmiarów kropek. Dla danego materiału półprzewodnikowego zakres tej regulacji długości fali może wynosić kilkaset nanometrów (300–400 nm dla ZnS, 400–700 nm dla CdS, 700–2500 nm dla PbS). Jeśli zastosujemy kropki z różnych materiałów półprzewodnikowych, to uzyskamy możliwość wzbudzania emisji promieniowania od bliskiego nadfioletu do bliskiej podczerwieni – a więc także w całym zakresie światła widzialnego. Pasma emisyjne kropek są wąskie (rys. 3), a ponieważ można je wzbudzać dużo krótszymi falami, rozproszone promieniowanie wzbudzające łatwo eliminuje się metodą rejestracji emitowanego światła przez odpowiedni filtr.

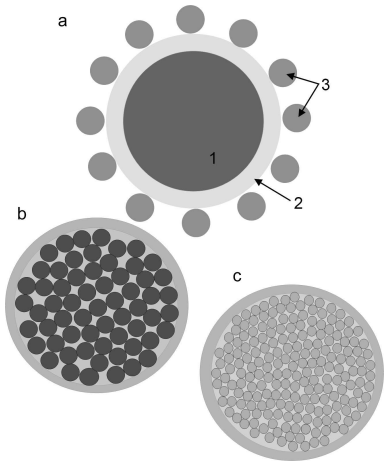


Rys. 3. Unormowane widma emisyjne kropek z CdSe z warstwą ochronną ZnS; długość fali wzbudzającej 430 nm [3]

Budowa i wytwarzanie kropek kwantowych

Dotychczas przedstawiliśmy tylko zalety kropek, nie mówiąc nic o zawiłej technologii ich produkcji, ani o konkurujących z nimi w tych zastosowaniach innych fluoroforach – fluoryzujących barwnikach synte-

tycznych i naturalnych. Procedury produkcji kropek, opracowane w dużych, dobrych laboratoriach i chronione patentami zakupionymi przez konkurujące ze sobą firmy amerykańskie, są niełatwe. Każda z firm specjalizuje się w produkcji określonych typów kropek, a każdy ich typ ma określone przeznaczenie. Uproszczony schemat kropki przedstawia rys. 4a. Środkowe kuliste jądro kropki (1) stanowi kryształ półprzewodnikowy (najczęściej CdTe lub PbSe) o średnicy zwykle 2–3 nm i o określonej strukturze. Jej zaburzenia zmieniają własności kropki, a więc należy unikać defektów i domieszek innych materiałów. Powierzchnia kropki nie powinna ulegać zmianom ani podczas jej przechowywania, ani oświetlania w trakcie wykonywania eksperymentu. Jeśli kropki mają być używane do znakowania elementów komórek żywych organizmów, to ich powierzchnia powinna być hydrofilowa, choć może to utrudnić przenikanie kropek przez błony komórek. Kropki nie mogą również agregować, bo to w istotny sposób zmienia ich widma emisji.



Rys. 4. Struktura kropki (a), 1 – półprzewodnikowe jądro kropki, 2 – warstwa ochronna, 3 – molekuły czynne; multikropki w osłonie z polimeru (b–c, barwy emisji zależą od wymiaru małych kropek)

Aby spełnić te wszystkie warunki, otacza się jądro kropki warstwą ochronną (2 na rys. 4a). Bywa to albo inny półprzewodnik, np. ZnS, albo polimer lub specjalna mieszanina polimerów. Często stosuje się jako warstwę ochronną polistyren, bo jego własności powierzchniowe są dobrze zbadane. Na tę warstwę nakłada się oddziałujące makromolekuły (3 na rys. 4a), np. białka. Jeśli mamy możliwość zwiększenia wymiarów znacznika fluorescencyjnego, to możemy zamknąć dużą liczbę (np. 1000) kropek o tych samych rozmiarach w jednej osłonie polimerowej (rys. 4b). Taka „zbiorowa kropka" (multikropka) świeci dużo mocniej niż pojedyncza. Barwa światła wysyłanego przez kropkę zbiorową zależy od rozmiarów kropek składowych (rys. 4c).

Multikropki kwantowe znajdują zastosowanie m.in. w badaniach składników nowych lekarstw cytometrem przepływowym. Skład i budowa zewnętrznych warstw kropek (3 na rys. 4a) ściśle zależą od ich przeznaczenia, bowiem warstwa ta musi oddziaływać z badaną, obecną w próbce substancją. Niektórzy producenci proponują zestawy różnych biologicznych molekuł, które badacz może sam nałożyć na ochronną warstwę kropki. Inni producenci wytwarzają kropki już przystosowane do konkretnych badań. Małe zmiany w procedurze produkcji powodują duże zmiany własności kropek, toteż ta niełatwa i znana we wszystkich szczegółach jedynie producentowi technologia musi być starannie przestrzegana.

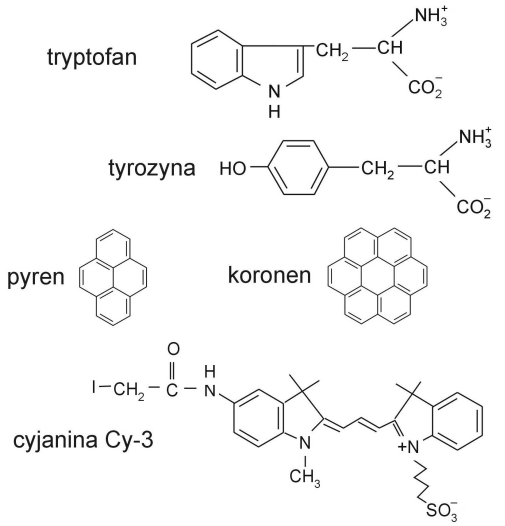
Kropki nie są tanie i wprowadzenie ich do nowego typu badań wymaga uciążliwych prac wstępnych. Niedawno w State University of New York w Buffalo opracowano nową metodę produkcji i wyznaczania rozmiarów kropek [4]. Produkcja ta jest przeprowadzana w temperaturze pokojowej, co znacznie obniża koszty, i polega na wytworzeniu kropelek heptanu zawieszonych w formamidzie i stabilizowanych przez surfaktant (środek powierzchniowo czynny). Otrzymuje się w ten sposób jednorodną zawiesinę nanokropelek o rozmiarach kilkudziesięciu nanometrów, które pełnią funkcję minireaktorów wytwarzających nanokryształki. Przez kontrolę rozmiarów kropelek steruje się rozmiarami wzrastających syntetycznych kryształków. Synteza zachodzi wewnątrz kropelek – jeden składnik jest już w nich zawarty, inne są dostarczane w bąbelkach przedmuchiwanych przez zawiesinę kropelek [4]. W tym układzie kryształy wzrastają w temperaturze pokojowej; dzięki małym rozmiarom „reaktorów" do syntezy wystarcza ciepło przebiegających w kroplach reakcji egzotermicznych. Rozmiary syntetyzowanych nanokryształków mogą być zmieniane przez zmianę rozmiarów minireaktorów lub zmianę stężenia substancji, z których powstają kropki. Otrzymano kropki o różnych rozmiarach – od 2 nm aż do 8 nm [4]. Rozmiary wyznaczano z położeń pasm emisyjnych. Autorzy chcą stosować tę nową metodę także do syntezy kropek z innych materiałów.

Działanie kropek kwantowych jako fluoroforów

Jak wspomnieliśmy, w celu badania reakcji zachodzących między molekułami biologicznymi na warstwę ochronną kropek nakłada się biomolekuły zabarwione naturalnymi pigmentami lub sztucznie przyłączonymi barwnikami (rys. 4a). Zewnętrzna warstwa biomolekuł może być przyłączana do półprzewodnikowej lub polimerowej warstwy ochronnej przy wykorzystaniu różnych mechanizmów: 1) przez kowalencyjne wiązania z warstwą ochronną, 2) przez wiązania wodorowe, 3) za pomocą oddziaływań elektrostatycznych, jak w przypadku ujemnie naładowanych kwasów lipidowych przyłączających z kolei maltozę wiążącą białka [2]. Koloidalne próbki lub łańcuchy DNA udaje się osadzić wprost na jonach Cd^{2+}, których jest zwykle więcej na powierzchni niż w środku nanokryształka CdS. Liczba molekuł przyłączonych do jednej

kropki zależy od ich rozmiarów: w przypadku dużych makromolekuł jest ich zwykle kilka, lecz dla mniejszych, np. oligonukleotydów, może ich być nawet 24. Rodzaj przyłączonych molekuł w tej warstwie zależy od projektowanego zastosowania próbnika.

Ważnym zjawiskiem umożliwiającym określenie odległości między molekułami, ich oddziaływań i ich zmian konformacyjnych jest foersterowskie rezonansowe przekazywanie energii (ang. FRET) [7,8]. Rozpatrzmy zastosowanie tego zjawiska na przykładzie kropek pokrytych z wykorzystaniem oddziaływań elektrostatycznych białek wiążących maltozę (ang. MBP), na które z kolei nałożona jest warstwa ligandów kwasu dichlorolipidowego. Do próbnika wprowadza się związki fluoryzujące (fluorofory). Często są to barwniki cyjanowe (np. Cy-3, rys. 5), które są przyłączane do białek MBP. Wzbudzamy półprzewodnikowe jądra kropek, ale one w obecności barwnika nie świecą lub świecą słabo, bo przekazują energię wzbudzenia przez FRET do cyjaniny, która zaczyna świecić, choć oświetlamy próbkę promieniowaniem o długościach fali nieabsorbowanych przez ten barwnik (rys. 6a). Dobierając korzystne dla wydajności FRET rozmiary kropek, obserwujemy spadek natężenia ich emisji i wzrost natężenia emisji barwnika. Donorem (D) energii jest kropka, akceptorem (A) – barwnik.



Rys. 5. Wzory strukturalne niektórych fluoroforów naturalnych i syntetycznych

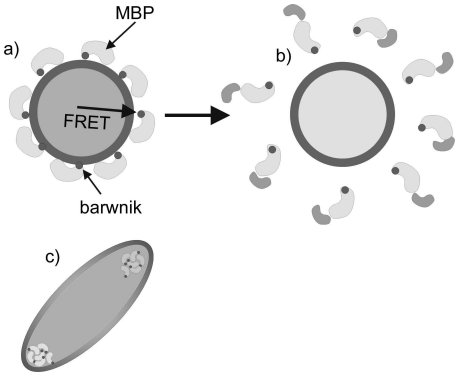
Z pomiaru całkowitego natężenia pasm emisji w nieobecności i w obecności D otrzymujemy dokładne odległości między D i A, uwzględniając ewentualną emisję A bez obecności D. Trzeba też wziąć pod uwagę liczbę (n) molekuł donora D przyłączonych do kropki. Po odłączeniu MBP od kropki barwnik przestaje świecić w wyniku reakcji z innymi makromolekułami, a kropki świecą nadal (rys. 6b). Wydajność (E_{ET}) przekazywania poprzez mechanizm FRET energii od D do A jest dana prostym wzorem

$$E_{\mathrm{ET}} = 1 - \frac{F_{\mathrm{DA}}}{F_{\mathrm{D}}}, \tag{1}$$

gdzie F_{DA} oraz F_{D} są odpowiednio całkowitym natężeniem fluorescencji donora D w obecności akceptora A i bez niego. Natomiast odległość między D i A dla n molekuł akceptora w bliskości donora otrzymujemy ze wzoru [7,8]

$$R_n = R_0 \left[\frac{n(1 - E_{\mathrm{ET}})}{E_{\mathrm{ET}}} \right]^{1/6}, \tag{2}$$

gdzie R_0 oznacza odległość, w której wydajność przekazywania energii D $\rightarrow$ A jest równa wydajności zaniku wzbudzenia donora. Tę drugą wydajność wyznaczamy na podstawie zmierzonych czasów zaniku emisji D. Czasy te oczywiście skracają się przy wygaszeniu świecenia poprzez FRET. Ich pomiary są bardzo precyzyjne. Na wydajność przekazywania energii wpływa zmiana konformacji białek, zmieniająca odległość D–A, a więc z badania mechanizmu FRET mamy też informacje o takich zmianach.

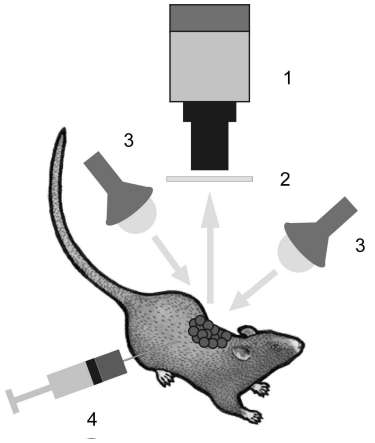


Rys. 6. Oddziaływanie między kropką a barwnikiem przyłączonym do białek (MBP); a) dzięki przekazywaniu energii wzbudzenia barwnik świeci; b) po odłączeniu MBP w wyniku reakcji z innymi makromolekułami barwnik nie świeci, kropki świecą; c) kropki o różnych rozmiarach przyłączane są do różnych elementów komórki

Jeśli mamy kilka kropek o różnych rozmiarach, to ich pasma emisji w różnym stopniu pokrywają się z absorpcją barwnika przyłączonego do białek. Im to pokrycie jest większe, tym efekt FRET jest wydajniejszy. Obserwujemy więc różne czasy zaniku świecenia kropek o różnych rozmiarach. Świecenie kropek zanika wolniej niż emisja barwników, co pozwala ze zmian czasów zaniku mierzonych w różnych chwilach po błysku lasera (np. w dziewięciu odstępach czasu co 2 ns) wnioskować o kinetyce reakcji, którym ulegają zewnętrzne białka. Jeśli w wyniku tych reakcji zabarwione białka zostaną odłączone od kropek (rys. 6b), to świecenie kropek znów się pojawia.

Przy zastosowaniach kropek w PDD i PDT (fotodynamicznej terapii) nowotworów [9,10] istotne jest,

aby „odróżniały" one dobrze komórki chore (nowotworowe) od zdrowych. Jest trochę kłopotliwe, że po wprowadzeniu do żywego organizmu kropki mogą agregować. Problemem tym zajęła się grupa badaczy z Emory University w Atlancie [5], która opracowała warstwy czynne kropek pozwalające wprowadzać kropki do organizmów żywych. Tę warstwę zewnętrzną o grubości 1 nm tworzy tlenek tri-*n*-oktylofosfiny (TOPO). Warstwa TOPO nie ulega zmianie w zakresie od pH = 1 do pH = 14. Jest ona hydrofobowa i przeciwdziała sklejaniu się kropek w zawiesinie. Kropki pokryte warstwą TOPO mają zwykle średnice 10–15 nm. Wykazano, że świetnie nadają się do zlokalizowania komórek nowotworowych [5]. Na rysunku 7 pokazano badanie lokalizacji komórek nowotworowych u myszy [1]. W metodzie tej wykorzystuje się fakt, że kropki przyłączają się do różnych elementów komórek (rys. 6c).



Rys. 7. Badania lokalizacji nowotworu w myszach; 1 – mikroskop, 2 – filtr, 3 – źródła światła, 4 – strzykawka z kropkami kwantowymi

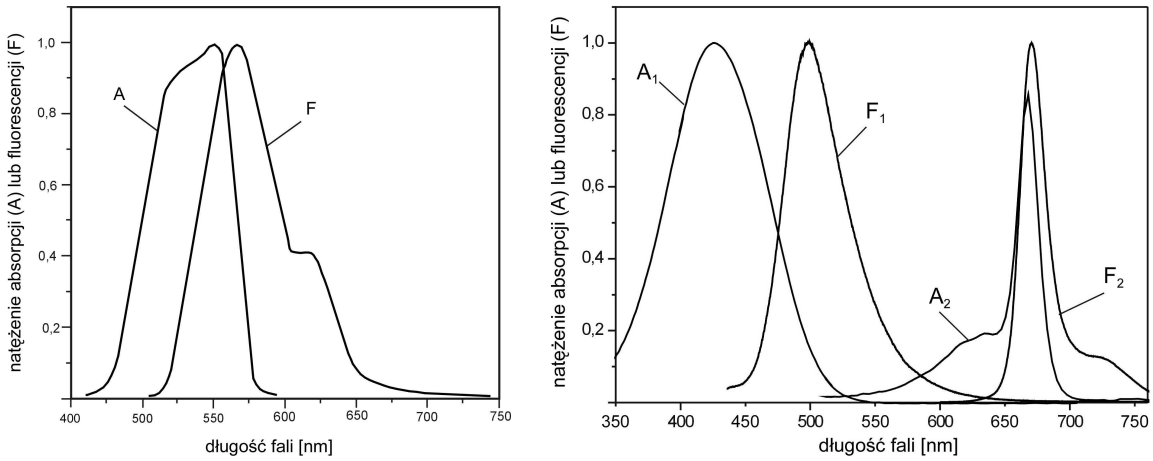
Porównanie przydatności kropek kwantowych i fluoroforów barwnikowych

Wskaźniki fluorescencyjne dzielimy na wewnętrzne (zawarte w badanej próbce biologicznej) i zewnętrzne – znaczniki (wprowadzone do preparatu w celu oznakowania jakichś molekuł). Nowoczesne omówienie barwnikowych wskaźników fluorescencyjnych można znaleźć w książce [8]. Znaczników są całe tysiące i można je dobrać do danego zadania, posługując się katalogami opisującymi ich własności. Fluoroforów wewnętrznych jest dużo mniej, ale też są one bardzo użyteczne w badaniach komórek różnych organizmów.

W organizmach fotosyntetyzujących jest bardzo wiele chlorofili i bakteriochlorofili, których fluorescencja – choć w roztworach intensywna – w komórkach zależy od ich sąsiedztwa i funkcji, którą w nich pełnią. Wewnętrznymi fluoroforami białek są aromatyczne kwasy nukleinowe: tryptofan, tyrozyna (rys. 5) i fenyloanilina. Świecą one w zakresie krótkofalowym (250–400 nm) z dość niewielkimi wydajnościami fluorescencji (0,02–0,14), podczas gdy np. wydajność barwnika zielonych bakterii fotosyntetycznych bakteriochlorofilu *c* rozpuszczonego w etanolu wynosi 0,22) (kwantowa wydajność fluorescencji jest stosunkiem liczby fotonów wyemitowanych do liczby fotonów pochłoniętych). Wydajność fluorescencji tryptofanu silnie zależy od otoczenia, a więc jego emisja dostarcza informacji o zmianach konformacyjnych makromolekuł, tym bardziej że wiadomo, jakie grupy silnie wygaszają tę emisję. Przyłączenie do białka niektórych związków powoduje silny, dla pewnych białek nawet czterokrotny wzrost natężenia ich świecenia, podczas gdy forma utleniona tych samych znaczników nie ma wpływu na emisję danego białka. Silnie świecą też flawiny. W niektórych organizmach znajdują się fluoryzujące białka. W bakteriach fotosyntetycznych zwanych sinicami występują fluoryzujące kompleksy barwnikowo-białkowe – biliproteiny. Wiele informacji o przebiegu procesu fotosyntezy zachodzącego w sinicach można uzyskać właśnie z badań świecenia biliprotein. Ich grupy chromoforowe, biliny, też mogą znaleźć zastosowanie jako znaczniki. W niektórych rybach występują białka, których zielono świecące grupy tworzą się przez odpowiednie zwinięcie łańcuchów polipeptydowych [8]. Jak widać, naturalne fluorofory wewnętrzne dostarczają wielu cennych informacji o budowie i funkcjach tkanki organizmów. Z tymi fluoroforami kropki kwantowe nie mogą konkurować.

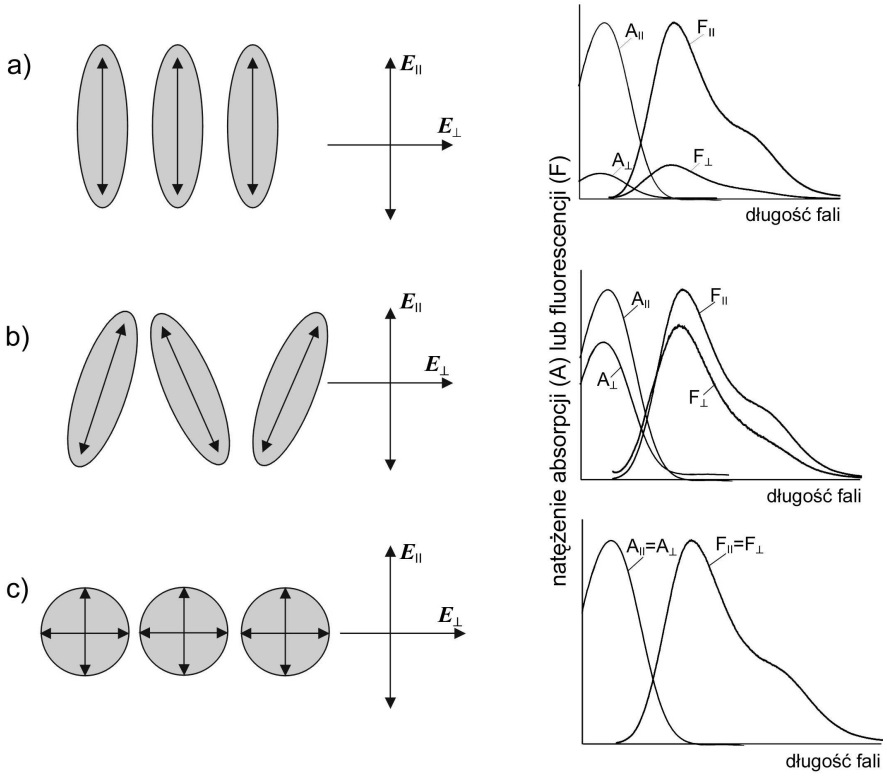
Niefluoryzujące składniki komórek znakuje się fluoroforami zewnętrznymi. Są one przyłączane do makromolekuł kowalencyjnie lub innymi „sposobami", podobnie jak makromolekuły przyłącza się do ochronnej warstwy kropek. Niekowalencyjne wskaźniki zwykle słabo świecą w roztworze wodnym, a lepiej po przyłączeniu do białek lub membran. Bardzo popularne są silnie świecące barwniki cyjanowe, które fluoryzują w różnych zakresach, np. Cy-3 (rys. 5) ma emisję z maksimum przy 570 nm, a Cy-7 przy 850 nm. Niestety, mają one bardzo małe przesunięcie stokesowskie, tj. przesunięcie pasma emisji w stosunku do pasma absorpcji, oraz szerokie (w porównaniu z pasmami kropek) pasma absorpcji i emisji (rys. 8). W tej sytuacji trudno się pozbyć domieszki światła wzbudzającego w obserwowanej emisji. Jeśli stosujemy kilka barwników absorbujących i emitujących w różnych zakresach widmowych, to musimy używać kilku źródeł światła wzbudzającego. Jest to procedura bardziej kosztowna i kłopotliwa niż przy kropkach „wielobarwnych", które można wzbudzić jednym laserem. Ponadto pasma absorpcji i emisji barwników są dużo szersze niż pasma kropek, więc trudno używać znaczników o zbliżonych barwach emisji. Czasy życia stanów wzbudzonych większości barwników są zbyt krótkie, aby można było obserwować przebiegi czasowe szybkich procesów zachodzących w makromolekułach.

Ale są i dobre strony zastosowań barwników. Znane są np. fluorofory, które spontanicznie łączą się z DNA i wykazują silny wzrost emisji po tym po-



Rys. 8. Unormowane widma absorpcji i fluorescencji: po lewej – cyjaniny Cy3, po prawej – merocyjaniny (wskaźnik 1) [8,10] i bakteriochlorofilu *c* (wskaźnik 2)

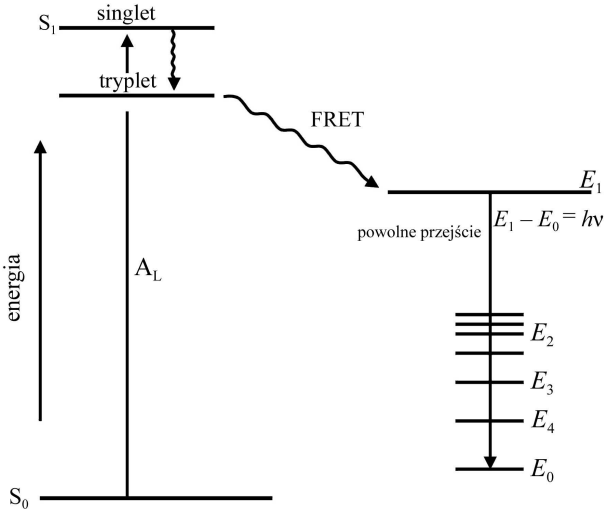
łączeniu. Niektóre znaczniki pozostają połączone nawet w czasie elektroforezy DNA. Tego kropki kwantowe nie potrafią! Są też specjalne próbniki wykazujące obecność jonów, np. Cl^-, Na^+ lub Ca^{2+}, oraz takie, które świecą, gdy badany enzym ulega rozszczepieniu. Znaczniki barwnikowe są często anizotropowe, tj. po uporządkowaniu wykazują inne natężenia absorpcji i emisji światła przy zmianie płaszczyzny polaryzacji padającego światła spolaryzowanego (rys. 9). Pomiary absorpcji i emisji w świetle spolaryzowanym dostarczają informacji o ułożeniu molekuł w próbce, a badania zmian polaryzacji wiązki emitowanej z upływem czasu – o obrotach molekuł lub ich części. Z kropkami, które mają symetrię kulistą, nie można prowadzić takich badań. Większość dotychczas szeroko stosowanych znaczników barwnikowych ma krótkie czasy zaniku emisji, ale obecnie są już znane i badane również związki o długich czasach zaniku, np. pyren ma czas życia emisji ok. 100 ns, a koronen – ok. 200 ns, ale te znaczniki nie są niestety anizotropowe.



