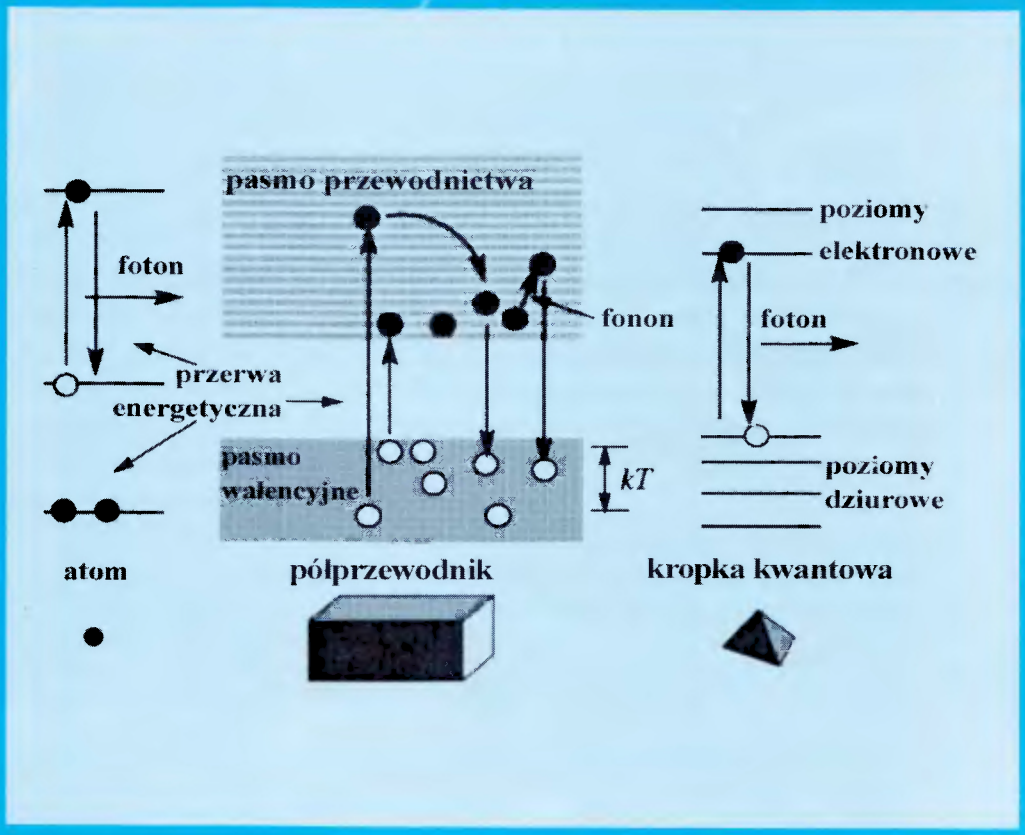
Nr indeksu 369721

POSTĘPY FIZYKI

TOM 53 ZESZYT 3 ROK 2002

DWUMIESIĘCZNIK
POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO



PODWÓJNE HETEROSTRUKTURY

GRANTY KBN Z FIZYKI: XX I XXI KONKURS

ROZWÓJ I PRZYSZŁOŚĆ FIZYKI

ROZMOWA O FOTONICE

POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

ZARZĄD GŁÓWNY

Prezes: Prof. Maciej Kolwas
Wiceprezesi: Prof. Katarzyna Chałasińska-Macukow
Prof. Reinhard Kulessa
Sekretarz Generalny: Prof. Aleksandra Kopystyńska
Skarbnik: Dr Marek Kowalski
Członkowie ZG: Prof. Andrzej Bielski
Prof. Stanisław Chwirot
Prof. Jan Gaj
Prof. Bernard Jancewicz
Mgr Mirosław Trociuk
Prof. Jerzy Warczewski

REDAKTORZY NACZELNI CZASOPISM PTF

Prof. Adam Sobiczewski – *Postępy Fizyki*
Prof. Jerzy Prochorow – *Acta Physica Polonica A*
Prof. Andrzej Staruszkiewicz – *Acta Physica Polonica B*
Prof. Marek Kordos – *Delta*
Prof. Andrzej Jamiołkowski – *Reports on Mathematical Physics*
Dr Zofia Gołąb-Meyer – *Foton*

PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW PTF

Prof. Andrzej Maziewski (Białystok)
Prof. Ryszard Siuda (Bydgoszcz)
Dr Stanisław Tkaczyk (Częstochowa)
Prof. Eugeniusz Czuchaj (Gdańsk)
Dr Andrzej Klimasek (Gliwice)
Prof. Jerzy Warczewski (Katowice)
Prof. Zbigniew Włodarczyk (Kielce)
Prof. Reinhard Kulessa (Kraków)
Prof. Stanisław Hałas (Lublin)
Dr hab. Bogusław Broda (Łódź)
Prof. Stefan Szymura (Opole)
Prof. Andrzej Dobek (Poznań)
Prof. Aleksander Szymański (Rzeszów)
Prof. Henryk Wrembel (Słupsk)
Prof. Adam Bechler (Szczecin)
Prof. Andrzej Bielski (Toruń)
Prof. Jacek Baranowski (Warszawa)
Prof. Jerzy Czerwonko (Wrocław)
Prof. Andrzej Więckowski (Zielona Góra)

Adres Zarządu: ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa, tel./fax: 621 26 68, adres elektroniczny: ptf@fuw.edu.pl,
Internet: www.fuw.edu.pl/~ptf.

POSTĘPY FIZYKI

RADA REDAKCYJNA

Andrzej K. Wróblewski (akw@fuw.edu.pl) – przewodniczący
Jerzy Czerwonko (pelstud@netra.ac.pwr.wroc.pl)
Marek Demiański (mde@fuw.edu.pl)
Zofia Gołąb-Meyer (meyer@thp1.if.uj.edu.pl)
Stanisław K. Hoffmann (skh@ifmpan.poznan.pl)
Franciszek Kaczmarek (efka@vm.amu.edu.pl)
Józef Szudy (szudy@phys.uni.torun.pl)

KOMITET REDAKCYJNY

Adam Sobiczewski – redaktor naczelny
Tomasz Dietl
Jerzy Gronkowski
Mirosław Łukaszewski
Magdalena Staszel
Barbara Wojtowicz

KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

Dr Maciej Piętka (Białystok)
Prof. Jerzy J. Wysłocki (Częstochowa)
Dr Stanisław Zachara (Gdańsk)
Dr Roman Bukowski (Gliwice)
Prof. Wiktor Zipper (Katowice)
Dr Małgorzata Suchańska (Kielce)
Dr Jacek Bieroń (Kraków)
Dr Elżbieta Jartych (Lublin)
Dr Urszula Garuska (Łódź)
Dr Ryszard Czajka (Poznań)
Dr Małgorzata Klisowska (Rzeszów)
Mgr Małgorzata Kuzio (Słupsk)
Dr Janusz Typek (Szczecin)
Dr Józefina Turło (Toruń)
Mgr Aleksandra Miłosz (Warszawa)
Prof. Bernard Jancewicz (Wrocław)
Mgr Justyna Jankiewicz (Zielona Góra)

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

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, druk i oprawa: „UNI-DRUK", Warszawa, ul. Buńczuk 7b

000001353
...ERSYTET MARII CURIE-SKŁODOWSKIEJ
...ioteka Instytutu Fizyki
...rie-Skłodowskiej
...tel. 537-62-94

Podwójne heterostruktury oraz ich zastosowanie w fizyce, elektronice i technice*

Żores I. Ałfiorow

Instytut Fizyko-Techniczny im. A.F. Joffego, Rosyjska Akademia Nauk, Sankt Petersburg, Rosja

The double heterostructure concept and its applications in physics, electronics and technology

Nobel Lecture, 8 December 2000, Stockholm

1. Wstęp

Trudno jest obecnie wyobrazić sobie współczesną fizykę ciała stałego bez półprzewodnikowych struktur heterozłączowych. Heterostruktury półprzewodnikowe, a w szczególności podwójne struktury heterozłączowe, zawierające studnie, druty i kropki kwantowe, są dzisiaj przedmiotem badań dwóch trzecich społeczności fizyki półprzewodników.

Możliwość zmiany typu przewodnictwa materiału półprzewodnikowego przez dobór domieszek oraz pomysł wstrzykiwania nierównowagowych nośników ładunku stały się jakby zalążkiem, z którego rozwinęła się elektronika półprzewodników. Wytworzone w jej ramach heterostruktury umożliwiły rozwiązanie bardziej ogólnego problemu sterowania takimi parametrami kryształów i przyrządów półprzewodnikowych, jak szerokość przerwy energetycznej, masa efektywna i ruchliwość nośników ładunku, współczynnik załamania światła, widmo energii elektronów itp.

Rozwój fizyki i technologii heterostruktur półprzewodnikowych przyniósł wielkie zmiany w naszym życiu codziennym. Przyrządy elektronowe z heterozłączami są szeroko stosowane w wielu dziedzinach cywilizacji ludzkiej. Trudno sobie dziś wyobrazić świat bez systemów telekomunikacyjnych wykorzystujących lasery z podwójnymi heterozłączami (lasery DH, ang. Double Heterostructure Laser), diody elektroluminescencyjne (LED, Light-Emitting Diode), tranzystory bipolarne z heterozłączami lub niskoszumowe tranzystory o wielkiej ruchliwości elektronów (HEMT, High Electron Mobility Transistor) stosowane w układach wielkiej częstotliwości, np. w telewizji satelitarnej. Lasery DH są obecnie w prawie każdym domu w odtwarzaczach płyt kompaktowych. Baterie słoneczne z heterozłączami znalazły szerokie zastosowanie zarówno na Ziemi jak i w przestrzeni kosmicznej.

Nasze zainteresowanie heterostrukturami półprzewodnikowymi nie było przypadkowe. Systematyczne studia nad półprzewodnikami zostały

*Wykład noblowski, wygłoszony 8 grudnia 2000 r. w Sztokholmie, został przetłumaczony za zgodą Autora i Fundacji Nobla [Translated with permission. Copyright © 2000 by the Nobel Foundation] (przyp. Red.).

rozpoczęte we wczesnych latach 30. ubiegłego wieku w Instytucie Fizyko-Technicznym w Petersburgu pod bezpośrednim kierunkiem jego dyrektora i założyciela, Abrahama F. Joffego. Tamże, w 1932 r., W.P. Żuze i B.W. Kurczatow badali samoistne i domieszkowe przewodnictwo półprzewodników, a w tym samym roku Joffe i Jakow I. Frenkel wykorzystując zjawisko tunelowania stworzyli teorię prostowania przez kontakt metal–półprzewodnik [1–3]). W latach 1931 i 1936 Frenkel opublikował swoje słynne artykuły, w których przewidział, nazwał i rozwinął teorię ekscytonów w półprzewodnikach, a w 1951 r. J.F. Gross po raz pierwszy wykazał doświadczalnie istnienie ekscytonów [4–7] Pierwsza dyfuzyjna teoria prostowania w heterozłączu p–n, która stała się podstawą teorii tego złącza opracowanej przez Shockleya, została opublikowana przez B.I. Dawidowa w 1939 r. [8]. To z inicjatywy Joffego w końcu lat czterdziestych XX w. rozpoczęto w Instytucie Fizyko-Technicznym badania związków miedzymetalicznych. N.H. Welker (na przykładzie InSb) i niezależnie N.A. Goriunowa i A.R. Regel w Instytucie Fizyko-Technicznym [9–11] teoretycznie przewidzieli, a następnie doświadczalnie zbadali właściwości półprzewodnikowe związków III–V. Wiele skorzystaliśmy na teoretycznej, doświadczalnej i technologicznej analizie badań prowadzonych wówczas na wysokim poziomie w Instytucie Fizyko-Technicznym im. Joffego.

2. Heterostruktura klasyczna

Idea zastosowania heterozłączy w elektronice półprzewodników pojawiła się na samym początku ery elektronicznej. W pierwszym patencie dotyczącym trazystorów ze złączem p–n Shockley zaproponował zastosowanie szerokoprzerwowego emitera w celu uzyskania jednostronnego wstrzykiwania nośników [12]. A.I. Gubanow, w naszym Instytucie, jako pierwszy zmierzył charakterystyki prądowo-napięciowe izotypowego i anizotypowego heterozłącza [13,14], ale doniosłe rozważania teoretyczne w tym wczesnym stadium badań heterostruktur zostały przeprowadzone przez Herberta Kroemera, który wprowadził pojęcie pól quasi-elektrycznego i quasi-magnetycznego w heterozłączu z liniowo zmienną przerwą energetyczną[1]. On też przewidział, że heterozłącza powinny wyróżniać się nadzwyczaj dużą wydajnością wstrzykiwania w porównaniu z homozłączem [15,16]. W tym samym okresie pojawiły się różne sugestie zastosowania heterostruktur w półprzewodnikowych bateriach słonecznych.

Pomysł lasera półprzewodnikowego ze złączem p–n [17], doświadczalne potwierdzenie wydajnego promieniowania rekombinacyjnego w strukturze z takim złączem, połączonego z możliwością emisji wymuszonej [18], i realizacja laserów złączowych oraz diody luminescencyjnej [19–21] stały się zalążkiem, z którego zaczęła wyrastać optoelektronika półprzewodnikowa. Wydajność laserów nie była jednak zadowalająca z powodu dużych strat optycznych i elektrycznych. Gęstości prądu progowego były duże i do powstania akcji laserowej konieczna była niska temperatura. Wydajność diod elektroluminescencyjnych była bardzo mała z powodu wewnętrznych strat.

Doniosłym krokiem, wkrótce po stworzeniu laserów ze złączem p–n, stało się sformułowanie idei lasera z podwójnym heterozłączem (DH), niezależnie przez nas i przez Kroemera [22,23]. Kroemer w swojej pracy proponował zastosowanie podwójnej heterostruktury w celu ograniczenia ruchu nośników w obszarze czynnym. Przewidywał on, że „akcja laserowa może powstać w wielu półprzewodnikach o przejściach skośnych, a jeszcze łatwiej w półprzewodnikach o przejściach prostych, jeżeli możliwe będzie wykonanie struktury z parą emiterów heterozłączowych".

W naszym patencie my także podkreślaliśmy możliwość uzyskania dużych gęstości wstrzykiwania nośników i inwersji obsadzeń dzięki „podwójnemu" wstrzykiwaniu. Wykazaliśmy w szczególności, że lasery homozłączowe „nie zapewniają pracy ciągłej (cw) w wysokiej temperaturze" oraz wskazaliśmy na dodatkową wyższość laserów DH wynikającą „ze zwiększenia emitującej powierzchni oraz użycia nowych materiałów dla różnych zakresów widmowych".

Początkowo teoria rozwijała się szybciej od realizacji doświadczalnych. W 1966 r. przewidzieliśmy [24], że gęstość nośników wstrzykiwanych może przewyższyć o wiele rzędów wielkości gęstość nośników równowagowych w szeroko-

[1] Tekst wykładu noblowskiego Herberta Kroemera zamieściliśmy w zeszycie 1/2002 *Postępów*, s. 1 (przyp. Red.)

przerwowym emiterze (dzięki zjawisku superiniekcji, czyli nadwstrzykiwania). Tego samego roku w pracy zgłoszonej do nowego pisma *Fizika i Technika Połuprowodnikow* podkreślałem nasze rozumienie głównych zalet podwójnej heterostruktury zastosowanej w różnych przyrządach, w szczególności w laserach i prostownikach dużej mocy:

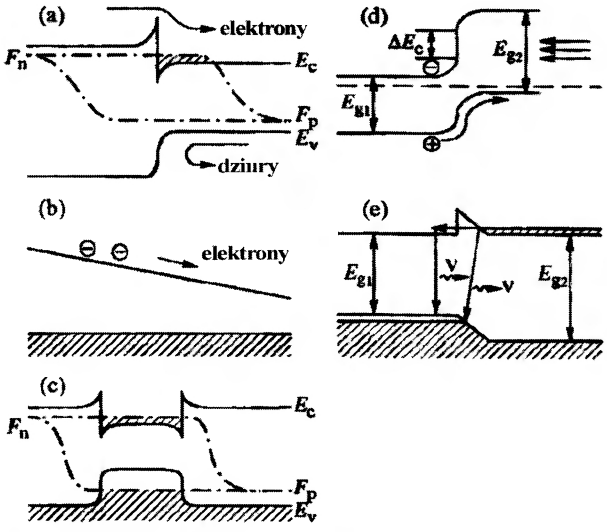
„Rekombinacja, emisja światła, inwersja obsadzenia stanów współistnieją i są zlokalizowane wyłącznie w środkowej warstwie struktury. Dzięki barierom potencjału na granicy półprzewodników o różnych szerokościach przerwy energetycznej prądy upływu elektronów i dziur nie mogą płynąć nawet przy dużym napięciu przewodzenia oraz nie zachodzi rekombinacja nośników w emiterach (w odróżnieniu od homostruktur p–i–n, p–n–n^+ oraz n–p–p^+, w których rekombinacja odgrywa dominującą rolę). Z powodu znacznej różnicy przenikalności elektrycznych światło jest całkowicie skupione w warstwie środkowej, która działa jak wysokiej klasy światłowód i dlatego nie ma strat promieniowania w obszarach biernych (emiterach)" [25].

Podkreśliliśmy najważniejsze wówczas cechy szczególne heterostruktur: 1) superiniekcję nośników, 2) optyczne ograniczenie przestrzenne, 3) elektryczne ograniczenie przestrzenne.

Realizacja praktyczna zjawiska okna szerokoprzerwowego miała duże znaczenie dla konstruowania detektorów promieniowania, baterii słonecznych i diod elektroluminescencyjnych. Pozwoliło nam to znacznie rozszerzyć i dokładnie dobierać zakres widmowy w bateriach słonecznych i detektorach promieniowania oraz radykalnie polepszyć wydajność diod elektroluminescencyjnych. Główne zjawiska fizyczne w pojedynczych i podwójnych heterostrukturach przedstawiono na rys. 1. Pozostawało już tylko stworzenie takiej heterostruktury, w której zjawiska te będą mogły wystąpić.

W owym czasie na ogół odnoszono się sceptycznie do możliwości wytworzenia takiego „idealnego" heterozłącza z powierzchnią graniczną (ang. interface) wolną od defektów, a przede wszystkim mającego przewidywane teoretycznie właściwości wprowadzania nośników. Nawet bardzo pionierskie badania pierwszych heterozłączy o dopasowanych parametrach sieci krystalicznej – monokrystalicznych heterozłączy Ge–GaAs wytwarzanych epitaksjalnie przez R.L. Andersona [26,27] – nie dawały żadnych dowodów na występowanie wstrzykiwania nośników nierównowagowych w heterostrukturach. Obecne osiągnięcia w realizacji wydajnego emitera szerokopasmowego uważano za nieomal niemożliwe, a patent na laser z podwójną heterostrukturą był często określany jako „patent papierowy".

Z powodu tego sceptycyzmu istniało tylko kilka grup próbujących znaleźć tę „idealną parę", co nie było oczywiście łatwą sztuką. W celu osiągnięcia wymaganej zgodności między termicznymi, elektrycznymi i krystalochemicznymi właściwościami kryształu oraz struktury pasmowej materiałów tworzących heterozłącze należało spełnić wiele warunków.



Rys. 1. Główne zjawiska fizyczne w heterostrukturach klasycznych: a) wstrzykiwanie jednokierunkowe i superiniekcja, b) dyfuzja w wewnętrznym polu elektrycznym, c) elektryczne i optyczne ograniczenie przestrzenne, d) zjawisko okna szerokoprzerwowego, e) tunelowanie skośne przez powierzchnię graniczną heterostruktury.

Szczęśliwa kombinacja licznych parametrów, jak mała masa efektywna i duża szerokość przerwy energetycznej, wydajne promieniowanie rekombinacyjne oraz ostry próg absorpcji dzięki „prostej" strukturze pasmowej, duża ruchliwość w absolutnym minimum pasma przewodnictwa i jej wyraźne zmniejszenie w najbliższym minimum w punkcie (100), zapewniała arsenkowi galu, nawet w tamtych czasach, poczesne miejsce w fizyce i elektronice półprzewodników. Ponieważ maksimum efektu uzyskuje się tworząc heterozłącze między półprzewodnikiem służącym jako obszar czynny i materiałem o większej szero-

kości przerwy energetycznej, najbardziej obiecujące były wówczas pary GaP–GaAs i AlAs–GaAs. Aby istniała zgodność w danej parze, materiały ją tworzące muszą mieć zbliżone wartości parametru („stałej") sieci krystalicznej. Heterozłącze w układzie AlAs–GaAs wydawało się zatem najlepsze. Przed podjęciem prac nad wytwarzaniem i badaniem właściwości tych heterozłączy trzeba było jednak pokonać pewną barierę psychologiczną. Syntezę AlAs przeprowadzono już dawno temu [28,29], ale wiele parametrów tego półprzewodnika nie było znanych, ponieważ AlAs uważano za niestabilny chemicznie i rozkładający się w wilgotnym powietrzu. Możliwość wytworzenia w tym układzie heterozłącza stabilnego i właściwego do odpowiednich zastosowań nie wydawała się zbyt realna.

Początkowo nasze wysiłki zmierzające do utworzenia podwójnej heterostruktury sprowadzały się do niedopasowanego sieciowo układu GaAsP. Naszym sukcesem stało się wykonanie w tym układzie laserów DH metodą epitaksji z fazy gazowej, lecz z powodu niezgodności stałych sieci akcja laserowa, tak jak w laserach homozłączowych, zachodziła wyłącznie w temperaturze ciekłego azotu [30]. Chciałbym podkreślić, że – o dziwo – był to pierwszy praktyczny wynik otrzymany dla niedopasowanego sieciowo, nawet tylko częściowo zrelaksowanego układu.

Doświadczenie, które nabyliśmy badając układ GaAsP, miało duże znaczenie dla zrozumienia specyficznych właściwości fizycznych i podstaw heteroepitaksji. Rozwój metody epitaksji z fazy gazowej w reaktorze wielokomorowym dla układu GaAsP umożliwił nam wytworzenie w 1970 r. struktury z supersiecią o okresie 20 nm i wykazanie zjawiska rozszczepienia pasma przewodnictwa [31].

Na podstawie ogólniejszych przesłanek doszliśmy jednak w końcu 1966 r. do wniosku, że nawet małe niedopasowanie stałych sieci w heterostrukturach $GaP_{0,15}As_{0,85}$–GaAs nie umożliwi nam wykorzystania potencjalnych zalet podwójnej heterostruktury. Mój współpracownik, D.N. Tretiakow, powiedział mi wtedy, że małe kryształy roztworu stałego $Al_xGa_{1-x}As$ o różnych składach, wykonane 2 lata wcześniej metodą chłodzenia z roztworu, leżą schowane w szufladzie dra A.S. Borszczewskiego i nic się z nimi złego nie dzieje. Stało się wówczas jasne, że roztwory stałe $Al_xGa_{1-x}As$ są trwałe chemicznie i nadają się do tworzenia stabilnych heterostruktur i przyrządów. Badania wykresu fazowego i kinetyki wzrostu kryształów w tym układzie oraz rozwój metody epitaksji z fazy ciekłej, przystosowanej do wytwarzania heterostruktur, zaowocowały wkrótce utworzeniem pierwszej dopasowanej sieciowo heterostruktury w układzie AlGaAs. Gdy opublikowaliśmy pierwszą pracę na ten temat, czuliśmy się szczęśliwi, że udało nam się zrealizować wyjątkowy układ z GaAs o idealnym dopasowaniu sieciowym, ale, jak to się często zdarza, te same wyniki zostały osiągnięte równocześnie i niezależnie przez H. Rupprechta i J. Woodalla z Centrum Badawczego IBM im. T.J. Watsona [32,33].

Od tego momentu nastąpił bardzo szybki postęp w dziedzinie heterostruktur półprzewodnikowych. Przede wszystkim wykazaliśmy doświadczalnie wyjątkowe właściwości szerokoprzerwowego emitera, istnienie zjawiska superiniekcji [34] oraz emisję wymuszoną w podwójnych heterostrukturach AlGaAs [35]; określiliśmy model pasmowy heterozłącza $Al_xGa_{1-x}As$–GaAs; wnikliwie zbadaliśmy właściwości luminescencji, dyfuzji nośników w heterostrukturze ze zmienną szerokością przerwy energetycznej oraz bardzo interesujące, szczególne właściwości przepływu prądu w heterozłączu. Tak więc np. przepływ prądu jest podobny do przepływu wskutek ukośnych przejść tunelowo-rekombinacyjnych bezpośrednio między dziurami wąskoprzerwowego i elektronami szerokoprzerwowego obszaru heterozłącza [36–39].

W tym samym okresie wytworzyliśmy kilka ważnych przyrządów, które wykorzystywały główne zalety idei heterostruktury:

— laser z podwójnym heterozłączem (DH) o małym natężeniu prądu progowego w temperaturze pokojowej (rys. 2) [40];

— diody elektroluminescencyjne (LED) o dużej wydajności, ze strukturami jedno- oraz dwuheterozłączowymi [41];

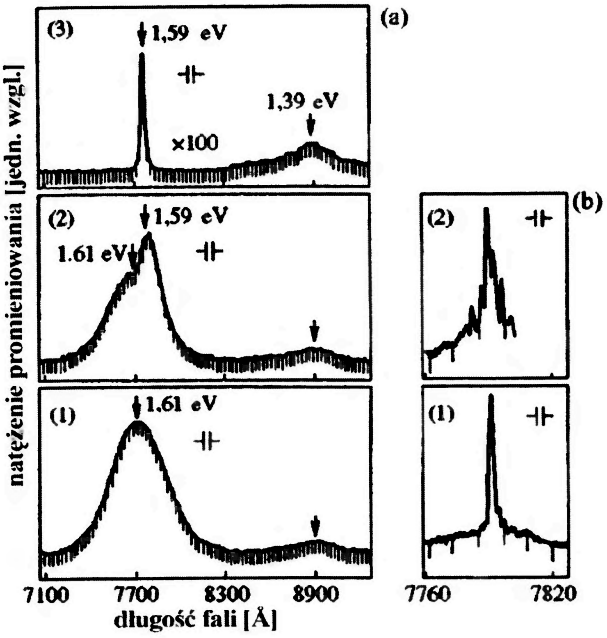
— baterie słoneczne z heterostrukturą [42];

— heterozłączowy tranzystor bipolarny [43];

— diodę przełączającą z heterostrukturą p–n–p–n [44].