Rys. 9. Modele molekuł oraz ich widma absorpcji i fluorescencji w świetle spolaryzowanym: a) wydłużone, wysoce uporządkowane molekuły absorbujące i emitujące znacznie silniej światło o wektorze natężenia pola elektrycznego $\boldsymbol{E}_{\parallel}$ równoległym do dłuższej osi (strzałki) niż o wektorze $\boldsymbol{E}_{\perp}$ do niej prostopadłym, b) te same molekuły gorzej uporządkowane, c) molekuły symetryczne absorbujące podobnie światło spolaryzowane w obu płaszczyznach. Kierunek wiązki światła jest prostopadły do płaszczyzny rysunku.

Znaczniki lantanowcowe

Lantanowce wykazują w wodnych roztworach jeszcze bardziej długotrwałą fluorescencję, gdyż emisja zachodzi w ich atomach z poziomu wzbronionego (rys. 10). Absorpcja lantanowców jest liniowa i bardzo słaba, ale ich atomy można wzbudzić poprzez FRET za pośrednictwem innych związków. Widma emisji lantanowców w roztworze są liniowe, podobnie jak zwykłe widma atomów w gazach. Można podstawić jony lantanowców, np. Eu^{3+} lub Tb^{3+}, w miejsce wapnia w białkach. Zaniki emisji tych przyłączonych jonów przebiegają przede wszystkim poprzez niepromieniste procesy zachodzące w wyniku ich oddziaływania z wodą. Badając czasy zaniku emisji próbki w wodzie (H_2O) i w ciężkiej wodzie (D_2O), można obliczyć liczbę molekuł wody przyłączonych w miejscu wiązania wapnia. Jeśli białko nie wiąże lantanowców, to można podstawić najpierw „pośrednika", który – przyłączony do białka – przyłączy ten metal.



Rys. 10. Schemat poziomów energetycznych E_i lantanowca (terbu); A_L – absorpcja pomocniczego ligandu, $E_1 \rightarrow E_0$ – przejście wzbronione (powolna emisja)

Stosuje się też jako wskaźniki kompleksy innych metali z ligandami. W kompleksach zachodzi przejście z przeniesieniem ładunku z metalu do ligandu, które – jako częściowo wzbronione – jest powolne. Są to układy bardzo trwałe, umożliwiające pomiary anizotropii emisji i do tego stopnia obiecujące, że choć otrzymano dotychczas dopiero wstępne wyniki, przewiduje się rozwój badań w tym kierunku [8]. Czasem jako znaczników używa się metali, których emisja zależy od ich kontaktu z wodą. Póki są ukryte w zwiniętych peptydach białek, ten kontakt jest słaby, lecz zwiększa się przy zmianach konformacyjnych białka, gdy wskaźnik kontaktuje się z wodą [8].

Kropki kwantowe w medycynie?

Bardzo ważnym zastosowaniem barwników jest fotodynamiczna terapia (PDT) i diagnostyka (PDD) nowotworów [4,10]. W obu metodach stosuje się barwniki – uczulacze, które wnikają w chore komórki z większą wydajnością niż w komórki zdrowe. Do diagnostyki wykorzystuje się silnie fluoryzujące związki, które – gromadząc się przede wszystkim w komórkach nowotworowych – po oświetleniu umożliwiają dzięki swej fluorescencji lokalizację nowotworu [8]. Związki te muszą być mało toksyczne i powinny być szybko wydalane ze zdrowych komórek. Czy kropki kwantowe nadają się do takich medycznych zastosowań? Jest to ciągle otwarte zagadnienie. Można oczywiście przygotować takie kropki, które będą łatwiej wnikały w chore niż w zdrowe komórki organizmu. Nie jest to łatwe, ale jest możliwe [5]. Umiemy już wprowadzać kropki do żywych komórek [1–3,5] i były pierwsze próby obrazowania za ich pomocą zaatakowanych nowotworem węzłów chłonnych zwierząt. Ale konieczność wprowadzenia do organizmu dożylnym zastrzykiem zawartych w kropkach, szkodliwych dla organizmów metali ciężkich nasuwa wiele wątpliwości. Co prawda ilość tych metali jest bardzo mała, ale tempo ich wydalania z organizmu i ich ewentualny wpływ na organizm wymagają dalszych starannych badań [1–6]. Podobne wątpliwości nasuwają się przy badaniach obecności toksyn w środowisku, ale w tym przypadku trudności są mniejsze, bo można pobrać do badań małą próbkę (np. wody z jeziora) i po zdiagnozowaniu ją zniszczyć.

Diagnozowanie guzów nowotworowych możemy podzielić na czynne i bierne [5]. Szybko narastające guzy mają zwykle w swym sąsiedztwie wiele naczyń krwionośnych. Bierna (pasywna) metoda polega na wprowadzeniu kropek do tych naczyń, podczas gdy metoda aktywna wymaga wprowadzenia barwnika do wnętrza komórek nowotworowych. Do każdej z tych metod trzeba dobrać nieco inne kropki. Wielu autorom [5] udało się już dobrze zdiagnozować nowotwory u zwierząt [1], co niesie nadzieje na dalsze zastosowania medyczne.

Podsumowanie

Porównując kropki kwantowe z innymi znacznikami fluorescencyjnymi widzimy, że mają one następujące wady:

- są drogie i trudniej dostępne niż barwniki,
- nie mogą być umieszczane we wszystkich interesujących elementach komórek,
- są izotropowe, a więc spektroskopia polaryzacyjna ma w ich przypadku małe zastosowanie,
- zawierają toksyczne metale ciężkie.

Mają one jednak również liczne zalety:

- możliwość wzbudzania kropek o różnym widmie emisji falą o tej samej długości (tańsza aparatura, łatwiejszy eksperyment),
- wąskie pasma emisji, które mogą być łatwo wzbudzane dużo krótszymi falami świetlnymi,
- duża trwałość przy przechowywaniu i oświetleniu,
- długie czasy zaniku emisji.

Niektóre z tych zalet mają również badane obecnie intensywnie kompleksy metali. Na pewno znacznik fluorescencyjny musi być starannie dobrany do badanej próbki, a zastosowanie kilku różnych wskaźników do tej samej próbki umożliwia zgromadzenie większej ilości informacji. Z całą pewnością warto nasilić badania wszystkich typów fluoroforów, które mogą znaleźć zastosowania w biologii, biotechnologii i medycynie.

Obie autorki (DF i ES) dziękują Komitetowi Badań Naukowych za przyznanie grantu 3P05B 073 24.

Literatura

[1] B.D. Butkin, „Quantum dots lend simplicity", *Biophotonics International*, May 2004, s. 34.
[2] A.J. Sutherland, „Quantum dots as luminescence probes in biological systems", *Current Opinion in Solid State & Materials Science* **6**, 265 (2002).
[3] A.R. Clapp i in., „Fluorescence Resonance Energy Transfer Between Quantum Dots Donors and Dye-Labeled Protein Acceptors", *J. Am. Chem. Soc.* **126**, 301 (2004).
[4] H. Hogan, „Dialing in quantum dots", *Biophotonics International*, September 2004, s. 27.
[5] K. Robinson, „Quantum dot coating improves specificity of tumor targeting and imaging", *Biophotonics International*, September 2004, s. 52.
[6] Y. Amao, T. Komori, „Bio-photovoltaic conversion device using chlorine-e_6 derived from chlorophyll from *Spirulina* adsorbed on a nanocrystalline TiO_2 film electrode", *Biosens. Bioelectron.* **19**, 843 (2004).
[7] R.M. Clegg, „The vital contributions of Perrin and Foerster", *Biophotonics International*, September 2004, s. 42.
[8] J.R. Lakowicz, *Principles of Fluorescence Spectroscopy* (Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, Dordrecht, London, Moscow 1999), s. 63–92.
[9] D. Frąckowiak, A. Dudkowiak, A. Ptak, „Zdrowe i niezdrowe słońce", *Wiedza i Życie*, zesz. 8/2003, s. 30.
[10] E. Staśkowiak, A. Dudkowiak, I. Hanyż, K. Wiktorowicz, D. Frąckowiak, „Spectral properties of stilbazolium merocyanines – potential sensitizers in photodynamic therapy and diagnosis. Part I. Merocyanines in model systems", *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* **163**, 127 (2004).

Prof. DANUTA FRĄCKOWIAK (z domu Jabłońska) jest emerytowanym profesorem zwyczajnym Politechniki Poznańskiej. Maturę zrobiła na tajnych kompletach w Wilnie, gdzie była także żołnierzem AK. Magisterium z fizyki teoretycznej oraz doktorat i habilitację z fizyki doświadczalnej uzyskała na UMK w Toruniu. Jest biofizykiem i zajmuje się wykorzystaniem spektroskopii molekularnej do wyjaśnienia procesów zachodzących w aparacie fotosyntetycznym organizmów oraz do wyboru fotouczulaczy i wskaźników fluorescencyjnych właściwych w zastosowaniach medycznych. Jest autorem lub współautorem ponad 200 publikacji w czasopismach naukowych oraz około 30 rozdziałów książek i artykułów przeglądowych, promotorem 25 doktorów, z których 11 jest już po habilitacji. Ma za sobą przeszło 5 lat pracy w USA, Kanadzie i Japonii jako wizytujący badacz lub profesor. Jest honorowym członkiem Polskiego Towarzystwa Biofizycznego oraz członkiem Towarzystw Fotobiologicznych: Amerykańskiego i Europejskiego. Ma dwoje dzieci i 3 wnuków. Jej hobby to praca naukowa, wnuki i pies.

Mgr inż. EWA STAŚKOWIAK ukończyła studia na Wydziale Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej w zakresie fizyki materiałów i nanotechnologii. Obecnie jest słuchaczem Studium Doktoranckiego „Technologia Chemiczna i Aparatura Badawcza". Wykonuje pod opieką dr hab. Aliny Dudkowiak pracę na temat badania uczulaczy do fotodynamicznej terapii i diagnostyki medycznej.

Dr JĘDRZEJ ŁUKASIEWICZ jest absolwentem Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Doktorat z fizyki molekularnej (promotor prof. Danuta Wróbel) obronił na Wydziale Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej, gdzie jest obecnie asystentem w Zakładzie Fizyki Molekularnej.

Na tropie egzotycznych hadronów*

Alex R. Dzierba[a], Curtis A. Meyer[b], Eric S. Swanson[c]

[a] *Department of Physics, Indiana University, Bloomington, Indiana, USA*

[b] *Department of Physics, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA*

[c] *Department of Physics and Astronomy, University of Pittsburgh, Pennsylvania, USA*

The search for QCD exotics

Abstract: Particles predicted by the theory of quantum chromodynamics help explain why the fundamental building blocks of matter are impossible to isolate.

Wstęp

Przez ostatnie ćwierćwiecze fizycy podejrzewali, że musi istnieć subatomowa cząstka niepodobna do żadnej innej – zbudowana wyłącznie z gluonów, które są „klejem" spajającym materię na najbardziej fundamentalnym poziomie. Działają one w obrębie jądra każdego atomu, wiążąc naładowane składniki, które w przeciwnym wypadku by się odepchnęły. Ale czy to możliwe, żeby ów klej odpowiedzialny za siły sam istniał również jako forma materii? Ostatnio poszukiwania nieuchwytnej cząstki zbudowanej wyłącznie z gluonów, zwanej kulą gluonową (ang. glueball), nabrały rozpędu, bo coraz więcej jest oznak jej istnienia. Badacze znaleźli również ślady innych podobnie egzotycznych cząstek. Po ponad stu latach od odkrycia pierwszej cząstki subatomowej – elektronu – fizycy stoją u progu poznania całkiem nowego rodzaju materii.

Rozwój badań struktury materii

Aby w pełni zrozumieć, dlaczego fizycy, tacy jak my, są zapalonymi poszukiwaczami kul gluonowych i innych podobnych cząstek egzotycznych, potrzebna będzie odrobina wysiłku. Chyba najlepiej zacząć od krótkiej dygresji przedstawiającej historię naszej dziedziny.

Od odkrycia elektronu w 1897 r. do odkrycia protonu minęło 14 lat, a do znalezienia neutronu – następnych 21 lat. W roku 1932 wydawało się, że elektron, proton i neutron wystarczą do wyjaśnienia całej fizyki cząstek elementarnych i pojawiło się komfortowe poczucie, że świat subatomowy został całkowicie poznany. Niestety, to samozadowolenie miało wkrótce ustąpić miejsca irytacji i zamieszaniu.

W gruncie rzeczy problemy zaczęły się jednak już w 1910 r., gdy Theodor Wulf, jezuita i fizyk, wszedł na wieżę Eiffla z elektrometrem na plecach. Urządzenie to, które ojciec Wulf sam zaprojektował i zbudował, wykrywało cząstki naładowane. Wiedząc, że takie cząstki są wysyłane przez radioaktywne minerały, badacz oczekiwał, że wskazania jego elektrometru się zmniejszą, gdy przyrząd znajdzie się wysoko nad ziemią. Po wspięciu się na wieżę zaobserwował jednak ze zdziwieniem wzrost wskazań. Wyjaśnienie: cząstki subatomowe spadają na Ziemię z kosmosu.

Chociaż źródło tych cząstek do dziś pozostaje do pewnego stopnia tajemnicą, w latach 20. i 30. ubiegłego wieku ich istnienie stało się dla fizyków oczywiste. A gdy skończyła się II wojna światowa, młodzi ludzie zaczęli się wspinać na szczyty Pirenejów i Alp, aby dokładniej zbadać owe „promienie kosmiczne". Używane wtedy detektory składały się z wielkich stosów płyt fotograficznych, które dosłownie fotografowały miniaturowe ślady pozostawione przez pędzące cząstki. Te wysiłki, wraz z analizą cząstek wytworzonych niedługo później w wielkich, rozbijających atomy akceleratorach, ujawniły ciągle wydłużającą się listę cząstek powstających tylko w ekstremalnych warunkach, m.in. kaonów, pionów i hiperonów Λ.

Dziś znamy ponad 200 takich cząstek. Fizycy początkowo podzielili je według mas na dwie klasy: mezony (od greckiego meso, „średni") ważące więcej niż elektron, ale mniej niż proton, oraz bariony (od greckiego bario, „ciężki") ważące tyle co proton lub więcej. Współczesny podział jest oparty nie na masie, ale na spinie cząstek: mezony mają spin całkowity, a bariony połówkowy, gdy wyrażamy go w jednostkach stałej Plancka podzielonej przez 2π. (Najbliższym ana-

* Artykuł, opublikowany w *American Scientist* **88**, 406 (2000) (*American Scientist Online*: www.americanscientist.org), został przetłumaczony za zgodą Autorów i Wydawcy. [Translated with permission. © 2000 Sigma Xi, The Scientific Research Society]

logiem spinu, wielkości czysto kwantowej, jest moment pędu wirującego bąka).

Mezony i bariony nazywamy łącznie „hadronami" (od grec. adron, „silny"), ponieważ wszystkie te cząstki podlegają oddziaływaniom silnym, które razem z oddziaływaniami elektromagnetycznymi, słabymi i grawitacyjnymi stanowią cztery fundamentalne siły przyrody. Pierwsze wskazówki istnienia oddziaływań silnych pojawiły się w latach 30., kiedy stało się oczywiste, że jądra atomów zawierają zwarte grupy protonów i neutronów. Trudno było to zrozumieć – wzajemne odpychanie elektrostatyczne dodatnio naładowanych protonów powinno spowodować, że składniki jądra atomu rozlecą się w różnych kierunkach. Fizycy rychło zrozumieli, że potrzebny jest inny rodzaj fundamentalnych oddziaływań, takich, które mogą działać tylko na małych odległościach, skoro nigdy nie zostały zaobserwowane poza jądrami.

Zatem już od dawna było jasne, że oddziaływania silne istnieją i że odczuwają je wszystkie hadrony. Ale w jaki sposób nowe hadrony wpisują się w dopiero co uporządkowany świat subatomowy (rys. 1)? Ta zagadka pozostawała nierozwiązana aż do roku 1961, kiedy Murray Gell-Mann (podówczas profesor California Institute of Technology) i Yuval Ne'eman (attaché wojskowy Izraela w Londynie, studiujący jednocześnie fizykę w Imperial College) niezależnie zaproponowali jej rozwiązanie. Obaj zdali sobie sprawę, że znany świat cząstek subatomowych może być pogrupowany według pewnej matematycznej symetrii, którą Gell-Mann nazwał drogą ośmiokrotną przez analogię do buddyjskich „ośmiu dróg do oświecenia".

Argumenty za trafnością tego pomysłu pojawiły się zaskakująco szybko. Już w kilka miesięcy po wymyśleniu nowej teorii Gell-Mann uczestniczył w konferencji w CERN-ie, europejskim laboratorium cząstek w Genewie, i był wśród słuchaczy, gdy grupa z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Los Angeles ogłosiła o odkryciu dwóch nowych barionów, Ξ^{*-} oraz Ξ^{*0}. Gell-Mann zauważył, że ta para prawie dopełniła grupę dziesięciu spokrewnionych cząstek (rys. 2). Nie tylko od razu przewidział, że powinna istnieć jeszcze jedna cząstka tego typu, ale potrafił z grubsza odgadnąć jej własności. Owa śmiała hipoteza, którą Gell-Mann wysunął publicznie przed wszystkimi zgromadzonymi, stała się sygnałem rozpoczęcia wyścigu do odkrycia nowej cząstki, nazwanej Ω^-. Została ona zaobserwowana już w lutym 1964 r. przez grupę z Brookhaven National Laboratory w Nowym Jorku, a po kilku tygodniach z CERN-u nadeszło potwierdzenie tej obserwacji.

1930 — 1935 — 1940 — 1945 — 1950 — 1955 — 1960 — 1965

leptony

e^+ (0,511)	μ^+ (105,6) μ^- (105,6)		ν_e (≈ 0) $\bar{\nu}_e$ (≈ 0)	ν_μ (≈ 0) $\bar{\nu}_\mu$ (≈ 0)

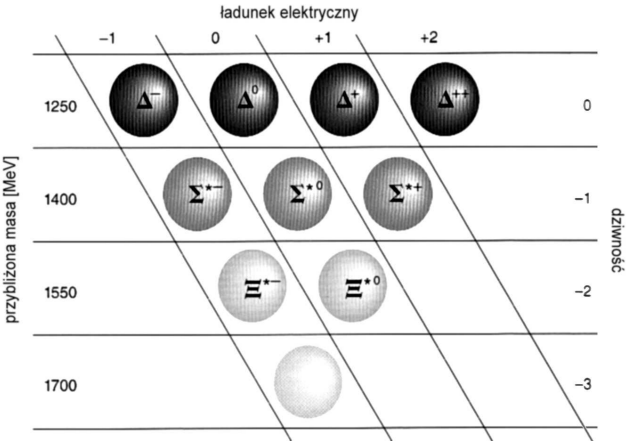
mezony

	π^0 (135) π^+ (140) π^- (140) K^+ (494) K^- (494) K^0 (498)		η (547) ρ (770) ω (782) K^* (892) η' (958) f (980) ϕ (1019) a_2 (1318)

bariony

n (939,6)	Λ^0 (1115) Σ^+ (1189) Σ^- (1197) Δ (1230) Ξ^- (1321)	$\bar{p}$ (938,3) $\bar{n}$ (939,6) $\bar{\Lambda}^0$ (1115) Σ^0 (1192) Ξ^0 (1315)	Σ^{*0} (1385) Σ^{*-} (1385) Σ^{*+} (1385) Ξ^{*0} (1530) Ξ^{*-} (1530) Ω^- (1672)

Rys. 1. Wśród wielu subatomowych cząstek odkrytych w latach 1930–65 szczególnie zdumiała fizyków wielka różnorodność hadronów. Dopiero w 1961 r. teoretycy zauważyli pewien porządek w wydłużających się tablicach cząstek i – podobnie jak zbudowanie układu okresowego sto lat wcześniej – uporządkowanie to dostarczyło wielu informacji na temat ich wewnętrznej struktury (masy spoczynkowe podano w nawiasach w jednostkach energii – megaelektronowoltach – zgodnie ze słynnym wzorem Einsteina, stwierdzającym równoważność tych wielkości: $E = mc^2$).

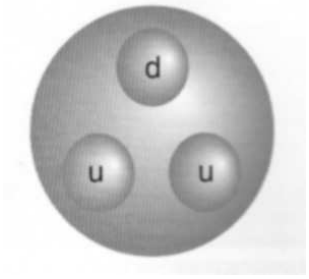


Rys. 2. Znano już siedem cząstek mających ten sam spin (3/2) – dwa górne rzędy – kiedy w 1962 r. zostały odkryte hiperony Ξ^{*-} oraz Ξ^{*0} (trzeci rząd). Teoretyk Murray Gell-Mann natychmiast zauważył, że takie uporządkowanie hadronów wymaga istnienia dziesiątego członka tej rodziny. Przewidział własności brakującej cząstki (u dołu), opierając się na diagramie podobnym do powyższego, a po 2 latach właśnie taka cząstka, nazwana Ω^-, została rzeczywiście znaleziona.

W tym samym roku Gell-Mann i George Zweig (który wtedy pracował w CERN-ie) niezależnie wysunęli przypuszczenie, że symetria znanych wówczas hadronów bierze się stąd, że są one zbudowane z trzech fundamentalnych składników. Gell-Mann ochrzcił je „kwarkami" – żartobliwym słowem użytym przez Jamesa Joyce'a w *Finnegan's Wake* („Three quarks for Muster Mark!").

Przypuszczenie to było ryzykowne, ponieważ hipotetyczne kwarki miały inne własności niż wszystkie znane wcześniej cząstki. Uznano, że kwarki istnieją w trzech odmianach, nazwanych „zapachami": górnym (u), dolnym (d) i dziwnym (s). Tak jak inne cząstki, kwarki miały masę i spin, ale w przeciwieństwie do wszystkich innych miały ułamkowy ładunek elektryczny – kwark górny $+2/3$, kwarki dolny i dziwny $-1/3$ (w jednostkach ładunku elementarnego e). Istotą pomysłu Zweiga i Gell-Manna było to, że hadrony są stanami związanymi trzech kwarków, podobnie jak atom wodoru można uważać za stan związany protonu i elektronu. Na przykład, proton miał się składać z dwóch kwarków u oraz jednego d (rys. 3), co dałoby całkowity ładunek elektryczny $2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$. Podobnie, neutron składałby się z dwóch kwarków d oraz jednego u, co dałoby ładunek $-1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$. Ułamkowy ładunek był szalonym pomysłem, ale chyba najbardziej niepokojącym aspektem tej teorii było to, że nigdy nie zaobserwowano samych kwarków – fakt, którego ani Gell-Mann, ani Zweig nie wyjaśnili.

Mimo to model kwarkowy uzyskiwał coraz szerszą akceptację. Potężny impuls przyszedł cztery lata później, gdy badacze w Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) wykazali w sposób niebudzący wątpliwości, że protony mają strukturę wewnętrzną. Wyniki te pochodzą z eksperymentu będącego właściwie współczesną wersją doświadczenia Ernesta Rutherforda i Ernesta Marsdena z 1909 r. Bombardowali oni cząstkami α cienką warstwę miki i zaobserwowali, że choć zdecydowana większość cząstek przelatujących przez tarczę tylko nieznacznie zmieniała kierunek, to jednak niekiedy cząstki α odbijały się pod dużym kątem. Zaskoczony Rutherford skomentował to słowami: „To tak, jakby 15-calowy pocisk, wystrzelony w stronę arkusika bibułki, odbił się od niego i uderzył w strzelającego". Wkrótce zrozumiał, że tak dziwne zachowanie oznacza, że atomy mają małe, ale ciężkie rdzenie – w ten sposób odkrył jądra atomowe.



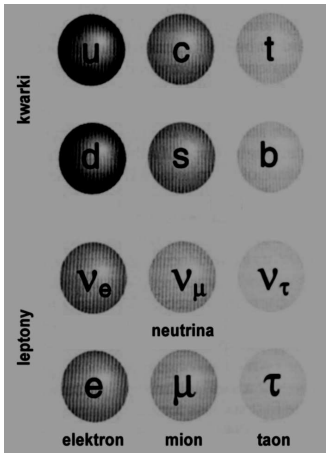
Rys. 3. Model kwarkowy, zaproponowany w roku 1964, przedstawiał proton złożony z dwóch kwarków „górnych" (u), każdy o ładunku $(+2/3)e$, i jednego „dolnego" (d) o ładunku $(-1/3)e$, co daje prawidłowy ładunek protonu $+e$. Na początku myślano o kwarkach tylko jako o użytecznym modelu matematycznym, przydatnym do księgowania cząstek, ale niewnoszącym fizycznej treści.

W stanfordzkim eksperymencie z 1968 r. fizycy rozpraszali elektrony na protonach i zaobserwowali, że mała, ale znacząca ich część zupełnie zmieniała kierunek ruchu. Dowodziło to, że protony – a przez analogię także inne hadrony – mają wewnętrzną strukturę. Dalsze badania wykazały, że składniki protonu mają ułamkowe ładunki.