Jednym z pierwszych udanych wdrożeń do produkcji w naszym kraju były baterie słoneczne z heterostrukturami, które znalazły zastosowanie w badaniach przestrzeni kosmicznej. Przeka-

zaliśmy naszą technologię firmie Quant, która od 1974 r. produkowała baterie słoneczne z GaAlAs, instalowane w wielu naszych sputnikach. Stacja kosmiczna Mir (rys. 3) używała ich przez 15 lat.

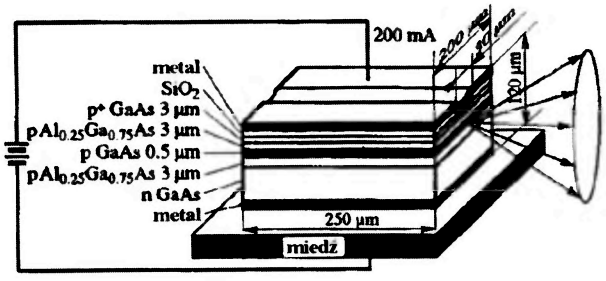


Rys. 2. Widma emisji pierwszej podwójnej heterostruktury z $Al_xGa_{1-x}As$ o małej gęstości prądu progowego $J_{pr} = 4{,}3$ kA/cm^2: a) prąd wzrasta od 0,7 A (1) przez 8,3 A (2) aż do 13,6 A (3); $s = 2{,}2 \cdot 10^{-3}$ cm^2; b) powiększony zakres wokół maksimum.

Rys. 3. Stacja kosmiczna Mir wyposażona w baterie słoneczne z heterostrukturami.

Większość tych wyników uzyskano następnie w innych laboratoriach w ciągu 1–2 lat, a w niektórych przypadkach nawet później. Z początkiem 1970 r. międzynarodowe współzawodnictwo bardzo się jednak nasiliło. Jeden z naszych konkurentów, Izuo Hayashi, pracujący wraz z M. Panishem w Laboratoriach Bella w Murray Hill, napisał później: „W sierpniu 1969 r. Żores Ałfiorow z Instytutu Joffego w Leningradzie zwiedzał nasze laboratorium. Okazało się, że on już osiągnął [gęstość prądu progowego lasera DH] $J_{pr}^{(300)} = 4{,}3$ kA/cm^2. Nie uświadamialiśmy sobie, że współzawodnictwo było tak ostre, i zdwoiliśmy nasze wysiłki... O pracy ciągłej lasera w temperaturze pokojowej donieśliśmy w maju 1970 r." [45].

W naszej publikacji z 1970 r. [46] ogłosiliśmy o osiągnięciu ciągłej akcji laserowej w laserze o geometrii paskowej, wytworzonym metodą fotolitografii i zamontowanym na posrebrzanej płytce miedzianej (rys. 4). Najmniejsza osiągnięta gęstość prądu J_{pr} w 300 K wynosiła 940 A/cm^2 w geometrii standardowej oraz 2,7 A/cm^2 w geometrii paskowej. Hayashi i Panish opublikowali niezależnie dane o pracy lasera DH w trybie cw (dla lasera o geometrii standardowej z radiatorami diamentowymi) zaledwie miesiąc po nas [47]. Osiągnięcie pracy ciągłej laserów w temperaturze pokojowej wywołało wybuch zainteresowania fizyką i technologią heterostruktur półprzewodnikowych. Podczas gdy w 1969 r. badania nad heterostrukturami były prowadzone tylko w kilku ośrodkach, głównie w ZSRR i USA (Instytut Joffego, Polius i Quant – laboratoria przemysłowe, którym przekazaliśmy naszą technologię do zastosowań w ZSRR; Laboratoria Bella, Centrum Badawcze D. Sarnoffa oraz Centrum Badawcze IBM im. T.J. Watsona w USA), to na początku 1971 r. wiele laboratoriów uniwersyteckich i przemysłowych w USA, ZSRR, Anglii, Japonii, a nawet w Brazylii i Polsce rozpoczęło badanie heterostruktur i przyrządów ze związków III–V.

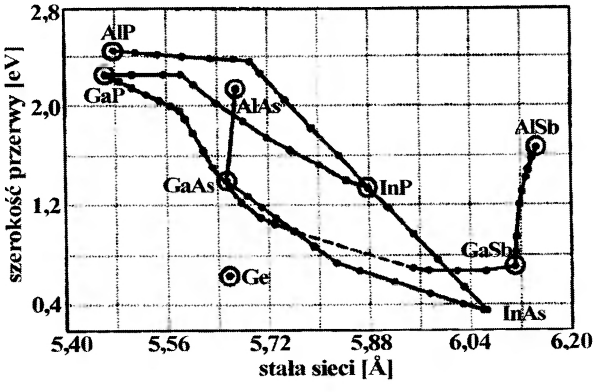


Rys. 4. Schemat struktury pierwszego lasera iniekcyjnego z podwójną heterostrukturą pracującego w trybie cw w temperaturze pokojowej.

W tym wczesnym stadium rozwoju fizyki i technologii heterostruktur stało się jasne, że na-

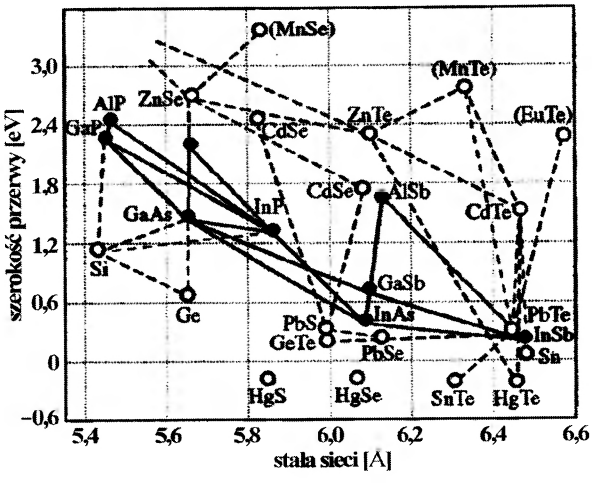
leży zintensyfikować badania w dziedzinie nowych heterostruktur dopasowanych sieciowo, w celu pokrycia szerokiego zakresu widma energii. Pierwszy istotny krok został zrobiony w naszym zespole w 1970 r.; w naszej pracy [48] donosiliśmy, że możliwe są różne czteroskładnikowe roztwory stałe III–V, pozwalające na niezależną zmianę parametru sieci krystalicznej i szerokości przerwy energetycznej, co stwarzało możliwość tworzenia różnych heterozłączy dopasowanych sieciowo. Nieco później do tego samego stwierdzenia doszedł Antipas ze współpracownikami [49]. Jako praktyczny przykład realizacji tej idei badaliśmy InGaAsP o różnych składach i wkrótce materiał ten został uznany za jeden z najważniejszych dla wielu praktycznych zastosowań, w tym w fotokatodach [50], a w szczególności w laserach emitujących podczerwień, w telekomunikacji światłowodowej [51] oraz w zakresie promieniowania widzialnego [52–54].

Na początku lat 70. została stworzona „mapa świata" idealnych heterostruktur dopasowanych sieciowo (rys. 5) Zaledwie 10 lat później uległa ona radykalnej zmianie (rys. 6). Obecnie trzeba dodać do niej jeszcze azotki.



Rys. 5. Zależność szerokości przerwy energetycznej od stałej sieci krystalicznej dla półprzewodników III–V. Heterozłącza o dopasowaniu sieciowym: Ge–GaAs – 1959 [26,27], AlGaAs – 1967 [32,33]. Heterostruktura czteroskładnikowa (InGaAsP i AlGaAsSb): projekt – 1970 [48], pierwszy eksperyment – 1972 [49].

Podstawowe koncepcje lasera półprzewodnikowego z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym sformułowaliśmy w patencie z 1971 r. [55]. W tym samym roku H. Kogelnik i C.V. Shank rozważali możliwość zastąpienia rezonatora Fabry'ego–Pérota lub podobnych rezonatorów w laserach barwnikowych o okresowych niejednorodnościach objętościowych [56]. Należy zaznaczyć, że ich podejście nie jest możliwe do zastosowania w laserach półprzewodnikowych i wszystkie laboratoria, które prowadziły badania w dziedzinie laserów z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym i z rezonatorami ze zwierciadłami Bragga stosują koncepcje sformułowane w pracy [55]: 1) siatka dyfrakcyjna jest utworzona nie w objętości, lecz na powierzchni warstwy światłowodu; 2) oddziaływanie modów światłowodowych z siatką dyfrakcyjną na powierzchni daje nie tylko rozłożone sprzężenie zwrotne, ale także wysoce skolimowane światło na wyjściu.



Rys. 6. Zależność szerokości przerwy energetycznej od stałej sieci krystalicznej dla półprzewodników grupy IV, III–V oraz II(IV)–VI i materiałów magnetycznych (w nawiasach). Linie łączące symbole związków chemicznych, ciągłe dla półprzewodników III–V i przerywane dla pozostałych, wskazują zbadane heterostruktury kwantowe.

Dokładna analiza teoretyczna lasera półprzewodnikowego z powierzchniową siatką dyfrakcyjną została opublikowana w 1972 r. [57]. W pracy tej autorzy przedstawili sposób uzyskania generacji światła na jednej harmonicznej. Pierwszy laser półprzewodnikowy z zastosowaniem powierzchniowej siatki dyfrakcyjnej i rozłożonego sprzężenia zwrotnego został zrealizowany niemal równocześnie w Instytucie Fizyko-Technicznym [58,59], w Caltechu [60] oraz w Laboratorium firmy Xerox w Palo Alto [61].

We wczesnych latach 80. Kroemer i Griffiths opublikowali artykuł [62], który wywołał ogromne zainteresowanie heterostrukturami o schodkowym układzie pasm (tzw. heterozłącza II typu, ang. staggered lineups). Przestrzenne rozdzielenie elek-

tronów i dziur na powierzchni granicznej stwarza możliwość strojenia właściwości optycznych takiej heterostruktury [38,63]. Układ pasm w heterozłączach II typu umożliwia emisję światła o energii fotonów znacznie mniejszej niż szerokość przerwy energetycznej każdego z półprzewodników tworzących heterozłącze. Skonstruowanie lasera ze wstrzykiwaniem, opartego na heterozłączach II typu z GaInAsSb–GaSb [63], stało się zapowiedzią wytwarzania wydajnych źródeł światła spójnego w zakresie podczerwieni. W takim przyrządzie światło powstaje w wyniku rekombinacji elektronów i dziur zlokalizowanych w samozgodnych studniach potencjału po obu stronach powierzchni granicznej heterozłącza. Heterostruktury II typu otwierają nowe perspektywy badań podstawowych w fizyce, oraz zastosowań, które nie mogą być zrealizowane za pomocą heterostruktur typu I (ang. straddling lineup) z materiałów III–V. Praktyczne wykorzystanie tych struktur jest jednak ciągle jeszcze utrudnione wskutek niedostatecznego zrozumienia ich podstawowych własności i małej liczby dotychczas badanych układów.

Podsumowując ten krótki przegląd rozwoju klasycznych heterostruktur, można wymienić następujące, najważniejsze z nich:

I. Podstawowe zjawiska fizyczne (rys. 1): 1) jednostronne wprowadzanie nośników; 2) superiniekcja; 3) dyfuzja w wewnętrznych polach quasi-elektrycznych; 4) ograniczenie przestrzenne elektronów; 5) ograniczenie optyczne; 6) zjawisko szerokoprzerwowego okna emitera; 7) tunelowanie skośne przez powierzchnię graniczną heterozłącza.

II. Ważne zastosowania w elektronice: 1) lasery półprzewodnikowe – mała gęstość prądu progowego, praca ciągła w temperaturze pokojowej, lasery z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym, lasery ze zwierciadłami Bragga, lasery na podczerwień z heterostrukturami II typu; 2) diody elektroluminescencyjne o dużej wydajności; 3) baterie słoneczne i detektory promieniowania wykorzystujące zjawiska szerokoprzerwowego okna; 4) półprzewodnikowa optyka zintegrowana wykorzystująca lasery z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym i lasery ze zwierciadłami Bragga; 5) bipolarne tranzystory szerokoprzerwowe; 6) tranzystory, tyrystory i dynistory z fotonową transmisją sygnału; 7) diody i tyrystory dużej mocy; 8) przetworniki podczerwieni i promieniowania widzialnego; 9) wydajne zimne katody.

III. Ważne technologicznie cechy szczególne: 1) struktury z dopasowaniem sieciowym – praktycznie niezbędne; 2) wieloskładnikowe roztwory stałe – stosowane w celu uzyskania dopasowania sieciowego; 3) technika epitaksjalnego wzrostu – zasadniczo konieczna.

Podsumowując to streszczenie wczesnego rozwoju heterostruktur objętościowych (3D) można stwierdzić, ze wynalazek „idealnego" heterozłącza oraz wprowadzenie idei heterostruktur do fizyki i technologii doprowadziło do odkrycia nowych zjawisk fizycznych, do zawrotnego polepszania charakterystyk praktycznie wszystkich znanych przyrządów półprzewodnikowych oraz do wynalezienia nowych.

3. Heterostruktury ze studniami kwantowymi i z supersieciami

Dzięki ograniczeniu przestrzennemu elektronów laser z podwójnymi heterozłączami stał się ważnym zwiastunem struktury ze studnią kwantową: gdy warstwa środkowa osiąga grubość kilkudziesięciu nanometrów, poziomy energetyczne elektronów ulegają rozszczepieniu na skutek kwantowego zjawiska rozmiarowego. Rozwój technologii umożliwił tworzenie heterostruktur o ultracienkich warstwach. W latach 70. rozwinięto dwie metody osadzania warstw z bardzo dokładną kontrolą grubości, płaskości powierzchni granicznych, składu itp. Współczesna technologia epitaksji z wiązek molekularnych (MBE) stała się w praktyce ogromnie ważną metodą w odniesieniu do heterostruktur III–V, przede wszystkim dzięki pionierskim pracom A. Cho [64,65]. Metoda metaloorganicznego chemicznego osadzania z fazy gazowej (MOCVD) rozwinęła się z wczesnych prac H. Manasevita [66] i znalazła szerokie zastosowanie w badaniach nad heterostrukturami III–V po ogłoszeniu przez R. Depuisa i D. Dapkusa [67] uzyskania jednokierunkowego wstrzykiwania w laserze DH z AlGaAs wytworzonym metodą MOCVD.

Wyraźnym przejawem kwantowego efektu rozmiarowego w widmie optycznym półprzewodnikowych heterostruktur GaAs–AlGaAs z ultracienkimi warstwami (studni kwantowych) były wyniki pracy Raymonda Dingle'a i in. [68]. Au-

torzy ci zaobserwowali charakterystyczny skok w widmie absorpcji i systematyczne przesunięcia energii charakterystycznych ze zmniejszaniem grubości studni kwantowej.

Badania nad supersieciami rozpoczęły się od prac L. Esakiego i R. Tsu [69], którzy analizowali ruch elektronu w supersieci, czyli w dodatkowym potencjale okresowym, wytworzonym przez zmianę domieszkowania bądź składu materiałów półprzewodnikowych, z okresem nieco większym od stałej sieci krystalicznej. W takim krysztale, „zrobionym ludzką ręką", jak to nazwał Esaki, pasmo paraboliczne ulega podziałowi na minipasma z małymi przerwami wzbronionymi o strefach Brillouina zależnych od okresu supersieci. Podobna idea została opisana przez L.W. Kiełdysza [70], gdy rozważał okresowy potencjał wytworzony na powierzchni półprzewodnika przez intensywne fale ultradźwiękowe. W Instytucie Fizyko-Technicznym R. Kazarinow i R. Suris we wczesnych latach 70. rozważali teoretycznie przepływ prądu w supersieciach [71–73]. Wykazali oni, że przepływ prądu miedzy studniami jest uwarunkowany tunelowaniem przez bariery potencjału oddzielające studnie oraz przewidzieli bardzo ważne zjawiska: tunelowanie w polu elektrycznym, gdy stan podstawowy studni jest zgodny ze stanem wzbudzonym następnej studni, oraz emisję wymuszoną, wynikającą z tunelowania z udziałem fotonu między stanem podstawowym jednej studni a stanem wzbudzonym studni sąsiedniej, mającym mniejszą energię w wyniku działania zewnętrznego pola elektrycznego. Niezależnie w tym samym czasie Esaki i Tsu analizowali tunelowanie rezonansowe w supersieciach [74].

Pionierskie prace doświadczalne nad strukturami supersieciowymi prowadzili Esaki i Tsu: supersieci były wytwarzane metodą MOCVD w układzie GaP_xAs_{1-x}–GaAs. Równocześnie w naszym laboratorium została skonstruowana pierwsza aparatura z reaktorem wielokomorowym, co pozwoliło nam wytworzyć, jak wspomniałem wcześniej, strukturę z supersiecią $GaP_{0,3}Al_{0,7}$–GaAs o grubości każdej warstwy 10 nm i całkowitej ich liczbie równej 200 [31]. Obserwowane cechy szczególne charakterystyk prądowo-napięciowych, ich zależność od temperatury oraz fotoprzewodnictwo można było wytłumaczyć rozszczepieniem pasma przewodnictwa związanym z istnieniem jednowymiarowego potencjału okresowego supersieci. Ta pierwsza supersieć była także pierwszą supersiecią naprężoną. W połowie lat 70. E. Blakeslee i J. Matthews, pracujący z Esakim i Tsu w IBM, wytworzyli supersieć naprężoną o bardzo małej koncentracji defektów. Ale wiele lat później, po pracach teoretycznych G. Osbourna z Laboratoriów Sandia [75] oraz pierwszym pomyślnym wytworzeniu przez M. Ludowise'a z firmy Varian i N. Holonyaka z Uniwersytetu stanu Illinois supersieci naprężonej o wysokiej jakości (w układzie GaAs–$In_{0,2}Ga_{0,8}As$), osiągnięto na tej strukturze akcję laserową w pracy ciągłej i w temperaturze pokojowej [76]. Stało się jasne, że naprężenia sieci w supersieci naprężonej stają się dodatkowym stopniem swobody i że przez zmianę grubości oraz składu warstwy można zmieniać w sposób ciągły i niezależny szerokość przerwy energetycznej oraz stałą sieci całej supersieci.

Na początku lat 70. Esaki ze współpracownikami przeszli na technologię epitaksji z wiązek molekularnych w układzie AlGaAs [77], a w marcu 1974 r. opublikowali pracę na temat tunelowania rezonansowego [78]. Był to pierwszy wynik doświadczalny z dziedziny fizyki studni kwantowych. Mierzyli oni natężenie prądu tunelowego w funkcji przyłożonego napięcia w strukturze GaAs–GaAlAs z dwiema barierami i zmierzone maksima prądu powiązali z tunelowaniem rezonansowym. Następnie, w tym samym roku, Esaki i Chang zaobserwowali tunelowanie rezonansowe w supersieci [79]. Duże zainteresowanie tunelowaniem rezonansowym wynikało z możliwości zastosowania tego zjawiska w szybkiej elektronice. W późnych latach 80. skonstruowano pikosekundowe diody z podwójną barierą i tunelowaniem rezonansowym, osiągając w diodzie z GaAs oscylacje o częstotliwości sięgającej 420 GHz w temperaturze pokojowej.

Ograniczenie ruchu elektronu do dwóch wymiarów w tranzystorach polowych wykryto dawno temu [80], a dla elektronów pułapkowanych w warstwie inwersyjnej po raz pierwszy potwierdził je A.B. Fowler w pomiarach magnetoprzewodnictwa [81]. Zjawiska widmowe związane z kwantowaniem przestrzennym zostały zaobserwowane w warstwach bizmutu przez W.N. Łuckiego [82] i L.A. Kulika w 1968 r.

Pionierskie badania supersieci domieszkowanych modulacyjnie, wykonane przez Dingle'a

i współpracowników [83], wskazywały na zwiększenie ruchliwości w stosunku do kryształów 3D, co ożywiło prace dotyczące zastosowań dwuwymiarowego gazu elektronowego we wzmacniaczach mikrofalowych. We Francji i Japonii skonstruowano, prawie równocześnie, nowe typy tranzystorów z pojedynczą heterostrukturą nAlGaAs–nGaAs domieszkowaną modulacyjnie, oznaczanych symbolem TEGFET (Two Dimensional Electron-Gas Field-Effect Transistors) we Francji [84] i HEMT (High Electron Mobility Transistors) w Japonii [85].

Pierwszy działający laser ze studnią kwantową został zademonstrowany przez J.P. van der Ziela i współpracowników [86], ale jego parametry były gorsze niż dla laserów DH. W 1978 r. Dupuis i Dapkus, we współpracy z Holonyakiem, jako pierwsi donieśli o laserze ze studnią kwantową o parametrach porównywalnych z konwencjonalnym laserem DH [87]. W artykule tym została użyta nazwa „studnia kwantowa". Rzeczywiste zalety laserów ze studnią kwantową wykazał znacznie później W.T. Tsang z Laboratoriów Bella. Dzięki wielu ulepszeniom technologii epitaksji z wiązek molekularnych oraz wprowadzeniu zoptymalizowanej struktury (GRIN SCH), osiągnął on gęstość prądu progowego równą 160 A/cm^2 [88].

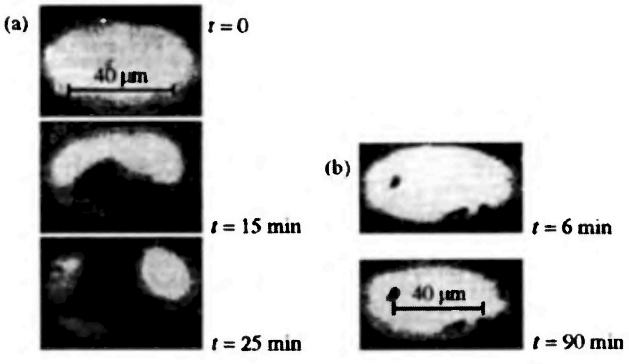
My rozpoczęliśmy rozwijanie metod MBE i MOCVD do tworzenia heterostruktur III–V dopiero w końcu lat 70. Przede wszystkim wspieraliśmy projektowanie i konstrukcję pierwszej krajowej aparatury do MBE w naszym przemyśle elektronicznym. W ciągu kilku lat zostały opracowane trzy generacje takich urządzeń, zanim ostatnia, o nazwie „Cna", spełniła nasze oczekiwania. (Nazwa pochodzi od imienia pięknej rzeki niedaleko Riazania – miasta, gdzie znajdowało się NITI – Przemysłowe Laboratorium Elektroniki. NITI zajmowało się udoskonalaniem konstrukcji naszej aparatury do MBE). Równolegle, wraz z NTO AN – firmą Akademii Nauk w Leningradzie wytwarzającą aparaturę naukową – zaczęliśmy rozwijać aparaturę do MBE. W połowie lat 80. posiadaliśmy kilka egzemplarzy tej wersji. Oba typy aparatury do MBE ciągle jeszcze działają w Instytucie Joffego i w innych laboratoriach.

W naszym Instytucie rozwijaliśmy także technologię MOCVD, a nieco później szwedzka firma Eqiquip zaprojektowała specjalnie dla nas, z naszym współudziałem, dwa układy, które nadal są używane w naszych pracach.

Duże zainteresowanie pracami doświadczalnymi nad strukturami niskowymiarowymi oraz brak odpowiedniego wyposażenia do MBE i MOCVD skierowały naszą uwagę na rozwój epitaksji z fazy ciekłej, nadającej się do wytwarzania heterostruktur ze studniami kwantowymi. Aż do końca lat 70. wydawało się jednak niemożliwe wytwarzanie tą metodą heterostruktur III–V o grubości obszaru czynnego mniejszej od 50 nm, ze względu na istnienie w heterozłączu rozległego obszaru o niejednorodnym składzie chemicznym. Sytuacja uległa zmianie dzięki pracom Holonyaka i in. [89] dla struktur zbliżonych do supersieci z InGaAsP, z użyciem techniki obracającej się łódki. Rozwinęliśmy więc w naszym laboratorium nową metodę epitaksji z fazy ciekłej ze zwykłym ruchem translacyjnym, w standardowym systemie poziomym, do wytwarzania heterostruktur InGaAsP [90], oraz niskotemperaturową epitaksję z fazy ciekłej do struktur AlGaAs [91]. Metody te pozwoliły nam otrzymać prawie każdy rodzaj heterostruktur ze studniami kwantowymi, doskonałej jakości, o grubości obszaru czynnego do 2 nm z rozmyciem powierzchni granicznej rzędu jednej stałej sieci krystalicznej. Wielkie znaczenie praktyczne dla rozwoju heterostruktur laserowych InGaAsP miało ustanowienie rekordu gęstości prądu progowego dla InGaAsP/InP (λ = 1,3 i 1,55 μm) oraz dla InGaAsP/GaAs (λ = 0,65–0,9 μm) w laserach z pojedynczą studnią kwantową o rozdzielonym ograniczeniu przestrzennym [92,93]. Co się tyczy laserów dużej mocy InGaAsP/GaAs (λ = 0,8 μm), osiągnięto całkowitą wydajność 66% i moc 5 W w pracy ciągłej dla lasera paskowego o szerokości paska 100 μm [94,95]. W laserze tym zrealizowano po raz pierwszy skuteczne chłodzenie półprzewodnikowego przyrządu mocy drogą rekombinacji promienistej, zgodnie z wcześniejszymi przewidywaniami [25]. Garbuzow i in. zmierzyli ważne charakterystyki heterostruktur InGaAsP – ich nadzwyczajną odporność na mnożenie się dyslokacji i defektów (rys. 7). Właśnie te badania zapoczątkowały szerokie zastosowanie struktur bez Al.

Najbardziej złożona struktura laserowa ze studnią kwantową (rys. 8), stanowiąca kombinację studni kwantowej z supersiecią o małym okre-

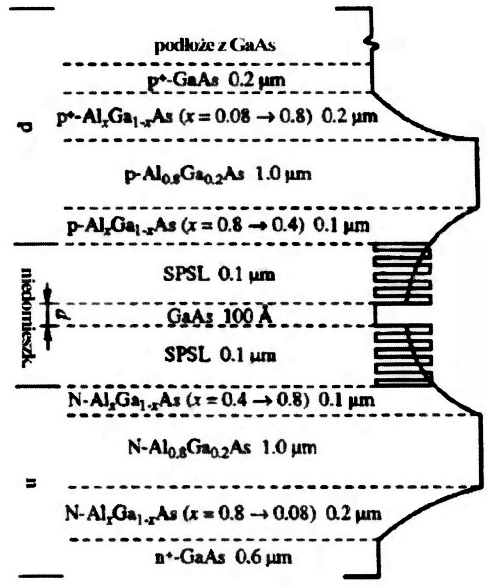
sie, która posłużyła do utworzenia heterostruktur półprzewodnikowych o nazwie GRIN SCH (najkorzystniejszych dla uzyskania najmniejszych wartości J_{pr}), została zademonstrowana w naszym laboratorium w 1988 r. [97]. Stosując supersieć o małym okresie, osiągnęliśmy nie tylko żądany profil światłowodu, stwarzając w ten sposób barierę dla ruchu dyslokacji w kierunku warstwy czynnej, lecz także uzyskaliśmy możliwość osadzania różnych warstw struktury w znacznie różniących się temperaturach. W ten sposób uzyskaliśmy zarówno doskonałą morfologię powierzchni jak i dużą wewnętrzną wydajność kwantową na planarnej powierzchni (100) GaAs. Najmniejsza gęstość prądu $J_{pr} = 52$ A/cm^2, a po małej optymalizacji 40 A/cm^2, stała się na długo rekordem świata dla laserów złączowych oraz świetną demonstracją zastosowań studni kwantowych i supersieci w przyrządach półprzewodnikowych.



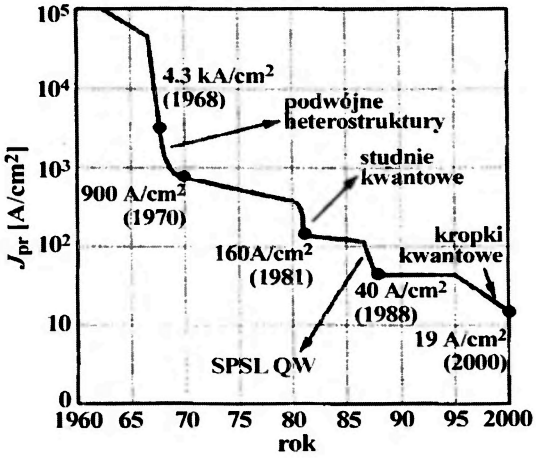
Rys. 7. Ewolucja obszaru czynnego podwójnej heterostruktury przy wysokim poziomie wzbudzenia światłem: a) AlGaAs/GaAs, b) InGaAsP/GaAs. Średnica wiązki lasera wzbudzającego Kr^+ wynosi 40 μm. Poziom wzbudzenia: a) 10^4 W/cm^2, b) 10^5 W/cm^2.

Pomysł emisji wymuszonej w supersieciach, sugerowany przez Kazarinowa i Surisa [71–73], został zrealizowany blisko ćwierć wieku później, wkrótce po ukazaniu się pracy Federica Capassy [98]. Proponowana struktura została znacznie ulepszona i laser kaskadowy, opracowany przez Capassę, dał początek nowej generacji laserów unipolarnych w zakresie średniej podczerwieni.

Historia lasera półprzewodnikowego jest niejako historią ewolucji prądu progowego lasera, co zostało przedstawione na rys. 9. Najbardziej radykalne zmiany nastąpiły po zrealizowaniu koncepcji podwójnej heterostruktury. Ten najważniejszy parametr został doprowadzony do granic wyznaczonych przez teorię w wyniku skoku, jakim stało się zastosowanie supersieci o małym okresie. To, co się może wydarzyć po zastosowaniu nowych struktur z drutami lub kropkami kwantowymi, zostanie omówione w następnej części artykułu.



Rys. 8. Laser ze studnią kwantową wykorzystujący supersieci o krótkim okresie, wytworzone metodą MBE.



Rys. 9. Ewolucja gęstości prądu progowego laserów półprzewodnikowych; SPSL QW – studnie kwantowe z supersieci o krótkich okresach.

Ukoronowaniem badań nad studniami kwantowymi było zapewne odkrycie kwantowego zjawiska Halla [99]. Odkrycie to i jego wnikliwe badania na heterostrukturach AlGaAs–GaAs doprowadziły wkrótce do odkrycia ułamkowego zjawiska Halla [100] i stały się przebojem w fizyce ciała

stałego. Badanie zjawiska, które dotyczy jedynie wielkości podstawowych i nie jest związane ze specyfiką struktury pasmowej czy ruchliwością lub koncentracją nośników, wykazało, że heterostruktury mogą być użyte do modelowania bardzo podstawowych zjawisk fizycznych. Ostatnio wiele prac w tej dziedzinie skupiło się na próbach zrozumienia kondensacji elektronów i poszukiwania krystalizacji Wignera.

W podsumowaniu można przeprowadzić ocenę ewolucji heterostruktur ze studniami kwantowymi i supersieciami tak samo jak w przypadku heterostruktur klasycznych:

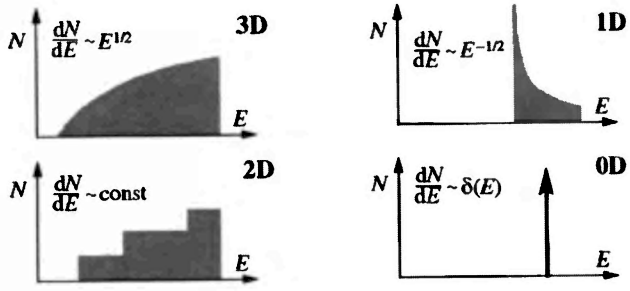
I. Podstawowe zjawiska fizyczne: 1) dwuwymiarowy (2D) gaz elektronowy; 2) schodkowa funkcja gęstości stanów; 3) kwantowe zjawisko Halla; 4) ułamkowe kwantowe zjawisko Halla; 5) ekscytony w temperaturze pokojowej; 6) tunelowanie rezonansowe w strukturze z podwójną barierą i supersieciami; 7) widmo energii w supersieciach określone przez wybór potencjału i naprężeń; 8) emisja wymuszona i tunelowanie rezonansowe w supersieciach; 9) pseudomorficzny wzrost struktur naprężonych.

II. Ważne konsekwencje i zastosowania: 1) mniejsze długości fali emitowanego światła, mniejsza gęstość prądu progowego, większy różniczkowy współczynnik wzmocnienia, słabsza zależność gęstości prądu progowego od temperatury w laserach półprzewodnikowych; 2) kaskadowy laser kwantowy emitujący w podczerwieni; 3) laser ze studnią kwantową w postaci supersieci o małym okresie; 4) optymalizacja ograniczenia przestrzennego elektronów i światła oraz efektu światłowodowego w laserach półprzewodnikowych; 5) tranzystory z 2D gazem elektronowym (HREMT); 6) diody z tunelowaniem rezonansowym; 7) dokładne oporniki wzorcowe; 8) SEED-y i modulatory elektrooptyczne; 9) detektory podczerwieni wykorzystujące kwantowy efekt rozmiarowy.

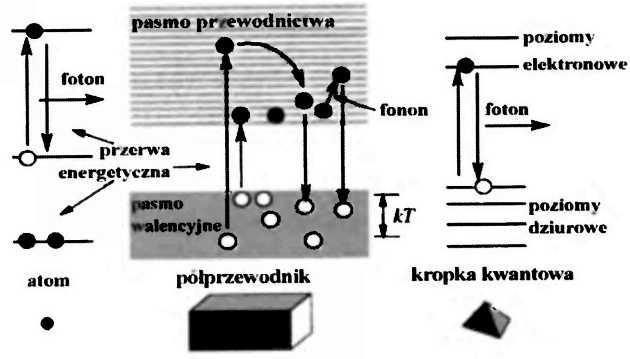
III. Ważne technologicznie cechy szczególne: 1) dopasowanie sieciowe – niekonieczne; 2) technologia wzrostu z małą prędkością (MBE, MOCVD) – zasadniczo konieczna; 3) zastosowanie technik wzrostu submonowarstw; 4) blokowanie dyslokacji niedopasowania podczas wzrostu epitaksjalnego; 5) gwałtowny wzrost różnorodności elementów tworzących heterostrukturę.

4. Heterostruktury z drutami i kropkami kwantowymi

Główną zaletą struktur kwantowych wykorzystywaną w technologii przyrządów laserowych jest istotny wzrost gęstości stanów elektronów przy zmniejszaniu wymiarowości gazu elektronowego (rys. 10). W latach 80. postęp w fizyce i technologii struktur ze studniami kwantowymi skłonił wielu naukowców do badania systemów o jeszcze niższej wymiarowości – drutów i kropek kwantowych. W odróżnieniu od studni kwantowych, w których nośniki są zlokalizowane w kierunku prostopadłym do warstwy, lecz mogą się swobodnie poruszać w jej płaszczyźnie, w drutach kwantowych nośniki są zlokalizowane w dwóch kierunkach i mogą się swobodnie poruszać tylko wzdłuż osi drutu. Ograniczenie ruchu nośnika we wszystkich trzech kierunkach prowadzi do powstania kropek kwantowych – „sztucznych atomów" o całkowicie dyskretnym widmie energii (rys. 11).



Rys. 10. Gęstość stanów nośników ładunku w strukturach o różnych wymiarach.



Rys. 11. Schemat poziomów energetycznych pojedynczego atomu (z lewej), kryształu objętościowego (w środku) i kropki kwantowej (z prawej).

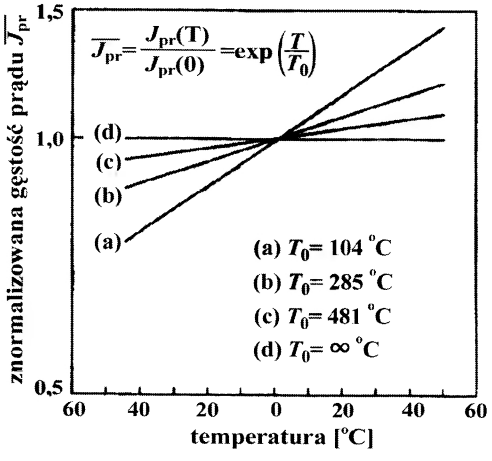
Prace doświadczalne nad wytwarzaniem i badaniem drutów i kropek kwantowych rozpoczęły

się przeszło 15 lat temu. W 1982 r. Y. Arakawa i H. Sakaki [101] rozważali teoretycznie niektóre zjawiska w laserach z heterostrukturami, w których występuje kwantyzacja energii w jednym, dwóch lub trzech kierunkach. Pisali oni: „Najważniejsze jest to, że gęstość prądu progowego takiego lasera jest – jak się wydaje – znacznie mniej czuła na zmiany temperatury niż w przypadku lasera konwencjonalnego, co odzwierciedla zmniejszoną wymiarowość stanów elektronowych". Autorzy przeprowadzili badania doświadczalne lasera ze studnią kwantową, umieszczonego w silnym polu magnetycznym skierowanym prostopadle do płaszczyzny studni, i zaobserwowali wzrost temperatury charakterystycznej (T_0) opisującej wykładniczy wzrost gęstości prądu progowego; w polu magnetycznym temperatura ta wzrastała od 144 do 313°C. Wskazywali oni na możliwość zmniejszenia się zależności prądu progowego od temperatury w laserach z drutami kwantowymi oraz pełnej stabilności termicznej dla laserów na kropkach kwantowych (rys. 12). Od tamtej pory pojawiło się już wiele teoretycznych i doświadczalnych prac w tej dziedzinie.

Pierwsze półprzewodnikowe kropki z mikrokryształów II–VI zanurzonych w szklanych matrycach zaproponowali i otrzymali A.I. Jekimow i A.A. Onuszczenko [102]. Zarówno to, że półprzewodnikowe kropki kwantowe wprowadzone zostały do izolacyjnej matrycy szklanej, jak i niska jakość powierzchni granicznej szkło–półprzewodnik, stanowiły i stanowią jednak istotne ograniczenia dla możliwych zastosowań tych struktur. Znacznie ciekawsze możliwości pojawiły się wraz z wytworzeniem trójwymiarowo uporządkowanych układów kropek kwantowych w matrycy półprzewodnikowej [103].

Zaproponowano już wiele metod wytwarzania takich struktur. Metody pośrednie, np. wytrawianie litograficzne struktury ze studnią kwantową, były często obarczone niewystarczającą rozdzielczością przestrzenną oraz prowadziły do powstawania defektów na powierzchniach bocznych. Bardziej obiecujące wydaje się użycie metod bezpośrednich, np. osadzania półprzewodnika w rowkach o kształcie litery V czy wytwarzanie warstwy na powierzchni pofałdowanej, które prowadzą do otrzymania zarówno drutów jak i kropek kwantowych. Znaczny wkład w tej dziedzinie wniosły zespoły z Instytutu Joffego i Politechniki Berlińskiej, które w ostatnich latach ściśle ze sobą współpracowały.

Te same zespoły doszły do wniosku, że najbardziej obiecującą metodą tworzenia uporządkowanych sieci drutów i kropek kwantowych jest wykorzystanie zjawiska samoorganizacji na powierzchni kryształu. Relaksacja naprężeń na stopniach lub krawędziach płaszczyzn krystalograficznych może prowadzić do tworzenia się uporządkowanych układów drutów i kropek zarówno w dopasowanym jak i niedopasowanym sieciowo wzroście heterostruktury. Pierwsze bardzo jednorodne sieci trójwymiarowych kropek kwantowych, wykazujących także uporządkowanie w płaszczyźnie struktury, zostały wytworzone w układzie InAs–GaAs zarówno metodą MBE jak i MOCVD [104,105].

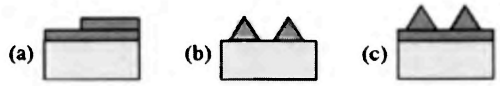


Rys. 12. Zależność znormalizowanej gęstości prądu progowego od temperatury dla różnych laserów DH: a) konwencjonalnego, b) ze studnią kwantową, c) z drutami kwantowymi, d) z kropkami kwantowymi.

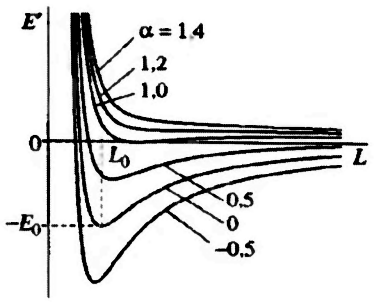
Mechanizmami prowadzącymi do tworzenia się regularnych uporządkowanych sieci ze spójnie naprężonych trójwymiarowych wysp na powierzchni kryształu są: relaksacja naprężeń sprężystych na krawędziach ścianek oraz wzajemne oddziaływanie wysp przez naprężone podłoże [106]. W heteroepitaksji materiałów o jednakowych stałych sieci mechanizm wzrostu jest ściśle określony przez związek między energią obu powierzchni heterozłącza oraz energią powierzchni granicznej. Jeżeli suma powierzchniowej energii warstwy epitaksjalnej γ_2 i energii powierzchni granicznej γ_{12} jest mniejsza od energii powierzchniowej podłoża, $\gamma_2 + \gamma_{12} < \gamma_1$, czyli je-

żeli osadzany materiał zwilża podłoże, to mamy do czynienia z mechanizmem wzrostu Franka–van der Mervego. Zmiana wartości $\gamma_2 + \gamma_{12}$ może spowodować przejście od mechanizmu Franka–van der Mervego do mechanizmu Volmera–Webera, w którym bezpośrednio na podłożu tworzą się trójwymiarowe wyspy.

W układzie z niedopasowaniem sieciowym między osadzaną warstwą a podłożem wzrost początkowo może postępować warstwa po warstwie. Im jednak warstwa jest grubsza, tym większa jest jej energia sprężysta. Zmniejszenie tej energii jest możliwe przez tworzenie się trójwymiarowych izolowanych wysp. Naprężenia sprężyste zostają w nich zmagazynowane, co prowadzi do zmniejszenia się całkowitej energii sprężystej, dając w efekcie mechanizm wzrostu Stranskiego–Krastanowa (rys. 13). Charakterystyczny rozmiar wysp jest określony przez minimum funkcji zależności energii sieci spójnie naprężonych wysp 3D od rozmiaru wyspy (rys. 14) [106]. Oddziaływanie między wyspami przez naprężenie sprężyste podłoża powoduje uporządkowanie wysp w płaszczyźnie struktury, typowe dla sieci kwadratowej.

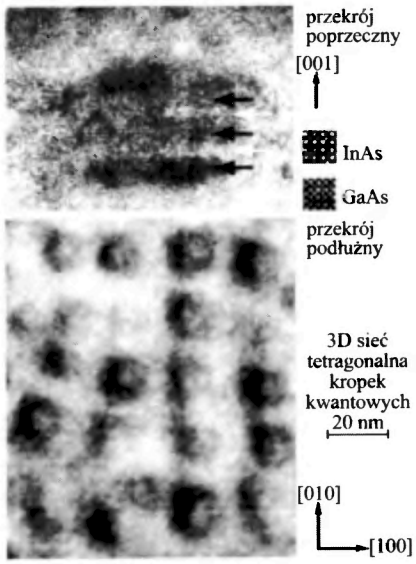


Rys. 13. Mody wzrostu: a) Franka–van der Mervego, b) Volmera–Webera, c) Stranskiego–Krastanowa.



Rys. 14. Energia na jednostkę powierzchni niezbyt gęstej sieci spójnie naprężonych wysp 3D w funkcji rozmiaru wyspy. Parametr α jest stosunkiem zmiany energii powierzchniowej po utworzeniu wyspy i wkładu od brzegów wyspy do energii relaksacji sprężystej. Gdy $\alpha > 1$, układ dąży termodynamicznie do połączenia wysp. Gdy $\alpha < 1$, istnieje optymalny rozmiar wysp, układ jest stabilny i nie podlega łączeniu.

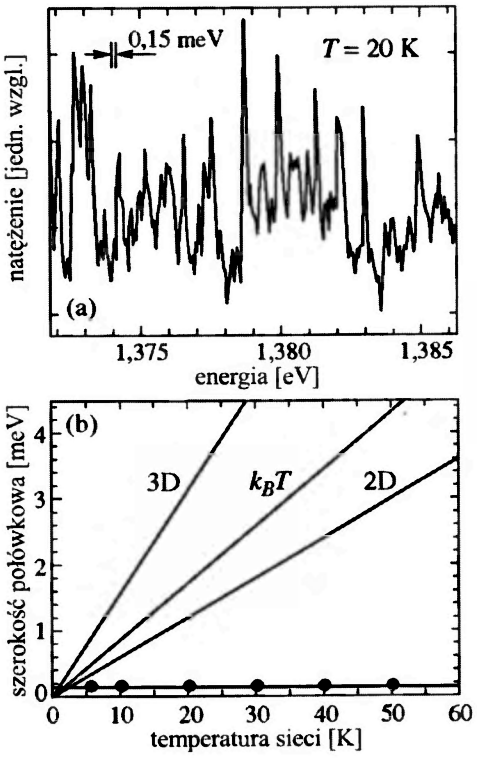
Przeprowadzone doświadczenia dały w większości przypadków rozkład wysp o małej dyspersji rozmiarów, a na wierzchu spójne wyspy InAs, tworzące w określonych warunkach quasi-okresową sieć kwadratową (rys. 15). Kształt kropek kwantowych może ulec wyraźnej zmianie podczas wygrzewania w czasie wzrostu lub po nim albo w wyniku zastosowania specjalnej sekwencji wzrostu. Krótkookresowa zmiana w osadzaniu materiałów prowadzi do rozdzielenia kropek i tworzenia się sprzężonej pionowo supersieci kropek kwantowych (QD) (rys. 15, za [107]). Stwierdzono zgodność energii stanu podstawowego w emisji, absorpcji i akcji laserowej [104]. Wykazano, że obserwowane ultrawąskie (o szerokości $< 0{,}15$ meV) linie luminescencji kropek kwantowych, nieulegające poszerzeniu ze wzrostem temperatury, są dowodem na tworzenie się elektronowych kropek kwantowych (rys. 16).



Rys. 15. Pionowe i poziome uporządkowanie sprzężonych kropek kwantowych w układzie InAs–GaAs.

Oczekuje się, że lasery z kropkami kwantowymi będą miały znacznie lepsze własności od konwencjonalnych laserów ze studniami kwantowymi. Spodziewane jest duże wzmocnienie różniczkowe oraz niezwykle mała gęstość i duża stabilność temperaturowa prądu progowego. Ponadto uporządkowana sieć centrów rozproszeniowych utworzona w obszarze światłowodu może dać w efekcie rozłożone sprzężenie zwrotne i stabilizację pojedynczego modu emisji laserowej. Samoistne struktury zagrzebane kropek kwantowych lokalizują przestrzennie nośniki i nie pozwalają im na rekombinację niepromienistą na po-

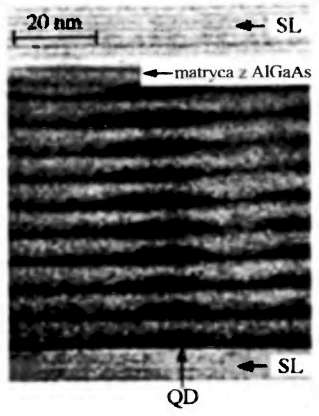
wierzchniach rezonatora. Dzięki temu być może uda się uniknąć przegrzewania ścianek, co jest jednym z najpoważniejszych problemów w działaniu laserów dużej mocy i o dużej wydajności w układach AlGaAs–GaAs i AlGaAs–InGaAs.



Rys. 16. a) Widmo katodoluminescencji InAs–GaAs uzyskane w spektrometrze o dużej zdolności rozdzielczej. b) Zależność szerokości połówkowej linii od temperatury.

Od pierwszych realizacji laserów z QD [108] wiadomo, że jednorodność wymiarów QD jest wystarczająca do osiągnięcia dobrego działania przyrządu. Ale nawet wówczas stwierdzono, że główną przeszkodą w działaniu lasera w temperaturze pokojowej i wyższej była indukowana termicznie aktywacja nośników z kropek kwantowych. Stosowano różne metody polepszenia sprawności działania takiego lasera: 1) zwiększanie gęstości kropek kwantowych przez gromadzenie ich w wielu warstwach (rys. 17); 2) umieszczanie kropek w studni kwantowej; 3) używanie materiału matrycy o większej przerwie energetycznej. W wyniku tego otrzymaliśmy poprawę wielu parametrów laserów QD w porównaniu z laserami ze studniami kwantowymi z tych samych materiałów. Jako przykład może służyć osiągnięta ostatnio gęstość prądu progowego 19 A/cm^2 [109]. Ponadto uzyskano niedawno moc wyjściową w pracy ciągłej do 3,5–4,0 W dla szerokości paska 100 μm z wydajnością kwantową 95% i o sprawności równej 50% [110].

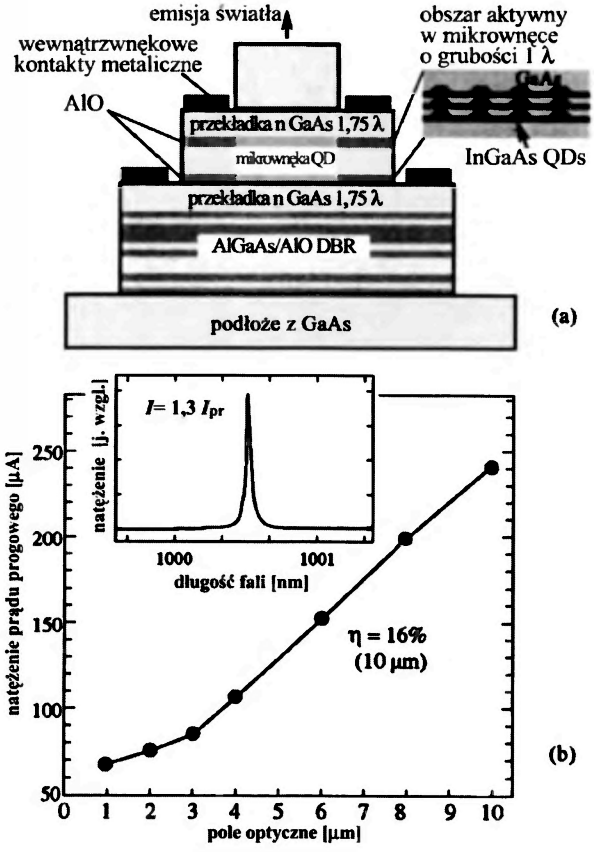
Podjęto intensywne prace w celu zrozumienia działania laserów QD o realistycznych parametrach. Przy rozrzucie rozmiaru i innych parametrów kropek kwantowych rzędu 10% teoria przewiduje typowe gęstości prądu progowego 5 A/cm^2 w temperaturze pokojowej [111]. Wartości 10 A/cm^2 w 77 K [112], a nawet 5 A/cm^2 w 4 K [113] obserwowano już w praktyce.