Te odkrycia stanowią ważną granicę. Wcześniej wielu fizyków (w tym Gell-Mann) uważało, że kwarki są tylko modelem matematycznym, pozwalającym uporządkować świat hadronów. Od tego momentu wszystko zaczęło jednak wskazywać, że kwarki być może rzeczywiście istnieją. W końcu, w roku 1974, wiadomość o odkryciu nowej cząstki przekonała nawet najbardziej opornych. Ta nowa cząstka, mezon, była zbudowana z czwartego zapachu kwarkowego, nazwanego powabnym (c). Potem dodano do menu jeszcze dwa inne zapachy: piękno (b) w 1976 r. i prawdę (t) w roku 1995. Każdy z tych sześciu kwarków ma odpowiadającego mu „antykwarka", co zwiększa liczbę rodzajów tych cząstek do dwunastu (rys. 4).

Chociaż hipoteza kwarków odniosła błyskotliwy sukces, pozostało kilka niepokojących wątpliwości.

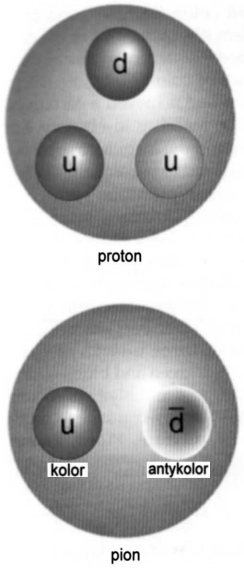
Po pierwsze, nigdy nie zaobserwowano odosobnionego kwarka. Bardziej dokuczliwym problemem było to, że wyznaczone własności barionu nazwanego Δ^{++} wydawały się sprzeczne z jednym z ogólnych twierdzeń kwantowej teorii pola, które mówi, że kwantowe funkcje falowe opisujące hadrony muszą być antysymetryczne, jeżeli cząstki składowe są identyczne. Wiadomo było, że cząstka Δ^{++} składa się z trzech identycznych kwarków u, ale obserwowane własności wskazywały na symetryczną funkcję falową.



Rys. 4. Zbiór fundamentalnych klocków, z których zbudowana jest materia, ostatecznie został rozszerzony do 6 rodzajów kwarków (i niepokazanych powyżej odpowiadających im 6 antykwarków) oraz 6 lżejszych cząstek (i 6 ich antycząstek) nazwanych leptonami. Te ostatnie nie oddziałują silnie.

Teoretycy chwytali się najdziwniejszych sposobów rozwiązania tej łamigłówki. Oskar Greenberg z Uniwersytetu Marylandzkiego przedstawił jedno z bardziej pomysłowych rozwiązań: zaproponował, żeby przypisać kwarkom nowy rodzaj ładunku, który pozwala na utworzenie antysymetrycznej funkcji falowej. Matematyczna sztuczka Greenberga w gruncie rzeczy obchodziła problem przez stwierdzenie, że pełna funkcja falowa barionu Δ^{++} jest jednak antysymetryczna, tylko dotychczas nie brano pod uwagę pewnej jej części. Gell-Mann nazwał nową cechę cząstek k o l o r e m, choć nie ma ona nic wspólnego z normalnym znaczeniem tego słowa. Przewidywano, że taki „ładunek kolorowy" ma trzy odmiany, często nazywane czerwoną, zieloną i niebieską.

Ale w doświadczeniach nigdy nie zaobserwowano koloru. Wyglądało więc na to, że jeden problem (symetria cząstki Δ^{++}) został po prostu zastąpiony innym (brakiem obserwacji koloru). Niemniej pomysł Greenberga przyniósł pewną korzyść: niemożność zaobserwowania pojedynczych kwarków i niemożność zaobserwowania koloru zostały połączone w „hipotezę uwięzienia koloru", która głosi, że kolor istnieje jedynie ukryty wewnątrz hadronów i nigdy nie może się pojawić, żeby oddziaływać z jakimkolwiek detektorem. Przeciwnie – kolory muszą zawsze występować w grupach, tak by tworzyć obiekty niekolorowe. Protony, neutrony i inne bariony są kombinacjami trzech kwarków o różnych kolorach (czerwonym, zielonym i niebieskim), które tworzą niekolorową kombinację, podobnie jak kombinacja barw trzech luminoforów na ekranie telewizora może dawać plamkę bezbarwną (rys. 5). Piony, kaony i inne mezony są utworzone z kwarka o określonym kolorze i „antykolorowego" względem niego antykwarka.



Rys. 5. Kwarkom zaczęto przypisywać „ładunek kolorowy" na początku lat 70., mimo że kolor nigdy nie został zaobserwowany – kwarki zawsze zbierają się w grupy, tworząc obiekty niekolorowe, jak kwarki 3 różnych kolorów w protonie: dwa różnokolorowe kwarki u oraz jeden kwark d (u góry). W przypadku mezonów składających się z pary kwark–antykwark kolor i antykolor muszą tworzyć odpowiedną parę, np. kwarki u oraz $\bar{\text{d}}$ w pionie muszą mieć przeciwne kolory (u dołu).

Chromodynamika kwantowa

Uwięzienie koloru okazało się ważną ideą, ponieważ w ostatecznym rozrachunku pokazało, w jaki sposób kwarki łączą się w hadrony. Mechanizm ten jest podobny do kulombowskiego przyciągania protonu i elektronu, które opisujemy jako wymianę fotonów (cząstek, które nie mają masy ani ładunku, ale mają energię i spin). Z tego powodu fotony są nazywane nośnikami oddziaływań elektromagnetycznych. Co więcej, teoretycy od dziesiątków lat wiedzą, że samo istnienie elektronów i protonów (a dokładniej ich ładunków) wystarcza do stwierdzenia istnienia fotonów i określenia ich własności. Ta magiczna sztuka jest wynikiem matematycznej procedury zwanej c e c h o w a n i e m.

Teoria cechowania pochodzi z prac Hermanna Weyla z 1918 r. Starał się on połączyć grawitację i elektromagnetyzm w jedną teorię przez żądanie, aby wyniki fizyczne nie zależały od lokalnego skalowania (czyli cechowania) czasoprzestrzeni. Choć jego teoria okazała się błędna, idea warunku lokalnej niezmienniczości

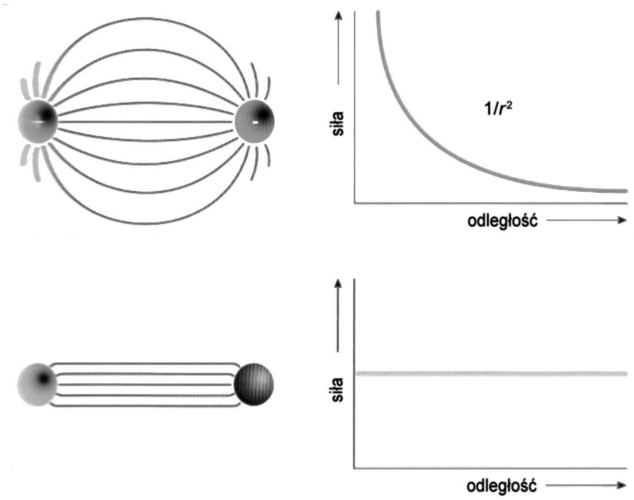
przetrwała. Pierwszy sukces cechowanie odniosło w latach 40., kiedy zostało zastosowane do kwantowej teorii elektromagnetyzmu, zwanej elektrodynamiką kwantową (QED). Idea ta została rozszerzona w latach 60. na zunifikowane oddziaływania elektromagnetyczne i słabe i stanowi podstawę współczesnego rozumienia zarówno oddziaływań elektrosłabych, jak i silnych oraz cząstek im podlegających – podstawę pełnej teorii budowy materii, zwanej Modelem Standardowym.

Cząstki przenoszące oddziaływania, analogiczne do fotonów, musiały zapewne istnieć również dla kwarków – w końcu coś musiało przenosić oddziaływania silne. Ale co to miałyby być za cząstki? Gell-Mann i Harold Fritzsch z Uniwersytetu Monachijskiego pierwsi znaleźli odpowiedź na to pytanie w 1972 r. po przeprowadzeniu procedury cechowania dla oddziaływań silnych. Nazwali otrzymaną teorię chromodynamiką kwantową (QCD), podkreślając w ten sposób jej podobieństwo do elektrodynamiki kwantowej i wagę idei koloru. Ich praca wykazała, że musi istnieć 8 typów cząstek, teraz nazywanych gluonami, będących nośnikami oddziaływań wiążących kwarki. Gluony są podobne do fotonów pod tym względem, że nie mają masy, a mają spin. Różni je jednak kluczowa cecha: gluony mają ładunek kolorowy, podczas gdy fotony nie mają ładunku elektrycznego. Wskutek tego gluony – w przeciwieństwie do fotonów – mogą bezpośrednio oddziaływać ze sobą.

QCD można więc traktować jak przepis na ciasteczka. Kwarki i gluony stanowią składniki, kwantowa teoria pola podaje sposób przyrządzenia, a powstające smakołyki to hadrony. Co ciekawe, QCD wskazuje, że struktura próżni, w której znajdują się cząstki, również ma duże znaczenie. Jeżeli wyobrażamy sobie próżnię jako całkowitą pustkę, to ostatnie stwierdzenie musi budzić zdziwienie. Ale na poziomie kwantowym próżnia nie jest naprawdę pusta. W rzeczywistości jest piekielną zupą, godną szekspirowskich czarownic Hekate, zupą, w której wirtualne cząstki pojawiają się i znikają tak szybko, że zasady zachowania nie są pogwałcone. Cała ta wirtualna aktywność ma dramatyczny wpływ na siłę oddziaływania między kwarkami. Przypomnijmy, że oddziaływanie to powstaje na skutek wymiany gluonów i że muszą się one przedzierać przez próżnię. Wyobraźmy sobie, że gluonom najłatwiej jest podążać przetartym szlakiem. Skutkiem byłoby zlokalizowanie gluonów na wąskiej ścieżce między kwarkami.

Teoretycy zajmujący się na co dzień QCD wolą inną analogię, opartą na idei elektrycznych i magnetycznych linii pola, rozbiegających się i tworzących wzór znany wszystkim uczniom, którzy rozsypywali opiłki żelaza nad magnesem (rys. 6). W przypadku QCD struktura próżni powoduje przyciąganie się linii tzw. pola chromomagnetycznego w taki sposób, że tworzą one cienką wiązkę.

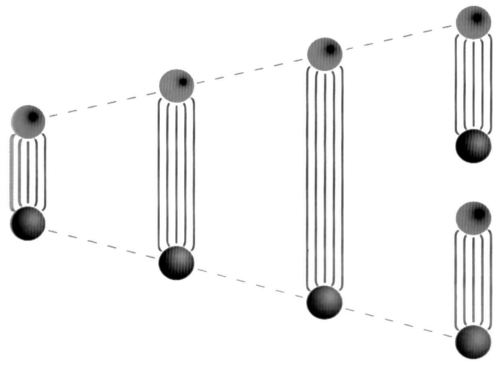
W przypadku pola elektrycznego rozbieganie się linii pola prowadzi do znanej siły kulombowskiej, której wartość jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między ładunkami. Dla kwarków łączenie się linii pola chromomagnetycznego w cienką wiązkę daje zupełnie inny efekt – siła zachowuje stałą, niezależną od odległości wartość (zwaną napięciem struny), tak jakby wiązka linii była sprężystą taśmą, ściągającą kwarki zawsze tą samą siłą, niezależnie od tego, jak bardzo jest rozciągnięta (rys. 6).



Rys. 6. Linie pola elektrycznego między dwiema przeciwnie naładowanymi cząstkami szeroko się rozbiegają, co prowadzi do własności charakterystycznej dla elektrostatycznej siły Coulomba i dla siły grawitacyjnej: ich wielkość maleje jak kwadrat odległości między cząstkami (u góry). Inaczej jest w przypadku linii pola chromomagnetycznego między dwoma kwarkami – linie te tworzą zwartą wiązkę, co prowadzi do stałej (niezależnej od odległości) siły (u dołu).

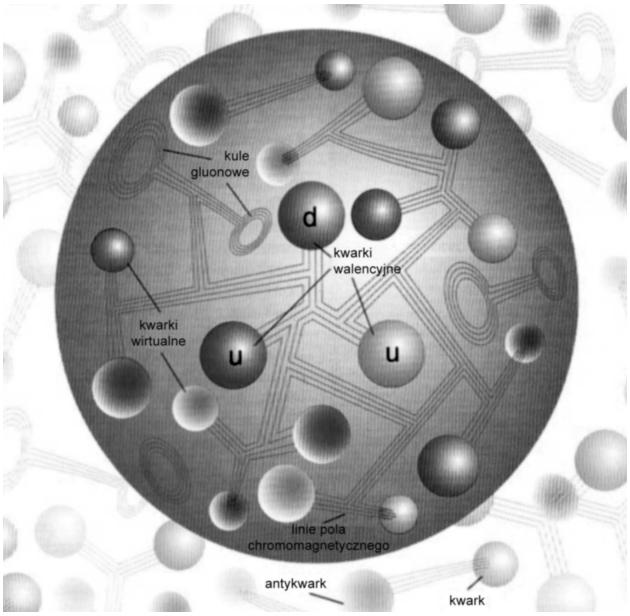
Napięcie struny między kwarkiem a antykwarkiem odpowiada bardzo dużej sile wiążącej, równoważnej ciężarowi ciała o masie 16 ton. Mimo to można by pomyśleć, że taką siłę da się pokonać i rozdzielić obie cząstki. Okazuje się jednak, że nawet nieznaczne ich odciągnięcie (na odległość rzędu promienia protonu) wpompowuje w układ energię wystarczającą do rozerwania wiązki linii pola między kwarkami i utworzenia dwóch nowych cząstek – kwarka i antykwarka, które są przyłączone do nowo utworzonych wolnych końców wiązek linii pola (rys. 7). W wyniku takiego procesu w miejsce jednej niekolorowej cząstki początkowej powstają dwie cząstki niekolorowe. W tym sensie kolor nigdy nie wydostaje się na wolność.

Zatem to szczególny charakter próżni w QCD powoduje uwięzienie koloru. Skomplikowana struktura próżni pozwala również wyjaśnić zaskakujące wartości mas hadronów. Fizycy są przekonani, że kwarki są o wiele za lekkie, aby ich masy mogły dać w sumie masy utworzonych z nich cząstek. Wydaje się więc, że prosty opis hadronów jako połączenia dwóch lub trzech kwarków jest zbyt naiwny. Jednakże kwantowa teoria pola dopuszcza fluktuacje liczby i rodzajów cząstek, z których składa się hadron. Takie fluk-



Rys. 7. Próby rozdzielenia dwóch kwarków tworzących typowy mezon nieuchronnie kończą się niepowodzeniem, ponieważ energia dostarczona w celu rozdzielenia tej pary zostaje zamieniona w nowy kwark i nowy antykwark; powstałe cząstki przyłączają się do swobodnych końców rozerwanej wiązki linii pola.

tuacje mają postać dodatkowych gluonów lub wirtualnych par kwark–antykwark, które, jak wierzą teoretycy, dają nadwyżkę (ok. 98%) masy potrzebną do zbudowania typowego hadronu (rys. 8).



Rys. 8. Jak dziś uważamy, proton zawiera dużo więcej składników niż tylko trzy kwarki walencyjne, składające się na jego ładunek elektryczny $+e$. Kwarki te wnoszą jedynie ok. 2% masy protonu. Reszta pochodzi z „morza" wirtualnych kwarków i kul gluonowych. Nawet na zewnątrz protonu wirtualne cząstki – kule gluonowe, mezony i pary barion–antybarion – pojawiają się i znikają, tworząc zatłoczoną próżnię opisywaną przez chromodynamikę kwantową.

Gluony zatem pomagają uzasadnić wartości mas hadronów. Ale czy są one zawsze we wnętrzu tych cząstek, czy mogą też uciec i podróżować przez przestrzeń, jak fotony, ich kuzyni-lekkoduchy? Fotony z całą pewnością mogą dolecieć daleko – wykorzystuje to każdy, kto czyta tę stronę – natomiast gluony mają kolor, a uwięzienie koloru oznacza, że nigdy nie może on zostać zaobserwowany.

Fritzsch i Peter Minkowski z Uniwersytetu Berneńskiego doszli w 1975 r. do wniosku, że kilka gluonów mogłoby się połączyć w neutralne kolorowo hadrony złożone tylko z materii gluonowej. Takie obiekty – k u l e g l u o n o w e – byłyby zupełnie nowym i nieoczekiwanym rodzajem materii. Elektromagnetycznym ich odpowiednikiem byłoby zbicie się fotonów w „atom" zbudowany z samego światła. Ted Barnes, doktorant w Caltechu, rozwinął ten pomysł w 1977 r., gdy zauważył, że gluony mogłyby również wiązać się z kwarkami i antykwarkami, tworząc mezony hybrydowe. Te hybrydy i kule gluonowe noszą wspólną nazwę c z ą s t e k e g z o t y c z n y c h (ang. QCD exotics).

Na tropie nowych cząstek

Czego potrzeba, żeby odkryć cząstkę egzotyczną? Przede wszystkim, teoretycy muszą mieć jakieś wyobrażenie o jej własnościach – masie, czasie życia, kanałach rozpadu (czyli sposobach, w jakie może ona zniknąć, wytwarzając na swoje miejsce lżejsze, długo żyjące cząstki). Poza tym badacze muszą znać wartości trzech ważnych liczb kwantowych, które opisują poszukiwaną cząstkę. Pierwsza z nich (J) oznacza całkowity spin, druga (P) odnosi się do parzystości, a trzecia (C) – do sprzężenia ładunkowego.

Liczba kwantowa J jest częściowo zdeterminowana przez ustawienie spinów kwarków, z których składa się szukana cząstka. W przypadku mezonów dwukwarkowych suma spinów obu składników może przyjąć tylko dwie wartości: 1, gdy spiny są równoległe, lub 0, gdy są antyrównoległe. Całkowity spin zależy jednak również od względnego momentu pędu obracających się wokół siebie składników, zatem J może przyjmować wartości całkowite większe od 1.

Parzystość i sprzężenie ładunkowe są subtelniejszymi cechami. Opisują one symetrię pary kwark–antykwark w przypadku lustrzanego odbicia przestrzennego (parzystość) lub zamiany miejscami cząstki i antycząstki (sprzężenie ładunkowe). Jeżeli kwantowa funkcja falowa nie zmienia się w czasie takiej operacji, to cząstkę nazywamy symetryczną i przypisujemy jej odpowiednią „liczbę kwantową" o znaku plus; w przeciwnym przypadku cząstka jest antysymetryczna i przypisany jest jej minus.

Podstawowe zasady mechaniki kwantowej mówią, że mezony mogą mieć tylko szczególne kombinacje wartości J, P oraz C, które stanowią identyfikator cząstki, zazwyczaj zapisywany w postaci J^{PC}. Ale chromodynamika kwantowa przewiduje, że sytuacja jest bardziej skomplikowana. Przypomnijmy, że mezon wyobrażamy sobie jako dwa kwarki utrzymywane razem przez wiązkę linii pola, która działa jak sprężysta taśma. Gdyby ktoś mógł przytrzymać te dwa kwarki

i szarpnąć taśmę między nimi, zaczęłaby ona drgać jak struna gitary. I podobnie jak w przypadku szarpnięcia takiej struny, pole między kwarkami może zostać wzbudzone na wiele różnych sposobów – każdy odpowiadałby innemu rodzajowi mezonu hybrydowego.

Jeżeli na przykład spiny kwarków są równoległe, a ruch wiązki pola odpowiada pierwszemu stanowi wzbudzonemu (odpowiednik podstawowej częstości drgań gitary), to J^{PC} może np. wynosić 0^{+-} lub 1^{-+}; są to wartości niemożliwe dla stanu złożonego z tylko dwóch kwarków. Takie kombinacje jednoznacznie odpowiadają zatem nowym rodzajom cząstek – mezonom hybrydowym. Podczas gdy własności normalnego mezonu można wyjaśnić przez spiny oraz momenty pędu kwarka i antykwarka, w przypadku mezonu hybrydowego są one również związane ze wzbudzoną wiązką pola. Co więcej, wzbudzone wiązki są wystarczająco mocne, aby utworzyć mezon bez żadnych kwarków. Takie samotne wiązki pola, zwinięte w zamknięte pierścienie, są kulami gluonowymi, zbudowanymi wyłącznie z tego, co zazwyczaj odpowiada jedynie za spoistość materii.

Czy takie ciekawe cząstki mogą istnieć? Tak, ale niezbyt długo. Olbrzymia większość mezonów produkowanych w zderzeniach cząstek rozpada się prawie natychmiast po utworzeniu, wytrzymując jedynie ok. 10^{-23} sekundy. Nawet jeśli poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, to odległość, jaką przebywają od narodzin do śmierci jest nie większa niż średnica protonu. Zatem fizycy cząstek muszą się domyślać ich ulotnego istnienia na podstawie pozostawionych przez nie szczątków. W większości przypadków wyraźnymi znakami są inne mezony o dużo mniejszych masach i dłuższych czasach życia – wystarczających, aby zostawić rozróżnialne ślady.

Przez wiele lat fizycy badali tory takich cząstek, używając komór pęcherzykowych – zbiorników z ciekłym wodorem utrzymywanym pod wysokim ciśnieniem. W chwili wejścia cząstki do komory tłok jest odciągany, co gwałtownie obniża ciśnienie. Taki manewr obniża temperaturę wrzenia, ale wodór nie zamienia się natychmiast w parę. Przez chwilę pozostaje niestabilną, „przegrzaną" cieczą. Ponieważ przelatująca cząstka naładowana oddaje energię, przegrzany wodór zaczyna wrzeć wzdłuż jej toru, zaznaczając go tym samym niewielkimi bąbelkami. Jeżeli komora znajduje się w polu magnetycznym, to naładowana cząstka jest odciągana w bok, a widoczne na fotografii zakrzywienie toru jest miarą jej pędu (rys. 9). Prześledzenie kierunków ruchu wszystkich produktów rozpadu – zazwyczaj mezonów o znanych masach – pozwala odtworzyć własności (masę i J^{PC}) efemerycznej cząstki, z której te produkty powstały.

Zaletą komór pęcherzykowych jest to, że dostarczają one dosyć pełnego i nieznieksztalconego obrazu eksperymentu. Niestety, przeglądanie zdjęć tysięcy pęcherzykowych śladów wymaga mrówczej pracy i w ten sposób można odkryć tylko najczęściej spotykane mezony. Dlatego od ponad 30 lat modne są elektroniczne komory drutowe, zbudowane ze zbiornika gazu poprzecinanego krzyżującymi się drutami pod dużym napięciem. Przejście naładowanej cząstki jonizuje gaz wzdłuż jej toru, łącząc elektrycznie niektóre druty. Miejsca, gdzie obwody zostały chwilowo zwarte, pokazują tor cząstki. Inny rodzaj elektronicznego detektora, zwany kalorymetrem, mierzy jej energię. Oba urządzenia umieszczone razem w polu magnetycznym nazywa się spektrometrem. Współczesne spektrometry mogą wykonywać miliony pomiarów przechodzących przez nie cząstek i dlatego są tak cenne przy poszukiwaniu nowych mezonów. Niestety, ich czułość – w przeciwieństwie do czułości komór pęcherzykowych – nie jest taka sama dla wszystkich kierunków ruchu cząstek.

Rys. 9. Zakrzywiające się linie na tym zdjęciu z komory pęcherzykowej pokazują tory – a przez to rodzaje – różnych subatomowych cząstek powstających w akceleratorze. Dokładne zbadanie tych śladów (tutaj robi to Renee Jones z Fermilabu w ramach doświadczenia z 1984 r.) pokazuje własności niezostawiających śladów obiektów, które – rozpadając się – są źródłami takich strumieni cząstek. Jak większość współczesnych badaczy, autorzy niniejszego artykułu zamiast komór pęcherzykowych wykorzystują detektory elektroniczne, unikając dzięki temu tego pracochłonnego etapu polowania na szczególne przypadki cząstek egzotycznych, czyli takich, które są utworzone (w całości lub części) z obiektów zazwyczaj odpowiedzialnych tylko za oddziaływanie wiążące materię (fot. David Parker, Science Source/Photo Researchers, Inc.).

Żeby uwzględnić ten fakt, fizycy używają metody Monte Carlo, która polega na tym, że komputer symuluje wielką liczbę przypadkowych zderzeń cząstek, od których żądamy jedynie zachowania energii i pędu. Program oblicza wtedy reakcję detektora na taką sztuczną inwazję. Z powodów konstrukcyjnych we współczesnych detektorach nie wszystkie tory cząstek można zarejestrować jednocześnie. Wiedząc jednak, co nie zostało wykryte w czasie symulowanego zdarzenia, można poprawić wyniki otrzymywane w prawdziwym doświadczeniu. Gdy szuka się mezonów egzotycznych, ten krok musi być wykonany starannie, ponieważ przypisanie J^{PC} opiera się na znajomości kierunków ruchu wszystkich produktów rozpadu. Gdyby korekta zniekształceń pomiaru została wykonana niewłaściwie, sygnał egzotycznego J^{PC} mógłby się pojawić tam, gdzie egzotycznej cząstki wcale nie było.

Poszukiwania na całym świecie

Pierwszy poważny program poszukiwania kul gluonowych zainicjował Claude Amsler z CERN-u. W roku 1985 przekonał on grupę swoich kolegów do budowy detektora nazwanego „Crystal Barrel" (Kryształowa Beczka) – cylindra wypełnionego krystalicznymi kalorymetrami – i dołączenia go do obsługiwanego przez nich pierścienia z niskoenergetycznymi antyprotonami (rys. 10). Eksperyment polegał na doprowadzaniu do zderzeń antyprotonów z protonami i szukaniu kul gluonowych, które, jak przewidywali niektórzy teoretycy, mogłyby w takim procesie powstawać.