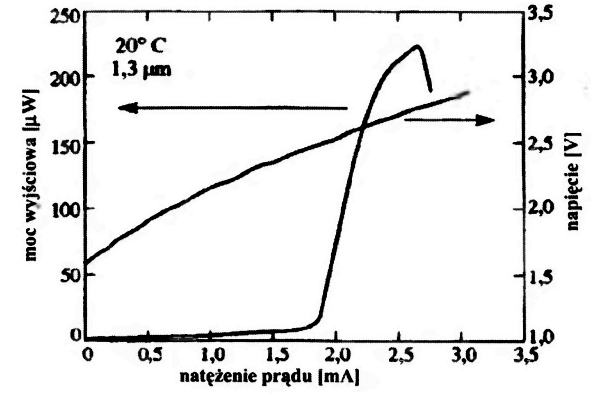
Rys. 17. Obraz warstwy czynnej lasera o dużym natężeniu emisji, uzyskany w transmisyjnym mikroskopie elektronowym; SL – supersieć.

Z punktu widzenia zastosowania kropek kwantowych w nowoczesnych przyrządach, wprowadzenie kropek do laserów powierzchniowych z pionową wnęką jest – jak się wydaje – bardzo obiecujące. Lasery takie o parametrach zbliżonych do najlepszych wartości przyrządów ze studniami kwantowymi o podobnej geometrii zostały już zbudowane (rys. 18, za [114]). Ostatnio uzyskano także bardzo obiecujące wyniki dla powierzchniowych laserów QD z pionowa wnęką, wykonanych z GaAs w celu zastosowania w telekomunikacji światłowodowej dla $\lambda = 1{,}3$ μm (rys. 19, za [115]).

W swobodnych wyspach 3D, utworzonych na niedopasowanych sieciowo podłożach, naprężenia mogą ulegać sprężystej relaksacji bez tworzenia dyslokacji. W ten sposób może powstać duża objętość wąskoprzerwowego materiału QD. Daje to możliwość pokrycia zakresu widmowego 1,3–1,5 μm z użyciem GaAs jako podłoża i rozwinięcia w przyszłości systemu transmisji wielokanałowej przy użyciu laserów QD.



Rys. 18. a) Schemat budowy powierzchniowego lasera QD z pionową wnęką [104]: 1) bez rekombinacji powierzchniowej na brzegach pola optycznego ograniczonego tlenkami; 2) zmniejszone boczne rozpływanie się nośników poza obszarem pola optycznego. Laser na pojedynczej kropce kwantowej z bardzo małą gęstością prądu progowego wydaje się możliwy do skonstruowania. b) Zależność gęstości prądu progowego od rozmiaru pola optycznego w powierzchniowym laserze QD z pionową wnęką: 1) małe gęstości prądu progowego (170 A/cm^2); 2) małe natężenie prądów progowych przy ultramałych polach optycznych; 3) zakres 1,3 μm dla podłoża GaAs.



Rys. 19. Laser powierzchniowy QD na GaAs z pionową wnęką.

Należy tu podkreślić, że udało nam się zrealizować pomysł DH dla struktur z drutami i kropkami kwantowymi, ponieważ w obu przypadkach mieliśmy wąskoprzerwowy materiał w matrycy materiału szerokoprzerwowego.

Dokonajmy znowu podsumowania jak w poprzednich rozdziałach:

I. Podstawowe zjawiska fizyczne: 1) gaz elektronowy 1D (druty); 2) funkcja gęstości stanów z ostrymi maksimami (druty); 3) gaz elektronowy 0D (kropki); 4) funkcja gęstości stanów o kształcie delty Diraca (kropki); 5) wzrastająca energia wiązania ekscytonów.

II. Ważne zastosowania w elektronice: 1) mała gęstość prądu progowego akcji laserowej i większy różniczkowy współczynnik wzmocnienia; 2) słabsza zależność prądu progowego od temperatury (druty); 3) stabilność temperaturowa prądu progowego (kropki); 4) dyskretne widmo wzmocnienia oraz możliwość otrzymania parametrów eksploatacyjnych zbliżonych do charakterystyk laserów gazowych lub laserów na ciele stałym (kropki); 5) większy współczynnik modulacji w modulatorach elektrooptycznych; 6) możliwość tworzenia przyrządów na „pojedynczych elektronach"; 7) nowe możliwości rozwoju tranzystorów polowych.

III. Ważne technologicznie cechy szczególne: 1) zastosowanie zjawiska wzrostu samoorganizujacych się struktur; 2) wzrost epitaksjalny na rowkach o kształcie litery V (druty); 3) wysokorozdzielcza litografia struktur laserowych ze studniami kwantowymi.

5. Przewidywane tendencje rozwoju

Bardzo interesujące wyniki dla krótkofalowych źródeł światła osiągnięto ostatnio w grupie selenków (II–VI) i azotków (III–V). Sukcesy w tych badaniach były głównie uwarunkowane zastosowaniem heterostruktur i metod wzrostu opracowanych dla studni kwantowych i supersieci ze związków III–V. Naturalną i najbardziej przewidywalną tendencją jest wykorzystanie specyficznych metod technologicznych i właściwości nowych materiałów. Opracowywane ostatnio różne heterostruktury w układach III–V, II–VI i IV–VI stanowią dobre potwierdzenie powyższych spostrzeżeń.

Z bardziej ogólnego punktu widzenia heterostruktury (w tym studnie kwantowe i supersieci, druty i kropki kwantowe) otwierają drogę do two-

rzenia materiałów nowego typu – heteropółprzewodników. By zacytować Leo Esakiego – zamiast „God-made crystals" tworzymy „man-made crystals".

Badania klasycznych heterostruktur, studni kwantowych oraz supersieci są już w stadium nasycenia i obecnie wykorzystujemy głównie wiele z ich wyjątkowych właściwości. Badania drutów i kropek kwantowych są zaś ciągle jeszcze w okresie rozwojowym; ekscytujące odkrycia i nieoczekiwane zastosowania wciąż jeszcze na nas czekają. Ale nawet już w tym stadium początkowym możemy powiedzieć, że uporządkowana, stabilna sieć kropek kwantowych może znaleźć zastosowanie w wielu przyrządach: laserach, modulatorach światła, detektorach oraz źródłach dalekiej podczerwieni itd. Tunelowanie rezonansowe przez atomy półprzewodnika, wprowadzone do warstw o szerszej przerwie energetycznej, może prowadzić do znacznych ulepszeń charakterystyk przyrządów. Mówiąc ogólniej, struktury z kropkami kwantowymi będziemy rozwijać „w głąb" i „wszerz".

Określenie „wszerz" oznacza układy z nowych materiałów, które pokryją nowy zakres energii. W tej gamie materiałów można będzie rozwiązać (przy zastosowaniu struktur z kropkami kwantowymi) problem ograniczenia czasu życia zielonych i niebieskich laserów półprzewodnikowych, a nawet ogólniejsze problemy tworzenia struktur bezdefektowych wykorzystujących szerokoprzerwowe układy II–VI i III–V (azotki).

Określenie „w głąb" natomiast ma podkreślać, że stopień uporządkowania układów zależy od bardzo złożonych warunków wzrostu, stałych materiałowych oraz konkretnych wartości swobodnej energii powierzchniowej. Aby uzyskać tunelowanie rezonansowe oraz przyrządy jednoelektronowe, w tym też optoelektroniczne, należy te parametry ocenić i przeanalizować, tak by otrzymać maksymalny stopień uporządkowania. W ogólności trzeba znaleźć silniejsze mechanizmy samoorganizacji, prowadzące do porządkowania sieci kropek kwantowych.

Na początku lat 80. zostałem zaproszony do wygłoszenia wykładu o heterostrukturach i ich zastosowaniach w Centrum Fotoniki Amoco w pobliżu Chicago. Oto jego podsumowanie:

1) Heterostruktury – nowy rodzaj materiału półprzewodnikowego – drogi, skomplikowany chemicznie i technologicznie, ale najwydajniejszy.

2) Współczesna optoelektronika jest oparta na następujących zastosowaniach heterostruktur: a) laser z podwójną heterostrukturą – podstawowy przyrząd współczesnej optoelektroniki; b) fotodioda z heterostrukturą – najwydajniejsza szybka fotodioda; c) optoelektroniczne układy scalone (OEICs, OptoElectronic Integrated Circuits) – będą one rozwiązywać problemy dużej gęstości informacji w systemach komunikacji optycznej.

3) Szybka mikroelektronika przyszłości będzie głównie oparta na heterostrukturach.

4) Szybka elektronika wysokotemperaturowa i wysokoenergetyczna – nowe, szerokie pole zastosowań heterostruktur.

5) Heterostruktury w przetwarzaniu energii: najdroższe fotokomórki i najtańsza produkcja energii słonecznej.

6) W XXI wieku tylko 1% heterostruktur będzie zawierało homozłącza.

Po 20 latach nie widzę powodu, żeby zmieniać to podsumowanie.

Trudno jest opisać główne kierunki współczesnej fizyki i technologii heterostruktur półprzewodnikowych. Można powiedzieć znacznie więcej niż ja tu naszkicowałem. Wielu jest uczonych, którzy przyczynili się do tak ogromnego postępu, określającego w dużym stopniu nie tylko przyszły rozwój w dziedzinie fizyki laserów półprzewodnikowych i telekomunikacji, ale także, w pewnym sensie, rozwój przyszłej cywilizacji. Chciałbym także podkreślić udział uczonych poprzednich pokoleń, którzy utorowali nam drogę. Jestem bardzo szczęśliwy, że dane mi było pracować w tej dziedzinie od jej początków. Jestem tym szczęśliwszy, że możemy przyczyniać się obecnie do jej dalszego rozwoju.

Tłumaczyła *Elżbieta Janik*
Instytut Fizyki PAN
Warszawa

Literatura

[1] Ya.I. Frenkel, A. Ioffe, *Phys. Z. Sowjetunion* **1**, 60 (1932).
[2] W.P. Żuze, I.W. Kurczatow, *ŻETF* **2**, 309 (1932).
[3] V.P. Zhuze, I.V. Kurchatov, *Phys. Z. Sowjetunion* **2**, 453 (1932).
[4] Ya.I. Frenkel, *Phys. Rev.* **37**, 17, 1276 (1931).

[5] J.I. Frenkel, *ŻETF* **6**, 647 (1936).
[6] E.F. Gross, N.A. Karryjew, *Dokł. Akad. Nauk SSSR* **84**, 261 (1952).
[7] E.F. Gross, N.A. Karryjew, *Dokł. Akad. Nauk SSSR* **84**, 471 (1952).
[8] B.I. Dawidow, *ŻETF* **9**, 451 (1939).
[9] N.A. Goriunowa, „Sieroje ołowo", praca doktorska, Uniwersytet Leningradzki, Instytut Fizyko-Techniczny (1951).
[10] A.I. Blum, N.P. Mokrowski, A.R. Regel, *Izw. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz.* **16**, 139 (1952).
[11] N.H. Welker, *Z. Naturforsch. A* **7a**, 744 (1939); *Z. Naturforsch. A* **8a**, 248 (1953).
[12] W. Shockley, „Circuit element utilizing semiconductor material", U.S. Patent 2269347, September 25, 1951.
[13] A.I. Gubanow, *Ż. Tiech. Fiz.* **20**, 1287 (1950).
[14] A.I. Gubanow, *Ż. Tiech. Fiz.* **21**, 304 (1951).
[15] H. Kroemer, *Proc. IRE* **45**, 1535 (1957).
[16] H. Kroemer, *RCA Rev.* **28**, 332 (1957).
[17] N.G. Basow, O.N. Krochin, J.M. Popow, *ŻETF* **39**, 1486 (1960).
[18] D.N. Nasledow i in., *Fiz. Twiord. Tieła* **4**, 1062 (1962).
[19] R.H. Hall i in., *Phys. Rev. Lett.* **9**, 366 (1962).
[20] N. Holonyak Jr., S.F. Bevacgua, *Appl. Phys. Lett.* **1**, 83 (1962).
[21] M.I. Nathan i in., *Appl. Phys. Lett.* **1**, 62 (1962).
[22] Ż.I. Ałfiorow, R.F. Kazarinow, „Laser półprzewodnikowy z pompowaniem elektrycznym", zgłoszenie patentowe nr 181737 [ZSRR], wniosek nr 950840, 30 marca 1963 r.
[23] H. Kroemer, *Proc. IEEE* **51**, 1782 (1963).
[24] Ż.I. Ałfiorow, W.B. Chałfin, R.F. Kazarinow, *Fiz. Twiord. Tieła* **8**, 3120 1966).
[25] Ż.I. Ałfiorow, *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **1**, 436 (1966).
[26] R.L. Anderson, *IBM J. Res. Dev.* **4**, 283 (1960).
[27] R.L. Anderson, *Solid-State Electron.* **5**, 341 (1962).
[28] G. Natta, L. Passerini, *Gazz. Chim. Ital.* **58**, 458 (1928).
[29] V.M. Goldschmidt, *Trans. Faraday Soc.* **25**, 253 (1929).
[30] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Twiord. Tieła* **9**, 279 (1967).
[31] Ż.I. Ałfiorow, J.W. Żylajew, J.W. Szmarcow, *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **5**, 196 (1971).
[32] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **1**, 1579 (1967).
[33] H.S. Rupprecht, J.M. Woodall, G.D. Pettit, *Appl. Phys. Lett.* **11**, 81 (1967).
[34] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **2**, 1016 (1968).
[35] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **2**, 1545 (1968).
[36] Ż.I. Ałfiorow i in., w: *Proceedings of the Ninth International Conference on Semiconductor Structures*, Moscow, July 23-29, 1968 (Nauka, Leningrad 1969), t. 1, s. 534.
[37] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **3**, 541 (1969).
[38] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **3**, 1054 (1969).
[39] Zh.I. Alferov, *J. Lumin.* **1**, 869 (1970).
[40] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **3**, 1328 (1969).
[41] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **3**, 930 (1969).
[42] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **4**, 2378 (1970).
[43] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **7**, 1159 (1973).
[44] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **4**, 578 (1970).
[45] I. Hayashi, *IEEE Trans. Electron Dev.* **ED-31**, 1630 (1984).
[46] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **4**, 1826 (1970).
[47] I. Hayashi i in., *Appl. Phys. Lett.* **17**, 109 (1970).
[48] Ż.I. Ałfiorow i in., w: *Proceedings of the International Conference on Physics and Chemistry of Semiconductor Heterojunctions and Layer Structures*, Budapest, October 1970, red. G. Szigeti (Academiai Kiado, Budapest 1971), t. 1, s. 93.
[49] G.A. Antipas i in., *Inst. Phys. Conf. Ser.* **17**, 48 (1973).
[50] L. James i in., *Appl. Phys. Lett.* **22**, 270 (1973).
[51] A.P. Bogatow i in., *Kwant. Elektron.* **1**, 2294 (1974).
[52] Ż.I. Ałfiorow i in., *Pisma Ż. Tiech. Fiz.* **1**, 305 (1975).
[53] Ż.I. Ałfiorow i in., *Pisma Ż. Tiech. Fiz.* **1**, 406 (1975).
[54] W.R. Hitchens i in., *Appl. Phys. Lett.* **27**, 245 (1975).
[55] Ż.I. Ałfiorow i in. „Półprzewodnikowy kwantowy generator optyczny", zgłoszenie patentowe nr 392875 [ZSRR], wniosek nr 1677436, 19 lipca 1971 r.
[56] H. Kogelnik, C.V. Shank, *Appl. Phys. Lett.* **18**, 152 (1971).
[57] R.F. Kazarinow, R.A. Suris, *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **6**, 1359 (1972).
[58] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **8**, 832 (1974).
[59] Ż.I. Ałfiorow i in., *Pisma Ż. Tiech. Fiz.* **1**, 645 (1975).
[60] M. Nakamura i in., *Appl. Phys. Lett.* **22**, 315 (1973).
[61] D.R. Scifres, R.D. Burnham, W. Streifer, *Appl. Phys. Lett.* **25**, 203 (1974).
[62] H. Kroemer, G. Griffiths, *IEEE Electron Dev. Lett.* **EDL-4**, 1, 20 (1983).
[63] A.N. Baranow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **20**, 2217 (1986).
[64] A.Y. Cho, *J. Vac. Sci. Technol.* **8**, 31 (1971).
[65] A.Y. Cho, *Appl. Phys. Lett.* **19**, 467 (1971).
[66] H.M. Manasevit, *Appl. Phys. Lett.* **12**, 156 (1968).
[67] R.D. Dupuis, P.D. Dapkus, *Appl. Phys. Lett.* **31**, 466 (1977).
[68] R. Dingle, W. Wiegmann, C.H. Henry, *Phys. Rev. Lett.* **33**, 827 (1974).
[69] L. Esaki, R. Tsu, *IBM J. Res. Dev.* **14**, 61 (1970).

[70] L.W. Kiełdysz, *Fiz. Twiord. Tieła* **4**, 2265 (1962).
[71] R.F. Kazarinow, R.A. Suris, *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **5**, 797 (1971).
[72] R.F. Kazarinow, R.A. Suris, *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **6**, 148 (1972).
[73] R.F. Kazarinow, R.A. Suris, *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **7**, 488 (1973).
[74] R. Tsu, L. Esaki, *Appl. Phys. Lett.* **22**, 562 (1973).
[75] G. Osbourn, *J. Appl. Phys.* **53**, 1586 (1982).
[76] M. Ludowise i in., *Appl. Phys. Lett.* **42**, 487 (1983).
[77] L.L. Chang i in., *J. Vac. Sci. Technol.* **10**, 11 (1973).
[78] L.L. Chang, L. Esaki, R. Tsu, *Appl. Phys. Lett.* **24**, 593 (1974).
[79] L. Esaki, L.L. Chang, *Phys. Rev. Lett.* **33**, 686 (1974).
[80] J.R. Schrieffer, w: *Proceedings of the Conference on the Physics of Semiconductor Surfaces*, Philadelphia, June 1956, red. R.H. Kingston (University of Pennsylvania, Philadelphia 1957), s. 68.
[81] A.B. Fowler i in., *Phys. Rev. Lett.* **16**, 901 (1966).
[82] V.N. Lutskii, *Phys. Status Solidi A* **1**, 199 (1970).
[83] R. Dingle i in., *Appl. Phys. Lett.* **33**, 665 (1978).
[84] D. Delagebeaudeuf i in., *Electron. Lett.* **16**, 667 (1980).
[85] T. Mimura i in., *Jpn. J. Appl. Phys.* **19**, L225 (1980).
[86] J.P. van der Ziel i in., *Appl. Phys. Lett.* **26**, 463 (1975).
[87] R.D. Dupuis i in., *Appl. Phys. Lett.* **32**, 295 (1978).
[88] W.T. Tsang, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 217 (1982).
[89] E. Rezek i in., *Appl. Phys. Lett.* **31**, 534 (1977).
[90] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **19**, 1108 (1985).
[91] Ż.I. Ałfiorow i in., *Pisma Ż. Tiech. Fiz.* **12**, 1089 (1986).
[92] Ż.I. Ałfiorow i in., *Pisma Ż. Tiech. Fiz.* **12**, 210 (1986).
[93] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **21**, 824 (1987).
[94] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **22**, 1031 (1988).
[95] D.Z. Garbuzov i in., Technical Digest CLEO 1988, paper THU44, s. 396.
[96] D.Z. Garbuzov i in., Conference Digest 12th International Semiconductor Laser Conference, Davos, Switzerland, 1990, paper L-33, s. 238.
[97] Ż.I. Ałfiorow i in., *Pisma Ż. Tiech. Fiz.* **14**, 1803 (1988).
[98] J. Faist i in., *Science* **264**, 553 (1994).
[99] K. von Klitzing, G. Dorda, M. Pepper, *Phys. Rev. Lett.* **45**, 494 (1980).
[100] D.C. Tsui, H.L. Stormer, A.C. Gossard, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 1559 (1982).
[101] Y. Arakawa, H. Sakaki, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 939 (1982).
[102] A.I. Ekimov, A.A. Onushchenko, *JETP Lett.* **34**, 345 (1981).
[103] L. Goldstein i in., *Appl. Phys. Lett.* **47**, 1099 (1985).
[104] N.N. Ledentsov i in., w: *Proceedings of the 22nd International Conference on the Physics of Semiconductors*, Vancouver, Canada, 1994, red. D.J. Lockwood (World Scientific, Singapore 1995), t. 3, s. 1855.
[105] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **30**, 357 (1996).
[106] V.A. Shchukin i in., *Phys. Rev. Lett.* **75**, 2968 (1995).
[107] Ż.I. Ałfiorow i in., *Fiz. Tiech. Połuprowodn.* **30**, 351 (1996).
[108] N. Kirstaedter i in., *Electron. Lett.* **30**, 1416 (1994).
[109] G. Park i in., *IEEE Photonics Technol. Lett.* **33**, 230 (2000).
[110] A.E. Zhukov i in., *Electron. Lett.* **35**, 1845 (1999).
[111] L.V. Asryan, R.A. Suris, *Semicond. Sci. Technol.* **11**, 554 (1996).
[112] A.E. Zhukov i in., *Jpn. J. Appl. Phys., Part 1* **36**, 4216 (1997).
[113] G. Park i in., *Appl. Phys. Lett.* **75**, 3267 (1999).
[114] J.A. Lott i in., *Electron. Lett.* **33**, 1150 (1997).
[115] J.A. Lott i in., *Electron. Lett.* **36**, 1384 (2000).

Granty KBN z fizyki: XX i XXI 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 2001 r. (XX konkurs) i od czerwca 2001 r. (XXI konkurs). Ogólną informację o grantach KBN-u i wynikach I konkursu przedstawiliśmy w *Postępach Fizyki* **44**, 131 (1993), a wyniki kolejnych konkursów są podane w *Postępach Fizyki* **45**, 59 (1994), **45**, 365 (1994), **46**, 55 (1995), **47**, 263 (1996), **48**, 43 (1997), **49**, 42 (1998), **50**, 85 (1999), **51**, 134 (2000) oraz **52**, 125 (2001). Wiele informacji o działalności KBN-u zawierają także artykuły A.Z. Hrynkiewicza: *Postępy Fizyki* **46**, 259 (1995) oraz **48**, 565 (1997).

Na XX konkurs wpłynęło 148 wniosków: 106 tzw. zwykłych, 12 tzw. niskonakładowych (w spisie: N) i 30 tzw. promotorskich (w spisie: P). Przyznano finansowanie 58 wniosków zwykłych, 6 niskonakładowych i 21 promotorskich. Oceny projektów dokonał zespół w składzie: profesor Danuta Kisielewska (AGH, przewodnicząca), dr hab. Ryszard Gonczarek (PWr); profesorowie: Kazimierz Grotowski (UJ), Andrzej Holas (IChF PAN), Jan Jadżyn (IFM PAN), Karol Krop (AGH), Marek Kuś (CFT PAN); dr hab. Maria Lefeld-Sosnowska (UW); profesorowie: Stanisław Mrówczyński (IPJ), Andrzej Mycielski (IF PAN), Tadeusz Paszkiewicz (URz), Czesław Szmytkowski (PG), Karol Wysokiński (UMCS) i Jerzy Zioło (UŚl).

Na XXI konkurs wpłynęło 125 wniosków: 92 zwykłe, 11 niskonakładowych i 22 promotorskie. Przyznano finansowanie 32 wniosków zwykłych, 8 niskonakładowych i 17 promotorskich. Oceny projektów dokonał zespół w składzie: profesorowie Jerzy Zioło (UŚl, przewodniczący), Jerzy Bartke (IFJ); dr hab. Ryszard Gonczarek (PWr); profesorowie: Kazimierz Grotowski (UJ), Andrzej Holas (IChF PAN), Jan Jadżyn (IFM PAN), Karol Krop (AGH), Marek Kuś (CFT PAN); dr hab. Maria Lefeld-Sosnowska (UW); profesorowie: Stanisław Mrówczyński (IPJ), Andrzej Mycielski (IF PAN), Tadeusz Paszkiewicz (URz), Czesław Szmytkowski (PG) i Karol Wysokiński (UMCS).

Łącznie w 21 dotychczasowych konkursach w Sekcji Fizyki zawarto 1684 umowy, czyli średnio w każdym konkursie finansowano ok. 80 projektów.

Lista projektów została opracowana we współpracy z Panią mgr inż. Martą Minorską (Sekcja Fizyki KBN), która przy tej okazji informuje kandydatów w następnych konkursach, że Sekcja ocenia negatywnie wnioski, w których kierownik (lub doktorant we wniosku promotorskim) nie miał w ostatnich 4 latach żadnej publikacji w czasopiśmie z „listy filadelfijskiej".