Detektor został uruchomiony w grudniu 1989 r. W pierwszej serii pomiarów odkryto cząstkę, która rozpadała się na dwa neutralne piony – podobnej cząstki nie zaobserwowano nigdy wcześniej. Do kwietnia 1990 r. detektor Crystal Barrel zarejestrował 35 tys. takich zdarzeń – gigantyczny zbiór pomiarów!

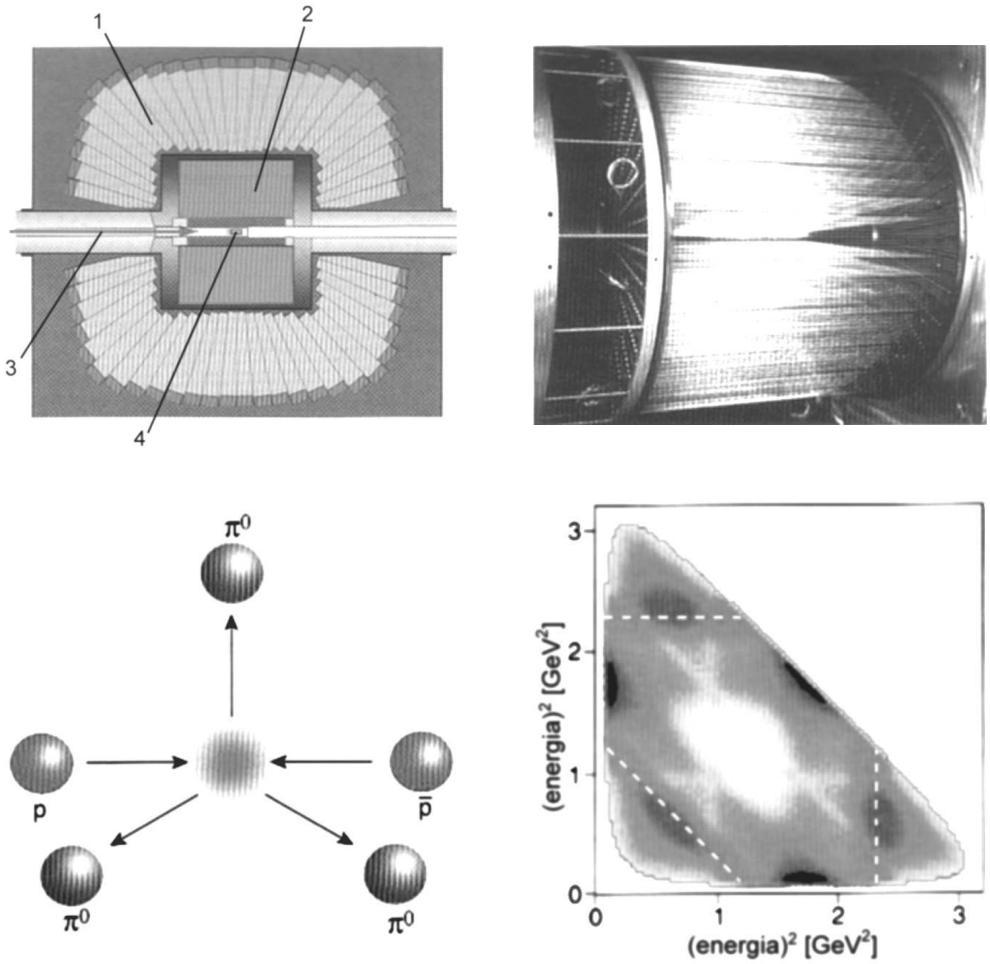
Grupa pod kierunkiem Eberharda Klempta, podówczas z Uniwersytetu Mogunckiego, zajęła się analizą tej reakcji. W lipcu 1990 r. fizycy ze współpracy Crystal Barrel zaczęli ostrożnie przedstawiać swoje wyniki, które interpretowali jako obserwację nowego mezonu o spinie 2. Dwa lata później David Bugg z Queen Mary and Westfield College i Peter Blum z Uniwersytetu w Karlsruhe (obaj uczestniczący w tym eksperymencie) niezależnie przejrzeli jeszcze raz wyniki i doszli do wniosku, że lepiej by je tłumaczyły dwie nowe cząstki o spinie 0. W roku 1994, po przestudiowaniu znacznie większego zbioru danych, badacze ze współpracy Crystal Barrel doszli do wniosku, że prawdziwa jest kombinacja obu rozwiązań. Najbardziej ekscytującą cząstką była jedna z tych o zerowym spinie, nazwana $f_0(1500)$ zgodnie z konwencją, według której nazwa zawiera spin i masę (1500 MeV/c^2, ponad półtorej masy protonu).

Z upływem następnego roku, gdy dodawano wyniki kolejnych pomiarów, stawało się coraz bardziej oczywiste, że $f_0(1500)$ prawdopodobnie nie jest zwykłym mezonem. W roku 1995 Amsler i Frank Close z Rutherford Appleton Laboratory w Anglii opublikowali pierwszy artykuł, w którym twierdzili, że cząstka ta jest w gruncie rzeczy kulą gluonową. Jeszcze w tym samym roku Donald Weingarten, teoretyk z IBM Watson Research Center w Nowym Jorku, argumentował jednak, że $f_0(1500)$ jest zwykłym mezonem: nieuchwytna kula gluonowa według jego ocen powinna być cięższa. Wysunął za to sugestię, że kulą gluonową może z powodzeniem być $f_0(1710)$ – ciekawa cząstka, znana już wtedy od ponad 10 lat. Wielu fizyków sądzi obecnie, że obie te cząstki są kwantowymi superpozycjami kuli gluonowej i dwóch mezonów.

Eksperyment Crystal Barrel działał aż do roku 1996, gdy pierścień niskoenergetycznych protonów w CERN-ie został wyłączony. Doświadczenie w Genewie nie było jednak jedyną próbą upolowania cząstki egzotycznej. W połowie lat 80. Jurij D. Prokoszkin z grupą rosyjskich kolegów twierdzili, że odkryli nową cząstkę rozpadającą się na cztery fotony – byłoby to pierwsze wykrycie egzotycznej hybrydy. Detektory, które ustawili w CERN-ie oraz Instytucie Wielkich Energii w Protwinie („miasteczku naukowym" pod Moskwą, zbudowanym wokół akceleratora cząstek) składały się z bloków szkła ołowiowego służących do pomiarów energii fotonów powstających w rozpadach mezonów. Rosyjscy badacze nie próbowali wykryć cząstek naładowanych, obserwowali jedynie fotony, niemniej wykazali, że potrafią tą metodą identyfikować dobrze poznane mezony. Pomimo to ich raporty o wykryciu mezonów egzotycznych spotkały się ze sceptycyzmem z powodu niespójności w skomplikowanej analizie danych.

We wczesnych latach 90. jeden z nas (Dzierba) nawiązał współpracę z Suh Urk Chungiem z Brookhaven National Laboratory, aby sprawdzić wyniki Rosjan. Zaczęliśmy tworzyć grupę, której celem było ulepszenie detektora cząstek naładowanych w Brookhaven, zwanego spektrometrem wielocząstkowym – wielkiego magnesu z przyłączonymi komorami drutowymi. Natomiast członkowie grupy Dzierby w Indiana University połączyli siły z inną grupą z Protwina, kierowaną przez Siergieja P. Denisowa, aby zbudować detektor fotonów zawierający 3000 bloków szkła ołowiowego.

Jeżeli grupa Prokoszkina rzeczywiście odkryła cząstkę egzotyczną, to cząstka ta powinna być widoczna zarówno w śladach naładowanych cząstek pochodzących z rozpadów, jak i przez obserwacje powstających fotonów. Eksperymenty w Brookhaven, wykorzystujące spektrometr wielocząstkowy i 11 ton szkła ołowiowego, powinny być czułe na oba rodzaje sygnałów. Pierwszy test odbył się w 1993 r., dwie serie danych zebrano w latach 1994 i 1995. Nasze pierwsze próby znalezienia wyraźnych rozpadów czterofotonowych nie powiodły się, ale taki wynik nie był specjalnym zaskoczeniem: do tego czasu większość fizyków cząstek straciła zaufanie do pierwotnego odkrycia, ponieważ powtórna analiza rosyjskich pomiarów podważyła początkową interpretację. Inne raporty na temat



Rys. 10. Urządzenie Crystal Barrel zbudowane w 1989 r. w CERN-ie zawierało 1380 detektorów z jodku cezu (1). Otaczały one komorę (2) zawierającą ok. 4000 gęsto rozpiętych równoległych drutów (zdjęcie), które dodatkowo rejestrowały naładowane cząstki powstające w zderzeniach wysokoenergetycznych antyprotonów (3) z protonami tarczy z ciekłego wodoru (4). Szczególnie ważny wynik eksperymentu Crystal Barrel pochodzi z analizy reakcji produkującej trzy obojętne piony (π^0, u dołu po lewej), z których dwa pochodziły z rozpadu intrygującej, krótko żyjącej cząstki. Nie da się w takim przypadku ustalić, która para z tych trzech pionów pochodzi z badanej cząstki. Dlatego badacze analizują wiele przypadków takich procesów i dla każdego robią wykres sumy energii dwóch pionów w funkcji sumy energii innej pary, oznaczając różnymi barwami lub stopniami szarości różne gęstości występowania punktów odpowiadających wynikom analizy. Linie dużej gęstości na takim „diagramie Dalitza" (przerywane kreski na rys. u dołu po prawej) ujawniają krótko żyjącą cząstkę i jej masę – w tym przypadku ok. 1500 MeV/c^2. Ta cząstka, nazwana $f_0(1500)$, była przez niektórych uważana za kulę gluonową, ale obecnie wielu fizyków sądzi, że jest to kwantowa superpozycja kuli gluonowej i dwóch mezonów.

tego samego mezonu egzotycznego zostały w końcu również uznane za błędne identyfikacje. Przyczyną błędów było niepełne zrozumienie działania aparatury, które doprowadziło niektórych badaczy do interpretowania niewielkiej części rozpadów licznych zwykłych mezonów jako śladów rzadkich hybryd egzotycznych.

W tym samym czasie uczestnicy współpracy z Brookhaven przeanalizowali inny możliwy kanał rozpadu (na dwa fotony i naładowany pion), używając danych zebranych w 1994 r., i wysunęli hipotezę istnienia egzotycznej hybrydy o tych samych własnościach (masie i J^{PC}), co w oryginalnych wynikach Rosjan. Ponadto jeszcze jedna grupa z Protwina zaobserwowała ten sam kanał rozpadu, ale nie zdecydowała się na ogłoszenie odkrycia mezonu egzotycznego. Krążyły też plotki, że również w detektorze Crystal Barrel wykryto ślady podobnej cząstki.

Wśród fizyków uczestniczących we współpracy z Brookhaven zaczęła się intensywna dyskusja. Większość była przekonana o odkryciu mezonu egzotycznego i chciała natychmiast opublikować raport. Ci jednak z nas, którzy pracują w Indiana University, nie chcieli się zdecydować na takie stwierdzenie, przynajmniej nie przed analizą wyników obu serii pomiarów. Niemniej większość zdecydowała o szybkim ogłoszeniu w *Physical Review Letters* o odkryciu nowej cząstki

hybrydowej o masie 1400 MeV/c^2. Wkrótce potem grupa z CERN-u opublikowała dane potwierdzające istnienie tej cząstki, nazwanej $\pi_1(1400)$.

Te kontrowersje wytworzyły nieprzyjemne napięcia między współpracującymi zespołami, lecz niebawem wszyscy razem obwieścili odkrycie jeszcze jednej cząstki egzotycznej, z zupełnie innym kanałem rozpadu i większą masą. Analiza tej cząstki, nazwanej $\rho(1600)$, nie obejmowała problemów mogących poprzednio spowodować fałszywą identyfikację lżejszej hybrydy, a jej odkrycie zostało wkrótce potwierdzone w niezależnym eksperymencie. Niemniej problemem pozostaje fakt, że oba znalezione mezony mają masy mniejsze niż wskazywana przez niektórych teoretyków najmniejsza możliwa masa cząstek egzotycznych (1900 MeV/c^2). Co więcej, w obu przypadkach kanały rozpadu nie były takie, jakich teoretycy wcześniej się spodziewali.

Dziewicze tereny

Wszyscy trzej współpracujemy z innymi eksperymentatorami i teoretykami (razem ok. 80 osób z 25 instytucji w 7 krajach) nad wykorzystaniem wiązki fotonów do wytwarzania mezonów egzotycznych. Dlaczego właśnie fotonów? Przede wszystkim niewiele wiadomo o mezonach, które mogą powstawać z wysokoenergetycznych fotonów. Co jednak ważniejsze, QCD wskazuje, że wiązki fotonów powinny się idealnie nadawać do produkcji cząstek egzotycznych: kwantowo rzecz biorąc, foton z dużym prawdopodobieństwem może zachowywać się przez krótki czas jak para kwark–antykwark o równoległych spinach. Nathan Isgur (podówczas na Uniwersytecie w Toronto) i Jack Paton (z Uniwersytetu w Oksfordzie) wysunęli przypuszczenie, że pole między tą parą może zostać wzbudzone (struna – szarpnięta) w czasie zderzenia z nieruchomą tarczą. W takim procesie powinny łatwo tworzyć się cząstki o egzotycznych wartościach J^{PC} – takie wartości byłyby niezbitym dowodem na znalezienie mezonów hybrydowych.

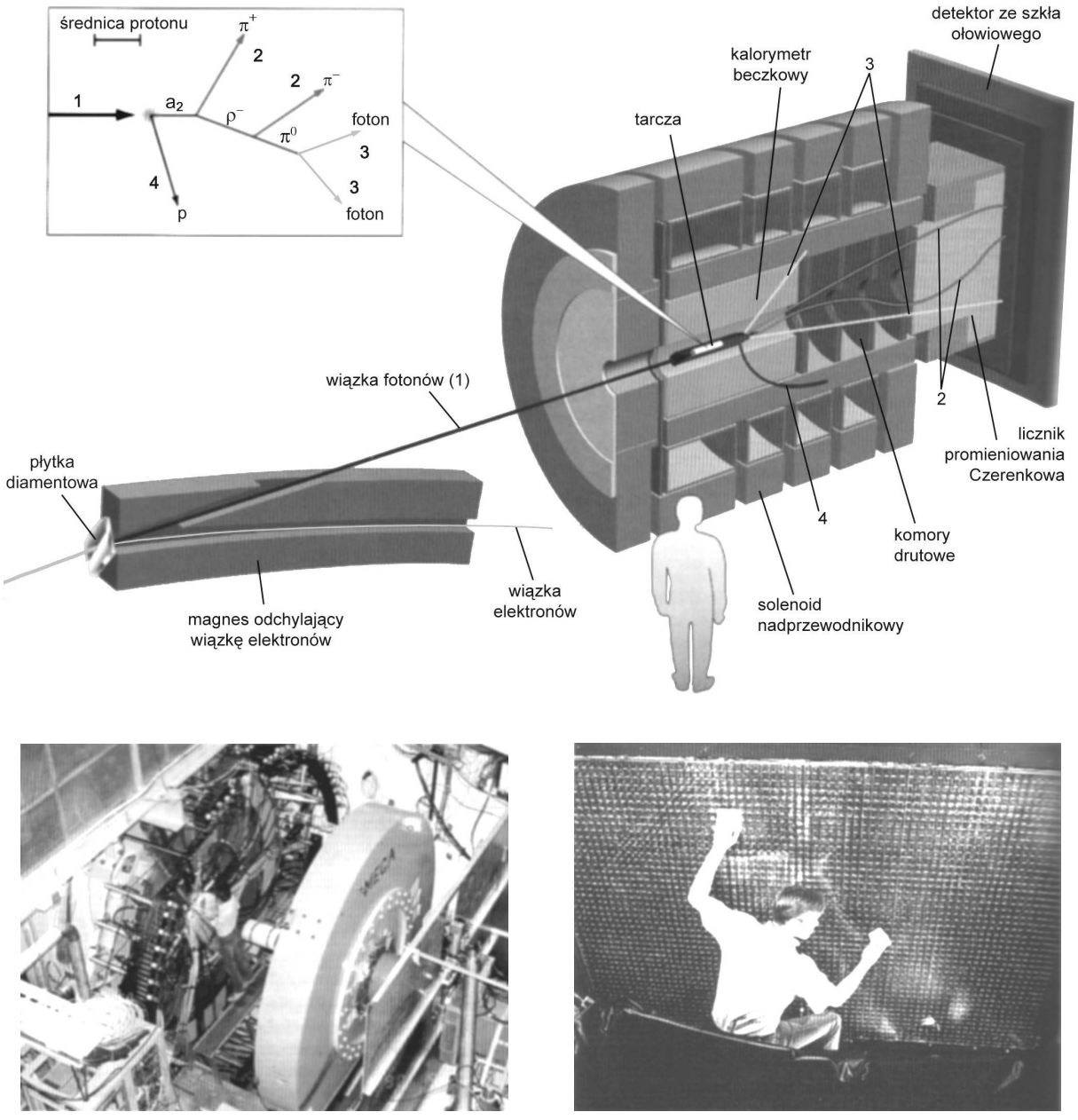
Eksperyment ten będziemy prowadzić w Thomas Jefferson National Accelerator Facility w Newport News w Wirginii (USA), gdzie obecnie działa wielki akcelerator elektronów. Po pewnych modyfikacjach wysokoenergetyczne elektrony z tego urządzenia można byłoby wykorzystać do wytwarzania odpowiednich wiązek fotonów. Trik polegałby na przepuszczeniu pędzących elektronów przez cienką płytkę syntetycznego diamentu. Elektrony będą wylatywały z akceleratora ok. 6 metrów pod ziemią i zderzały się z diamentową tarczą. Niektóre z nich zostaną spowolnione, produkując fotony promieniowania hamowania. Jeżeli wszystko jest odpowiednio przygotowane, to na skutek spójnego odrzutu atomów kryształu diamentu może nastąpić wzmocniona emisja fotonów o pewnych szczególnych wartościach energii, tzw. spójnego promieniowania hamowania. Takie zjawisko daje dodatkową korzyść: powstaje wiązka fotonów o polaryzacji liniowej, tzn. pole elektryczne ma jeden ustalony kierunek. Ta cecha ułatwia wyznaczenie J^{PC} produkowanych mezonów. Warto dodać, że wiązki pionów zazwyczaj wykorzystywane do wytwarzania nowych mezonów nie mogą być spolaryzowane.

Fotony wyprodukuje tylko część elektronów, lecz wszystkie zostaną odchylone w stronę otaczającego gruntu (rys. 11). Tylko fotony – ok. 50 milionów w każdej sekundzie – osiągną tarczę. Detektor będzie się składał z wielkootworowego magnesu nadprzewodnikowego z wewnętrznymi komorami drutowymi i kalorymetrami oraz masywnego kalorymetru ze szkła ołowiowego na jednym końcu. Aby obniżyć koszty, wykorzystamy istniejącą już aparaturę. Magnes nadprzewodnikowy, wart ok. 12 milionów dolarów amerykańskich, zbudowano 30 lat temu na potrzeby eksperymentu w SLAC-u. W połowie lat 80. został przeniesiony do Los Alamos National Laboratory w celu przeprowadzenia innych badań i niedługo zostanie przywieziony do Jefferson Lab, gdzie będzie wykorzystany w naszym eksperymencie. Kalorymetr ze szkła ołowiowego będzie przewieziony z Brookhaven, gdzie został zbudowany za 3 miliony dolarów. Jeśli wszystko przebiegnie zgodnie z planem, to pierwsze pomiary cząstek egzotycznych zostaną wykonane około roku 2008. Pomimo oszczędności związanych z użyciem już istniejącego sprzętu całkowity koszt eksperymentu wyniesie jednak ok. 30 milionów dolarów.

Jak widać, skala przedsięwzięcia jest olbrzymia. Ale nasz eksperyment nie jest jedynym, który jest w przygotowaniu. Nowe badania są albo planowane, albo już prowadzone w Genewie, Nowosybirsku i Pekinie. Zupełnie nowe laboratorium mające prowadzić tego rodzaju badania jest projektowane w Japonii. Oczekujemy, że w ciągu najbliższych 10 lat zostanie odkryty i szczegółowo zbadany bogaty zbiór egzotycznych hadronów. Dopiero wtedy fizycy cząstek będą mogli twierdzić, że naprawdę zrozumieli, jak są zbudowane kule gluonowe i hybrydy, jak rozpadają się hadrony, jak oddziałują i skąd bierze się ich masa. I co najważniejsze, dopiero wtedy będziemy mogli powiedzieć, że naprawdę rozumiemy Model Standardowy.

Uzupełnienie (Alex R. Dzierba, grudzień 2004)

11 listopada 2003 r. Spencer Abraham, amerykański sekretarz ds. energii, wygłosił przemówienie w National Press Club w Waszyngtonie, przedstawiając plan, który w ciągu najbliższych 20 lat ma doprowadzić do powstania w Stanach Zjednoczonych nowych wielkich urządzeń badawczych. Jednym z krótkoterminowych priorytetów tego planu jest podwojenie energii akceleratora elektronowego CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) w Jefferson Lab oraz budowa nowej hali pomiarowej (Hall D) i aparatury pokazanej na rys. 11. Według owego 20-letniego



Rys. 11. Eksperyment planowany przez autorów niniejszego artykułu i ich współpracowników w Jefferson National Accelerator Facility w Newport News w Wirginii (USA) wykorzysta urządzenia z wcześniejszych doświadczeń. Magnes nadprzewodnikowy wielkości pokoju (zdjęcie po lewej), aktualnie w Los Alamos National Laboratory w Nowym Meksyku (USA), i 11-tonowy detektor ze szkła ołowiowego (zdjęcie po prawej), aktualnie w Brookhaven Laboratory w Nowym Jorku, zostaną przewiezione i staną się częścią nowego urządzenia pomiarowego. Zderzając się z cieniutką płytką diamentową, wysokoenergetyczna wiązka elektronów wyprodukuje fotony promieniowania γ (1). Tor elektronów (z których część ulegnie spowolnieniu w diamencie) zostanie odchylony, tak że tylko fotony zderzą się z tarczą. W przykładowej reakcji, w zderzeniu powstaje proton i krótko żyjąca cząstka a_2, która rozpada się na mezony ρ^- oraz π^+. Pierwsza z tych cząstek rozpada się szybko na π^- oraz π^0, które z kolei rozpada się na dwa fotony. Tory obu naładowanych pionów (2) zakrzywiają się w polu magnetycznym i kończą się w miejscu zderzenia tych cząstek z jednym z detektorów. Natomiast fotony powstające w reakcji (3) poruszają się po liniach prostych dopóty, dopóki nie wpadną do detektora ze szkła ołowiowego lub kalorymetru beczkowego (w tych przypadkach mogą zostać wykryte) lub zderzą się z inną częścią urządzenia. [Fotografie dzięki uprzejmości odpowiednio Los Alamos National Laboratory i Brookhaven National Laboratory]

planu Departamentu Energii „realizacja tego przedsięwzięcia pozwoli naukowcom podjąć próbę zgłębienia jednej z wielkich tajemnic współczesnej fizyki – mechanizmu wiążącego kwarki. Nowe obliczenia prze-

prowadzone na superkomputerach wskazują, że mogą być zań odpowiedzialne pola w postaci wiązek, których wzbudzenie powinno prowadzić do wytworzenia nigdy wcześniej nieobserwowanych cząstek elementarnych". 19 kwietnia 2004 r. Kyle McSlarrow, zastępca sekretarza ds. energii, i John Warner, senator ze stanu Wirginia, uczestniczyli w Jefferson Lab w ceremonii oficjalnej inauguracji przedsięwzięcia.

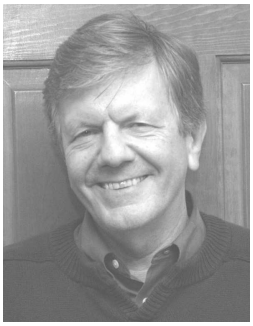
Współpraca przy eksperymencie obejmuje ponad 100 fizyków z 25 instytucji w 6 krajach, w tym w Polsce (Robert Kamiński i Leonard Leśniak z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN im. Henryka Niewodniczańskiego w Krakowie – red.). Prowadzą oni program wstępnych badań, którego celem jest optymalizacja konstrukcji detektora, przygotowanie oprogramowania analizy danych oraz rozwinięcie teorii badanych zjawisk. Eksperyment i cała współpraca przyjęły nazwę GlueX (od ang. gluonic excitations experiment, www.gluex.org). Oficjalnym przedstawicielem współpracy jest Alex Dzierba, a Curtis Meyer jest jego zastępcą. Eric Swanson jest członkiem należącej do współpracy grupy teoretyków, której przewodzi Adam Szczepaniak, dyrektor Nuclear Theory Center w Indiana University. Konstrukcja urządzeń badawczych i unowocześnienie akceleratora mają zakończyć się w 2008 r., a pierwszych wyników można się spodziewać rok lub dwa lata później.