Redakcja

XX konkurs

Kierownik projektu Tytuł projektu	Liczba wykonawców; czas (w miesiącach); koszt (w zł)		
METODY MATEMATYCZNE, TEORIA POLA FIZYKA STATYSTYCZNA, ASTROFIZYKA			
prof. Krzysztof Parliński (IFJ) Przewidywanie ciśnieniowych zmian struktury i dynamiki kryształów z pierwszych zasad	9	36	163 000
prof. Jerzy Lukierski (IFT UWr) Geometrie nieprzemienne i nowe supersymetrie w teorii oddziaływań fundamentalnych	9	36	160 000
dr hab. Andrzej Królak (IM PAN) Analiza danych z detektorów fal grawitacyjnych	5	36	150 000
dr Marek Czachor (WFTiMS PG) Techniki solitonowe w zastosowaniu do równań mechaniki kwantowej	4	36	90 000
prof. Maciej Błaszak (IF UAM) Teoria separowalności skończenie wymiarowych układów wielohamiltonowskich	3	24	61 220

prof. Piotr Pierański (KFA PP)
Helisy gęsto upakowane 2 24 36 730

prof. Iwo Białynicki-Birula (CFT PAN)
Zastosowanie teorii twistorów do optyki kwantowej i elektrodynamiki kwantowej 1 18 20 000

prof. Piotr Rozmej (IM PZ)
Precesja relatywistycznej paczki falowej w atomach wodoropodobnych 3 12 20 000

dr hab. Andrzej Rutkowski (IMIiF UWM)
Zastosowanie arytmetyki wysokiej dokładności do badania problemów kwantowo-mechanicznych 3 24 19 750

dr hab. Stanisław Kryszewski (IFTiA UG)
Światło jako siła termodynamiczna: modyfikowane światłem współczynniki Greena–Kubo (P) 2 12 13 960

prof. Piotr Pierański (KFA PP)
Poszukiwanie węzłów idealnych i ich własności (P) 2 12 12 500

prof. Bogdan Cichocki (IFT UW)
Funkcja pamięci związana ze zjawiskiem dyfuzji kolektywnej oddziałujących cząstek Browna (P) 2 12 11 100

dr hab. Hubert Grudziński (IF UMK)
Badanie warunków N-reprezentowalności 2-cząstkowych operatorów gęstości (P) 2 12 11 000

FIZYKA POŚREDNICH I WYSOKICH ENERGII

prof. Marek Jeżabek (IFJ)
Badania teoretyczne fundamentalnych fermionów i ich oddziaływań 8 36 176 200

dr hab. Bohdan Grządkowski (IFT UW)
Badania własności ciężkich kwarków i bozonów Higgsa w świetle poszukiwań oddziaływań spoza Modelu Standardowego 9 36 170 000

prof. Stefan Pokorski (IFT UW)
Badanie przewidywań fizycznych rozszerzeń Modelu Standardowego 11 24 150 000

prof. Jan Kwieciński (IFJ)
Teoretyczna analiza procesów głębokonieelastycznych w powiązaniu z programem eksperymentalnym fizyki wysokich energii 6 36 145 000

prof. Ewa Skrzypczak (IFD UW)
Badanie zderzeń relatywistycznych jonów: od materii hadronowej do plazmy kwarkowo-gluonowej; eksperyment NA49 w CERN 10 18 142 375

dr hab. Ewa Rondio (IPJ)
Poszukiwanie neutrin taonowych powstałych w wyniku oscylacji neutrino mi $\leftrightarrow$ neutrino tau 6 24 100 000

dr Michal Szleper (IPJ)
Eksperyment NA48 w CERN: opracowanie danych i analiza fizyczna 4 24 100 000

dr hab. Jacek Pawełczyk (IFT UW)
Badanie teorii strun i teorii M oraz ich zastosowań w unifikacji oddziaływań fundamentalnych 4 24 96 200

prof. Joanna Stepaniak (IPJ)
Badanie produkcji par leptonowych w oddziaływaniach proton–proton i proton–deuteron w eksperymencie WASA 6 36 88 400

dr hab. Janusz Zabierowski (IPJ)
Badanie wielkich pęków promieniowania kosmicznego w zakresie energii pierwotnych 10^{15}–$5 \cdot 10^{16}$ eV za pomocą aparatury KASCADE działającej w Forschungszentrum Karlsruhe w RFN 7 24 86 000

dr hab. Wojciech Dominik (IFD UW)
Modelowy opis mechanizmów powstawania lawin w detektorach gazowych o równoległych płaskich elektrodach wysokooporowych (P) 2 18 26 910

dr hab. Teresa Tymieniecka (IFD UW)
Badania mechanizmów produkcji wielocząstkowej w oddziaływaniach elektron–proton (eksperyment ZEUS) 2 18 19 995

dr hab. Jan Figiel (IFJ)
Pomiar różniczkowych przekrojów czynnych w dyfrakcyjnej fotoprodukcji mezonów wektorowych przy dużym t w eksperymencie ZEUS na akceleratorze HERA (P) 2 12 19 920

dr Wiesław Płaczek (II UJ)
Symulacje Monte Carlo produkcji par bozonów W i Z w akceleratorach LEP2 i LC 1 12 16 000

prof. Danuta Kisielewska (WFiTJ AGH)
Analiza spinowa dyfrakcyjnie produkowanych mezonów wektorowych w eksperymencie ZEUS (P) 2 12 15 000

FIZYKA JĄDROWA I FIZYKA PLAZMY

prof. Andrzej Bałanda (IF UJ)
Spektroskopia dielektronów w relatywistycznych zderzeniach proton–proton oraz jądro–jądro realizowana spektrometrem HADES 12 36 150 000

dr Tomasz Ludziejewski (IPJ)
Efekty QED i niedipolowe i ich wpływ na strukturę atomową oraz dynamikę oddziaływań kilkuelektronowych ciężkich jonów z materią 6 24 120 000

dr hab. Jerzy Wołowski (IFPiLM WAT)
Zbadanie wpływu zewnętrznych pól magnetycznych i elektrycznych na parametry strumienia jonów emitowanych z plazmy wytwarzanej laserem 13 26 113 500

dr Regina Siudak (IFJ)
Eksperymentalne badanie widm jąder $A = 6$ poniżej progu na rozpad 3+3 12 30 112 400

dr Marcin Palacz (ŚLCJ UW)
Spektroskopia gamma neutronowo-deficytowych jąder z obszaru podwójnie magicznej ^{100}Sn – badania prowadzone w oparciu o układ detektorów EUROBALL 4 24 83 900

dr hab. Jan Kownacki (ŚLCJ UW)
Spektroskopia egzotycznych jąder z użyciem wiązek ciężkich jonów warszawskiego cyklotronu 10 12 20 000

prof. Henryk Witała (IF UJ)
Efekty trzyciałowe w rozpraszaniu nukleonu na deuteronie (P) 2 15 20 000

dr hab. Teresa Rząca-Urban (IFD UW)
Poszukiwanie egzotycznych wzbudzeń jądrowych związanych z magnetyczną rotacją jądra atomowego 2 12 19 987

dr Marek Kirejczyk (IFD UW)
Badanie warunków zastosowania metody Ma do zderzeń ciężkich jonów przy energiach średnich 1 12 19 235

dr hab. Ernest Piasecki (IFD UW)
Badanie rozkładu bariery na fuzję jąder atomowych 1 12 16 700

dr hab. Tomasz Czosnyka (ŚLCJ UW)
Badanie elektromagnetycznej struktury stabilnych izotopów hafnu (P) 2 12 15 000

FIZYKA ATOMOWA I MOLEKULARNA OPTYKA, AKUSTYKA

prof. Jerzy Prochorow (IF PAN)
Specyficzne oddziaływania i agregacje molekularne i ich wpływ na procesy promienistej i bezpromienistej relaksacji wzbudzonych cząsteczek z wolną parą elektronową 12 36 222 550

dr Jarosław Koperski (IF UJ)
Właściwości wiązania van der waalsowskiego w cząsteczkach dwuatomowych w różnych zakresach odległości międzyjądrowych 9 36 200 000

prof. Andrzej Bielski (IF UMK)
Efekty optyczno-zderzeniowe w widmach par metali i gazów szlachetnych 12 36 192 037

prof. Andrzej Kowalski (IFD UG)
Spektroskopowe badania zderzeń reaktywnych przy energiach hipertermicznych 2 36 120 000

dr hab. Marek Pajek (IF WSP Kielce)
Badanie jonizacji wielokrotnej atomów metodami spektroskopii rentgenowskiej 5 24 99 800

prof. Janusz Adamowski (WFiTJ AGH)
Badanie własności elektronowych sztucznych atomów i molekuł 3 30 88 700

dr Marian Rusek (IF PAN)
Teoretyczne badania eksplozji klasterów w silnym polu impulsu lasera: model Thomasa–Fermiego 4 24 73 000

dr hab. Marek Żukowski (IFTiA UG)
Interferencja wielofotonowa i komunikacja kwantowa 2 24 33 600

prof. Andrzej Dobek (IF UAM)
Struktura i oddziaływanie telomerów. Spektroskopia korelacji fotonów (P) 2 24 30 000

dr hab. Janusz Czub (IFTiA UG)
Teoretyczne badanie struktury elektronowo-oscylacyjnej kompleksu zderzeniowego Ca^{+}–H_2 (P) 2 24 22 320

mgr inż. Krzysztof Góral (CFT PAN)
Własności bardzo zimnych gazów cząsteczkowych i dipolowych (N) 1 12 20 000

mgr Zbigniew Idziaszek (CFT PAN)
Kwantowe fluktuacje zimnych gazów atomowych (N) 1 12 20 000

mgr Jacek Rzadkiewicz (IPJ)
Precyzyjna spektroskopia rentgenowska atomów podwójnie zjonizowanych na wewnętrznych powłokach elektronowych atomów o średnim i wysokim Z (N) 1 12 20 000

METALE, MAGNETYKI, NADPRZEWODNIKI

prof. Henryk Szymczak (IF PAN)
Właściwości magnetyczne i transportowe kobaltytów – rola pośrednich stanów spinowych kobaltu 12 24 226 000

prof. Jan Stankowski (IFM PAN)
Niestabilność strukturalna związana z degeneracją orbitalną jonów metali przejściowych 9 35 180 000

prof. Elżbieta Zipper (IF UŚl)
Koherencja kwantowa w układach fullerenów i nanorurek węglowych – własności strukturalne, elektryczne i magnetyczne 7 36 180 000

prof. Andrzej Michał Oleś (IF UJ)
Uporządkowania ładunkowe, magnetyczne i orbitalne w układach silnie skorelowanych elektronów 12 33 172 000

dr hab. Piotr Przysłupski (IF PAN)
Transport elektronowy, własności magnetyczne i mikrofalowe cienkich warstw i heterostruktur związków o strukturze perowskitu 7 36 154 600

prof. Józef Barnaś (IF UAM)
Spinowo spolaryzowany transport elektronowy i własności magnetyczne nanoskopowych układów magnetycznych 10 24 119 600

dr Jan Chojcan (IFD UWr)
Wykorzystanie spektroskopii mössbauerowskiej do badania oddziaływania atomów pierwiastka rozpuszczonego w żelazie 5 36 90 000

dr Piotr Wróbel (INTiBS PAN)
Zachowanie typu nie-cieczy Fermiego a nadprzewodnictwo w domieszkowanych antyferro- i ferromagnetykach 3 23 80 000

prof. Andrzej Ślebarski (IF UŚl)
Wpływ nieporządku krystalograficznego na własności magnetyczne i strukturę elektronową w stopach Heuslera (P) 2 24 30 000

dr hab. Antoni Paja (WFiTJ AGH)
Wpływ oddziaływania spin–orbita na przewodnictwo elektryczne w układach nieuporządkowanych (P) 2 24 27 300

prof. Andrzej Ślebarski (IF UŚl)
Wpływ mieszanej wartościowości atomów Ce na formowanie się przerwy energetycznej w „izolatorach Kondo" (P) 2 24 21 816

dr hab. Krzysztof Kułakowski (WFiTJ AGH)
Badanie dynamiki układu bistabilnych drutów amorficznych (P) 2 24 19 500

prof. Henryk Szymczak (IF PAN)
Magnetostrykcja powierzchniowa w układach nanokrystalicznych i w cienkich warstwach magnetycznych (P) 2 12 15 000

KRYSZTAŁY MOLEKULARNE I POLIMERY, CIECZE

dr Marian Paluch (IF UŚl)
Liniowe i nieliniowe własności dynamiczne cieczy przechłodzonych 6 36 180 050

prof. Lech Longa (IF UJ)
Badanie związku pomiędzy korelacjami i stabilnością struktur ciekłokrystalicznych 7 36 150 000

prof. Adam Patkowski (IF UAM)
Badania zależności dynamiki cieczy przechłodzonych od ciśnienia i temperatury w pobliżu T_g 3 24 106 000

prof. Danuta Bauman (IF PP)
Badanie efektu gościa-gospodarza w jednoosiowych fazach ciekłokrystalicznych metodami spektroskopii optycznej (P) 2 18 30 000

prof. Danuta Wróbel (IF PP)
Badanie dróg dezaktywacji energii stanów wzbudzonych w barwnikach metaloporfirynowych (P) 4 15 19 994

mgr Stella Hensel-Bielówka (IF UŚl)
Wpływ ciśnienia na rozmycie relaksacji w cieczach przechłodzonych (N) 1 12 19 980

dr hab. Jerzy Górecki (IChF PAN)
Nierównowagowe korelacje przestrzenne stanów energetycznych reagentów w układach z reakcjami chemicznymi 2 15 19 650

dr hab. Andrzej Skumiel (IA UAM)
Badanie wpływu szybkości zmian natężenia pola magnetycznego na propagację fali ultradźwiękowej w cieczy magnetycznej (P) 2 14 19 500

dr hab. Adam Lipowski (IF UAM)
Komputerowa analiza sieciowych modeli stanu szklistego 1 12 17 000

mgr inż. Konstanty Tretiakov (IFM PAN)
Wykorzystanie współczynnika Poissona do lokalizacji obszaru stabilności faz rotacyjnych w modelowych układach molekularnych 1 12 16 000

prof. Józef Świątek (IF WSP Częstochowa)
Badanie objętości swobodnych w fotopolimeryzowanych oligoeteroakrylanach (P) 3 18 15 000

PÓŁPRZEWODNIKI I IZOLATORY

dr Piotr Kossacki (IFD UW)
Mikrospektroskopia dwuwymiarowego gazu nośników w polu magnetycznym 7 36 219 500

prof. Marek Godlewski (IF PAN)
Efekty lokalizacyjne w niskowymiarowych strukturach półprzewodnikowych i ich wpływ na procesy rekombinacji promienistej 7 36 179 985

dr Jacek Kołodziej (IF UJ)
Badanie topografii i rekonstrukcji powierzchni związków półprzewodnikowych z grupy AIIIBV z użyciem bezkontaktowej mikroskopii sił atomowych 6 24 135 000

dr Czesław Skierbiszewski (CBW PAN)
Badanie struktury pasmowej i własności elektronowych związków $In_yGa_{1-y}As_{1-x}N_x$ 8 24 131 950

mgr Sebastian Maćkowski (IF PAN)
Spektroskopia pojedynczych ekscytonów w kropkach kwantowych CdTe (N) 1 12 20 000

prof. Aleksander Gutsze (KiZB AM Bydgoszcz)
Badanie zeolitów typu A metodami Magnetycznego Rezonansu Jądrowego w ciele stałym (P) 2 26 19 835

EKOLOGIA, BIOFIZYKA, FIZYKA MEDYCZNA

mgr Grażyna Panek (IF UAM)
Analiza czasowych zmian aktywności elektrycznej poszczególnych fragmentów mięśnia sercowego metodą wektokardiografii wysokiej rozdzielczości (N) 1 12 20 000

dr Maciej Kozak (IF UAM)
Analiza struktury asparaginazy II z *Escherichia coli* w roztworze metodami niskokątowego rozpraszania promieniowania rentgenowskiego 1 20 19 800

NAUCZANIE FIZYKI

dr Zofia Gołąb-Meyer (IF UJ)
Przeszkody poznawcze w nauczaniu fizyki – energia i prawo zachowania energii. Porównanie trudności poznawczych uczniów i nauczycieli. Rola podręczników. 4 24 20 000

XXI konkurs

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

METODY MATEMATYCZNE, TEORIA POLA FIZYKA STATYSTYCZNA, ASTROFIZYKA

prof. Piotr Kosiński (IF UŁ)
Modele rozwiązywalne i kwazirozwiązywalne – teoria klasyczna i kwantowa 7 36 140 000

prof. Jan Jacek Żebrowski (IF PW)
Intermitencja w niestacjonarnych układach dynamicznych 4 36 121 200

dr hab. Janusz Hołyst (IF PW)
Multirezonans stochastyczny w układach chaotycznych z kryzysem 6 18 64 000

prof. Brian Garner Wybourne (IF UMK)
Fizyka Symetrii III — 6 36 60 000

dr Jan Łażewski (IFJ)
Strukturalne, dynamiczne i termodynamiczne własności chalkopirytów wyliczane z pierwszych zasad — 5 24 49 000

dr hab. Bogusław Broda (IF UŁ)
Badanie efektywnych modeli trójwymiarowej topologicznej kwantowej teorii pola — 2 24 46 500

dr hab. Robert Olkiewicz (IFT UWr)
Własności klasyczne kwantowanych układów otwartych — 2 12 35 000

mgr Andrzej Ostruszka (IF UJ)
Własności spektralne operatora Frobeniusa–Perrona w układach z zaburzeniem losowym (N) — 1 18 20 000

dr Marek Rogatko (WIBiS PL)
Czarne dziury w niskoenergetycznej teorii strun — 1 12 20 000

prof. Józef Sznajd (INTiBS PAN)
Renormalizacja słabo oddziałujących łańcuchów spinowych — 1 12 20 000

dr Grzegorz Kondrat (IFT UWr)
Badania modelu losowej adsorpcji sekwencyjnej obiektów rozciągłych — 1 12 19 910

dr hab. Karol Życzkowski (CFT PAN)
Własności spektralne dyskretnych kwantowych układów dynamicznych (P) — 2 12 17 550

dr hab. Anatol Nowicki (IF WSP Zielona Góra)
Kinematyczne i dynamiczne własności prostych układów fizycznych w zdeformowanej czasoprzestrzeni (P) — 2 10 17 000

prof. Piotr Rozmej (IM PZ)
Efekty relatywistyczne w ewolucji paczek falowych (P) — 2 15 15 000

FIZYKA POŚREDNICH I WYSOKICH ENERGII

dr hab. Danuta Kiełczewska (IFD UW)
Wyznaczanie parametrów oscylacji neutrin oraz badanie stabilności protonu w detektorze Super-Kamiokande — 3 24 139 450

dr hab. Grzegorz Wilk (IPJ)
Fluktuacje, korelacje i nieekstensywność w zderzeniach wysokich energii (P) — 2 12 20 000

mgr Tomasz Pierzchała (IF UŚl)
Rozbudowa TAUOLI, biblioteki programów Monte Carlo symulujących rozpady leptonów γ (N) — 1 12 18 130

mgr Małgorzata Worek (IF UŚl)
HIGGSOLA – Biblioteka programów Monte Carlo symulujących rozpady bozonów Higgsa (N) — 1 12 16 640

dr hab. Piotr Żenczykowski (IFJ)
Słabe rozpady hadronów — 2 12 16 380

prof. Krzysztof Rybicki (IFJ)
Badanie produkcji czterech fermionów w oddziaływaniach e^+ i e^- poprzez prądy neutralne (P) — 2 15 14 160

prof. Marek Zrałek (IF UŚl)
Problem wyznaczania mas neutrin (P) — 2 9 9936

FIZYKA JĄDROWA I FIZYKA PLAZMY

prof. Jacek Dobaczewski (IFT UW)
Opis stanów jąder atomowych dalekich od stabilności i jąder o wysokim spinie — 13 29 300 000

prof. Zbigniew Majka (IF UJ)
Badanie materii hadronowej przez ultrarelatywistyczne kolizje ciężkich jonów na akceleratorze RHIC w ramach eksperymentu BRAHMS — 8 24 88 500

prof. Sławomir Wycech (IPJ)
Stany boromejskie i jądrowe mezonów eta — 4 30 60 000

dr hab. Józef Andrzejewski (IF UŁ)
Pierwsze pomiary reakcji (n,alfa) na impulsowej wiązce neutronów spalacyjnego źródła nTOF w CERN — 4 18 46 750

dr hab. Tomasz Czosnyka (ŚLCJ UW)
Struktura elektromagnetyczna i dynamika wiązek warszawskiego cyklotronu U-200P (P) — 2 24 30 000

prof. Wiktor Zipper (IF UŚl)
Krzywa kaloryczna w materii jądrowej: wyznaczanie temperatury (P) — 2 18 20 000

dr Artur Siwek (IFJ)
Pomiar funkcji wzbudzenia dla fragmentacji pocisku w zderzeniach ciężkojonowych — 1 24 19 760

mgr Agnieszka Korgul (IFD UW)
Badanie jąder neutrono-nadmiarowych w okolicy podwójnie magicznego jądra ^{132}Sn (N) — 1 12 19 320

FIZYKA ATOMOWA I MOLEKULARNA OPTYKA, AKUSTYKA

dr hab. Teresa Grycuk (IFD UW)
Kompleksowe badania spektroskopowe układów van der waalsowskich typu metal BII–gaz szlachetny — 7 36 208 400

dr Krzysztof Sacha (IF UJ)
Układy atomowe z zaburzeniem zależnym od czasu — 7 24 147 500

prof. Jacek Karwowski (IF UMK)
Modelowanie układów wieloelektronowych II — 3 36 70 000

prof. Krzysztof Rościszewski (IFJ)
Fazy o niejednorodnym rozkładzie ładunku i gęstości spinowej. Numeryczne badanie korelacji elektronowych w klastrach atomowych — 5 25 36 500

prof. Czesław Szmytkowski (WFTiMS PG)
Wyznaczanie przekrojów czynnych na rozpraszanie elektronów na wybranych drobinach (P) — 2 12 19 900

prof. Eugeniusz Czuchaj (IFTiA UG)
Teoretyczne badanie dwuatomowych kompleksów zderzeniowych — 1 18 18 200

dr hab. Józef Eugeniusz Sienkiewicz (WFTiMS PG)
Relatywistyczna metoda wielokonfiguracyjna w obliczeniach atomowych (P) 2 12 18 000

METALE, MAGNETYKI, NADPRZEWODNIKI

dr Paweł Korecki (IF UJ)
Holografia γ – trójwymiarowe obrazowanie struktury geometrycznej i magnetycznej z atomową zdolnością rozdzielczą 6 24 232 000

dr hab. Michael Giersig (IF PP)
Magnetyczne cząstki koloidalne o wymiarach nanometrycznych jako elementy wyjściowe do tworzenia uporządkowanych struktur 7 24 180 000

dr Andrzej Wiśniewski (IF PAN)
Badanie wpływu podstawień chemicznych, ciśnienia i defektów radiacyjnych na temperaturę krytyczną i anizotropię podstawowych parametrów fizycznych w wybranych grupach nadprzewodników 12 30 180 000

prof. Tomasz Goworek (IF UMCS)
Wpływ ciśnienia na pozyt w ośrodkach krystalicznych 7 27 168 400

dr hab. Adam Kiejna (IFD UWr)
Adsorpcja atomów metali alkalicznych na powierzchni magnezu 3 18 64 260

dr hab. Grzegorz Gładyszewski (IF PL)
Badanie naprężeń w metalicznych strukturach wielowarstwowych metodą symulacji numerycznych i metodami dyfrakcyjnymi 3 16 48 000

dr Grzegorz Litak (KMS PL)
Perkolacja w nieuporządkowanym nadprzewodniku 1 12 20 000

dr hab. Janusz Wolny (WFiTJ AGH)
Analiza struktur o osobliwych widmach dyfrakcyjnych (P) 2 18 20 000

prof. Jan Stankowski (IFM PAN)
Badanie nadprzewodnika wysokotemperaturowego rozproszonego w kompozytach (P) 2 9 15 750

KRYSZTAŁY MOLEKULARNE I POLIMERY, CIECZE

dr hab. Andrzej Poniewierski (IChF PAN)
Defekty i linie kontaktu w układach ciekłokrystalicznych 4 36 104 400

dr Marcin Fiałkowski (IChF PAN)
Topologia i geometria powierzchni rozdziału faz w procesie porządkowania układu 3 30 97 000

dr hab. Jan Wąsicki (IF UAM)
Badanie reorientacji molekularnych w ciałach stałych metodą echa spinowego („SOLID-ECHA") (P) 2 18 40 700

mgr Piotr Garstecki (IChF PAN)
Analiza eksperymentalnych obrazów dyfrakcyjnych struktur mezoporowatych (N) 1 12 20 000

mgr Marek Bromberek (IF UAM)
Własności sprężyste ferroelastycznego kryształu $LiKSO_4$ w zakresie niskich temperatur (N) 1 24 19 955

mgr inż. Andrzej Boguta (IF PP)
Oddziaływania molekularne w mieszaninach barwników organicznych (N) 2 12 18 000

dr hab. Janina Heldt (IFD UG)
Właściwości spektroskopowe i fizykochemiczne naftanilidu (P) 4 24 17 750

PÓŁPRZEWODNIKI I IZOLATORY

dr Hanka Przybylińska (IF PAN)
Wpływ kodomieszkowania na własności stanów akceptorowych w azotku galu 8 24 131 000

prof. Lucjan Jacak (IF PWr)
Chaos kwantowy w supersieciach półprzewodnikowych i sieciach optycznych (P) 2 24 53 000

prof. Marek Szymoński (IF UJ)
Rola par Frenkla w modyfikacji powierzchni izolatorów jonowych wywołanej wiązką fotonów i elektronów (P) 2 18 30 150

dr hab. Andrzej Burian (IF UŚl)
Charakterystyka przestrzennych korelacji międzyatomowych w niekrystalicznych formach węgla (P) 2 18 20 000

mgr Adrianna Jabłońska (IF UŚl)
Wyznaczanie cząstkowych czynników struktury dla amorficznych warstw In–Se metodą anomalnego rozpraszania promieniowania rentgenowskiego (N) 1 12 20 000

Rozwój i przyszłość fizyki*

Manfred Robert Schroeder

III Physikalisches Institut, Universität Göttingen, Niemcy

Evolution and future of physics

*Abstract***: The most important steps in creating notions and theories of physics, as well as in unifying its seemingly different branches into one discipline, are described. The author's views on the future of physics are presented.

1. Wprowadzenie

„Któż z nas nie chciałby uchylić rąbka zasłony skrywającej przyszłość, by spojrzeć na nadchodzące postępy naszej wiedzy i poznać tajemnice jej rozwoju w przyszłych stuleciach!" Tymi słowami David Hilbert (1862–1943), getyński matematyk, rozpoczął swój słynny wykład na Międzynarodowym Kongresie Matematyków w Paryżu w 1900 r., u progu XX w.

Dziś, sto lat później, wielu ludzi (nie tylko matematyków i fizyków) stawia sobie to samo pytanie: „Któż nie chciałby uchylić rąbka zasłony, za którą ukryta jest przyszłość..." Ale odpowiedź nie jest prosta – przyszłość uchodzi za nieprzewidywalną. Rozwój fizyki zawsze cechowało dążenie do jedności. Jakie elementarne kategorie i zasady kryją się za olbrzymią różnorodnością zjawisk przyrody? To pytanie nurtowało już starożytnych Greków. Empedokles (ok. 490–430 p.n.e.) wyróżniał ok. 450 r. p.n.e. cztery podstawowe elementy przyrody: ziemię, powietrze, ogień i wodę. To samo dążenie do jednolitości motywuje dziś fizykę w jej awangardzie – badaniach cząstek elementarnych i kosmosu. Wydaje się, że droga ku przyszłości, po wielkich osiągnięciach fizyki w ubiegłych stuleciach, leży w sprowadzaniu skomplikowanych zjawisk do prostych zasad. Najchętniej wprowadzilibyśmy jedną zasadę, która by wyjaśniała wszystkie zjawiska nieożywione: jedną teorię wszystkiego, czyli – jak to się po angielsku nazywa – a Theory Of Everything (TOE). Połamało sobie na niej zęby już wielu fizyków, przede wszystkim Albert Einstein (1879–1955), który w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat swego życia daremnie próbował sprowadzić do wspólnego mianownika siłę grawitacji i siły elektromagnetyczne. Wernerowi Heisenbergowi (1901–76) wydawało się w latach pięćdziesiątych XX w., że znalazł formułę świata (Weltformel), która miała wywodzić wszystkie cząstki elementarne z jednego wspólnego pola. Nazwał je prapolem. Podłoże, na którym było zbudowane to prapole, okazało się jednak lotnym piaskiem. Nowa teoria znalazła się wprawdzie na tytułowej stronie czasopisma *Der Spiegel*, ale szybko zapadła w niepamięć. Byłoby tak pięknie mieć prapole, ale niestety – te cholerne fakty doświadczalne. (Może fakty w fizyce powinny być zakazane, jak to już od dawna jest w polityce).

*Wykład „Entwicklung und Zukunft der Physik", wygłoszony w maju 2001 r. z okazji 250-lecia Akademii Nauk w Getyndze, został przetłumaczony za zgodą Autora [Translated with permission. Copyright © 2000 Manfred R. Schroeder] (przyp. Red.).

**Streszczenie dodane przez Redakcję (przyp. Red.).

Mimo wszystkich niepowodzeń nie ustaje jednak dążenie do znalezienia wszechogarniającego połączenia fundamentalnych sił przyrody nieożywionej. Czy przyszłość w końcu obdaruje nas tak przez wszystkich pożądanym zjednoczeniem (chciałoby się rzec – ponownym zjednoczeniem)?

Zanim zaczniemy mówić o przyszłości, warto chyba przypomnieć sobie przeszłość fizyki.

2. Rozwój fizyki

2.1. Archimedes

Archimedes (ok. 287–212 p.n.e.), Grek mieszkający w Syrakuzach, uchodzi za największego matematyka i fizyka starożytności. Jego prace o przecięciach stożka, o powierzchni tworów płaskich i objętości objektów przestrzennych – zwiastuny rachunku całkowego – były kamieniami milowymi matematyki. Jego prawo dźwigni, prawo hydrostatyki i badania odbicia światła przetrwały przez wieki.

2.2. Fizyka po Koperniku

W roku 1543 ukazało się przełomowe dzieło Mikołaja Kopernika (1473–1543) *De revolutionibus orbium coelestium*. Raptem Ziemia, a wraz z nią człowiek, przestała być środkiem świata, jak w systemie ptolemeuszowym (ok. 130 r. p.n.e.). Zamiast tego planety, wraz z Ziemią, miały zataczać okręgi wokół Słońca, które teraz było w ich środku.

Zaledwie 20 lat później, w 1563 r., duński astronom Tycho Brahe zauważył, że z orbitami kołowymi też coś nie jest całkiem w porządku. Jego precyzyjne obserwacje wykazały, że Saturn i Jowisz wychylają się z tego korowodu. Później Johannes Kepler (1571–1630), następca Tychona na stanowisku cesarskiego matematyka i astronoma w Pradze, odkrył, że również ruch Marsa nie pasuje do hipotezy o ruchu Ziemi po torze kołowym wokół Słońca jako środka. Nie pomogło nawet założenie ekscentrycznych torów kołowych. Potem Kepler próbował dopasować orbity w kształcie osiowego przekroju skorupki jajka; to też się nie udawało: tor Marsa wydawał się jak przedtem zbyt jajowaty. W końcu Kepler zdecydował się na elipsy i patrzcie, raptem wszystko zaczęło pasować. Planety poruszały się po elipsach ze Słońcem w jednym z ich ognisk. To było pierwsze prawo Keplera.

Kepler stwierdził ponadto, że prędkość planet na ich orbitach nie jest stała – w pobliżu Słońca poruszają się szybciej. Planety, można powiedzieć, spadają ku Słońcu. Prosta łącząca planetę ze Słońcem zakreśla w jednakowych odstępach czasu jednakowe powierzchnie. To było drugie prawo Keplera.

A później Kepler odkrył jeszcze coś, mianowicie związek między największym oddaleniem (dokładniej: półosią wielką elipsy) planety od Słońca i jej czasem obiegu. Doszedł do tego (z dokładnością do stałej), gdy wyciągnął pierwiastek kwadratowy z oddalenia i wynik podniósł do trzeciej potęgi. Dziwne, ale prawdziwe! Było to trzecie prawo Keplera. (Muszę przyznać, że nie mogę się nadziwić, jak Kepler przed czterystu laty wszystko to tak dokładnie i trafnie wyczytał ze swoich obserwacji).

Można by sądzić, że współczesny Keplerowi Galileusz (1564–1642) był tym oczarowany. Nic podobnego. Krytykował keplerowskie elipsy. Nie mógł porzucić tych tak od czasów antycznych ukochanych torów kołowych. Uważał, jak wielu jego poprzedników, że zachowanie doskonałego porządku między różnymi częściami Wszechświata wymaga doskonałych okręgów. Do dziś jednak pozostajemy przy elipsach Keplera. Niestety, czy nam się to podoba, czy nie, nie zawsze to, co najprostsze, jest prawdziwe!

Galileusz wszedł do historii jako orędownik kopernikańskiego układu świata. Niedawno (w 1992 r.) nawet Rzym, w osobie Jana Pawła II, dał mu na to placet (dziś wielu zamiast placet powiedziałoby OK). Galileusza *Dialog o dwu najważniejszych układach świata* został przez Watykan już w 1741 r. dopuszczony do druku (z pewnymi „korektami" dotyczącymi światopoglądu). Ponadto Galileusz znacznie przyczynił się do ugruntowania praw mechaniki przez swoje doświadczenia z kulami staczającymi się po równi pochyłej i, jak głosi legenda, z przedmiotami spadającymi z krzywej wieży w Pizie.

Jeszcze przed Galileuszem filozof i późniejszy kardynał i biskup z Brixen[1] Nicolaus Cusanus (Cusa) (1401–64) oraz Giordano Bruno

[1] Miasto we Włoszech, obecna nazwa Bressanone (przyp. tłum.).

(1548–1600) głosili tezę, że nasz Układ Słoneczny jest tylko jednym z wielu i że Wszechświat musi być nieskończony, skoro zawiera nieskończenie wiele takich światów jak nasz. — Tylko tak niebiosa mogą sławić wspaniałego Boga — powiedział Giordano Bruno, ale skończył na stosie Inkwizycji. Gdyby jednak nasz Wszechświat był nieskończony i zawierał nieskończenie wiele jasno świecących gwiazd, to nocne niebo byłoby całkiem jasne. Zwracał uwagę na to już Kepler w 1610 r. Fakt, że tło nocnego nieba wydaje się ciemne, nazywa się paradoksem Olbersa, gdyż sprawę tę dyskutował w 1823 r. astronom z Bremy Wilhelm Olbers (1758–1840).

Wróćmy do elips Keplera. W końcu to Isaac Newton (1643–1727) zrobił porządek ze spekulacjami na temat orbit planet. Już jako osiemnastolatek zrozumiał, że ruchami planet rządzi możliwie najprostsze prawo sił. Z drugiego i trzeciego prawa Keplera wyciągnął wniosek, że na planety działa przyciągająca „siła centralna" Słońca i że siła ta jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości. Było to prawo powszechnego ciążenia – p o w s z e c h n e g o, gdyż stosuje się zarówno np. do obiegu Księżyca wokół Ziemi, jak i do jabłek spadających z drzewa. Newton ponadto stwierdził, wbrew poglądom Arystotelesa (384–322 p.n.e.), że jednostajny, prostoliniowy ruch nie wymaga żadnej siły. Początkowo jednak odłożył swoje młodzieńcze odkrycie *ad acta*. Musiało upłynąć jeszcze 20 lat, zanim przedstawił pełną teorię. Przedtem musiał wynaleźć odpowiedni aparat matematyczny, by ściśle dowieść, że jego prawo grawitacji rzeczywiście prowadzi do elips. Elipsy są właśnie matematycznie nie tak proste do opanowania jak okręgi. Wszystko to jest zawarte w newtonowskich *Philosophiae naturalis principia mathematica*, kamieniu milowym fizyki matematycznej.

Czy możemy stąd dowiedzieć się czegoś, co mogłoby być pomocne w prognozie przyszłego rozwoju fizyki?

1. Prace Johannesa Keplera i Isaaca Newtona wskazują, że nie zawsze prawdziwe jest to, co jest p r o s t e – czasem prawda bywa skomplikowana. Nie zawsze *veritatis simplex oratio est* (język prawdy jest prosty) i nie zawsze – jak głosi napis w jednym z naszych audytoriów fizycznych w Getyndze – *simplex sigillum veri* (prostota znakiem prawdy).

I jeszcze czegoś możemy nauczyć się z *Principiów* Newtona:

2. Czasami fizycy, aby rozwiązać swoje problemy, muszą sami stworzyć odpowiednie narzędzia matematyczne, choć częściej są one już gotowe, jak w przypadku geometrii nieeuklidesowej. Po wielu nieudanych próbach dowodu euklidesowego aksjomatu o prostych równoległych, matematycy: Łobaczewski w Rosji, Bolyai na Węgrzech oraz Gauss i Riemann w Getyndze stworzyli nowy rodzaj geometrii, która zastąpiła ten aksjomat innym i która później okazała się niezmiernie użyteczna w einsteinowskiej teorii względności jako zakrzywiona czasoprzestrzeń.

Wreszcie, płynie stąd kolejna nauka:

3. Żadna teoria nie jest nic warta, jeśli nie opiera się na precyzyjnych pomiarach, a te z kolei wymagają nowych, często kosztownych przyrządów – „więcej niż tonę złota duńskiego króla", jak powiedział Tycho Brahe.

Przełomy w naukach przyrodniczych często związane są z osiągnięciami nowych technologii. Odnosi się to zarówno do postępu w biologii dzięki opracowaniu przez Antoniego van Leuwenhoeka (1632–1723) zadziwiająco sprawnego mikroskopu, jak i w astronomii dzięki ulepszeniu teleskopu przez Galileusza. Jeśli chodzi o nasze czasy, mam tu na myśli wkład wielkich akceleratorów w fizykę cząstek elementarnych, radioastronomii w badania kosmosu i tomografii spinowej w rozszyfrowanie działania mózgu.

2.3. Postępujące jednoczenie fizyki

Wróćmy jednak do dalszego rozwoju fizyki. Dzięki Newtonowi zostały zbudowane podstawy mechaniki. Rozwijali je dalej: Szwajcar Leonhard Euler (1707–83), Francuz Joseph Louis de Lagrange (1736–1813), Irlandczyk sir William Rowan Hamilton (1805–65) i inni.

Jeśli chodzi o światło, to Newton sądził, że są to małe cząstki. René Descartes (1596–1650) i Leonhard Euler uważali, że światło to fale. Holender Christiaan Huygens (1629–95) dał podstawy teorii falowej światła, która znalazła swój wyraz w zasadzie nazwanej jego imieniem. Fresnel, Fraunhofer, Snell i Young tworzyli prawa odbicia, załamania, ugięcia i interferencji światła. Goethe nauczył nas dostrzegać barwne cienie i tym samym położył kamień węgielny pod optykę fizjolo-

giczną. Wszechstronny geniusz z Getyngi – Georg Christoph Lichtenberg (1742–99) – niesłychanie wyprzedzając swoje czasy, pierwszy zastanawiał się nad tym, czy światło może być zarówno falą, jak i cząstką.

Anglik Michael Faraday (1791–1867) i Duńczyk Christian Oersted (1777–1851) badali zjawiska elektryczne i magnetyczne. Oersted odkrył odchylanie igły magnetycznej przez prąd elektryczny. Faraday wywoływał prądy elektryczne ruchami magnesu i unaoczniał pole magnetyczne za pomocą opiłków żelaznych.

Sadi Carnot (1796–1832) i Jean-Baptiste Joseph baron Fourier (1768–1830) zajmowali się naukowym opisem ciepła. W wyniku tych prac fizyka w XIX w. rozwinęła się w kilka pozornie niezależnych dyscyplin. Były to: mechanika, nauka o cieple, optyka, elektryczność i magnetyzm. Wydawało się, że nie można tego wszystkiego wrzucić do jednego worka. A jednak Szkot James Clerk Maxwell (1831–79) opierając się na pracach Faradaya i Oersteda wykazał jedność elektryczności i magnetyzmu. Jego równania przewidywały istnienie fal elektromagnetycznych, rozchodzących się z prędkością światła. Istnienie tego rodzaju fal doświadczalnie potwierdził Heinrich Hertz (1857–94), pracujący wówczas w Karlsruhe. Tym samym elektryczność i magnetyzm zostały zjednoczone, a światło uznano za fale elektromagnetyczne.

Już wcześniej Carl Friedrich Gauss (1777–1855) i Wilhelm Weber (1804–91) ustalili dla magnetyzmu i elektryczności bezwzględny układ miar. Przy okazji ci dwaj przyjaciele skonstruowali elektromagnetyczny telegraf (1832), którego przewody prowadziły z gabinetu fizycznego ponad wieżami kościoła św. Jana do obserwatorium astronomicznego na Geismarlandstrasse. Udział Webera w proteście „Siódemki Getyńskiej"[2] i wynikająca stąd banicja z Getyngi przerwały owocną współpracę z Gaussem.

Austriak Ludwig Boltzmann (1844–1906) wykazał, że również ciepło nie jest jakimś odrębnym zjawiskiem. Ciepło, jak już przypuszczał Galileusz, jest niczym innym jak ruchem, ruchem najmniejszych cząstek – molekuł i atomów. Takie założenie zrobił już w 1738 r. Daniel Bernoulli (1700–82) w hydrodynamice i kinetycznej teorii gazów, lecz jego teoria popadła w zapomnienie. Jeszcze w styczniu 1878 r. wielki sceptyk Ernst Mach (1838–1916) wystąpił przed Cesarską Akademią w Wiedniu, oświadczył: „Nie wierzę, że istnieją atomy" i zapytał ironicznie: „Czy ktoś kiedyś widział atom?" Pogląd Boltzmanna zwyciężył – mechanika i ciepło zostały definitywnie połączone.

Wszystko w przyrodzie nieożywionej było mechaniką lub elektromagnetyzmem. Na długiej drodze do jednolitego fizycznego obrazu świata zrobiono ogromny postęp. W tej wędrówce pierwsze kroki stawiali już starożytni Grecy, przede wszystkim Demokryt. Rzymski poeta i filozof Lukrecjusz (Titus Lucretius Carus, ok. 97–55 p.n.e.) dał temu szczegółowe świadectwo w długim poemacie *De rerum natura* (O naturze wszechrzeczy). Ponad 2000 lat temu Lukrecjusz pisał m.in.: „Mokre chusty wysychają na słońcu, ale my nie widzimy wody, która z nich ulatuje. Woda składa się więc z cząstek, atomów zbyt małych, byśmy mogli je zobaczyć". Lukrecjusz dostrzegał też potrzebę próżni. Gdyby nie było próżni, argumentował, nie byłoby pustych przestrzeni, w których rzeczy mogłyby się poruszać. Bez próżni nie byłoby więc żadnego ruchu! Do łacińsko-niemieckiego wydania prac Lukrecjusza (Hermann Diels, 2 tomy, 1923) entuzjastyczną przedmowę napisał Albert Einstein.

2.4. Świat fizyki przed rokiem 1900

Wyobraźmy sobie przez chwilę sytuację ok. roku 1890. Panowało ogólne mniemanie, że fizyka we wszystkich istotnych sprawach jest już opracowana, że co najwyżej chodzi jeszcze o polepszenie dokładności pomiarów, „o dziesiąte miejsce po przecinku". Gdy Max Planck szykował się do studiów, monachijski fizyk Philipp von Joly odradzał mu fizykę, gdyż tam już wszystko wiadomo. W istocie, na przełomie stuleci wydawało się, że fizyka jest dobrze i całkowicie uporządkowana. Zrozumiano ruch wahadeł i planet. Zjawiska cieplne zostały, jak wspomnieliśmy, z powodzeniem przyporządkowane mechanice. Obrazy pól wyjaśniły magnetyzm i światło. Według ogólnego przekonania, obraz świata, jaki przedstawiała fizyka, zbliżał się do stanu skończonej doskonałości.

[2] W 1837 r. król Hanoweru Ernst August zniósł liberalną konstytucję kraju. Wywołało to protest siedmiu profesorów Uniwersytetu w Getyndze, za co zostali usunięci z Uniwersytetu i z Królestwa Hanoweru (przyp. Red.).

Ten stan samozadowolenia w fizyce był typowy dla schyłku XIX w. Na oko wydawało się, że wszystko jest w najlepszym porządku, przynajmniej w środkowej Europie. Alzacja i Lotaryngia znów należały do Niemiec, cesarz śnił o pięknym imperium kolonialnym chronionym przez wielką flotę. W dniu jego urodzin zwykle panowała piękna pogoda. Kobieta była ponoć niezmiernie szczęśliwa w kuchni, a ogólnie całkowicie zaabsorbowana rodzeniem dzieci. Panował, przynajmniej pozornie, spokój i przede wszystkim porządek.

2.5. Rozwój teorii kwantów

Pewnego rodzaju odpowiednikiem ogólnego dążenia do porządku było w fizyce wymaganie doskonałości i precyzji. Już tylko nieliczne zjawiska, jak się wydawało, nie dawały się jeszcze uporządkować w fizycznym obrazie świata. Należały do nich przenikliwe promienie, odkryte właśnie (1895) przez Conrada Wilhelma Roentgena (1845–1923), i promieniotwórczość odkryta (1896) przez Henriego Becquerela (1852–1908) oraz Marię (1867–1934) i Piotra Curie (1859–1906). Również promieniowanie „ciała czarnego" (pomyślcie o barwie żarzącego się kawałeczka węgla) nie dawało się przedstawić jednym spójnym wzorem matematycznym. Z tej bolesnej dla fizyki sytuacji wybrnął Max Planck (1858–1947), który na jesieni 1900 r. wpadł na genialną ideę: po prostu przeprowadził interpolację między dwoma przeciwstawnymi i wykluczającymi się wzorami i otrzymał prawo promieniowania. Było ono słuszne dla wszystkich długości fali oraz dla wszystkich temperatur i zgadzało się z wynikami najdokładniejszych pomiarów. Jak jednakże można było zrozumieć ten nowy wzór, który później stał się słynny jako prawo promieniowania Plancka? 14 grudnia 1900 r. Planck przedstawił Pruskiej Akademii Nauk w Berlinie jego fizyczny sens. Najistotniejszym punktem uzasadnienia była kwantyzacja energii, według której drgania nie mogły przybierać wszystkich możliwych wartości energii, jak w fizyce klasycznej, lecz musiały to być wartości dyskretne, skwantowane. Wynikające stąd skoki wartości energii scharakteryzował Planck za pomocą nowej stałej, którą dziś nazywamy stałą Plancka (kwantem działania). Było to całkowite zerwanie ze starą fizyką, które sam inicjator tego przełomu ciężko przeżywał.

Choć początkowo Planck uważał wprowadzone przez siebie kwantowanie za sztuczkę rachunkową, Albert Einstein potraktował kwantowanie energii całkiem serio. W 1905 r. wprowadził do fizyki kwant światła, nazwany potem fotonem, i dzięki temu wyjaśnił zjawisko fotoelektryczne, tzn. przemianę światła w prąd elektryczny w światłoczułej fotokomórce (jaka dziś tkwi w każdym automatycznym aparacie fotograficznym). Za to odważne zastosowanie pojęcia kwantu Einstein otrzymał, co prawda dopiero po 17 latach, Nagrodę Nobla z fizyki. Jak odważny był to krok, można sobie wyobrazić pamiętając, że światło, po długich kłótniach co do jego natury, dzięki pracom Maxwella zostało uznane za fale, a teraz znowu miało się składać z małych cząstek.

Czy światło jest więc falą, czy cząstkami? Mało zadowalająca odpowiedź brzmiała: jak kto woli! Było więc coś bardzo niedobrego w samym rdzeniu fizyki. Tę skazę oznakowano etykietką „dualizm falowo-korpuskularny", która jednak niczego nie wyjaśniała. Był to dopiero początek rewolucji kwantowej. Widma atomów, będące kluczem do ich wewnętrznej budowy, stawiały przed fizykami coraz to nowe zagadki. Tylko założenie, że atomy mogą trwać w dyskretnych, skwantowanych stanach energetycznych mogło wyjaśnić zaobserwowane dyskretne linie widmowe, ale również ono przeczyło pojmowaniu klasycznemu. Elektron krążący wokół jądra atomu – a tak wyobrażano sobie od 1912 r. atom dzięki pracom Ernesta Rutherforda (1871–1937) i Hansa Geigera (1882–1945) – musiałby według elektrodynamiki Maxwella promieniować w sposób ciągły energię i w końcu spaść na jądro. Tak się jednak nie działo. Elektron jakby pozostawał w bezpromienistym stanie podstawowym. Atom nie był więc maleńkim układem planetarnym. Był czymś fundamentalnie innym.

Niels Bohr (1885–1962) przedstawił w 1913 r. nowy model atomu, wyjaśniający to zjawisko. Według hipotezy Bohra określone całki po dozwolonych torach elektronów powinny dawać wartości całkowite, mianowicie całkowite wielokrotności planckowskiego kwantu działania. Fizycy jeszcze długo nie rozumieli, co się za tym kryje, ale mieli przynajmniej wzór na linie widmowe i pierwszy schemat budowy atomu.

Wciąż jednak nie udawało się usunąć trudności i niedorzeczności fizyki atomowej. Były wpraw-

dzie pewne reguły i zasady, np. zasada korespondencji Bohra, które wymagały, aby przy przejściu od układów mikroskopowych do makroskopowych nowa fizyka bezkolizyjnie dołączała do starej, nie było jednak nowej, całościowej teorii. Wtedy pojawił się na scenie młody doktor fizyki Uniwersytetu w Getyndze, Werner Heisenberg, i przedstawił genialną propozycję. Powiedział: — Jeżeli czegoś ani nie widzę, ani nie mogę zmierzyć, np. torów elektronów w atomie, to nie muszę tego objaśniać. Muszę tylko interpretować zjawiska obserwowalne, wyniki pomiarów. — Heisenberg wymyślił teorię opierającą się wyłącznie na wielkościach obserwowalnych, mianowicie dyskretnych amplitudach i częstościach atomowych linii widmowych. Te wielkości zapisał w formie tabel, które jego mentor, teoretyk z Getyngi Max Born (1882–1970), rozpoznał jako macierze. (Jak się wydaje, doktor fizyki Heisenberg nie wiedział, co to jest w matematyce macierz. Tak bywa, gdy stopień doktora uzyskuje się mając zaledwie 21 i pół roku). Ani Born, ani Heisenberg nie wiedzieli, co mają sądzić o macierzach w fizyce atomowej. Zapytany o to matematyk David Hilbert miał im poradzić, żeby poszukali równań różniczkowych, które mają te same rozwiązania (wartości własne); może im to poprawi samopoczucie. Nie posłuchali jednak dobrej rady Hilberta i zapewne przez to umknęło im odkrycie równoważnego opisu świata mikroskopowego w postaci równania, jakie w rok później przedstawił Austriak Erwin Schrödinger (1887–1961).