Tłumaczył *Marek Więckowski*
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Warszawski

Lektura uzupełniająca

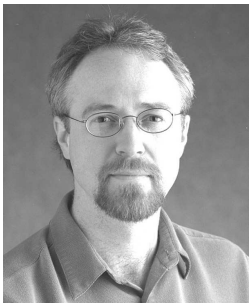
- F.E. Close, *The Cosmic Onion* (American Institute of Physics Press, New York 1983); F. Close, *Kosmiczna cebula: kwarki i Wszechświat* (PWN, Warszawa 1988).
- F. Close, M. Martin, C. Sutton, *The Particle Explosion* (Oxford University Press, Oxford 1987).
- F.E. Close, P.R. Page, „Glueballs", *Scientific American*, November 1998, s. 80.
- C. Amsler, „Proton-antiproton annihilation and meson spectroscopy with the Crystal Barrel", *Rev. Mod. Phys.* **70**, 1293 (1998).
- D.R. Thompson i in., „Evidence for exotic meson production in the reaction $\pi^- p \to \eta\pi^- p$ at 18 GeV/c", *Phys. Rev. Lett.* **79**, 1630 (1997).
- G.S. Adams i in., „Observation of a new $J^{PC} = 1^{-+}$ exotic state in the reaction $\pi^- p \to \pi^+\pi^-\pi^- p$ at 18 GeV/c", *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5760 (1998).

Redakcja dziękuje prof. Adamowi Szczepaniakowi za przejrzenie tłumaczenia.



ALEX R. DZIERBA otrzymał doktorat z doświadczalnej fizyki cząstek w 1969 r. na University of Notre Dame. Po czteroletnim kontrakcie w Caltechu zaczął pracę na Indiana University, gdzie nadal uczy i prowadzi badania.

CURTIS A. MEYER uzyskał doktorat z doświadczalnej fizyki cząstek na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley w 1987 r. Prowadził badania na Uniwersytecie w Zurychu, a następnie, w 1993 r., został profesorem na Wydziale Fizyki Carnegie Mellon University.



ERIC S. SWANSON otrzymał doktorat z fizyki w 1991 r. na Uniwersytecie w Toronto, gdzie badał dwuwymiarowe układy kwantowe spinów. Pracował m.in. w Centrum Fizyki Teoretycznej MIT, w Rutherford Appleton Laboratory w Wielkiej Brytanii i North Carolina State University oraz na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu w Pittsburghu.

Granty KBN z fizyki: XXVI i XXVII konkurs

Grants in physics of the State Committee for Scientific Research

Poniżej przedstawiamy listę projektów badawczych (grantów) z fizyki finansowanych przez Komitet Badań Naukowych począwszy od stycznia 2004r. (XXVI konkurs) i od czerwca 2004 r. (XXVII konkurs). Informacje o wynikach poprzednich konkursów podawaliśmy w kolejnych rocznikach *Postępów Fizyki* (ostatnio – patrz *PF* **53**, 131 (2002), **54**, 65 (2003), **55**, 67 (2004)).

Na XXVI konkurs wpłynęło 116 projektów, w tym 43 promotorskie (w spisie: P). Przyznano finansowanie 52 projektów, w tym 25 promotorskich. Ich oceny dokonał zespół w składzie: prof. Tadeusz Skośkiewicz (IF PAN, przewodniczący), prof. Bogdan Bułka (IFM PAN), dr hab. Krzysztof Doroba (UW), prof. Krzysztof Fiałkowski (UJ), prof. Robert Hołyst (IChF PAN), dr hab. Tadeusz Lulek (URz), prof. Włodzimierz Jaskólski (UMK), prof. Andrzej Jeżowski (INTiBS PAN), prof. Jan Jacek Żebrowski (PW), prof. Jerzy Przystawa (UWr), prof. Barbara Wosiek (IFJ PAN).

Na XXVII konkurs wpłynęło 114 projektów, w tym 32 promotorskie. Przyznano finansowanie 51 projektów, w tym 19 promotorskich. Oceny projektów dokonał zespół w składzie: prof. Jan Jadżyn (IFM PAN, przewodniczący), dr hab. Bogusław Broda (UŁ), dr hab. Krzysztof Doroba (UW), prof. Krzysztof Fiałkowski (UJ), prof. Robert Hołyst (IChF PAN), prof. Włodzimierz Jaskólski (UMK), prof. Andrzej Jeżowski (INTiBS PAN), dr hab. Jan Pluta (PW), prof. Jerzy Przystawa (UWr).

Łącznie w 27 dotychczasowych konkursach w Sekcji Fizyki zawarto 2011 umów, czyli średnio w każdym konkursie finansowano ok. 74 projektów.

Lista została opracowana we współpracy z Panią mgr inż. Martą Minorską (Sekcja Fizyki).

XXVI konkurs

Kierownik projektu Tytuł projektu	Liczba wykonawców; czas (w miesiącach); koszt (w zł)		

METODY MATEMATYCZNE, TEORIA POLA FIZYKA STATYSTYCZNA, ASTROFIZYKA

prof. Marek Kuś (CFT PAN) Chaos kwantowy w układach otwartych	8	36	132 400
dr Jan Łażewski (IFJ PAN) Podstawowe własności i diagramy fazowe materiałów stosowanych w technice – rachunki z pierwszych zasad	2	24	66 800
prof. Iwo Białynicki-Birula (CFT PAN) Zjawiska elektromagnetyczne w układach obracających się i przyśpieszanych	3	24	44 000
prof. Edward Kapuścik (IFJ PAN) Metody analizy kombinatorycznej w konstrukcji stanów koherentnych (P)	2	18	28 000
dr hab. Piotr Bizoń (WMFiI UJ) Struktura rozwiązań modelu Skyrme'a na trójsferze (P)	2	11	23 750
prof. Jerzy Kowalski-Glikman (WFiA UWr) Podwójnie szczególna teoria względności i przestrzeń de Sittera (P)	2	15	23 070
dr hab. Ewa Gudowska-Nowak (WMFiI UJ) Zjawiska rezonansowe wywołane szumami stabilnymi (P)	2	20	17 500

FIZYKA POŚREDNICH I WYSOKICH ENERGII

dr hab. Maria Krawczyk (WF UW) Precyzyjny pomiar parzystości CP i innych podstawowych własności cząstek Higgsa w przyszłych zderzaczach	7	36	200 000
prof. Marek Zrałek (WMFiCh UŚl) Poszukiwanie „nowej fizyki" w eksperymentach neutrinowych	7	36	150 000
prof. Bohdan Grządkowski (WF UW) Rola sektora pól skalarnych i ciężkich kwarków w poszukiwaniach i testach uogólnień modelu standardowego oddziaływań elektrosłabych	3	36	140 000
dr Paweł Moskal (WMFiI UJ) Badanie struktury mezonu η' oraz jego oddziaływania z protonami	7	36	97 000
dr hab. Janusz Zabierowski (IPJ) Badanie promieniowania kosmicznego w zakresie energii pierwotnych 10^{15}–$5 \cdot 10^{17}$ eV metodą wielkich pęków rejestrowanego przez aparaturę KASCADE-Grande, działającą w Forschungszentrum Karlsruhe w Niemczech	4	24	84 000
dr hab. Danuta Kiełczewska (IPJ) Poszukiwanie transformacji neutrin mionowych w elektronowe w eksperymencie K2K (P)	2	24	40 692
dr Jacek Szabelski (IPJ) Wykorzystanie rejestracji opóźnionych cząstek w wielkich pękach atmosferycznych do badania składowej hadronowej i poszukiwania egzotycznych cząstek w promieniowaniu kosmicznym	8	12	34 000

dr hab. Wojciech Dominik (WF UW)
Detekcja oddziaływań neutrin w komorze projekcji czasowej wypełnionej ciekłym argonem (P) 2 18 27 300

dr hab. Stanisław D. Głazek (WF UW)
Stany związane ciężkich kwarków w sformułowaniu hamiltonowskim (P) 2 18 25 870

FIZYKA JĄDROWA I FIZYKA PLAZMY

dr Marcin Palacz (ŚLCJ UW)
Spektroskopia gamma egzotycznych jąder atomowych z obszaru ^{100}Sn 3 24 75 410

prof. Krzysztof Pomorski (WMFiI UMCS)
Wpływ różnic rozkładów gęstości protonów i neutronów na rozszczepienie i fuzję jądrową (P) 2 24 25 000

FIZYKA ATOMOWA I MOLEKULARNA OPTYKA, AKUSTYKA

dr Krzysztof Dzierżęga (WMFiI UJ)
Laserowa spektroskopia plazmy niskotemperaturowej 4 30 160 000

prof. Czesław Radzewicz (WF UW)
Parametryczne wzmacnianie femtosekundowych impulsów światła 5 24 160 000

prof. Jan Badziak (IFPiLM)
Generacja strumieni jonów o ultrawysokiej gęstości prądu za pomocą pikosekundowych impulsów laserowych 9 24 96 000

mgr Tomasz Brzozowski (WMFiI UJ)
Wykorzystanie spektroskopii laserowej ultrawysokiej zdolności rozdzielczej w badaniach dynamiki zimnych atomów 2 24 52 800

dr hab. Marek Polasik (WCh UMK)
Teoretyczne badania struktury widm rentgenowskich oraz ich zastosowania do interpretacji widm towarzyszących procesom zderzeniowym ze szczególnym uwzględnieniem widm pochodzących od pocisków (P) 2 24 39 750

dr hab. Marek Polasik (WCh UMK)
Teoretyczne badania satelitarnych i hipersatelitarnych struktur różnorodnych rodzajów linii rentgenowskich serii K ciężkich atomów (P) 2 24 39 360

mgr Paweł Kruk (WMFiI UJ)
Budowa i diagnostyka atomowej pułapki dipolowej – wytworzenie jednowymiarowej sieci optycznej 1 23 34 500

prof. Marek Pajek (WM-P AŚw)
Badania struktury satelitarnej promieniowania rentgenowskiego serii L i M w zderzeniach jonów O i Ne z atomami (P) 2 20 33 600

prof. Paweł Kowalczyk (WF UW)
Badania stanów $4^1\Pi$ i $6^1\Sigma^+$ cząsteczki KLi (P) 2 12 18 945

prof. Jerzy Kamiński (WF UW)
Oddziaływanie silnych pól magnetycznych i elektrycznych z materią 1 12 11 500

METALE, MAGNETYKI, NADPRZEWODNIKI

prof. Andrzej Michał Oleś (WMFiI UJ)
Stany podstawowe i wzbudzenia w tlenkach metali przejściowych z orbitalnymi stopniami swobody 13 34 236 000

prof. Stanisław Robaszkiewicz (WF UAM)
Niekonwencjonalne mechanizmy nadprzewodnictwa i uporządkowania ładunkowe wąskopasmowych układów elektronowych 8 36 157 600

prof. Włodzimierz Dyakonov (IF PAN)
Natura anomalnego efektu akustoelektronowego w epitaksjalnych warstwach manganitów 6 36 150 000

prof. Adam Kiejna (WFiA UWr)
Teoretyczne badania adsorpcji metali alkalicznych na powierzchni berylu i magnezu (P) 2 15 19 900

prof. Adam Kiejna (WFiA UWr)
Struktura i energetyka submonowarstw adsorpcyjnych metali i tlenu na powierzchni metali 1 12 15 000

prof. Józef Spałek (WMFiI UJ)
Właściwości molekuł i układów nanoskopowych opisane metodą ścisłej diagonalizacji połączonej z podejściem *ab initio* (P) 2 12 10 000

KRYSZTAŁY MOLEKULARNE I POLIMERY CIECZE

prof. Adam Patkowski (WF UAM)
Wpływ wysokich ciśnień na relaksację strukturalną oraz propagację i tłumienie fononów w molekularnych i polimerowych cieczach przechłodzonych 2 36 160 000

prof. Alina Ciach (IChF PAN)
Wpływ samoorganizacji na równowagi fazowe w płynach złożonych 3 36 142 000

prof. Keshra Sangwal (WZiPT PL)
Badanie wpływu niektórych domieszek na procesy wzrostu kryształów jednowodnego szczawianu amonu z roztworów wodnych 4 24 70 400

prof. Danuta Bauman (WFT PP)
Organizacja molekularna barwników perylenowych i ich mieszanin z ciekłymi kryształami w warstwach Langmuira i Langmuira–Blodgett (P) 2 20 40 000

dr hab. Zbigniew Kisiel (IF PAN)
Wyznaczanie struktur i momentów dipolowych cząsteczek metodą spektroskopii rotacyjnej (P) 2 18 28 450

prof. Krzysztof Wojciechowski (IFM PAN)
Badania współczynnika Poissona modelowych układów cząstek z twardym rdzeniem (P) 2 12 25 000

prof. Keshra Sangwal (WZiPT PL)
Badanie powierzchni łupliwości i powierzchni wzrostowych niektórych monokryształów jonowych (P) 2 12 12 000

PÓŁPRZEWODNIKI I IZOLATORY

prof. Bronisław Orłowski (IF PAN)
Rola stanów zlokalizowanych w strukturze elektronowej niskowymiarowych materiałów elektroniki spinowej 12 36 183 200

dr Jacek Kołodziej (WMFiI UJ)
Obrazowanie budowy atomowej powierzchni GaAs, InAs i InP mikroskopem sił atomowych 9 24 170 000

dr Piotr Sitko (WPPT PWr)
Stany nieściśliwe wzbudzeń złożonych fermionów — 7 — 33 — 130 000

dr Ryszard Zdyb (WMFiI UMCS)
Struktura pasmowa powierzchni Si(335)–Au — 2 — 18 — 40 400

dr hab. Stanisław Bednarek (WFiTJ AGH)
Obliczenia z pierwszych zasad elektrodynamiki potencjałów uwięzienia w kropkach kwantowych (P) — 2 — 24 — 38 970

dr hab. Stanisław Bednarek (WFiTJ AGH)
Badania teoretyczne własności elektronowych sztucznych molekuł w pojedynczych i sprzężonych kropkach kwantowych (P) — 2 — 24 — 38 970

prof. Maria Kamińska (WF UW)
Własności domieszki Mn w GaN (P) — 2 — 12 — 32 500

dr hab. Tadeusz Wosiński (IF PAN)
Zjawiska transportu kwantowego w niskowymiarowych strukturach półprzewodnikowych na bazie arsenku galu (P) — 2 — 18 — 30 550

prof. Bogdan Pałosz (CBW PAN)
Dyfraktometryczne badania struktury atomowej polikryształów nanometrowych (P) — 4 — 12 — 24 000

dr hab. Tomasz Story (IF PAN)
Magnetyczne i magnetooptyczne własności półprzewodnikowych ferromagnetycznych struktur EuS–PbS (P) — 2 — 12 — 19 500

prof. Mirosław Załużny (WMFiI UMCS)
Polarytony plazmonowe w układach planarnych ze studniami kwantowymi (P) — 2 — 12 — 13 000

XXVII konkurs

Kierownik projektu Tytuł projektu	Liczba wykonawców; czas (w miesiącach); koszt (w zł)

METODY MATEMATYCZNE, TEORIA POLA FIZYKA STATYSTYCZNA, ASTROFIZYKA

dr hab. Piotr Jaranowski (WM-F UwB)
Analiza danych z detektorów fal grawitacyjnych — 4 — 36 — 150 000

prof. Jacek Wosiek (WFAiIS UJ)
Supersymetryczne mechaniki kwantowe Yanga–Millsa jako laboratorium dla teorii M — 5 — 36 — 150 000

prof. Janusz Hołyst (WF PW)
Struktura, dynamika i własności krytyczne sieci przypadkowych — 6 — 30 — 95 625

prof. Maciej Błaszak (WF UAM)
Separowalne układy skończenie wymiarowe oraz związane z nimi całkowalne układy polowe — 2 — 24 — 75 000

prof. Edward Kapuścik (IFJ PAN)
Zastosowanie metody funkcji tworzących do zagadnień resumacji szeregów rachunku zaburzeń w fizyce kwantowej (P) — 2 — 24 — 40 000

FIZYKA POŚREDNICH I WYSOKICH ENERGII

prof. Barbara Wosiek (IFJ PAN)
Badanie produkcji cząstek w zderzeniach jądrowych przy najwyższych energiach akceleratorowych: udział w eksperymencie Phobos przy akceleratorze RHIC — 5 — 36 — 263 250

dr hab. Danuta Kiełczewska (WF UW)
Badanie własności neutrin w detektorze Super-Kamiokande — 5 — 24 — 140 000

prof. Jan Figiel (IFJ PAN)
Weryfikacja Modelu Standardowego i poszukiwanie nowych zjawisk w oddziaływaniach e–p: eksperyment ZEUS — 9 — 24 — 128 500

prof. Danuta Kisielewska (WFiTJ AGH)
Badanie oddziaływań e–p w eksperymencie ZEUS na akceleratorze HERA — 8 — 24 — 124 000

prof. Elżbieta Richter-Wąs (IFJ PAN)
Strategie i potencjał dla poszukiwania bozonu(ów) Higgsa w stanach końcowych z leptonami tau i kwarkami b w zderzeniu proton–proton przy 14 TeV — 4 — 24 — 114 400

dr Janusz Gluza (WMFiCh UŚl)
Dwupętlowe poprawki QED do procesu Bhabhy — 4 — 18 — 83 980

dr hab. Henryk Czyż (WMFiCh UŚl)
Generator Monte Carlo dla procesu $e^+e^- \to u^+u^- +$ fotony (P) — 2 — 18 — 32 000

prof. Michał Praszałowicz (WFAiIS UJ)
Stany zreggeizowanych gluonów w chromodynamice kwantowej (P) — 2 — 14 — 28 000

prof. Marek Zrałek (WMFiCh UŚl)
Poprawki radiacyjne do procesów niskoenergetycznych w modelu o symetrii lewo–prawo (P) — 2 — 12 — 23 000

FIZYKA JĄDROWA I FIZYKA PLAZMY

prof. Jacek Dobaczewski (WF UW)
Badanie funkcjonałów gęstości energii i oddziaływań w egzotycznych układach jądrowych — 15 — 29 — 275 000

dr hab. Janusz Skalski (IPJ)
Synteza i dynamika rozszczepienia najcięższych jąder atomowych — 1 — 36 — 44 000

prof. Wiesław Andrzej Kamiński (WMFiI UMCS)
Wybrane zagadnienia fizyki niestandardowej w podwójnym bezneutrinowym rozpadzie beta (P) — 2 — 16 — 22 200

prof. Władysław Waluś (WFAiIS UJ)
Badanie wzbudzeń kolektywnych w neutronononadmiarowych jądrach atomowych z obszaru ^{132}Sn (P) — 2 — 14 — 22 200

dr Leszek Próchniak (WMFiI UMCS)
Analiza mikroskopowych podstaw symetrii dynamicznych w jądrach atomowych — 1 — 24 — 20 000

prof. Wiktor Zipper (WMFiCh UŚl)
Wyznaczanie obserwabli polaryzacyjnych w dużym obszarze przestrzeni fazowej reakcji rozszczepienia deuteronu ^{1}H(d,pp)n przy energii wiązki 130 MeV (P) — 2 — 12 — 15 000

FIZYKA ATOMOWA I MOLEKULARNA OPTYKA, AKUSTYKA

dr Jerzy Zachorowski (WFAiIS UJ)
Spektroskopia braggowska zimnych atomów — 9 — 24 — 236 250

prof. Andrzej Graja (IFM PAN)
Uporządkowanie magnetyczne i mechanizmy parowania elektronów w molekularnych materiałach hybrydowych — 7 — 36 — 220 000

dr hab. Janusz Braziewicz (WM-P AŚw)
Rentgenowska mikroanaliza fluorescencyjna: zastosowanie w badaniach biomedycznych — 3 — 30 — 98 250

prof. Marek Żukowski (WMiF UG)
Kwantowe splątanie — 5 — 30 — 78 000

METALE, MAGNETYKI, NADPRZEWODNIKI

prof. Zygmunt Henkie (INTiBS PAN)
Stan Kondo systemów dwupoziomowych w kryształach związków aktynowcowych — 9 — 36 — 263 430

dr hab. Marian Kuźma (WM-P URz)
Magnetyczne własności roztworów stałych CdCrTe z dużą zawartością chromu — 7 — 24 — 145 000

prof. Henryk Szymczak (IF PAN)
Indukowane ciśnieniem hydrostatycznym i światłem zmiany stanu spinowego w kobaltytach — 9 — 24 — 127 400

dr hab. Roman Puźniak (IF PAN)
Wpływ podstawień chemicznych i defektów radiacyjnych na samoistne i niesamoistne parametry stanu nadprzewodzącego MgB_2 — 5 — 24 — 108 000

dr hab. Mai Suan Li (IF PAN)
Fazowe przejścia w nadprzewodnikach i biomolekułach — 3 — 36 — 104 250

dr hab. Romuald Lemański (INTiBS PAN)
Magnetyzm układów złożonych z elektronów zlokalizowanych i wędrownych indukowany oddziaływaniami lokalnymi — 1 — 24 — 46 400

mgr Andrzej Hilczer (WF UAM)
Wpływ ciśnienia hydrostatycznego na własności dielektryczne relaksorów ferroelektrycznych — 1 — 18 — 44 220

dr Piotr Szymczak (WF UW)
Ewolucja geometrii wąskich szczelin w procesach erozji chemicznej — 1 — 12 — 26 800

dr hab. inż. Dariusz Kaczorowski (INTiBS PAN)
Własności termoelektryczne 4f i 5f-elektronowych faz Heuslera RPd_2X i RPdX (X = Sb, Bi) (P) — 2 — 15 — 26 400

prof. Tomasz Goworek (WMFiI UMCS)
Anihilacja pozytonów w krzemionce uporządkowanej typu MCM-41 (P) — 4 — 15 — 25 000

prof. Andrzej Michał Oleś (WFAiIS UJ)
Teoretyczny opis faz uporządkowanych magnetycznie w silnie skorelowanych tlenkach manganu (P) — 2 — 12 — 23 000

prof. Stefan Waplak (IFM PAN)
Struktura wybranych centrów paramagnetycznych a efekty przedprzejściowe fazy superprotonowej w $K_3H(SO_4)_2$ (P) — 2 — 10 — 22 500

prof. Janusz Wolny (WFiTJ AGH)
Zastosowanie metody średniej komórki elementarnej do opisu struktur modulowanych (P) — 2 — 12 — 20 000

prof. Henryk Szymczak (IF PAN)
Wpływ napięcia elektrycznego indukowanego w próbce nadprzewodnika drugiego rodzaju na dynamikę procesu lawiny termomagnetycznej (P) — 2 — 10 — 19 500

dr hab. Piotr Tomczak (WF UAM)
Czy przy użyciu metody RVB można poprawnie opisać stan podstawowy sfrustrowanych antyferromagnetyków kwantowych — 1 — 12 — 8950

KRYSZTAŁY MOLEKULARNE I POLIMERY CIECZE

prof. Jerzy Górecki (IChF PAN)
Przetwarzanie informacji w układach typu reakcja–dyfuzja — 7 — 36 — 173 300

dr hab. Andrzej Budkowski (WFAiIS UJ)
Samo-organizacja, tworzenie i odwzorowanie struktur w nanometrowych warstwach polimerów (P) — 2 — 18 — 37 119

dr hab. Adam Lipowski (WF UAM)
Mechanika statystyczna układów szklistych i granularnych — 1 — 24 — 37 000

prof. Wojciech Kuczyński (IFM PAN)
Liniowy i kwadratowy efekt elektrooptyczny w chiralnych ciekłych kryształach (P) — 2 — 18 — 34 000

dr hab. Marek Kozielski (WFT PP)
Badanie właściwości fizycznych szeregu homologicznego polioksyetylenoglikoli metodami spektroskopii Rayleigha i Ramana (P) — 2 — 12 — 24 800

dr hab. Krystyna Hołderna-Natkaniec (WF UAM)
Dynamika molekularna N6-furfurylo- i N6-benzylo-aminopuryny (P) — 2 — 14 — 23 890

PÓŁPRZEWODNIKI I IZOLATORY

prof. Mirosław Drozdowski (WFT PP)
Wpływ domieszkowania monokryształów $KGd(WO_4)_2$, $KY(WO_4)_2$ oraz $La_2CaB_{10}O_{19}$ na własności fizyczne badane metodami spektroskopii Brillouina oraz Ramana — 11 — 30 — 196 800

dr hab. Franciszek Firszt (WFAiIS UMK)
Technologia otrzymywania i własności szerokopasmowych związków półprzewodnikowych II–VI z berylem, magnezem i manganem jako składnikami — 7 — 36 — 181 500

dr hab. Stanisław Bednarek (WFiTJ AGH)
Badania teoretyczne solitonu elektronowego w nanostrukturach półprzewodnikowych — 6 — 36 — 120 000

prof. Andrzej Burian (WMFiCh UŚl)
Analiza dwuwymiarowych obrazów dyfrakcyjnych w badaniach strukturalnych nanorurek węglowych (P) — 2 — 18 — 35 400

dr hab. Ryszard Krzyminiewski (WF UAM)
Opracowanie algorytmów służących do otrzymywania obrazów 2D rozkładu rodników metodą EPR w ciałach stałych — 2 — 12 — 24 900

prof. Jan Gaj (WF UW)
Dynamika ekscytonów neutralnych i naładowanych w domieszkowanych studniach kwantowych z półprzewodników II–VI (P) — 2 — 12 — 20 010

Antoni Szczurek

Urodził się w 1957 r. w Krakowie. Studia fizyki na Uniwersytecie Jagiellońskim ukończył w roku 1981, specjalizując się w fizyce jądrowej. Odbył studia doktoranckie na UJ, zakończone doktoratem (1988) za pracę dotyczącą mechanizmu reakcji w układach z niewielką liczbą nukleonów oraz struktury lekkich jąder (promotor prof. Lucjan Jarczyk). Od 1987 r. pracuje w Instytucie Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego w Krakowie, gdzie obecnie jest kierownikiem Zakładu Reakcji Jądrowych oraz wiceprzewodniczącym Rady Naukowej. Habilitował się w 1997 r., a tytuł naukowy profesora otrzymał 2 kwietnia 2004 r.