Najważniejsze jednak w mechanice macierzowej Heisenberga, jak wkrótce zaczęto nazywać tę nową mechanikę, było całkowite usunięcie z fizyki wielkości nieobserwowalnych oraz propagowana przez Maksa Borna interpretacja statystyczna. Nie można już było przewidzieć określonego wyniku, a jedynie prawdopodobieństwo jego uzyskania. Tym samym została podana w wątpliwość przyczynowość – dotąd jedna z podstawowych zasad fizyki. Był to radykalnie nowy punkt widzenia, z którym wielu fizyków, przede wszystkim starszych, nie mogło się zgodzić. W szczególności Einstein do końca życia nie zaakceptował indeterminizmu. — Bóg nie gra w kości — mawiał. (Na co Niels Bohr odpowiedział mu kiedyś: — Albercie, przestań wreszcie pouczać dobrego Boga!). Kiedy Einstein robił Heisenbergowi zarzuty z powodu jego „nieokreśloności", ten mu odpowiedział, że Einstein zrobił to samo w swojej teorii względności: jeśli nie można zmierzyć absolutnej jednoczesności dwóch zdarzeń, to po prostu jej nie ma i kropka – to rozstrzyga sprawę! To samo dotyczyło eteru, przez który światło miało przebiegać – arystotelesowskiej kwintesencji, a według Einsteina – *enfant terrible* fizyki. Jeśli eteru nie można w żaden sposób wykryć, to eteru po prostu nie ma! Dla dalszego rozwoju fizyki była to nadzwyczaj owocna myśl.

Einstein nie mógł się jednak pogodzić z mechaniką kwantową, aczkolwiek podziwiał niektóre jej wyniki, np. wyjaśnienie reguł chemicznych; nie uważał jej – według swych własnych słów – za „właściwą osobę". Pewnego dnia – twierdził – wszystko lepiej zrozumiemy na gruncie jakiejś teorii przyczynowej. Ten dzień nigdy nie nadszedł.

Heisenberg podniósł nawet nieokreśloność fizyki mikroskopowej do rangi zasady – zasady nieoznaczoności, wyrażającej w sposób ilościowy związki wielkości, których nie można jednocześnie wyznaczyć z dowolną dokładnością. Zgodnie z tą zasadą, iloczynu niedokładności pomiaru położenia i odpowiedniego pomiaru prędkości nie można uczynić dowolnie małym. Ta resztkowa nieokreśloność jest dana przez planckowski kwant działania. Dziś wiemy, że nie ma odwrotu z tej drogi. Teorie mogą przychodzić i odchodzić, ale stała Plancka i nieokreśloność, której jest symbolem, będą nam zawsze towarzyszyć. W tym tkwi istota mechaniki kwantowej i jej rozwinięć.

Jedną z najbardziej zadziwiających konsekwencji zasady nieoznaczoności Heisenberga w fizyce jest banicja próżni absolutnej, owej „nicości". Taka próżnia miałaby energię dokładnie równą zeru, a więc dokładnie określoną, czego zabrania zasada nieoznaczoności. Paradoksalnie, fizyczna próżnia musi mieć skończoną, różną od zera energię. Ma to poważne konsekwencje, zwłaszcza dla fizyki cząstek elementarnych. Energia próżni ma również prawo głosu, gdy chodzi o kosmos jako całość, jego ostateczny los – wieczne rozszerzanie się lub może kurczenie aż do ostatecznej zapaści („Big Crunch"). Istnieją nawet przekonujące teorie, według których powstanie Wszechświata było wynikiem jakiejś „oszalałej" fluktuacji próżni. Cały Wszechświat z niczego!

Ingerencja mechaniki kwantowej w nasz obraz świata sięga znacznie głębiej niż sugeruje to zasada nieoznaczoności. Konsekwentne stosowa-

nie mechaniki kwantowej prowadzi do paradoksów, które przekraczają ludzkie pojęcie. Chyba najbardziej znanym jest doświadczenie myślowe zaproponowane w 1935 r. przez Einsteina, Podolsky'ego i Rosena, w którym sprowadzono mechanikę kwantową *ad absurdum*. W ostatnich latach przeprowadzono z wielką dokładnością zarówno to doświadczenie, jak i inne, zbliżone. Jak można było oczekiwać, ich wyniki w pełni potwierdziły „nieracjonalne" przewidywania mechaniki kwantowej. Nie wchodząc tu w szczegóły, można powiedzieć, że wyniki tych doświadczeń prowadzą do następujących wniosków: albo są oddziaływania na odległość, które rozchodzą się natychmiast – Einstein mówił o „upiornych oddziaływaniach na odległość", bo dla fizyki to rzeczywiście koszmarna idea – lub też – co dla naszego obrazu świata jest rzeczą jeszcze gorszą – nie ma żadnej takiej r z e c z y w i s t o ś c i, jaką dotychczas sobie wyobrażaliśmy. I mówi to nauka, w dodatku fizyka, która zawsze opisywała realnie istniejące, jednoznacznie wykrywalne obiekty!

Amerykański fizyk Richard Feynman (1918–88) kiedyś bardzo trafnie sformułował ten dylemat: „I think it is safe to say that nobody understands quantum mechanics" (Sądzę, że można spokojnie powiedzieć, że nikt nie rozumie mechaniki kwantowej). Zresztą już wcześniej Niels Bohr powiedział: „Jeśli nie kręci się wam czasem w głowie, gdy myślicie o mechanice kwantowej, to nie zrozumieliście jej naprawdę".

Wydaje mi się, że z tych trudności można wyjść jedynie drogą następującego rozważania. Nasze pojęcie rzeczywistości wykształciło się na podstawie codziennych doświadczeń z rzeczami dającymi się uchwycić makroskopowo. Dla przetrwania rodzaju ludzkiego nigdy nie było ważne, czy widać tory elektronów w atomie. Przenieśliśmy po prostu nasze realne doświadczenia z codziennie napotykanymi obiektami (belką, o którą można sobie rozbić głowę itp.) na świat atomów i dziwimy się, że ta „rzeczywistość" nie istnieje w świecie mikroskopowym. Już dawno pogodziliśmy się z tym, że w wymiarach kosmicznych nie ma absolutnej przestrzeni, choć mamy z nią w życiu codziennym stale do czynienia (np. posługując się nożem i widelcem). W tym świetle paradoksy mechaniki kwantowej nie są właściwie niczym nowym. Pochodzą ze świata będącego poza naszymi codziennymi doświadczeniami, a ten świat wygląda całkiem inaczej, niż myśmy go sobie wyobrażali i jak za pomocą naszego ograniczonego umysłu mogliśmy go sobie opisać. Możemy pojąć właściwie tylko to, co możemy uchwycić. „Duchowi, coś go pojął, równyś ty, nie mnie!"[3] – jak u Goethego zrozpaczonemu Faustowi odparł Duch.

Takie pytania mogą wydać się nam czymś nowym i niezwykłym, ale w starożytności i w okresie Oświecenia – pomyślcie tylko o Johnie Locke'u (1632–1704), biskupie George'u Berkeleyu (1685–1753), Davidzie Humie (1711–76), Immanuelu Kancie (1724–1804) – były chlebem powszednim myślicieli.

W ostatnich latach paradoks Einsteina–Podolsky'ego–Rosena, „upiorne oddziaływanie na odległość", przesunął się ze sfery dyskusji podstawowych w techniczną dziedzinę superszybkich komputerów. Postulowane przez Einsteina i Schrödingera „stany splecione" (entangled states) powinny umożliwić stworzenie komputera kwantowego, zdolnego do miliony razy szybszych rachunków, z wyłaniającymi się konsekwencjami dla kryptografii cyfrowej oraz szyfrowania, co mogłoby zapewnić bezpieczną wymianę danych w Internecie.

Mechanika kwantowa, niezależnie od swoich problemów filozoficznych, odniosła wiele praktycznych sukcesów. Zawdzięczamy jej (wraz z zakazem Pauliego) rozszyfrowanie budowy atomu, układu okresowego pierwiastków i zjawiska tunelowania, tak ważnego dla wyjaśnienia promieniotwórczości, a odkrytego przez Friedricha Hunda (1896–1997) i George'a Gamowa (1904–68). Na szczególną uwagę zasługuje właściwe wyjaśnienie pozostających długo zagadką obserwowanych makroskopowych efektów kwantowych, przede wszystkim ważnych dla techniki: nadprzewodnictwa, nadciekłości i kwantowego zjawiska Halla. Dalsze osiągnięcia mechaniki kwantowej to laser (wystarczy wspomnieć jego niepoślednią rolę w medycynie) i wyjaśnienie wiązań chemicznych, co jest również częściowo zasługą Hunda. Prowadzi to bezpośrednio do możliwości wyjaśnienia budowy c z ą s t e c z e k b i o l o g i c z n y c h i powstawania życia.

[3] Przekład Władysława Kościelskiego.

Przewidywania elektrodynamiki kwantowej, powstałej na gruncie mechaniki kwantowej, zostały potwierdzone z nieosiągniętą w innych dziedzinach dokładnością 14 lub więcej znaków po przecinku; tym samym jest ona najlepiej zweryfikowaną teorią fizyczną.

2.6. Względność przestrzeni i czasu

Przed 100 laty jeszcze inne trudności, poza promieniowaniem ciała czarnego, trapiły fizykę: jak to właściwie jest z tą przestrzenią i czasem?

Newton wierzył w absolutną przestrzeń i absolutny czas – rodzaj sceny, na której miałyby się rozgrywać wszystkie zdarzenia przyrody. Ale już Leibniz (1646–1716) miał wątpliwości. Istotnie, przyjęcie w fizyce założenia absolutnej przestrzeni prowadzi do sprzeczności, które usunąć potrafiła dopiero teoria względności. Według Einsteina przestrzeń i czas są określone przez swoją zawartość – rozmieszczenie gwiazd stałych i innej materii we Wszechświecie. Podobne idee można znaleźć już w *Timaiosie* Platona. Teoria Einsteina znalazla wspaniałe potwierdzenie w 1919 r., gdy w czasie całkowitego zaćmienia Słońca zaobserwowano odchylenie biegu światła gwiazd.

Einstein zrozumiał, że między bezwładnością i ciężkością, tj. siłą przyciągającą masę, nie ma zasadniczej różnicy. A więc m u s z ą być tym samym – tak oto fizyka znowu posunęła się do przodu. Była to słynna z a s a d a r ó w n o w a ż n o ś c i, filar ogólnej teorii względności, która siłę ciążenia wyjaśniała zakrzywieniem przestrzeni. Do niektórych z tych wniosków doszedł Einstein drogą doświadczeń czysto myślowych.

Ofiarą przyjęcia względności przestrzeni i czasu stały się pewne wyrobione, ulubione przyzwyczajenia myślowe, jak pojęcie eteru i jednoczesności dwóch zdarzeń w poruszających się układach. Ogólna teoria względności wyjaśniła jednak odchylenie promieni światła w pobliżu Słońca i od dawna zagadkowe odkształcenie toru Merkurego od idealnej elipsy. Natomiast szczególna teoria względności obdarowała nas najsłynniejszym wzorem fizyki $E = mc^2$, które głosi jedność energii i masy.

Matematyk Minkowski, który pracował wówczas w Getyndze, zaprzeczał nawet autonomii fizycznego pojęcia czasu. Nie było dla niego ani samoistnej przestrzeni, ani czasu samego w sobie, lecz połączenie ich obu, które nazwał czasoprzestrzenią. Słynne stało się jego powiedzenie z roku 1908: „Od tej chwili przestrzeń sama w sobie i czas sam w sobie powinny całkowicie odejść w cień, a tylko rodzaj połączenia ich obu ma zachować rację bytu". I tak już pozostało w fizyce do dziś. Niektóre osiągnięcia techniczne nie byłyby możliwe bez teorii względności – choćby globalny system nawigacji GPS, mile widziany przez kierowców, aczkolwiek kosztowny. W życiu codziennym, np. spacerując po lesie, raczej nie zauważamy jednak skutków zasad teorii względności.

3. Aktualne problemy fizyki

3.1. Czasoprzestrzeń

Dobitnym przykładem wewnętrznego zbratania się przestrzeni i czasu jest przewidziane przez szczególną teorię względności spowolnienie zegarów w polu ciężkości i przy wielkich prędkościach, co prowadzi m.in. do trudnego pojęciowo paradoksu bliźniąt. Człowiek, który spokojnie pozostaje w domu, starzeje się szybciej niż jego brat bliźniak odbywający podróż kosmiczną, który zatem po powrocie do domu jest młodszy biologicznie.

Fizyka ma jeszcze inny problem związany z czasem. Podstawowe prawa natury nie wprowadzają rozróżnienia między czasem biegnącym naprzód a cofającym się, natomiast doświadczenie codzienne uczy nas, że istnieje wyznaczona, niezmieniająca swego zwrotu „strzałka czasu". Pamiętamy przeszłość, ale nie przyszłość. Stłuczony na kawałki wazon sam się z powrotem nie złączy. Nieporządek, czyli – jak mówią fizycy – e n t r o p i a stale rośnie. Ukochana teoria chaosu uczy nas nawet, że przyszłość jest całkowicie nieprzewidywalna.

Od dawna fizyków niepokoi ta sprzeczność podstawowych praw przyrody z doświadczeniem życia codziennego. Ten paradoks, mówią, musi pochodzić z warunków początkowych Wszechświata. Świat był na początku w stanie uporządkowanym i od tego czasu zmierza nieprzerwanie w kierunku coraz to większego nieporządku.

Czy rzeczywiście w fizyce istnieje najkrótszy czas? Tak, nazywa się czasem Plancka i jest rzędu 10^{-43} sekundy, liczby, która zaczyna się czterdziestoma dwoma zerami po przecinku. Dopiero po upływie czasu Plancka zaczęły obowiązywać we Wszechświecie takie prawa przyrody, jakie dziś

znamy. A co było przedtem? Nad odpowiedzią wciąż jeszcze się pracuje.

Fizyczne pojęcia siły i temperatury pochodzą z subiektywnych doznań. Również czas fizyczny – wyprzedza go ludzkie poczucie czasu. My, ludzie starsi, wiemy, jak szybko zdają się przelatywać lata i jak nieskończenie długie wydają się niektóre akademickie wykłady. Ale dosyć o czasie!

3.2. Połączenie podstawowych sił przyrody

Fizyka rozróżnia 4 różne podstawowe siły przyrody: znaną wszystkim siłę ciężkości (pomyślcie tylko o spadaniu jabłek i ciężkich walizkach); siły elektromagnetyczne, które poruszają igłę kompasu i silniki elektryczne; siły jądrowe silne, które wiążą jądra atomowe pierwiastków i z których siłownie jądrowe czerpią energię; wreszcie siły jądrowe słabe, odpowiedzialne w dużej mierze za promieniotwórczość, i które nie zawsze są tak słabe, jak sugeruje ich nazwa. (Czy pamiętacie jeszcze skutki Czarnobyla? Działały tam właśnie owe słabe siły jądrowe).

Dlaczego akurat cztery siły? Czyż nie byłoby znacznie lepiej, gdyby była tylko jedna uniwersalna siła przyrody? Takie żądanie nie jest znowu aż tak zuchwałe – czyż Maxwell, jak widzieliśmy, nie dowiódł, że siła elektryczna i magnetyczna podlegają tym samym prawom i mają wspólne źródło? Przypomnijmy sobie ogólnie znane równania Maxwella.

Istotnie, nie tak dawno udało się fizykom pokazać, że słabe siły jądrowe i siły elektromagnetyczne mają wspólne źródło, nazwane siłą elektrosłabą. W życiu codziennym jednak siły elektromagnetyczne i słabe siły jądrowe bardzo się różnią (mówi się o „naruszonej symetrii").

W końcu znaleziono nawet wspólne podłoże siły elektrosłabej i silnej siły jądrowej. Stworzono piękną teorię silnych sił jądrowych, chromodynamikę kwantową, w której rządzą zupełnie nowego rodzaju cząstki elementarne – kwarki. Połączenie chromodynamiki kwantowej (zawdzięczającej swoją nazwę fikcyjnym kolorom kwarków) z siłą elektrosłabą doprowadziło do stworzenia tzw. Modelu Standardowego w fizyce cząstek elementarnych. Łączy on wszystkie siły przyrody, z wyjątkiem jednej – siły grawitacyjnej.

Pomimo swoich sukcesów (np. z nowymi cząstkami elementarnymi, o których mówiliśmy) Model Standardowy nie jest w pełni zadowalający nie tylko dlatego, że nie ma w nim miejsca na grawitację, ale także dlatego, że zawiera cały szereg pozornie dowolnych „stałych", o których nikt nie wie, skąd się wzięły. Wystarczyłoby to może na przepis kulinarny, ale nie na wielką teorię, przed którą klęka się ze czcią. I skąd się biorą te przeróżne masy cząstek elementarnych? To też jest nierozstrzygniętą kwestią. Teoria ostateczna i wszechobejmująca powinna umieć to wszystko przewidzieć!

4. Przyszłość fizyki

> If you can look into the seeds of time,
> and say which grain will grow and which will not,
> speak then to me.[4]
>
> William Shakespeare (1564–1616), *Macbeth*

Jak więc wygląda przyszłość fizyki? Wielkim, nierozwiązanym problemem jest, jak już mówiliśmy, połączenie siły grawitacyjnej z innymi fundamentalnymi siłami przyrody. Teoria grawitacji nie zawiera stałej Plancka, nie może więc być kompletna. Z drugiej strony, gdyby przestrzeń, w której krzątają się cząstki elementarne, nie była zakrzywiona, co nie jest możliwe, to wiele cząstek elementarnych mających masę i tak by ją zakrzywiło. Również z tego powodu Model Standardowy nie może być poprawny. Mówiąc krótko: w dzisiejszej fizyce nie ma żadnej teorii w pełni zgodnej z prawdą. Jest to oczywiście stan nie do zaakceptowania, nie tylko w fizyce. Sytuacja jest taka, jak gdybyśmy w matematyce posługiwali się twierdzeniami, które nie tylko nie są dowiedzione, ale są już uznane za fałszywe: 2+2 jest przecież równe 4, a nie 5, jak to Gauss wmawiał niegdyś swojemu profesorowi w Getyndze, Abrahamowi Gotthelfowi Kästnerowi (1712–1800). (Student Gauss tak mawiał o Kästnerze: to największy poeta wśród matematyków i największy matematyk wśród poetów).

4.1. Teoria strun

W tak rozpaczliwej sytuacji tonący chwyta się każdej brzytwy, a w fizyce jedna z tych brzytew to

[4] Jeśli umiecie wpatrzyć się w nasiona / czasu i orzec, które ziarnko wzrośnie, / które zmarnieje – przemówcie i do mnie (przekład Stanisława Barańczaka).

teoria strun. Zgodnie z nią przestrzeń fizyczna ma nie 4 wymiary (trzy przestrzenne i czas), lecz 10, z których 6 jest tak małych, że się ich nie dostrzega. Są „zrolowane" tak jak dywan. Przestrzenie o więcej niż czterech wymiarach brano już pod uwagę na długo przed teorią strun. Około roku 1920 pochodzący z Polski getyński matematyk Theodor Kaluza konstruował pięciowymiarową przestrzeń dla zjednoczenia siły grawitacji i elektromagnetyzmu. Próba się jednak nie udała, teoria Kaluzy popadła w zapomnienie i dopiero przed paru laty odkryto ją na nowo. Tak oto mały, skromny Kaluza (pamiętam go dobrze z moich lat studenckich) stał się jednym z proroków nowoczesnej fizyki.

No dobrze, ale co te struny robią w owej teorii? Drgają, tak jak drgają struny skrzypiec. Każde drganie struny reprezentuje cząstkę elementarną. Nie pytajcie mnie, jak. To jest zbyt skomplikowane, a poza tym ja sam nie wiem. Ale prawdziwa bomba dopiero wybuchnie: ludzie, którzy rzeczywiście rozumieją teorię strun (lub teorię superstrun), twierdzą (i wielu im wierzy), że dopuszcza ona połączenie z grawitacją. Słuchajcie i podziwiajcie – cząstki elementarne i grawitacja tańczą na jednej scenie, mówiąc ściślej: tańczą na tej samej strunie!

Tymczasem same drgające struny nie wystarczają do opisania cząstek elementarnych. Potrzebne są drgające membrany, takie jak w kotłach orkiestry symfonicznej. To wszystko dopiero się rozwija, ale być może jesteśmy na właściwej drodze. Pewnego dnia lepiej zrozumiemy nową teorię i będziemy mogli przedstawić ją w postaci prostych obrazów. Powstaje tymczasem ważkie pytanie: czy ta teoria jest poprawna? Będzie bardzo trudno uzyskać jej doświadczalne potwierdzenie, jeśli do przewidywanego połączenia sił jądrowych i grawitacji miałoby dochodzić przy niewyobrażalnie wielkich energiach. Odpowiednia miara odległości, długość Plancka, jest rzędu 10^{-35} cm. Łatwo się mówi: 10^{-35} centymetra, ale stosunek długości Plancka do średnicy wiśni jest malutkim ułamkiem (10^{-10}) stosunku średnicy wiśni do rozmiarów całego Wszechświata. Wiele czasu minie, może cała wieczność, zanim człowiek będzie mógł przeprowadzać wiarygodne doświadczenia na takich odległościach. Dla fizyków nie oznacza to jednak, że trzeba zaprzestać prób. Istnieje jeszcze inne kryterium poprawności jakiejś nowej teorii – musi ona posiadać określone symetrie. Symetrią fizycy nazywają inwariancję, niezmienniczość wobec pewnych zmian, np. kierunków w przestrzeni, strzałki czasu, wymiany znaku ładunku (plus/minus).

Obok dobrze nam wszystkim znanej symetrii zwierciadlanej przestrzeni (P) i symetrii odwrócenia czasu (T) wielką rolę w fizyce odgrywa symetria zamiany materii i antymaterii (C). Istnieje nawet słynne twierdzenie CPT, które podali ponad 40 lat temu Wolfgang Pauli (1900–58) i pracujący w Getyndze Gerhart Lüders (1920–1995): „Prawa przyrody nie powinny się zmieniać, gdy dokonujemy jednocześnie odwrócenia trzech kierunków przestrzennych, zwrotu czasu i znaku ładunku".

Fizyk teoretyk do uwierzytelnienia podstawowej teorii wymaga ponadto, by była ona „elegancka". Einstein podkreślał zawsze, że teoria musi być piękna. Odrzucał skomplikowane teorie jako szpetne i niewiarygodne. „Pan Bóg jest wyrafinowany, lecz nie perfidny". Einstein nie był pierwszym, który na równi stawiał piękno i dobro. Już grecka poetka Safona z wyspy Lesbos powiedziała 2600 lat temu: „to, co piękne, jest dobre".

4.2. Inne zagadki fizyki

Jedną z najbardziej zagadkowych cząstek elementarnych było neutrino, wprowadzone przez Pauliego w 1931 r. dla ratowania zasady zachowania energii. Dopiero w kilkanaście lat później potwierdzono doświadczalnie istnienie tej cząstki. Był to niewątpliwie jeden z triumfów fizyki. Ta mała, niewidoczna cząstka stawia przed nami nowe zagadki. Około 1/3 neutrin wytworzonych we wnętrzu Słońca nie dociera do Ziemi. Czy nasze teorie procesów zachodzących na Słońcu nie są całkiem słuszne, czy też neutrina skrywają w sobie jeszcze jakieś tajemnice? Można stwierdzić ogólnie, że obserwacje astrofizyczne wzbogacają naszą wiedzę o cząstkach elementarnych, i odwrotnie – właściwości cząstek elementarnych wpływają na ewolucję kosmosu.

Nie tylko dobrze znamy materię, ale od pewnego czasu wiemy o istnieniu antymaterii, która ma te same właściwości, poza znakiem ładunku, co zwykła materia. Istnienie antymaterii jako pierwszy postulował Paul Adrien Maurice Dirac (1902–84). W całym Wszechświecie na miliard cząstek przypada jednak tylko jedna jedyna anty-

cząstka. Skąd bierze się ta asymetria? Dlaczego nie ma tyle samo materii, co antymaterii?

Czy, tak jak przewidywał Einstein, istnieją fale grawitacyjne? Dotychczas wszystkie bezpośrednie obserwacje nie dały pozytywnego wyniku. Ale już ponad 20 lat temu odkryto parę masywnych gwiazd neutronowych, które ze stale rosnącą prędkością krążą wokół siebie. Wynika stąd, że powinny promieniować energię w postaci fal grawitacyjnych. Wyniki precyzyjnych pomiarów wskazują, że strata energii ma dokładnie taką wartość, jaką przewiduje ogólna teoria względności. (Za to odkrycie R.A. Hulse i J.H. Taylor dostali w 1993 r. Nagrodę Nobla z fizyki).

Czy z upływem miliardów lat zmieniają się podstawowe stałe przyrody – kwant działania, stała grawitacyjna, prędkość światła? To interesujące pytanie poruszało przed kilku laty umysły, ale już od dłuższego czasu nic na ten temat nie słyszałem.

I chyba warto przypomnieć najpoważniejsze pytanie, leżące co prawda poza fizyką: „dlaczego w ogóle istnieje coś, a nie nic?"

4.3. Brakująca masa

Nasz Wszechświat istnieje od ponad 10 miliardów lat. Wszystko zaczęło się od wielkiej eksplozji, nazwanej „Wielkim Wybuchem". Czy to rozszerzanie się będzie trwało wiecznie, czy skończy się bezruchem, a może zapaścią całego Wszechświata do jednego punktu? Ewentualny bezruch lub zapaść zależą od sił grawitacyjnych materii we Wszechświecie. Całkowita masa, która zatrzymałaby rozszerzanie się kosmosu, nazywa się masą krytyczną. Na podstawie różnych przesłanek, a także – można powiedzieć – przesądów, fizycy wierzą, że całkowita masa Wszechświata równa się masie krytycznej. Sęk w tym, że dotychczas zaobserwowana masa Wszechświata wynosi tylko jedną dziesiątą część masy krytycznej. Gdzie ukrywa się reszta? Mówi się o „ciemnej materii", której nie można zaobserwować. Rzeczywiście istnieją różne wskazówki, że ciemna, więc nieświecąca masa jest bardzo rozpowszechniona.