Początkowo zajmował się badaniem reakcji ciężkich jonów, spontanicznym pękaniem jąder atomowych i chaosem w reakcjach jądrowych oraz wyznaczaniem struktury hadronów przy użyciu sond leptonowych.

W latach 1990–93 przebywał w Forschungszentrum Jülich, gdzie zajmował się reakcjami z udziałem barionów i mezonów oraz efektami propagacji paczki falowej przez jądro atomowe. Praca habilitacyjna dotyczyła obserwowalnych efektów chmury mezonowej w nukleonie. Później badał m.in. poprawki do standardowego modelu partonowego w reakcjach inkluzywnych oraz w semiinkluzywnej produkcji pionów w głęboko nieelastycznym rozpraszaniu leptonów na nukleonach.

Obecnie pracuje m.in. nad wyznaczaniem rozkładów gluonów z głęboko nieelastycznego rozpraszania elektronów lub pozytonów na protonach w zakresie małych wartości parametru x Bjorkena, produkcją pionów i kaonów w zderzenich proton–proton oraz zderzeniami dwóch fotonów powyżej progu produkcji hadronów.

Jest autorem ok. 90 prac z zakresu fizyki niskich, średnich i wielkich energii oraz ponad 75 wystąpień konferencyjnych. Wykładał dla doktorantów uniwersytetów w Erlangen i Regensburgu, opiekował się pracami magisterskimi i doktorskimi. Od trzech lat prowadzi wykłady na Uniwersytecie Rzeszowskim. Brał udział w organizacji międzynarodowych konferencji MESON 2000, 2002 i 2004.

Żonaty, ma trzech synów: Aleksandra (1989), Mateusza (1992) i Łukasza (1997).

George I. Melikidze

Urodził się w Tbilisi w 1953 r. Jego ojciec był naukowcem, a matka lekarką. Podjął studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Tbilisi, lecz w ich trakcie postanowił poświęcić się astronomii i przeniósł się do Leningradu, gdzie uzyskał magisterium z astronomii. Miał wówczas okazję współpracować z wieloma słynnymi astrofizykami radzieckimi z Instytutu Fizyczno-Technicznego im. A.F. Joffego. Po studiach rozpoczął pracę w nowo powstałym laboratorium Obserwatorium Astrofizycznego w Abastumani, w pięknej górzystej okolicy, z dala od cywilizacji i w licznej grupie młodych badaczy. Zajmował się tam pulsarami i plazmą elektronowo-pozytonową, co było w owym czasie zupełnie nową dziedziną astrofizyki plazmy.

Był świadkiem rozpadu Związku Radzieckiego i wojny domowej w Gruzji – braku elektryczności i żywności oraz gigantycznej inflacji. Z największym trudem kontynuował badania dzięki grantom zagranicznym, m.in. Fundacji Sorosa (wielu naukowców w byłym ZSRR musiało wówczas wyemigrować lub porzucić karierę w nauce). Był wicedyrektorem Obserwatorium, walcząc o zachowanie aparatury pomiarowej i umożliwienie ludziom pracy. Uważa ten okres za najtrudniejszy w swojej karierze zawodowej.

W roku 1996 przeniósł się do Polski i podjął pracę w Instytucie Astronomii Uniwersytetu Zielonogórskiego. Nauczył się języka polskiego, nawiązał nowe przyjaźnie i zaczął uczyć polskich studentów. 16 kwietnia 2004 r. otrzymał tytuł profesora.

Bardzo lubi sporty wodne (jest Wodnikiem), zwłaszcza pływanie we wzburzonym morzu. W latach studenckich uprawiał też żeglarstwo.

Kocha poezję, zwłaszcza gruzińską, którą uważa za jedną z najlepszych na świecie. Zawsze bardzo lubił czytać, poświęcając lekturze największą część swego wolnego czasu. Lubi też gotować, zwłaszcza dania gruzińskie dla swych przyjaciół, i – jak każdy Gruzin – jest wielbicielem dobrych win. Najlepiej odpoczywa wśród przyjaciół, przy smakowitym jedzeniu i winie, czego – co przyznaje – brakuje mu w Polsce najbardziej.

Tadeusz Bancewicz

Urodził się w 1946 r. w Międzyrzeczu na Wielkopolsce. Studiował fizykę na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, uzyskując magisterium w 1970 r. Po ukończeniu studiów podjął pracę na UAM, gdzie w 1977 r. obronił doktorat (promotor prof. Stanisław Kielich) i uzyskał habilitację (1988). Od roku 1991 profesor UAM, tytuł naukowy otrzymał 12 października 2004 r.

Zajmuje się optyką molekularną, optyką nieliniową i spektroskopią molekularną. Bada własności optyczne molekuł metodami liniowego i nieliniowego rozpraszania światła. Opracował teorię kształtu linii widmowych hiperrejlejowskiego oraz wibracyjnego hiperramanowskiego rozpraszania światła przez gazy i ciecze molekularne. Rozwinął, w języku nieprzywiedlnych tensorów sferycznych, ogólną teorię rejlejowskiego i ramanowskiego rozpraszania światła z udziałem mechanizmów indukowanych oddziaływaniami międzymolekularnymi. Obecnie bada teoretycznie i doświadczalnie polaryzowalności multipolowe oraz hiperpolaryzowalności molekuł w fazie gazowej (zon8.physd.amu.edu.pl/welcome.html).

Odbył długoterminowy staż na State University of New York at Stony Brook (USA), przebywał krócej m.in. na Pennsylvania State University (USA) oraz na Uniwersytecie w Patras (Grecja). Od 1989 r. współpracuje z grupą, którą kieruje prof. Yves Le Duff na Uniwersytecie w Angers (Francja), dokąd wielokrotnie wyjeżdżał jako profesor-gość.

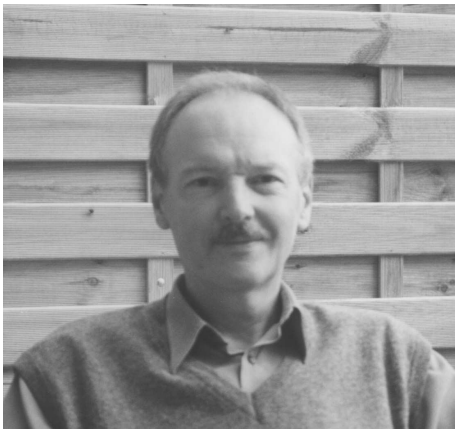
Był kierownikiem dwóch grantów KBN, grantu współpracy polsko-francuskiej oraz grantu POLONIUM. Jest autorem 47 artykułów w czasopismach z listy filadelfijskiej, 6 artykułów opublikowanych w języku polskim oraz 36 komunikatów konferencyjnych. Otrzymał nagrody ministra edukacji narodowej w latach 1979, 1989, 1994 i 2002 oraz siedmiokrotnie nagrodę rektora UAM.

Za swoich mistrzów uważa Stanisława Kielicha, który był jego nauczycielem, przełożonym i mentorem, oraz Yves'a Le Duffa, przyjaciela, który nauczył go interpretacji wyników doświadczalnych.

Poza fizyką interesują go: przyroda, film i fotografia.

Mariusz Zubek

Urodził się w 1945 r. w Łyszkowicach na ziemi łowickiej. Studia wyższe odbył na Politechnice Gdańskiej (fizyka techniczna) oraz na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza (fizyka). Stopień doktora nauk fizycznych otrzymał w roku 1977 (promotor prof. Olgierd Gzowski), a habilitował się (1993) na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika. Tytuł profesora nauk fizycznych otrzymał 30 listopada 2004 r. Od 1968 r. nieprzerwanie związany z Politechniką Gdańską, gdzie obecnie kieruje zespołem spektroskopii elektronowej na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej.



Prowadzi badania z zakresu fizyki atomowej i molekularnej. Zajmował się m.in. procesami przyprogowego wzbudzenia atomów i cząsteczek do stanów metatrwałych w zderzeniach z elektronami, spektroskopią stanów rezonansowych jonów ujemnych obserwowanych w rozpraszaniu elektronów (odkrył nowe stany rezonansowe) oraz pomiarami różniczkowych przekrojów czynnych na zderzenia elektronów z atomami. W laboratorium Daresbury Synchrotron Radiation Source (Wielka Brytania) badał fotojonizację jednofotonową atomów gazów szlachetnych. Do swoich osiągnięć zalicza opracowanie nowej metody detekcji cząsteczek w stanach metatrwałych oraz nowej techniki pomiarów spektrometrycznych rozpraszania wstecznego.

Jest autorem lub współautorem ponad 130 publikacji naukowych i dwóch podręczników oraz promotorem dwóch prac doktorskich.

Pełnił funkcję przewodniczącego i organizatora międzynarodowej konferencji CEPAS 2002 (Conference on Elementary Processes in Atomic Systems) w Gdańsku, a obecnie jest członkiem Komitetu Sterującego programu EIPAM (Electron Induced Processing at the Molecular Level) finansowanego przez Europejską Fundację Nauki. Jest członkiem rzeczywistym Instytutu Fizyki w Wielkiej Brytanii (Fellow of Institute of Physics).

Ma żonę Jadwigę Ewę (lekarza – specjalistę rehabilitacji), synów Radosława i Andrzeja, córkę Justynę i wnuka Krzysztofa. Z pasją uprawia fotografię krajobrazową.

Spotkania z noblistami w Lindau

W południowym zakątku Niemiec, tuż przy granicy z Austrią i Szwajcarią, leży nad Jeziorem Bodeńskim malownicze i niezwykłe miasteczko Lindau. Niezwykłe, bo od 1951 r. odbywają się tam corocznie na przełomie czerwca i lipca spotkania laureatów Nagrody Nobla z młodymi naukowcami i uzdolnionymi studentami z całego świata.

Autorami pomysłu spotkań byli dwaj lekarze mieszkający w Lindau, Gustave Parade i Franz Karl Hein, którzy w końcu lat 40. zaczęli organizować konferencje medyczne, chcąc przełamać izolację niemieckiej nauki po II wojnie światowej. Aby podnieść ich rangę, zapraszali na nie noblistów, początkowo tylko niemieckich, ale z upływem lat przyjeżdżało ich coraz więcej także z zagranicy. Szczęśliwym trafem niedaleko Lindau, na małej wyspie Mainau na Jeziorze Bodeńskim, mieszkał członek szwedzkiej rodziny królewskiej, hrabia Lennart Bernadotte af Wisborg, któremu – nie bez trudu – udało się przekonać zarząd Fundacji Noblowskiej do objęcia patronatu nad spotkaniami.

Aktualnie organizuje je komitet, którego przewodniczącą jest hrabina Sonja Bernadotte, a jej zastępcą – prof. Ludwig E. Feinendegen. Natomiast Lennart Bernadotte jest honorowym przewodniczącym fundacji (obecnie wraz z Romanem Herzogiem, byłym prezydentem Niemiec), której zadaniem jest pozyskiwanie środków finansowych na organizację spotkań. Sponsorują je liczne fundacje wspierania nauki (w tym Fundacja Noblowska), agendy rządowe i międzynarodowe, firmy przemysłowe i osoby prywatne. Ideą spotkań młodych naukowców i studentów z uznanymi autorytetami jest stworzenie forum dyskusji z różnych dziedzin: fizyki, chemii, medycyny i fizjologii (www.lindau-nobel.de)[1].

W dniach od 27 czerwca do 2 lipca 2004 r. odbyło się już 54. takie spotkanie, a 18. poświęcone fizyce. W konferencji uczestniczyło ok. 500 osób, w tym aż 18 noblistów. Odbyło się 16 wykładów, 2 dyskusje okrągłego stołu i wiele spotkań tematycznych w małych grupach.

Ciekawą formułę mają dyskusje przy okrągłym stole. Z założenia w każdej z nich uczestniczy kilku laureatów, którzy na wstępie w kilkuminutowej prezentacji przedstawiają wybrane problemy. Słuchacze kierują swoje pytania drogą pisemną, a następnie pytania wybrane drogą losowania są tematem dalszej dyskusji między laureatami. Pierwsza sesja z udziałem profesorów Riccarda Giacconiego (Nobel z fizyki 2002), Masatoshiego Koshiby (Nobel z fizyki 2002), Arno Penziasa (Nobel z fizyki 1978) oraz Gerardusa 't Hoofta (Nobel z fizyki 1999) dotyczyła astrofizyki. Poruszano takie zagadnienia, jak mechanizm tworzenia się gwiazd, astronomia rentgenowska, badania ciemnej materii, a także dyskutowano o finansowaniu badań astrofizycznych.

W drugiej sesji uczestniczyli profesorowie Ivar Giaever (Nobel z fizyki 1973), Herbert Kroemer (Nobel z fizyki 2000), Douglas Osheroff (Nobel z fizyki 1996) i Martinus Veltman (Nobel z fizyki 1999). Tematem przewodnim była kwestia „fizyka podstawowa a fizyka stosowana". Niektóre z pytań słuchaczy odbiegały co prawda od tematu dyskusji, ale dotyczyły spraw ważnych dla młodych ludzi wchodzących w świat nauki.

Dyskusja okrągłego stołu; od lewej: Ivar Giaever, Herbert Kroemer, prowadzący dyskusję Anders Bárány, Douglas Osheroff i Martinus Veltman (fot. Aleksandra Wójcik)

Cykl wykładów dotyczył przede wszystkim najważniejszych osiągnięć z astrofizyki, nanofizyki, fizyki ciała stałego, fizyki wielkich energii, fizyki kwantowej i biofizyki. Klaus von Klitzing (Nobel z fizyki 1985) wygłosił wykład „Spin w transporcie elektronowym w półprzewodnikowych strukturach kwantowych", Walter Kohn (Nobel z chemii 1998) – „Nowe spojrzenie na oddziaływania van der Waalsa między układami o różnych wymiarach, kształtach i składach atomowych", Herbert Kroemer – „Ujemne załamanie optyczne", Douglas Osheroff – „Zrozumieć katastrofę wahadłowca Columbia", Leo Esaki (Nobel z fizyki 1973) – „Narodziny i ewolucja supersieci", Arno Penzias – „Klasyczne spojrzenie na kosmologię", Robert Huber (Nobel z chemii 1988) – „Organizmy tlenowe i beztlenowe a tlenek węgla", Nicolaas Bloembergen (Nobel z fizyki 1981) – „Lasery w czasach pokoju i wojny", Riccardo Giacconi – „Astronomia rentgenowska", Masatoshi Koshiba – „Narodziny astrofizyki neutrin", Gerardus 't Hooft – „Superteorie", Martinus Veltman – „Rozwój fizyki cząstek".

Nie zabrakło również tematów mniej naukowych, np. „Jak zacząć działalność high-tech" (Ivar Giaever), „Fakty

[1] Od wielu lat młodzi polscy naukowcy mogą uczestniczyć w spotkaniach w Lindau dzięki dżentelmeńskiej umowie między prof. Ludwigiem Feinendegenem i prof. Łukaszem Turskim. Organizatorzy spotkania pokrywają koszty pobytu, a strona polska dba o dobór uczestników. Autorka sprawozdania wyjechała do Lindau jako świeżo upieczona absolwentka fizyki na Uniwersytecie Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie – red.

i fantazje w nauce" (Brian Josephson, Nobel z fizyki 1973) lub „Pseudonauka, cudowne gadżety i polityka społeczna" (Robert Richardson, Nobel z fizyki 1996).

Codziennie po wykładach organizowane były dyskusje naukowe. W zależności od swych zainteresowań słuchacze mogli w małych grupach uczestniczyć w spotkaniu z wybranym przez siebie profesorem. Warto podkreślić, że atmosfera tych spotkań pozwalała na zmniejszenie dystansu między laureatem a młodymi naukowcami, co znajdowało wyraz w zadawanych pytaniach.

Popołudniowa dyskusja młodych uczestników spotkania z prof. Douglasem Osheroffem (fot. Aleksandra Wójcik)

Bogaty był również program zajęć dodatkowych – znalazły się wśród nich: koncert muzyki klasycznej, wycieczka po Lindau i bankiet. Ideą tego tradycyjnego już bankietu jest stworzenie młodym uczestnikom konferencji niepowtarzalnej możliwości spotkania laureatów Nagrody Nobla w okolicznościach towarzyskich. Tradycją jest też, by przy każdym stole zasiadał tylko jeden laureat. Młodzi uczestnicy spotkania dokonywali wyboru laureata, w którego towarzystwie mogli spędzić czas.

Oficjalne zakończenie spotkania w Lindau odbyło się na wyspie Mainau. Jest to nadzwyczajne miejsce ze względu na niezwykle piękną przyrodę oraz historię. Najstarsze ślady osadnictwa na tej wyspie datuje się na 3000 r. p.n.e. Kolejni właściciele wyspy od niepamiętnych czasów stawiali sobie za punkt honoru wzbogacanie jej flory rzadkimi okazami. Dzięki temu jest to niebywale urokliwe miejsce.

Spotkania w Lindau są niepowtarzalną okazją poznania autorytetów naukowych. Uzmysławiają one, jak ważne jest w pracy badawczej prawdziwe pasjonowanie się nauką. Poznanie Laureatów i nawet tylko kilkudniowy kontakt z nimi działa na jej młodych adeptów bardzo motywująco i inspirująco.

Aleksandra Wójcik
Instytut Fizyki PAN
Warszawa

Od cienkich warstw do nanostruktur

W dniach od 30 sierpnia do 2 września 2004 r. w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Łódzkiego odbyła się międzynarodowa konferencja „From thin films to nanostructures" (Od cienkich warstw do nanostruktur), zorganizowana przez Katedrę Fizyki Ciała Stałego UŁ. Przewodniczącym komitetu organizacyjnego był dr hab. Tadeusz Balcerzak, kierownik Katedry.

Konferencja miała charakter jubileuszowy, związany z 30-leciem istnienia Katedry. Obchodom jubileuszu poświęcona została specjalna uroczysta sesja, w której udział wzięły władze rektorskie UŁ i liczni przedstawiciele łódzkiego środowiska naukowego (m.in. Łódzkiego Towarzystwa Naukowego, Oddziału Polskiego Towarzystwa Fizycznego i Politechniki Łódzkiej). W jej trakcie okolicznościowy referat wygłosił prof. Leszek Wojtczak, honorowy przewodniczący konferencji, który był założycielem i pierwszym kierownikiem KFCS w latach 1974–99.

Tematyka konferencji dotyczyła wielu interesujących i aktualnych aspektów fizyki ciała stałego związanych z fizyką cienkich warstw i powierzchni, nanotechnologią, własnościami fizycznymi nanostruktur i klasterów atomowych, a także z nowoczesnymi metodami doświadczalnymi, jak niskoenergetyczna dyfrakcja elektronów (LEED), skaningowa mikroskopia tunelowa i mikroskopia sił atomowych (STM/AFM), spektroskopia mössbauerowska, oraz różnymi rodzajami mikroskopii elektronowej (w tym analitycznej). Sporo uwagi poświęcono zagadnieniom fizyki magnetyzmu układów niskowymiarowych i możliwości ich zastosowań, m.in. w spintronice. Wygłoszono 25 referatów na zaproszenie (zarówno eksperymentalnych, jak i teoretycznych) omawiających szeroki zakres zagadnień.

W konferencji, która zgromadziła blisko 100 osób, wzięli udział przedstawiciele wielu znaczących ośrodków krajowych, m.in. z Warszawy (IF PAN), Poznania (UAM, IFM PAN, PP), Krakowa (UJ, AGH), Lublina (UMCS), Wrocławia (UWr), Katowic (UŚl), Torunia (UMK), Białegostoku (UwB), Częstochowy (PCz), Radomia (PR), Łodzi (UŁ, PŁ) i innych uczelni, z którymi KFCS utrzymuje kontakty naukowe, oraz kilkunastu przedstawicieli różnych ośrodków zagranicznych współpracujących z KFCS, m.in. z USA (Berkeley, Houston), Meksyku (Mexico City), Japonii (Tokio, Nagoja), Francji (St. Malo), Hiszpanii (Santiago de Compostela), Niemiec (Erlangen) i Słowacji (Koszyce). Obrady toczyły się w języku angielskim.

Przedostatni dzień konferencji poświęcony był całkowicie tematyce sieci „Nowe materiały dla magnetoelektroniki" (Mag-El-Mat). W pracach tej sieci, koordynowanych przez doc. Bogdana Idzikowskiego (IFM PAN), biorą aktywny udział zarówno pracownicy KFCS, jak i przedstawiciele wielu zespołów z ww. ośrodków krajowych. Mówiono m.in. o półprzewodnikach ferromagnetycznych, magnetooporowych czujnikach i złączach tunelowych, transporcie elektronowym w magnetykach granu-

larnych, kryształach magnonowych, dynamice sieci i dynamice spinowej manganitów oraz domenach magnetycznych w cienkich warstwach i nanostrukturach. Z innych referatów warto wymienić przegląd zastosowań i osiągnięć STM – techniki, która jest intensywnie rozwijana w KFCS.

Na zakończenie uczestnicy konferencji wyrazili podziękowanie jej organizatorom za dobre przygotowanie i za wysoki poziom merytoryczny zaproszonych referatów. Materiały pokonferencyjne (pełne teksty prac) będą opublikowane w języku angielskim w VI i VII tomie *Acta Physicae Superficierum*, wspólnego wydawnictwa UŁ i UAM. Pełny spis referatów wygłoszonych na konferencji można znaleźć na stronie std2.fic.uni.lodz.pl/konferencja/. Streszczenia referatów i komunikatów plakatowych zostały opublikowane w języku angielskim w broszurce *From thin films to nanostructures* (Wydawnictwo UŁ, Łódź 2004).

Sponsorami konferencji były: Komitet Badań Naukowych, sieć krajowa Mag-El-Mat, firma Precision and Vacuum Technology (Prevac) i Uniwersytet Łódzki.

Autor notatki dziękuje prof. Balcerzakowi za udostępnienie materiałów.

Marcin Ostrowski
Instytut Fizyki
Uniwersytet Łódzki

Przyszłość zderzeń jądrowych przy wysokich energiach

W dniach 15–17 września 2004 r. odbyły się w Kielcach międzynarodowe warsztaty dotyczące przyszłości zderzeń jądrowych przy wysokich energiach – International Workshop on Future of Nuclear Collisions at High Energies. Spotkanie, w którym wzięło udział 60 uczestników, zorganizował Instytut Fizyki Akademii Świętokrzyskiej przy wsparciu finansowym rektora uczelni. Głównym celem Warsztatów było przedyskutowanie programów doświadczalnych, które będą realizowane w bliższej lub dalszej przyszłości, oraz takich, których realizacja jest obecnie jedynie rozważana. Aby jednak dyskusja o przyszłości uwzględniała obecny stan badań, dokonano przeglądu i podsumowania najważniejszych dotychczasowych dokonań fizyki zderzeń relatywistycznych jonów. Celem tej dynamicznie rozwijającej się dziedziny jest badanie własności silnie oddziałującej materii, a zwłaszcza wyznaczenie jej wykresu fazowego. Wyniki uzyskane przy akcelaratorze SPS w CERN-ie w Genewie i zderzaczu relatywistycznych ciężkich jonów RHIC w Brookhaven National Laboratory w USA wskazują na istnienie dwóch zasadniczo odmiennych faz tej materii: gazu hadronowego i plazmy kwarkowo-gluonowej, w której kwarki i gluony są uwolnione z wnętrz hadronów.

Centralnym elementem programu Warsztatów, na który złożyły się 33 referaty, było 6 wykładów prezentujących programy przyszłości. I tak, omówiono eksperymenty ALICE (Marek Kowalski), CMS (Bolesław Wysłouch) i ATLAS (Barbara Wosiek), w których już od roku 2008 będą badane zderzenia ciężkich jąder atomowych w wielkim zderzaczu hadronowym LHC w CERN-ie. Osiągnięta ma zostać wtedy rekordowa energia zderzenia wynosząca 5 TeV dla pary zderzających się nukleonów, co umożliwi poznanie własności plazmy kwarkowo-gluonowej o wielkiej gęstości energii.

Poszukiwanie punktu krytycznego silnie oddziałującej materii ma być głównym celem przedstawionego przez Marka Gaździckiego programu badania zderzeń jąder atomowych przy SPS. Argumenty teoretyczne i dotychczas zebrane dane doświadczalne sugerują występowanie punktu krytycznego, objawiającego się wzmożonymi fluktuacjami liczby produkowanych cząstek i ich pędów, przy energiach zderzenia dostępnych właśnie przy akceleratorze SPS. Początek zbierania danych doświadczalnych przewidywany jest na rok 2009.

David Hofman przedstawił projekt nowego układu doświadczalnego przy zderzaczu RHIC, który ma badać zderzenia jądrowe zarówno w układzie wiązek przeciwbieżnych, jak i w konfiguracji ze spoczywającą tarczą. W pierwszym przypadku eksperyment ma odpowiedzieć na pytanie, co się dzieje z produktami zderzenia lecącymi w wąski stożek „do przodu", o których niewiele mówią eksperymenty obecnie realizowane przy RHIC. W drugiej konfiguracji możliwe będzie poszukiwanie punktu krytycznego silnie oddziałującej materii, podobnie jak w doświadczeniach przy SPS.

Wreszcie, przedstawiono (Peter Senger) eksperyment CBM (Compressed Baryon Matter), wykorzystujący ciężkie jony przyspieszone w akceleratorze SIS-300, który będzie częścią kompleksu FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) mającego rozpocząć pracę ok. roku 2014 w ośrodku badań ciężkojonowych GSI w Darmstadcie. Program badawczy projektu CBM ma się koncentrować, zgodnie ze swą nazwą, na własnościach materii o dużej gęstości barionowej.

Dyskusji o przyszłości towarzyszył szeroki przegląd podejść teoretycznych do zderzeń relatywistycznych jonów oraz programów badawczych obecnie realizowanych przy akceleratorach SIS-100 w GSI, SPS oraz RHIC. Wskazywano na nierozwiązane problemy, eksponowano zagadkowe wyniki doświadczalne, spierano się o najbardziej perspektywiczne kierunki badań. Pełny program Warsztatów wraz z elektronicznymi wersjami wszystkich prezentacji jest dostępny na stronie www.pu.kielce.pl/~stefanek/workshop/Kielce_workshop.htm.

Stanisław Mrówczyński
Instytut Fizyki
Akademia Świętokrzyska im. J. Kochanowskiego
Kielce
oraz Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana
Warszawa

Algebraiczne metody rozwiązywania równania Schrödingera

Włodzimierz Salejda, Michał H. Tyc, Marcin Just: *Algebraiczne metody rozwiązywania równania Schrödingera*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002, s. 190.

Mechanika kwantowa, której symbolem jest równanie Schrödingera, dostarcza teoretycznego aparatu pozwalającego wyjaśniać podstawowe własności materii. Do połowy XX w. teoria ta mogła być jedynie wykorzystywana do analizy najprostszych układów, gdyż złożoność obliczeniowa bardziej skomplikowanych problemów mechaniki kwantowej przekraczała istniejące wówczas możliwości rachunkowe. To samo ograniczenie dotyczyło badania zjawisk opisywanych klasycznymi równaniami ruchu, a także rozwiązywania złożonych zagadnień technicznych. Radykalne zmiany nastąpiły wraz z upowszechnieniem się dostępu do elektronicznych maszyn liczących. Rozwój komputerów i superkomputerów, któremu towarzyszył stały postęp w tworzeniu numerycznych algorytmów pozwalający na efektywne wykorzystanie dostępnych mocy obliczeniowych sprawił, że możliwa stała się teoretyczna analiza złożonych układów atomowych i molekularnych oraz modelowanie zagadnień mechanicznych. Dość powiedzieć, że dzisiaj użytkownik przeciętnego komputera przenośnego dysponuje mocą obliczeniową porównywalną z tą, jaką około 10 lat temu miał ostatni z listy 500 najszybszych superkomputerów na świecie (www.top500.org).

Jeszcze do niedawna rozwój i utrzymywanie arsenałów broni jądrowej wymagały przeprowadzania próbnych wybuchów. Teraz specjalne programy i największe instalacje superkomputerowe umożliwiają ich symulowanie i wirtualną analizę procesów starzenia się broni jądrowej. Poprawa bezpieczeństwa samochodów w dalszym ciągu wymaga testów zderzeniowych, ale wiele prób można już przeprowadzać na samym komputerze. Kształt karoserii można optymalizować, wykorzystując wyniki prób wykonywanych w wirtualnych tunelach aerodynamicznych. Najnowszy model samolotu Boeinga (777) powstawał całkowicie w wirtualnej rzeczywistości. To tylko kilka najbardziej spektakularnych przykładów świadczących zarówno o wspaniałych możliwościach współczesnych systemów komputerowych, jak i stopniu zaawansowania metod obliczeniowych fizyki oraz techniki.

Jest zatem rzeczą niezmiernie istotną, żeby studenci fizyki (w szczególności fizyki komputerowej), kierunków politechnicznych, a może też i informatyki byli zaznajamiani z praktycznymi sposobami rozwiązywania równań opisujących zjawiska fizyczne, czyli odpowiednimi algorytmami służącymi do numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych, oraz z konkretnymi realizacjami tych algorytmów. Chodziłoby o dokładne zrozumienie sposobów rozwiązywania tego typu zagadnień, umiejętność dobrania odpowiedniego algorytmu, ocenę uzyskiwanej dokładności i zależności jakości otrzymywanych wyników od stosowanego sprzętu (procesorów), wybranej precyzji obliczeń, zastosowanych kompilatorów oraz poziomu optymalizacji kodów. Ta wiedza może się okazać niezbędna nie tylko w przypadku konieczności napisania własnego programu do rozwiązywania konkretnego równania, ale także wówczas, kiedy trzeba będzie skorzystać z gotowego pakietu i ocenić przydatność dostępnych w nim algorytmów.

Dobrze zatem się stało, że dzięki wydawnictwu PWN w księgarniach dostępna jest omawiana książka Salejdy, Tyca i Justa, stanowiąca cenne uzupełnienie podręczników poświęconych metodom numerycznym. Powstała ona na podstawie wykładów z metod komputerowych fizyki oraz fizyki komputerowej wygłaszanych przez jej pierwszego autora na Politechnice Wrocławskiej w ostatnich latach. Ponieważ mam uwagi dotyczące układu książki, dalej nie będę omawiał jej zawartości w porządku kolejności rozdziałów.

Równanie Schrödingera, podobnie jak wiele innych równań różniczkowych fizyki klasycznej i kwantowej, daje się rozwiązać ściśle (analitycznie) tylko w bardzo nielicznych, prostych przypadkach. W praktyce zmuszeni jesteśmy rozwiązywać takie równania w sposób przybliżony, np. zastępując pochodne występujące w równaniu przez różnice skończone, co oznacza zamianę ścisłego rozwiązania na jego przybliżenie w postaci szeregu wartości wyznaczonych na wybranej siatce punktów (w najprostszym przypadku pierwszą pochodną można przybliżać przez iloraz różnicowy). W rozdziale 5 podręcznika przedstawiono zagadnienie dyskretyzacji ogólną metodą Guardioli–Rosa, a także omówiono szczególne przypadki, m.in. metodę pięciopunktową oraz metodę Lindberga.

Dyskretyzacja równania Schrödingera prowadzi do algebraicznego zagadnienia wartości i wektorów własnych. Najpierw w rozdziale 3 przedstawiono algorytm Martina–Deana wyznaczania wartości własnych macierzy symetrycznych trójdiagonalnych oraz rekurencyjną metodę Dy, Wu, Spratlina i Zhenga wyznaczania wektorów własnych. Natomiast rozdział 6 został poświęcony omówieniu metod wyznaczania wartości i wektorów własnych dla pełnych macierzy symetrycznych. Zostały w nim przedyskutowane metody: QR i QL, diagonalizacji Jacobiego, potęgowa, iteracji odwrotnych oraz mniej znana metoda „dziel i rządź".

Rozdział 9 poświęcono przedstawieniu i omówieniu wyników testów obliczeniowych, które zostały wykonane przy użyciu niektórych z omawianych w książce metod. Testy przeprowadzono dla kilku wybranych funkcji energii potencjalnej, dla których znane są ścisłe, analityczne rozwiązania równania Schrödingera (potencjały: oscylatora harmonicznego, Morse'a, Konwenta i kulombowski). Takie podejście umożliwia ocenę bezwzględnej jakości zastosowanej metody dyskretyzacji w zależności od liczby punktów siatki, dokładności warunków brzegowych i dokładności operacji zmiennopozycyjnych, pozwala także

na analizę efektywności zastosowanych algorytmów rozwiązywania zagadnienia własnego.

Osobny rozdział (rozdz. 7) zawiera krótkie przedstawienie zagadnień fizyki ciała stałego i fizyki atomowej, które można sprowadzić do rozwiązania równań typu stacjonarnego równania Schrödingera lub algebraicznego zagadnienia własnego. Autorzy omawiają m.in. drgania jednowymiarowego łańcucha atomów, ruch cząstki w sferycznie symetrycznym potencjale wiążącym, atom wodoru w zewnętrznym stałym polu elektrycznym, kropkę kwantową i supersieć w polu magnetycznym. Teoretyczny charakter tego rozdziału został zrównoważony przez zamieszczenie zestawu ok. 30 zadań, które zachęcają czytelnika do wyznaczania i analizowania numerycznych rozwiązań konkretnych problemów. Również inne rozdziały (szczególnie 3, 5 i 6) zawierają zadania pomagające w zrozumieniu omawianych w nich zagadnień algorytmicznych i numerycznych.

Lekturę omawianego podręcznika ułatwiają dodatki zawierające wybrane elementy algebry liniowej, sposoby przybliżania pochodnych przez różnice skończone i zasady klasycznej aproksymacji Padégo. Sądzę jednak, że książka powinna zostać uzupełniona o dodatek poświęcony omówieniu zagadnień związanych z reprezentacją liczb zmiennopozycyjnych oraz ich arytmetyką (w standardzie IEEE 754), a także problemowi dokładności obliczeń.

Do książki dołączona jest płyta CD zawierająca pliki źródłowe procedur w języku Fortran 77, które są częścią programów służących do badania dokładności i szybkości działania poszczególnych algorytmów, wyznaczania funkcji falowych oscylatora harmonicznego, a także program MARRS (Metody Algebraiczne Rozwiązywania Równania Schrödingera) w wersji dla systemu Windows. Program MARRS (omawiany szczegółowo w jednym z rozdziałów książki) pozwala rozwiązywać stacjonarne równanie Schrödingera dla dowolnego kształtu jednowymiarowych studni potencjału. Według Autorów program ten jest „przyjaznym użytkownikowi instrumentem badawczo-dydaktycznym w dziedzinie mechaniki kwantowej i fizyki struktur niskowymiarowych, przydatnym zarówno dla pracowników naukowych, jak i studentów". W tym kontekście brakuje mi wyraźnego określenia zasad jego wykorzystywania; dotyczy to także innych programów fortranowskich dołączonych do książki. Program MARRS powstał jako praca magisterska jednego z autorów książki, a wydanie recenzowanej książki było możliwe przy udziale finansowym Komitetu Badań Naukowych i Politechniki Wrocławskiej. Uważam, że są to dostateczne powody, aby ten program był dostępny w postaci źródłowej (wraz z dokumentacją), a byłoby jeszcze lepiej, gdyby był rozpowszechniany na zasadach powszechnej licencji publicznej GNU (GNU General Public License) lub podobnej (patrz www.gnu.org/home.pl.html). Sądzę bowiem, że tego typu prace finansowane z budżetu państwa powinny być udostępniane bez zbędnych ograniczeń[1]. Obecna wersja programu zawiera usterki (patrz Dodatek w internetowej wersji recenzji, www.fuw.edu.pl/~postepy/dodatki), które dałoby się stosunkowo łatwo usunąć pod warunkiem dostępu do plików źródłowych programu.

Pobieżny rzut oka na spis treści książki ujawnia, że rozdziały mają bardzo nierówną objętość i nieco zaskakujący układ. Oto po rozdziale 2 definiującym zagadnienia do rozwiązywania następuje rozdz. 3 o metodach wyznaczania wartości i wektorów własnych macierzy trójdiagonalnych, a za nim bardzo krótki (zaledwie trzystronicowy) rozdział o równaniu masy efektywnej, tematycznie pasujący raczej do rozdz. 2. Sądzę zatem, że Autorzy powinni rozważyć włączenie rozdz. 4 do rozdz. 2, zmieniając odpowiednio jego tytuł, np. na „Wybrane równania mechaniki kwantowej jako algebraiczne zagadnienia własne", a bezpośrednio za nim umieścić rozdz. 5.

Sądzę także, że powinno nastąpić scalenie rozdz. 3 z rozdz. 6. Za takim podejściem przemawia kilka argumentów. Przede wszystkim, przeniesienie wstępu rozdz. 6 na początek rozdz. 3 uczyniłoby lekturę tego drugiego łatwiejszą dla czytelnika mniej zorientowanego w tej problematyce. Z owego wstępu wynika, że zagadnienie algebraiczne o macierzy gęstej i symetrycznej warto upraszczać do postaci trójdiagonalnej, więc byłoby rzeczą naturalną, gdyby pierwszy podrozdział został poświęcony omówieniu przekształceń przez podobieństwo wykorzystywanych w procesie redukcji (pp. 6.1.1 i 6.1.2) oraz samej metodzie Householdera (jej obecność w środku rozdz. 6, jako p. 6.5, jest mało uzasadniona). Dalej powinny następować osobne podrozdziały poświęcone wyznaczaniu wartości i wektorów własnych trójdiagonalnych (obecny rozdz. 3) i pełnych (rozdz. 6) macierzy symetrycznych. Poza tym krótki rozdz. 10 powinien być uzupełnieniem rozdziału poświęconego rozwiązywaniu stacjonarnego równania Schrödingera.

Mam nadzieję, że dołączona do recenzji lista szczegółowych uwag o zawartości i formie książki, a także załączonych programach, ułatwi przygotowanie Autorom jej poprawionego wydania (dalsze uwagi można znaleźć w internetowej wersji recenzji).

Oto kilka uwag ogólniejszej natury.

— W przedmowie Autorzy piszą, że współczesną technikę komputerową charakteryzuje wykładniczy wzrost wydajności mikroprocesorów mierzony częstością taktowania tych układów. W rzeczywistości wzrost wydajności, o którym mowa, jest wypadkową wzrostu częstości oraz zmian w architekturze procesorów i mierzony jest liczbą operacji zmiennopozycyjnych, które procesor jest w stanie wykonać w ciągu sekundy.

— Opis metody elementów skończonych (s. 17) jest niezwykle skromny. Brakuje także odnośników do pozycji

[1] Warto w tym miejscu wspomnieć, że prace prowadzone w USA pod koniec lat 60. ubiegłego stulecia na specjalne zamówienie Departamentu Obrony doprowadziły do powstania otwartych protokołów komunikacyjnych, dzięki czemu możliwe stało się powstanie Internetu, a idea dostępu do rozproszonych danych w postaci stron WWW z aktywnymi odsyłaczami zrodziła się w CERN-ie.

poświęconych tym bardzo popularnym i szeroko stosowanym metodom. Moim zdaniem zaliczenie metody macierzy przejścia do metod typu elementów skończonych jest niewłaściwe. Idea rozbicia przedziału całkowania na podprzedziały i zszywania rozwiązań jest podobna, ale w metodach elementów skończonych rozwiązanie jest przybliżane przez wielomiany, natomiast w metodzie macierzy przejścia zagadnienie jest rozwiązywane analitycznie i liczba przedziałów jest mała, bo wynika z fizyki zagadnienia, a nie ze względów numerycznych.

— Dlaczego nie zawsze daje się wyznaczać wektory własne prostą metodą rekurencyjną (p. 3.3.1)? Czy argumenty Wilkinsona, na które powołują się Autorzy, nie są wystarczająco zwarte, by można było je przytoczyć w całości, zamiast odsyłać czytelnika do podręcznika, który zwykle nie jest łatwo dostępny? Na s. 61 Autorzy odwołują się do metody przesuwania widma wartości własnych zaproponowanej przez Wilkinsona, ale nie podają (nawet w zarysie), na czym ona polega.

— Podrozdział 6.7 powinien nazywać się „Metoda diagonalizacji Jacobiego", a nie „Metoda Jacobiego", aby odróżnić ją od iteracyjnej metody Jacobiego rozwiązywania dużych układów równań liniowych.

— W algorytmie Grama–Schmidta (algorytm 6-18, s. 91) zdefiniowano warunek przerwania przez $r = 0$. Wydaje się, że ten warunek liniowej zależności powinien być uzależniony od dokładności maszynowej.

— Należałoby się spodziewać, że wszystkie wyniki zamieszczone i dyskutowane w rozdz. 9 („Dokładność i szybkość algorytmów") będzie można łatwo odtworzyć za pomocą dołączonych do książki programów fortranowskich. Niestety, pojawiają się pewne drobne rozbieżności, które chyba wynikają stąd, że część danych zamieszczonych w tabelach otrzymano w ramach arytmetyki zmiennopozycyjnej określonej przez standard IEEE 754, a część w ramach rozszerzenia tego standardu (dostępnego w procesorach z rodziny x86). Zabrakło mi na płycie CD zestawu danych wejściowych do odtworzenia wspomnianych wyników testów, a także prostego pliku Makefile, który pozwoliłby skompilować potrzebne procedury i utworzyć programy testowe. Takie podejście ułatwiłoby korzystanie z tych programów, a także umożliwiałoby łatwą analizę zastosowanych metod numerycznych pod względem optymalizacji, użycia różnych kompilatorów itp.

— Nie wydaje się właściwe odejście od powszechnie stosowanej definicji liczby cyfr znaczących (s. 135). W rezultacie w tabelach rozdz. 9 liczby cyfr znaczących przyjmują wartości ułamkowe. Sądzę, że do śledzenia zmian dokładności kolejnych wartości własnych lepiej byłoby posługiwać się pojęciem błędu względnego zamiast logarytmu wartości bezwzględnej tego błędu. Jeśli już przyjąć zmienioną definicję, to w tabelach powinny być podawane wartości własne z wszystkimi 16 (a nie 14) cyframi, gdyż wówczas trudno zrozumieć, dlaczego wyniki numeryczne, które są identyczne z wynikami analitycznymi (w ramach podanej dokładności) mają różną liczbę cyfr znaczących.

— Dodatek C powinien zawierać wzory określające wielomiany interpolacyjne Newtona–Gregory'ego (oparte o progresywne i wsteczne różnice skończone) i Stirlinga (oparte o różnice centralne). Ułatwiłoby to uzasadnienie podanych wzorów na pochodne, a także rozwiązywanie załączonych zadań.

Recenzowana książka jest starannie opracowana od strony graficznej, ale, niestety, nie można tego powiedzieć o jej redakcji. Występują w niej liczne językowe niezręczności, anglicyzmy i błędy interpunkcyjne. Oto garść przykładów.

— Autorzy używają terminu „macierz rozrzedzona" w miejsce stosowanego w popularnych podręcznikach terminu „macierz rzadka" (patrz podręcznik *Metody numeryczne* G. Dahlquista i A. Björka). Wydawnictwo PWN powinno dbać o zachowanie jednolitości terminologicznej w wydawanych przez siebie pozycjach, a tylko w ostateczności przyjmować inny (być może lepszy) termin, przywołując jednak termin zastępowany.

— Zamiast „formuła" powinno być „wzór", zamiast „aproksymacja" – „przybliżenie" (np. na s. 23 mamy „posługiwać się pojęciami wartości własnej i funkcji własnej, mając na myśli ich aproksymacje"). W programie MARRS pojawiają się wręcz „hinty"!

— Skróty mogą być pomocne, ale nie należy ich nadużywać. Zamiast RS powinno się pisać „równanie Schrödingera". Jeżeli już skróty mają być używane, to powinny być definiowane przed pierwszym użyciem (zatem informacja o autorach algorytmu, która pojawia się na początku p. 3.3, powinna znaleźć się na początku rozdz. 3).

— Na s. 61 pojawia się pojęcie „epsilona maszynowego", które zostało wcześniej zdefiniowane (przypis 4 na s. 25), ale chyba prościej i przejrzyściej byłoby napisać, że chodzi o dokładność maszynową (w najgorszym razie należy odesłać czytelnika do wspomnianego przypisu). W skorowidzu brak hasła „dokładność maszynowa".

— Na s. 69 użyto oznaczenia $\Theta^{\pm}$, które zostało zdefiniowane w innym rozdziale, więc warto byłoby czytelnikowi pomóc w znalezieniu stosownego miejsca przez dodanie odsyłacza.

W podsumowaniu chciałbym podkreślić, że recenzowana książka stanowi wartościową pozycję i może być z pożytkiem wykorzystana przez wszystkich pragnących zapoznać się ze sposobami dyskretyzacji i algorytmami rozwiązywania algebraicznego zagadnienia własnego. Dziwi mnie jedynie, że tak doświadczone i zasłużone wydawnictwo jak PWN wykazało się sporym brakiem staranności i nie poddało książki właściwemu procesowi edytorskiemu.

Jacek Kobus
Instytut Fizyki UMK
Toruń

Tytuły profesorskie

Tytuł naukowy profesora nauk fizycznych, nadany przez Prezydenta Rzeczpospolitej Polskiej, otrzymali w dniu 30 listopada 2004 r.: Jan Andrzej Bartelski (UW), Chrystian Henryk Droste (UW), Andrzej Jerzy Maciejewski (UZ), Michał Konrad Nawrocki (UW) i Mariusz Lucjan Zubek (PG).

www.prezydent.pl

Nowi członkowie PAN

Polska Akademia Nauk na Zgromadzeniu Ogólnym w dniach 16–17 grudnia 2004 r. dokonała wyboru nowych członków rzeczywistych i korespondentów. W Wydziale III Nauk Matematycznych, Fizycznych i Chemicznych spośród fizyków i astronomów członkiem rzeczywistym został Stefan Pokorski, a członkami korespondentami Józef Szudy i Andrzej Udalski. W Wydziale VII Nauk o Ziemi i Nauk Górniczych na członka korespondenta został wybrany geofizyk Marek Grad.

Stefan P o k o r s k i (ur. 1942 r.), od 1991 r. członek korespondent PAN, jest też członkiem Polskiej Akademii Umiejętności i Towarzystwa Naukowego Warszawskiego. Jest profesorem zwyczajnym w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego. Prowadzi badania w dziedzinie teorii oddziaływań elementarnych. Wraz z kierowaną przez siebie grupą wniósł bardzo istotny wkład do badań nad Modelem Standardowym i jego rozszerzeniami, m.in. przewidywaniami właściwości mechanizmu naruszania symetrii elektrosłabej w teorii supersymetrycznej oraz zaproponowaniem wyjaśnienia struktury widma mas najcięższych kwarków wynikającej ze struktury próżni w teorii supersymetrycznej. Opublikował ponad 150 prac cytowanych ponad 5000 razy. Był promotorem 16 doktorów, z których kilku jest już profesorami. W latach 1991–93 był prezesem Polskiego Towarzystwa Fizycznego, a w 2003 r. otrzymał najwyższe wyróżnienie PTF – Medal Mariana Smoluchowskiego.

Józef S z u d y (ur. 1939 r.) studiował fizykę na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu, od 1987 r. jest profesorem tego Uniwersytetu. Autor ponad 90 prac z dziedziny fizyki atomowej (cytowanych ponad 500 razy) oraz jednej monografii i 37 artykułów popularnonaukowych. Do jego najważniejszych osiągnięć można zaliczyć: 1) opracowanie (wspólnie z W.E. Baylisem) jednolitej teorii ciśnieniowego rozszerzenia linii widmowych, która przez analizę kształtu linii pozwala wyznaczyć parametry opisujące potencjały oddziaływań międzyatomowych z udziałem stanów wzbudzonych; 2) uruchomienie w UMK (wspólnie z Andrzejem Bielskim) doświadczalnych badań – metodami wysokorozdzielczej spektroskopii – zderzeń optycznych w gazach szlachetnych oraz mieszaninach tych gazów z parami metali, jak również fotodysocjacji i dysocjacji rekombinacyjnej; 3) badania (wspólne z Romanem Ciuryło i Alanem Pine'em) wpływu korelacji między dopplerowskim i zderzeniowym rozszerzeniem linii widmowych oraz innych efektów zależnych od prędkości atomu emitującego. Jest jednym z inicjatorów utworzenia Krajowego Laboratorium FAMO i członkiem jego rady naukowej, członkiem International Scientific Committee of International Conference on Spectral Line Shapes, w latach 1993–99 był członkiem Zarządu Głównego PTF, a w latach 1995–99 wiceprezesem tego Towarzystwa, jest też członkiem Rady Redakcyjnej *Postępów Fizyki*.

Andrzej U d a l s k i (ur. 1957 r.) ukończył studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, od roku 2000 jest profesorem Obserwatorium Astronomicznego UW; jest autorem ponad 170 publikacji (ponad 3000 cytowań). Zajmuje się jedną z najważniejszych obecnie dziedzin astronomii obserwacyjnej – fotometrią mas. Główne dokonania wiążą się z kierowanym przez niego projektem OGLE polegającym na jednoczesnym śledzeniu blasku milionów gwiazd. Były to odkrycia mikrosoczewkowania grawitacyjnego, m.in. przez układ podwójny gwiazd (1994), odkrycie pierwszej odległej planety zaobserwowanej dzięki temu zjawisku, kalibracja tzw. gwiazdowych świec standardowych (czyli gwiazd służących do wyznaczania odległości we Wszechświecie), odkrycie pierwszych planet pozasłonecznych metodą tzw. tranzytów, odkrycie pierwszego pozasłonecznego układu planetarnego. W roku 2002 otrzymał najbardziej prestiżową polską nagrodę w dziedzinie nauk ścisłych – Nagrodę Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej. Jest redaktorem naczelnym czasopisma *Acta Astronomica*.

Marek G r a d (ur. 1951 r.) studiował na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, tytuł naukowy profesora otrzymał w 1992 r., w latach 1993–2002 był dyrektorem Instytutu Geofizyki UW. Jest autorem ponad 130 publikacji (w latach 1996–2003 ponad 300 cytowań). Jego główne osiągnięcia to: rozpoznanie głębokiej struktury skorupy ziemskiej w obszarze transeuropejskiej strefy szwu ze szczególnym uwzględnieniem strefy tektonicznej Teisseyre'a–Tonquista, rozpoznanie struktury basenu polskiego, stworzenie modelu subdukcji w skali Antarktyki, określenie struktury skorupy ziemskiej w strefie rowu Knipovicha na zachód od Spitsbergenu, stworzenie podstaw rekonstrukcji procesów formujących kraton wschodnioeuropejski na obszarze tarczy ukraińskiej. Był koordynatorem w przedsięwzięciach 15 krajów Europy i Ameryki Północnej – POLONAISE 97 i CELEBRATION 2000. Jest członkiem zagranicznym Fińskiej Akademii Nauk i przewodniczącym Komisji Sejsmologii Doświadczalnej w Europie.

B. W.

Roman Teisseyre doktorem h.c. Akademii Górniczo-Hutniczej

W grudniu 2004 r. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie nadała godność doktora honoris causa Romanowi Teisseyre'owi, wybitnemu, uznanemu w świecie sejsmologowi.

Roman Teisseyre podczas uroczystości (fot. Barbara i Janusz Marianiukowie)

Teisseyre (ur. 1929 r.) studiował fizykę na Uniwersytecie Warszawskim, gdzie w 1959 r. uzyskał doktorat (promotor Leopold Infeld), jest profesorem w Instytucie Geofizyki PAN, którego był dyrektorem w latach 1970–72. Jako ekspert UNESCO pracował przez rok w Międzynarodowym Instytucie Sejsmologii w Tokio. Przez wiele lat kierował pracami wielu geofizyków i zespołów badawczych. Utworzył własną grupę badawczą z zakresu fizyki trzęsień Ziemi. Stworzył nową teorię mechanizmu powstawania naturalnych trzęsień Ziemi, opracował podstawy ich dyslokacyjnej teorii, w której zawarte jest też zagadnienie zmian oporu elektrycznego gruntu w obszarze trzęsień oraz związki między deformacją i naprężeniami termicznymi. Wykazał istnienie fal i deformacji skrętnych towarzyszących trzęsieniom, co otworzyło nowy dział badań geofizycznych. Zaproponował też oryginalne metody badania wstrząsów górniczych, co znalazło zastosowanie w praktyce górniczej w Polsce.

Jest autorem ponad 250 prac naukowych oraz współautorem i redaktorem sześciotomowej monografii z zakresu fizyki i ewolucji wnętrza Ziemi, wydawanej przez PWN i Elsevier w latach 1984–93. Stworzył szkołę naukową, jego uczniowie są znanymi w świecie badaczami w dziedzinie sejsmologii i fizyki wnętrza Ziemi.

Roman Teisseyre jest członkiem Polskiej Akademii Nauk, Towarzystwa Naukowego Warszawskiego oraz Fińskiej Akademii Nauk i Literatury.

Swobodny dostęp do wyników CERN-u

CERN podpisał 13 maja 2004 r. deklarację stwierdzającą, że wyniki badań tego ośrodka będą swobodnie dostępne w internecie. Tym samym Genewa przystąpiła do analogicznego porozumienia podpisanego w październiku 2003 r. w Berlinie przez 38 sygnatariuszy, którymi były główne instytuty badawcze w Niemczech i CNRS we Francji.

Już od dawna CERN udostępniał w internecie za darmo publikowane w tym laboratorium prace, udzielając pozwolenia na ich kopiowanie. Obecne formalne przystąpienie do porozumienia ma jednak duże znaczenie dla międzynarodowego środowiska naukowego.

Nature **429**, nr 6989 (2004) *B. W.*

H. Eugene Stanley doktorem h.c. Uniwersytetu Wrocławskiego

H. Eugene Stanley urodził się w 1941 r. w Oklahoma City w USA. Ukończył wydział fizyki na Wesleyan University w Middletown (stan Connecticut) w 1962 r., a stopień doktora fizyki otrzymał na Uniwersytecie Harvarda w 1987 r.; jego promotorem był późniejszy laureat Nagrody Nobla Jan H. Van Vleck. Przez dwa lata pracował jako asystent w MIT, a później został zatrudniony jako zastępca profesora i jako profesor nadzwyczajny (1971).

Zainteresowania naukowe Stanleya w tamtym czasie dotyczyły fizyki magnetyków. Wtedy powstała jedna z jego klasycznych prac wskazująca na możliwość przejścia fazowego w pewnym typie ferromagnetyka – obecnie jest ono znane jako przejście Stanleya–Kaplana. Wiele wczesnych prac Stanleya dotyczyło klasycznej teorii magnetyzmu, m.in. wprowadził on tzw. model sferyczny, wyznaczył zależność własności krytycznych układu od spinu. Lata sześćdziesiąte i siedemdziesiąte to szybki rozwój teorii przejść fazowych – pojawiają się nowe zaskakujące doświadczenia i powstają liczne modele mające te doświadczenia opisywać. W roku 1971 wydawnictwo Oxford University Press wydaje książkę Stanleya *Wstęp do teorii przejść fazowych i zjawisk krytycznych*, która porządkuje rozwijającą się dziedzinę, stając się nieodzowną pomocą w badaniach naukowych i podstawowym podręcznikiem akademickim. Szybko przetłumaczono ją na inne języki. Na rosyjskim przekładzie tej książki wychowało się wielu dzisiejszych polskich profesorów fizyki teoretycznej.

W roku 1976 Stanley zostaje profesorem fizyki na Uniwersytecie w Bostonie. Od 1978 r. jest dyrektorem Centrum Badań nad Polimerami oraz profesorem fizjologii w Boston University School of Medicine.

Lista zainteresowań Stanleya jest długa, tutaj wymienimy tylko te dziedziny, którym poświęcił więcej prac. Uzyskał znaczące wyniki dotyczące zachowania się wody, ciągle jeszcze w pewnych aspektach tajemniczego. Napisał wiele, dziś klasycznych, prac na temat perkolacji i jej związków z fizyką polimerów. Był pionierem badań nad fraktalami, sposobami ich otrzymywania i ich związkami z fizyką. W latach dziewięćdziesiątych zainteresował się badaniem rytmu serca i możliwością wyznaczenia korelacji istniejących w jego zapisie. Wprawdzie uzyskane wyniki nie pozwalają jeszcze opracować przenośnego analizatora, za pomocą którego pacjent mógłby sprawdzić stan

swojego serca, ale są wykorzystywane w klinikach medycznych, także w Polsce. Stanley badał korelacje w sekwencji nukleotydów w DNA i stosował metody fizyki statystycznej, m.in. analizę szeregów czasowych, do badania możliwych korelacji między danymi dotyczącymi takich zagadnień, jak kursy walut, indeksy giełdowe, powiązania podmiotów gospodarczych. Jest też autorem terminu „ekonofizyka", który już przyjął się na określenie tej nowej dyscypliny.

W każdej z wymienionych dziedzin Stanley osiągnął znaczące wyniki, czego dowodem jest bardzo duże zainteresowanie jego pracami wyrażające się cytowaniami przekraczającymi liczbę kilkuset na publikację. Całkowita liczba jego publikacji przekracza 400. Tylko w roku 2000 opublikował 6 prac w *Physical Review Letters* oraz 3 w *Nature*. Lista otrzymanych przez niego nagród i odznaczeń jest długa, m.in. Memory Ride Prize for Alzheimer Disease Research (2001), tytuł Wybitny Nauczyciel-Naukowiec nadany przez National Science Foundation (2001), Medal Tersiana za badania układów złożonych przyznany przez Uniwersytet w Pawii (2003), Medal Nicholsona przyznany przez Amerykańskie Towarzystwo Fizyczne (2004) oraz Medal Boltzmanna (2004). Prof. Stanley jest doktorem honoris causa czterech uniwersytetów: Bar Ilan w Izraelu, Rolanda Eőtvősa w Budapeszcie, w Liège oraz w Dortmundzie.

Związki Eugene'a Stanleya z Uniwersytetem Wrocławskim mają długą historię. Po raz pierwszy przyjechał na Zimową Szkołę Fizyki Teoretycznej w Karpaczu w roku 1994 i był jedną z jej „gwiazd" nie tylko ze względu na swoją pozycję naukową, lecz także dzięki umiejętności bezpośredniego kontaktu z młodymi fizykami i przekazywania swojego entuzjazmu dla prowadzonych badań. W późniejszych latach duże znaczenie miała dla nas pomoc Profesora przy organizacji kolejnych szkół czy konferencji, jak też jego gotowość przyjęcia do swojej grupy badawczej naszych fizyków. Również ostatnio, gdy Uniwersytet Wrocławski podjął się organizowania interdyscyplinarnego kierunku studiów – ekonofizyki, prof. Stanley pomógł w ich przygotowaniu i prowadzeniu.

H. Eugene Stanley podczas promocji w zabytkowej Auli Leopoldyńskiej Uniwersytetu Wrocławskiego. Siedzą (od lewej): prof. Władysław Dynak, dziekan Wydziału Filologicznego, prof. Andrzej Witkowski, dziekan Wydziału Nauk Przyrodniczych, prof. Henryk Cugier, dziekan Wydziału Fizyki i Astronomii oraz prof. Andrzej Pękalski, promotor doktora h.c. (fot. Dział Promocji UWr).

25 czerwca 2004 r. odbyła się uroczystość nadania mu tytułu doktora honoris causa Uniwersytetu Wrocławskiego. Warto dodać, że senat Uniwersytetu podjął uchwałę w tej sprawie z inicjatywy dwóch wydziałów: Fizyki i Astronomii oraz Prawa, Administracji i Ekonomii.

Andrzej Pękalski, Bernard Jancewicz

Medal Diraca 2004

Międzynarodowe Centrum Fizyki Teoretycznej (ICTP) w Trieście przyznało Medal Diraca za rok 2004 dwóm wybitnym teoretykom: Jamesowi Bjorkenowi (Uniwersytet Stanforda, USA) i Curtisowi Callanowi (Uniwersytet w Princeton, USA) w uznaniu ich badań teorii silnych oddziaływań. Sformułowana przez Bjorkena w latach sześćdziesiątych teoria doprowadziła do odkrycia wewnątrz protonów cząstek punktowych – kwarków. Natomiast Callan zastosował, wspólnie z Kurtem Symanzikiem, renormalizację do rozpraszania głęboko nieelastycznego i przyczynił się do stworzenia podstaw chromodynamiki kwantowej (patrz artykuł P. Chankowskiego w tym zeszycie).

Phys. World **17**, nr 9 (2004) *B. W.*

Laughlin na Dalekim Wschodzie

Robert B. Laughlin (Nagroda Nobla z fizyki 1998 za teorię ułamkowego zjawiska Halla) został w lipcu 2004 r. dyrektorem Koreańskiego Instytutu Nauk Ścisłych i Techniki. Jest on pierwszym obcokrajowcem na tym stanowisku od czasu założenia Instytutu w 1971 r.

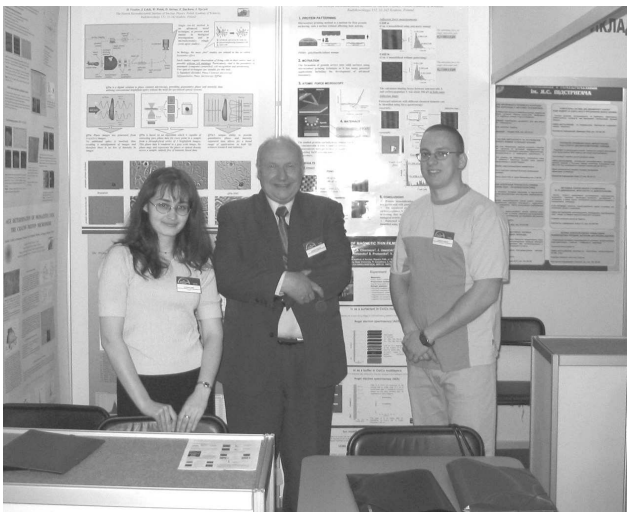
Laughlin od niedawna kieruje również Azjatyckim Centrum Fizyki Teoretycznej w Phenianie.

Phys. Today **57**, nr 9 (2004) *B. W.*

Dni nauki polskiej na Ukrainie

W dniach 21–25 czerwca 2004 r. we Lwowie i w Kijowie obchodzono Dni Nauki Polskiej. Było to główne wydarzenie Roku Polskiego na Ukrainie. W ramach uroczystości zorganizowano dwie wystawy połączone z konferencjami przedstawiającymi osiągnięcia w zakresie współpracy naukowej i technicznej. We Lwowie prezentowano głównie 13 polskich instytucji naukowych współpracujących z Ukrainą: Centrum Badań Kosmicznych PAN, Fundację Rozwoju Nauk Materiałowych, Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Instytut Obróbki Plastycznej, Instytut Odlewnictwa, Instytut Optoelektroniki WAT, Ośrodek Przetwarzania Informacji, Państwowy Instytut Geologiczny, Politechnikę Krakowską, Politechnikę Warszawską, Oddział PAN w Lublinie, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej. Natomiast w Kijowie eksponowano również dorobek 19 placówek ukraińskich.

Gośćmi konferencji byli przedstawiciele władz obu krajów: prof. Marek Bartosik, sekretarz stanu w polskim Ministerstwie Nauki i Informatyzacji, oraz prof. A.M. Gurżij, pierwszy zastępca ministra oświaty i nauki Ukrainy.



Ukraińscy doktoranci Międzynarodowego Studium Doktoranckiego IFJ PAN, Kateryna Lebed i Oleksandr Veselov, z dr. Zbigniewem Stachurą (koordynatorem współpracy IFJ PAN z Ukrainą) przed ekspozycją IFJ PAN we Lwowie

Na spotkaniu uczonych z ministrami dyskutowano na temat sposobu realizacji zaleceń lizbońskich dla VI Programu Ramowego UE dotyczących partnerstwa w dziedzinie fizyki i techniki. Uznano za koniecznie zwiększenie nakładów finansowych na naukę do zaleconej w Lizbonie wysokości 2,4% PKB. W Polsce na ten cel przeznacza się z budżetu 0,34% PKB, a z innych źródeł, m.in. pomocy unijnej – 0,3%, czyli daleko nam do zalecanego poziomu lizbońskiego. Ukraina przeznacza na naukę nieco większy procent PKB, ale kwotowo jeszcze mniej niż Polska.

Duża liczba wspólnych projektów badawczych świadczy o bliskich kontaktach między obu krajami. Przykładem może być współpraca ukraińskich placówek z krakowskim Instytutem Fizyki Jądrowej PAN, jedna z największych pod względem liczby projektów i niewątpliwie najstarsza, gdyż trwa od 11 lat. Obecnie uczestniczy w niej 20 osób. Czterech doktorantów z Ukrainy przygotowuje prace doktorskie w IFJ PAN, a kilku już obroniło. Ukraińscy doktoranci biorą udział w projekcie NANODERM, który dotyczy ochrony skóry przed ultradrobnymi cząstkami z otoczenia. Na przykład, dwutlenek tytanu stosowany w produkcji kremów z filtrami UVA i UVB rozprasza promieniowanie nadfioletowe, ale gdy dostanie się do tkanki, produkuje wolne rodniki, które niszczą komórki, a nawet mogą wywołać nowotwory.

W projekcie CELLION (dotyczącym badania odpowiedzi komórek na bombardowanie pojedynczymi jonami, z wykorzystaniem nanotechnologii), kierowanym przez dr. Zbigniewa Stachurę z IFJ PAN, Ukraińcy pomagali budować układ mikrowiązki protonowej. Teraz w Sumach i Kijowie są budowane podobne układy, a fizycy z IFJ PAN udzielają ukraińskim kolegom pomocy technicznej. W przyszłości będą realizowane wspólne projekty naukowe, których część będzie wykonywana na Ukrainie, a część w Polsce. Ukraińcy w IFJ PAN biorą udział także w innych projektach, np. w badaniach takich własności cienkich warstw, jak gigantyczny magnetoopór, wykorzystywany do produkcji głowic dla zapisu płyt kompaktowych o pojemności gigabajtów, opracowują także nowe czujniki biologiczne (biosensory) do wykrywania śladowych ilości białek, co w przyszłości znajdzie zastosowanie w medycynie lub przemyśle farmaceutycznym.

W czasie obrad konferencji postulowano dalszy rozwój kontaktów naukowych między Ukrainą i Polską. Uzyskano od ministrów obietnice poparcia przez rządy obustronnych kontaktów oraz łatwiejszego zatwierdzania wspólnych projektów badawczych i dostatecznego finansowania wymiany osobowej. Obiecano też promować granty obejmujące współpracę z przemysłem w obu krajach.

W przyszłym roku zostaną zorganizowane Dni Nauki Ukraińskiej w Polsce. Będzie to kolejna okazja do zacieśnienia współpracy naukowej oraz do monitorowania realizacji postanowień strategicznych powziętych przez przedstawicieli rządów.

Małgorzata Nowina Konopka

Heisenberg w Polsce

W numerze z marca 2004 r. czasopisma *American Journal of Physics* ukazał się artykuł Jeremy'ego Bernsteina „Heisenberg in Poland". Autor, fizyk teoretyk, który przez wiele lat pisywał felietony do *New Yorkera*, wydał kilka książek popularyzujących naukę i historię nauki. Nie uważa się jednak za zawodowego pisarza. W jednej ze swoich książek napisał, że chce pozostać zawodowym fizykiem.

Bernstein usiłuje dociec, dlaczego Heisenberg w grudniu 1943 r. odwiedził Kraków. Referuje tezę zawartą we wspomnieniach Elisabeth, wdowy po Heisenbergu, że pragnął on utrzymać kontakt z zagranicznymi kolegami z krajów podbitych przez Niemcy i wesprzeć ich moralnie. Bernstein zdaje sobie sprawę, że obraz przedstawiony przez Elisabeth Heisenberg nie jest ani zbyt wierny, ani obiektywny. Mąż jej nie mógł nie wiedzieć, że na zajętych przez Niemców terenach polskich zostały zamknięte uniwersytety, a nawet szkoły średnie. Musiał też chyba słyszeć o Sonderaktion Krakau, skoro protest przeciw uwięzieniu polskich profesorów podpisał inny niemiecki laureat Nagrody Nobla z fizyki – Max von Laue.

Według Bernsteina, Heisenberg nie był ani członkiem NSDAP, ani jej zwolennikiem. Był natomiast niemieckim patriotą, wręcz nacjonalistą. Miał słaby charakter, nie chciał się narażać, „wychylać". Toteż kiedy generalny gubernator Hans Frank zaczął nalegać na wizytę w Krakowie, Heisenberg w końcu uległ, w grudniu 1943 r. tam pojechał i miał wykład w Institut für Deutsche Ostarbeit. Pytanie tylko, dlaczego Frankowi tak na tym zależało. Według Bernsteina Frank prowadził walkę o władzę z innymi decydentami SS w Generalnej Gubernii i wizyta wielkiego uczonego miała mu dodać prestiżu.

Am. J. Phys. **72**, nr 3 (2004) *B. W.*

WARUNKI PRENUMERATY

Cena prenumeraty krajowej w 2005 r. wynosi 36,00 zł za pół roku, 72,00 zł za rok. Prenumeratę przyjmują:

I. „RUCH" S.A.

1. Wpłaty na prenumeratę przyjmują jednostki kolportażowe „RUCH" S.A. właściwe dla miejsca zamieszkania lub siedziby prenumeratora.

2. Informacji o prenumeracie ze zleceniem dostawy za granicę udziela Dział Prenumerat i Współpracy z Zagranicą, ul. Jana Kazimierza 31/33, 01-248 Warszawa, tel. (+4822) 5328731, e-mail: prenumerata@okdp.ruch.com.pl, Internet: www.ruch.pol.pl.

3. Terminy przyjmowania wpłat na prenumeratę krajową i zagraniczną: do 5 grudnia – na I półrocze roku następnego, do 5 czerwca – na II półrocze roku bieżącego.

II. ZARZĄD GŁÓWNY PTF

Wpłaty należy dokonać na konto Zarządu Głównego PTF w PKO BP IX O/Warszawa nr 19 1020 1097 0000 7802 0001 3128 lub w Biurze Zarządu Głównego PTF. Dostawa *Postępów Fizyki* następuje drogą pocztową pod wskazany adres.

III. ODDZIAŁY PTF

Opłata roczna dla członków PTF oraz studentów wynosi 48,00 zł. Dostawa *Postępów Fizyki* odbywa się za pośrednictwem oddziału PTF.

INFORMACJE DLA AUTORÓW

Artykuły powinny mieć charakter przeglądowy i być przystępne dla ogółu fizyków. Prace należy nadsyłać pod adresem redakcji. O przyjęciu pracy do druku decyduje komitet redakcyjny. Maszynopisów 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 *Postępach 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 Polish State Research Committee (KBN) 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).

NOWE KSIĄŻKI

- Zofia Kosturkiewicz, *Metody krystalografii*, wyd. II poprawione, Wyd. Naukowe UAM, Poznań 2004, s. 204.
- Rufin Makarewicz, *Dźwięki i fale*, Wyd. Naukowe UAM, Poznań 2004, s. 270.
- Andrzej Pawlak, *Propagacja dźwięku w pobliżu magnetycznej przemiany fazowej*, Wyd. Naukowe UAM, Poznań 2004, s. 120.
- Stephen W. Hawking, *Ilustrowana teoria wszystkiego*, z jęz. angielskiego tłum. Piotr Amsterdamski; Zysk i S-ka, Poznań 2004, s. 134.
- *Polska w europejskiej organizacji badań jądrowych CERN*, red. Małgorzata Święch-Płonka; Wyd. PAU, Kraków 2004, s. 262.
- Owen Gingerich, *Książka, której nikt nie przeczytał*, z jęz. angielskiego tłum. Jarosław Włodarczyk; Amber, Warszawa 2004, s. 270.

POSTĘPY FIZYKI W INTERNECIE

Zapraszamy do odwiedzania naszej strony internetowej www.fuw.edu.pl/~postepy, na której można znaleźć:

— szczegółowe spisy treści wszystkich zeszytów wydanych od 1993 r.,

— archiwum zawierające spisy treści *PF* z lat 1949–1992,

— materiały dodatkowe, uzupełniające treść niektórych artykułów,

— materiały XXXV Zjazdu Fizyków Polskich w Białymstoku w 1999 r. i XXXVI Zjazdu Fizyków Polskich w Toruniu w 2001 r.

— PEŁNE TEKSTY WYBRANYCH ARTYKUŁÓW, w tym wykładów noblowskich z lat:
  - 2001 – Wolfgang Ketterle,
  - 2002 – Raymond Davis, Masatoshi Koshiba i Riccardo Giacconi,
  - 2003 – Aleksiej Abrikosow i Anthony Leggett.

WKRÓTCE W *POSTĘPACH*

- *Wykład noblowski Witalija Ginzburga*
- *Barbara M. Terhal, Michael M. Wolf i Andrew C. Doherty o splątaniu kwantowym*
- *Robert Jaffe i Frank Wilczek o kwarkach, dikwarkach i pentakwarkach*
- *Maxim Pospelov i Michael Romalis o testowaniu niezmienniczości Lorentza*

WYDAWNICTWO NAUKOWE PWN

Igor N. Bronsztejn,
Konstantin A. Siemiendiajew,
Gerhard Musiol,
Heiner Mühlig

Nowoczesne
KOMPENDIUM
MATEMATYKI

Nowa encyklopedia matematyki współczesnej!

NOWOŚĆ

Niezastąpione źródło wiedzy o matematyce i jej zastosowaniach!

Zakres materiału dostosowany jest do współczesnych wymagań odbiorców. Szczególny nacisk położono na nowe dziedziny, związane z rozwojem komputerów i fizyki.

- Obszerne wiadomości z 20 działów matematyki
- Znakomicie opracowana matematyka współczesna – narzędzie modelowania matematycznego i zastosowania matematyki, m. in. *algebra i matematyka dyskretna, układy dynamiczne i chaos, teoria optymalizacji, metody numeryczne, matematyka finansowa, kryptologia*
- Pakiety oprogramowania matematycznego *Mathematica* i *Maple* oraz ich zastosowania
- Wiele użytecznych tablic: tablice całek nieoznaczonych, oznaczonych i eliptycznych, transformacji Laplacea i Fouriera oraz rozkładów Poissona, *f*-Fishera, *t*-Studenta i standardowego rozkładu normalnego
- Przejrzysta, uporządkowana forma podawanych informacji – grupowanie tematyczne
- Obszerny skorowidz ułatwiający znajdowanie potrzebnych fragmentów tekstu

Publikacja niezbędna matematykom, fizykom, ekonomistom, astronomom, chemikom, geofizykom, inżynierom, studentom uniwersytetów i uczelni technicznych.

Zamów przez telefon: 0 801 33 33 88 (0,29 zł za impuls) • Zamów przez Internet: www.pwn.pl

THORLABS

Nowy, ponad 900 - stronicowy katalog.
Optyka, mechatronika, fotonika

blaty optyczne
systemy antywibracyjne
ScienceDesk (TM)
profile konstrukcyjne
układy klatkowe
optomechanika

sprzęgacze światłowodowe
stoliki przesuwne
uklady 3,4,5,6-osiowe
sterowniki mikro -
i nanoprzeprzesuwu
siłowniki:
piezo, mikrostep i mieszane
rozdzielczość do 20 nm
zakres ruchu do 400 mm

detektory
mierniki mocy
kamery CCD
spektrometry
polarymetry
interferometry przestrajalne
czopery optyczne
generatory opóźnień
oświetlacze halogenowe
uklady testowania optyki
OpticStudio (TM)

soczewki, zwierciadła i filtry
diody laserowe
lasery He-Ne
światłowody i akcesoria
włókna aktywne
fotoniczne układy
pasywne i aktywne
lasery diodowe i
światłowodowe
sterowniki laserów i TEC
lasery femtosekundowe
przestrajalne lasery VIS i IR
źródła białe
wielokanałowe źródła WDM
wzmacniacze optyczne IR

Eurotek International Sp. z o. o. (od 1992 r.)
Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa
Tel./faks: (22) 843 79 40 / 843 61 43,
inbox@eurotek.com.pl