Gdyby nie istniała we Wszechświecie niewidoczna materia, to np. wiele szybko obracających się galaktyk, w tym nasza Droga Mleczna, rozleciałoby się. Tak jednak się nie dzieje – one się „sklejają". Klejem jest siła ciężkości pochodząca od niewidocznej materii, która składa się z wystygłych gwiazd, tzw. brązowych karłów, z czarnych dziur, a także z praktycznie niewidocznych cząstek elementarnych, jak neutrina, i być może z zupełnie jeszcze nieznanych rodzajów materii. Jeśli to prawda, to ludzie składają się z materiałów, które we Wszechświecie są w mniejszości. Innymi słowy, najpierw Kopernik swoim układem heliocentrycznym wyrzucił nas ze środka świata, a teraz ludzie mieliby być utworzeni z zupełnie marginalnych materiałów – to niezbyt przyjemna myśl. Ostatnio zresztą znaleziono już metody obserwacji ciemnej materii. Metody te wykorzystują fakt, że masa – wszystko jedno, czy świecąca, czy ciemna – odchyla bieg promieni światła. Skoncentrowana materia działa więc jak optyczna soczewka. Tego rodzaju soczewki nazywają się soczewkami grawitacyjnymi. Już przed 80 laty przewidział je Einstein, ale nie wierzył, że będzie je można zaobserwować, a co dopiero wykorzystać w praktyce. Soczewka grawitacyjna skupia światło schowanych za nią gwiazd i w ten sposób zdradza ich istnienie, nawet jeśli pozostają niewidoczne. (Własności odwzorowania soczewek grawitacyjnych mniej przypominają znane nam lupy czy soczewki skupiające, a raczej powyginaną nóżkę kieliszka do wina). Soczewki grawitacyjne stały się ważnym narzędziem pomocniczym astronomii, a więc także kosmologii. Być może niedługo będziemy już wiedzieć, czy gwiazdy – a my razem z nimi – będą się wiecznie rozpraszać, czy może dojdzie do zapaści Wszechświata.

Nie tak dawno znaleziono nowy argument za wiecznym rozszerzaniem się Wszechświata. *New York Times* doniósł 3 kwietnia 2001 r. na stronie tytułowej o potwierdzeniu istnienia siły antygrawitacji, czyli siły, która rozpycha masy zamiast przyciągać je do siebie. Tę siłę Einstein wprowadził w swojej ogólnej teorii względności jako „stałą kosmologiczną", by uchronić Wszechświat od przedwczesnej zapaści. Wprawdzie później ta stała została uznana za zbędną, ale dziś znowu odgrywa ważną rolę w kosmologii.

4.4. Złożoność

Poza poszukiwaniem jednolitego prawa przyrody i lepszego zrozumienia kosmosu, fizyka będzie w przyszłości skupiać się na wyjaśnieniu złożonych i ewoluujących układów. Są to przede wszystkim układy biologiczne, a wśród nich układ

immunologiczny człowieka. Również poza biologią jest jeszcze dużo do zrobienia. Na przykład, jeszcze wiele podniecających tajemnic kryją szkła spinowe, turbulencje, przewidywanie pogody, nadciekłość, nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe i złożone ciała stałe. Wiele układów złożonych przejawia zachowanie chaotyczne – ich przyszłego rozwoju nie da się przewidzieć. Drobne zmiany mają nieprzewidywalne następstwa. Dziwne, ale dzisiaj uważa się nasz Układ Słoneczny, ten paradygmat porządku i przewidywalności – pomyślcie tylko o dokładności, z jaką można przewidzieć zaćmienia Słońca – za układ chaotyczny. Chaos wystąpi zresztą też w ruchach planet, ale dopiero za, być może, 10 miliardów lat, a wtedy Słońce będzie już od dawna czerwonym olbrzymem i połknie Ziemię.

5. Podsumowanie

Czas na podsumowanie. W trakcie swego rozwoju fizyka nabierała cech abstrakcyjnych i dzisiaj jest w znacznym stopniu opanowana przez wzory matematyczne. Poglądowość i naiwny realizm musiały ustąpić abstrakcyjnym, matematycznym sformułowaniom. Wzory opisują podstawowe symetrie, które dziś uważa się za to, co „świat zawiera w swoim najgłębszym wnętrzu".

Matematyczka z Getyngi, Emmy Noether (1882–1935), pierwsza rozpoznała ogólny związek między symetriami praw przyrody a zasadami zachowania. Na przykład, podana już w 1847 r. przez Hermanna Helmholtza (1821–94) zasada zachowania energii wynika z niezmienności praw natury z upływem czasu.

Fizykę od samego początku cechowało dążenie do jedności. Nawet dzisiaj jej podstawowym problemem jest unifikacja, mianowicie połączenie siły grawitacyjnej z innymi siłami przyrody. Nie wiadomo, jak daleko posunie się ten proces łączenia i zwiększania abstrakcyjności. Tylko w gwiazdach jest zapisane, czy dojdziemy do jednolitej, wszechogarniającej teorii. Słynne powiedzenie Hilberta, wyryte na jego nagrobku na cmentarzu w Getyndze, brzmi: „Musimy wiedzieć, będziemy wiedzieć". Ale czy naprawdę będziemy wiedzieć? Optymizm Hilberta wydaje się nam dziś dalekim echem naiwnej przeszłości.

Dziś może bliższe są nam słowa Richarda Feynmana: „Nie niepokoi mnie to, że nie znam czegoś, że jestem zagubiony w tajemniczym świecie... Znam przybliżone odpowiedzi, możliwe przekonania i w różnym stopniu jestem pewien różnych rzeczy, absolutnie pewien nie jestem jednak niczego".

Na bardziej pragmatycznej płaszczyźnie przyszłość fizyki jest natomiast całkiem przewidywalna i bardzo obiecująca. Zastosowaniom nie będzie końca: w biologii, uzyskiwaniu energii słonecznej i energii wiatrów, badaniach materiałowych, nanotechnologii, komputerach nowego rodzaju, kryptografii kwantowej, metodach obrazowania w medycynie i jeszcze wielu innych, o których dziś nie mamy pojęcia.

Przyjacielskich wskazówek, za które dziękuję, udzielili mi: J. von Behr (Hamburg), H.J. Borchers, H. Goenner, K. Hentschel, G. Patzig, H. Quast, E. Scheib (Hamburg), K. Schönhammer, W. Schröter, M. Siebert, W. Stodiek (Princeton), H. Störmer (New York i Murray Hill), H.W. Strube, R. Ulbrich i H.-H. Voigt.

Tłumaczyła z języka niemieckiego
Barbara Wojtowicz
Warszawa

Rozmowa o fotonice

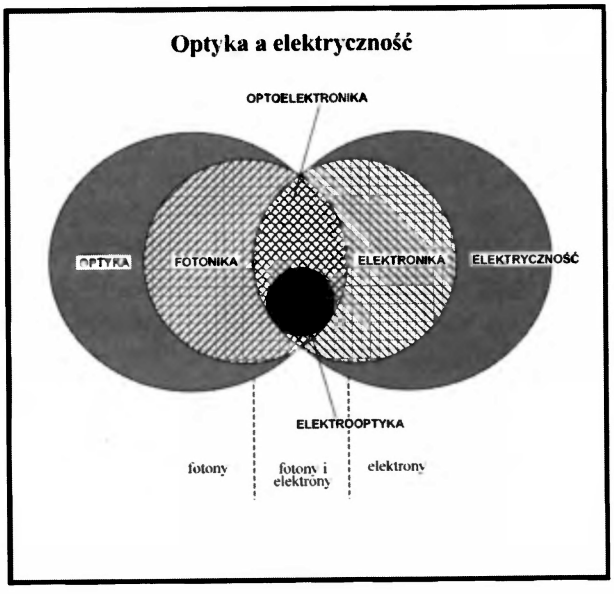
Conversation on photonics

Poniżej zamieszczamy nadesłany nam przez prof. Tomasza Szoplika (Wydział Fizyki UW) tekst dyskusji na temat zakresu terminu „fotonika", przyjętego dla szybko rozwijającego się działu nauki i techniki. W dyskusji, przeprowadzonej przez prof. Szoplika za pośrednictwem poczty elektronicznej w roku akad. 2000/01, udział wzięli profesorowie: Henryk Malak (Microcosm, Columbia, Maryland, USA), Bohdan Mroziewicz (Instytut Technologii Elektronowej, Warszawa), Włodzimierz Nakwaski (Politechnika Łódzka), Wacław Urbańczyk (Politechnika Wrocławska) i Tomasz Woliński (Politechnika Warszawska).

Redakcja

Tomasz Szoplik [TS] — Zapraszam Panów do rozmowy na temat fotoniki, w nadziei, że uda się nam uzgodnić poglądy na temat definicji tego nowego działu nauki i techniki. Fotonika wyrosła na pograniczu optyki i elektroniki. Sam termin powstał przez analogię do elektroniki, z tym, że funkcję elektronów przejęły fotony. Dyskusja na temat zakresu pojęciowego słowa „fotonika" toczy się na świecie od kilkunastu lat, ale nie udało się jeszcze osiągnąć powszechnej zgody, która gwarantowałaby prawdziwość definicji.

Zacznijmy od graficznego przedstawienia wzajemnego zachodzenia na siebie takich klasycznych działów fizyki, jak optyka i elektryczność, w obrębie których powstały nowe, pokrewne dziedziny. Schemat przedstawiony na rys. 1 został opracowany przez amerykańskich i europejskich optyków związanych z Amerykańskim Towarzystwem Optycznym (OSA), Międzynarodowym Stowarzyszeniem Inżynierii Optycznej (SPIE) oraz nieistniejącym już Europto – towarzystwem optyków europejskich, którzy stworzyli ok. 10 lat temu nieformalną Koalicję na rzecz Optyki. Celem Koalicji było wzmocnienie pozycji optyki przede wszystkim w środowisku inżynierów, dla których optoelektronika stała się ważniejsza od optyki. W moim przekonaniu naprawdę pożytecznym skutkiem działań Koalicji było odświeżenie poglądów na zakres pojęciowy słowa „optyka" i skierowanie uwagi na sposoby nauczania optyki na poziomie szkolnym i uniwersyteckim [1,2].



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie związku dwu klasycznych działów fizyki: optyki i elektryczności oraz umiejscowienie dziedzin pochodnych.

Następcami Koalicji na rzecz Optyki są dwie organizacje: europejska Optics and Photonics Education Network, stowarzyszona z Europejskim Towarzystwem Optycznym [3], oraz amerykańska Coalition for Photonics and Optics, stowarzyszona m.in. z OSA i SPIE [4]. W rezultacie pojawiła się amerykańska definicja fotoniki, którą przesłał mi dr Tyler Krupa z redakcji *Optics and Photonics News*, miesięcznika wydawanego przez OSA [5]. Brzmi ona następująco:

> Fotonika to technika wytwarzania światła oraz sterowania nim i innymi postaciami energii promienistej, której jednostką kwantową jest foton. Jest to nauka o emisji, przepuszczaniu, odchylaniu, wzmacnianiu i detekcji światła za pomocą elementów optycznych i urządzeń, o laserach i innych źródłach światła, o falowodach optycznych, o urządzeniach elektrooptycznych, o związanych z optyką urządzeniach elektronicznych i skomplikowanych układach. Zakres zastosowań fotoniki rozciąga się od wytwarzania i detekcji energii promienistej po komunikację i przetwarzanie informacji.

Do powyższej definicji fotoniki chętnie dodałbym wyszczególnienie działów, które się na nią składają. Moim zdaniem działami fotoniki są: elektronika kwantowa (lasery), akustooptyka (modulatory), technika światłowodowa, optoelektronika (diody laserowe i elektroluminescencyjne, ciekłokrystaliczne modulatory światła, detektory światła) i elektrooptyka (modulatory akustooptyczne), w których nośnikami informacji są zarówno fotony jak i elektrony. Innym działem fotoniki jest mikrooptyka, czyli dziedzina pozwalająca na kierowanie wiązki światła za pomocą małych elementów optycznych, zwykle o zmiennym współczynniku załamania. Mogą to być szkła z wdyfundowanymi atomami srebra lub aluminium albo tworzywa sztuczne napromieniowane wiązką protonów.

Skutkiem dalszych rozważań nad rolą optyki był wydany w lipcu 1998 r. świetny raport „Okiełznanie światła – nauka i technika optyczna w XXI wieku" [6]. Przygotowano go na zamówienie trzech amerykańskich instytucji: Państwowej Fundacji Nauki (NSF), Państwowego Instytutu Wzorców i Techniki (NIST) oraz Agencji Zaawansowanych Obronnych Projektów Badawczych (DARPA). Trzeba przyznać, że autorzy raportu nie eksponują nadmiernie terminu „fotonika" i optykę definiują szeroko jako dział nauki i techniki zajmujący się zjawiskami fizycznymi i technikami związanymi z generacją, przesyłaniem, przetwarzaniem, detekcją i wykorzystaniem światła. Również w styczniowym numerze z 2001 r. *ICO newsletter* optykę stawia się ponad nowoczesnymi dziedzinami pochodnymi, jak fotonika czy optoelektronika [7].

Wacław Urbańczyk [**WU**] — Nie zgadzam się z zakresem znaczeniowym słowa „fotonika", który jest pokazany na rys. 1. Moim zdaniem fotonika obejmuje całą optykę (z pewnymi oporami zaliczyłbym do fotoniki także optykę geometryczną, a nawet teorię aberracji) i jeszcze kilka dziedzin sąsiednich. Dobrym przykładem jest tu spektroskopia, niektóre działy fizyki półprzewodników czy nowa dziedzina związana z optycznym spowalnianiem i pułapkowaniem atomów i cząsteczek, a także badaniem właściwości takich struktur. Termin „kryształy fotoniczne"[1] zakorzenił się już w fizyce ciała stałego. Trudno mi zaliczyć te obszary badań do optyki, ale na pewno są one częścią fotoniki. Zatem fotonika obejmuje całą optykę i jeszcze trochę więcej.

Zgadzam się natomiast z tym, że optoelektronika jest podzbiorem fotoniki. Optoelektronika nie zawiera jednak w sobie dziedzin o bardziej podstawowym charakterze, np. optyki kwantowej. I jeszcze sprawa widma promieniowania elektromagnetycznego. Moim zdaniem, „zakres widmowy" fotoniki pokrywa się z pasmem optycznym, czyli z promieniowaniem widzialnym i bliską podczerwienią oraz nadfioletem. Na pewno nie zaliczyłbym do fotoniki niczego, co wiąże się np. z promieniowaniem rentgenowskim.

Włodek Nakwaski [**WN**] — Nie mogę się z tym zgodzić. Uważam, że optyka jest pojęciem szerszym od fotoniki. Trudno przecież do tej ostatniej zaliczyć teorie dyfrakcji, interferencji i rozpraszania, czy też prawa odbicia i załamania światła.

TS — Wbrew opinii prof. Urbańczyka nie mam zastrzeżeń do rysunku. Choć uważam, że część wspólna zbiorów reprezentujących optykę i fotonikę jest rzeczywiście bardzo duża, to jednak istnieją takie działy optyki, które nie należą do fo-

[1] Zręczniejszy wydaje się termin „kryształy fotonowe" (przyp. Red.).

toniki. Według mnie są to: optyka geometryczna, klasyczna optyka instrumentalna, teoria aberracji i optyka widzenia. Natomiast głęboki związek optyki z elektroniką najlepiej ilustrują takie zastosowania, jak technika światłowodowa i litografia optyczna. Obie stanowią jądro fotoniki. A czy do fotoniki zaliczymy litografię przy użyciu miękkiego promieniowania rentgenowskiego o długości fali 1–30 nm? Mam nadzieję, że tak. Uważam, że odmienne traktowanie różnych zakresów widma fal elektromagnetycznych ma wyłącznie znaczenie historyczne.

W czasopiśmie *Physics Today* wydawanym przez Amerykański Instytut Fizyki istnienie fotoniki jest zauważane i uznawane. W stałej rubryce „Książki" podział tematyczny obejmuje między innymi „Optykę i fotonikę" obok takich pokrewnych dziedzin, jak „Fizyka statystyczna i termodynamika" czy „Zjawiska nieliniowe i chaos". Zestawienie optyki i fotoniki nic nie mówi o ich wzajemnej relacji, ale wyklucza ich tożsamość.

Bohdan Mroziewicz [BM] — Moja wypowiedź na temat definicji fotoniki będzie może kontrowersyjna, ale postanowiłem zabrać głos w celu zwrócenia uwagi na dodatkowe aspekty powstałej niejednoznaczności w definicjach fotoniki i optoelektroniki. Otóż w moim przekonaniu wszelka terminologia, nie wykluczając dziedzin nauki, kształtuje się pod wpływem bardzo wielu czynników, spośród których jednym z najważniejszych w naszych czasach jest reklama. Zabrzmi to zapewne dość bulwersująco, ale wprowadzenie nowego terminu daje często możliwości otwarcia nowych programów badawczych, a więc pozyskania pieniędzy. Przykładem z Polski może być „technologia elektronowa" – termin na świecie nieznany, który jednak w swoim czasie przyczynił się do powstania trzech nowych instytutów zawierających go w swej nazwie (dwóch w Warszawie i jednego we Wrocławiu). Nie jest to przypadek odosobniony. W konsekwencji bardzo często mniej istotna staje się ścisłość samego terminu (np. „niebieska optoelektronika"), ważna jest zaś jego popularyzacja dla osiągnięcia celów zamierzonych przez pomysłodawców.

Termin „fotonika" pojawił się w wyniku dążenia do zareklamowania dynamicznie rozwijającej się szeroko rozumianej techniki światłowodowej. Stało się to istotne z uwagi na to, że termin „optoelektronika" okazał się już zbyt wąski, a ponadto wyeksploatowany i w rezultacie mniej nośny. Pojawienie się takich czasopism, jak *Photonics Spectra*, przysporzyło fotonice rozgłosu i spowodowało wchłonięcie zagadnień wiązanych dotąd z optoelektroniką. Dotyczy to np. przyrządów półprzewodnikowych, w których zjawiska optyczne występują w wyniku ruchu (transportu) elektronów, a więc powinny być określane jako optoelektroniczne (bądź optoelektronowe).

Definicja fotoniki zamieszczona w *The Photonics Dictionary* jest dokładnym odzwierciedleniem opisanej wyżej sytuacji. Tymczasem ściśle rzecz biorąc powinno się rozróżniać dwie dziedziny podstawowe: fotonikę i elektronikę oraz optoelektronikę jako gałąź interdyscyplinarną, łączącą elektronikę z fotoniką. Bardzo dobrze odzwierciedla to schemat sporządzony przez Coalition for Optics.

Tomasz Woliński [TW] — Optoelektronika jest dziedziną nauki oraz techniki łączącą w sobie optykę z elektroniką. Zaletą tego mariażu jest wynikająca z prędkości światła olbrzymia przepustowość informatyczna układów oraz łatwość sterowania wolniejszymi elektronami, które w przeciwieństwie do szybkich fotonów obdarzone są ładunkiem. Aby sobie uświadomić, jak wielki potencjał niesie użycie światła jako nośnika informacji, należy porównać własności fizyczne fotonu i elektronu. Posługując się fotonami, zyskujemy na szybkości transmisji, która dla elektronów jest ograniczona rezystancją, pojemnością i indukcyjnością przewodów. Nie mniej istotne jest szerokie pasmo transmisji fotonów oraz możliwość krzyżowania się wiązek fotonowych bez występowania wzajemnych oddziaływań ze względu na to, że fotony nie mają ładunku.

Optoelektronika jako nauka pozwala nam lepiej zrozumieć właściwości fotonów i elektronów oraz ich wzajemne oddziaływania. Natomiast jako dziedzina techniki rozwinęła szeroki zakres zastosowań, bez których nie potrafimy już wyobrazić sobie codziennego życia. Są to np. światłowodowe systemy telekomunikacji optycznej oraz układy czujnikowe, drukarki laserowe, odtwarzacze CD i DVD, wyświetlacze ciekłokrystaliczne, czytniki laserowe czy też cała gama zastosowań laserów w medycynie. W przyszłości optoelektronika będzie jeszcze szerzej wkraczała w nasze życie codzienne i trudno wyobrazić sobie granice jej rozwoju.

W moim osobistym odczuciu pojęcia „optoelektronika" i „fotonika" są bliskoznaczne, chociaż nie jednoznaczne. Mówiąc o optoelektronice, ograniczamy się do częstości optycznych i sięgamy również w kierunku elektroniki. Natomiast fotonika koncentruje naszą uwagę na zjawiskach czysto optycznych z udziałem, wykorzystaniem i przetwarzaniem fotonów, niekoniecznie tych z zakresu optycznego (chociaż w potocznym znaczeniu większość badaczy ma na myśli obszar częstości optycznych). W układach fotonicznych dominującym elementem jest zawsze foton (światło) – rola elektronu jest raczej służebna. Natomiast optoelektronika, opisując w zasadzie te same zjawiska, równomiernie rozdziela akcenty między fotony i elektrony.

WN — Znaczenie słowa „fotonika" jest intuicyjnie zrozumiałe, choć przez różne osoby pewnie w nieco inny sposób, gdyż różne są ich doświadczenia i do fotoniki dotarły z innego kierunku. Fotonika nakłada się w znacznym stopniu na zakres pojęciowy optoelektroniki. Spróbujmy więc zdefiniować najpierw tę ostatnią. Przyrząd optoelektroniczny to przyrząd elektroniczny, w którym zachodzi emisja lub absorpcja promieniowania elektromagnetycznego z zakresu światła widzialnego oraz pobliskich obszarów podczerwieni i nadfioletu i którego działanie jest oparte na wykorzystaniu tych zjawisk.

A fotonika? Po pierwsze, w ogóle nie musi być związana z elektroniką, choć rzeczywiście optoelektronika jest jej znaczącą częścią. Po drugie, należy rozszerzyć jej zakres widmowy na wszystkie fale elektromagnetyczne. Po trzecie, oprócz oczywistego wykorzystywania oddziaływania fal elektromagnetycznych z materią trzeba jeszcze uwzględnić wzajemne oddziaływania różnych fal elektromagnetycznych. A może po prostu definicja powinna brzmieć tak: Fotonika to dział nauki i techniki zajmujący się wykorzystywaniem promieniowania elektromagnetycznego jako nośnika informacji.

WU — Moja intuicyjna definicja fotoniki jest następująca: jest to dziedzina wiedzy zajmująca się fundamentalnymi właściwościami promieniowania elektromagnetycznego, jego oddziaływaniem z materią, zjawiskami związanymi z generacją i detekcją promieniowania elektromagnetycznego, a także sposobami jego przesyłania i przetwarzania. Termin „fotonika" obejmuje wiele kierunków badań, z których najważniejsze wydają mi się następujące (w przypadkowej kolejności): optyka kwantowa i jej zastosowania; optyka falowa; optyka nieliniowa; źródła światła, wzmacniacze i detektory; światłowody i ich telekomunikacyjne zastosowania; optyka zintegrowana; optyczne przetwarzanie informacji i optyczne sposoby zapisu informacji; spektroskopia; spowalnianie i pułapkowanie atomów oraz cząstek w polach optycznych; kryształy fotoniczne; szeroko rozumiana metrologia optyczna.

Henryk Malak [**HM**] — Nie jestem filologiem, lecz fizykiem, dlatego moje rozumienie definicji słowa „fotonika" opiera się na doświadczeniach z zakresu spektroskopii fluorescencyjnej i jej biomedycznych zastosowań, czyli dziedziny, w której pracuję w USA. Tutaj pojęcie „fotonika" jest zwykle używane do określenia techniki, w której fotony odgrywają główną rolę w procesie wywołania zjawiska i jego pomiaru. Natomiast pojęcie „optoelektronika" jest zarezerwowane dla techniki produkowania elementów do emisji lub detekcji fotonów lub dla określenia procesów polegających na modyfikacji fotonów, np. w efekcie akustooptycznym czy elektrooptycznym.

Zaobserwowałem, że w Stanach Zjednoczonych jest moda na chwytliwe i stosunkowo ogólne pojęcia, które jednym słowem określają wszystko. Wygląda na to, że termin „optoelektronika" jest obecnie rzadziej używany, a wręcz wyparty przez słowo „fotonika". W Europie, bardziej niż w USA, przywiązuje się wagę do znaczenia używanych słów. W *Photonics Spectra* z maja 2000 r. przedstawiono analizę rynku fotonicznego w przyszłym stuleciu. Pod pojęciem fotoniki rozpatruje się tam wiele spraw, począwszy od telekomunikacji, a na sekwencjonowaniu DNA skończywszy.

BM — Próby tworzenia definicji fotoniki mogą być oczywiście różnorakie. Nie należy jednak przyjmować za podstawę do tworzenia definicji tej dziedziny jedynie sposobu przesyłania sygnału, gdyż wówczas dla symetrii definicja elektroniki musiałaby być bardzo zawężona i całkowicie nieadekwatna do stanu rzeczywistego. Punktem wyjścia w przypadku fotoniki, podobnie jak w przypadku elektroniki, powinny być zjawiska fizyczne leżące u podstaw działania przyrządów, urządzeń i systemów wchodzących w zakres zainteresowań tej dziedziny. Z tych powodów staje się

oczywiste, że ani lasery, ani detektory nie mogą być traktowane jako przyrządy fotoniczne. Natomiast światłowody i wszelkie podzespoły na nich oparte są oczywiście podzespołami fotonicznymi.

Jeżeli przyjmiemy taki punkt widzenia, to definicje fotoniki i optoelektroniki mogłyby być sformułowane np. następująco:

— Fotonika: dziedzina nauki i techniki zajmująca się zjawiskami związanymi z propagacją fotonów oraz podzespołami (zwanymi często „przyrządami"), urządzeniami i systemami opartymi na ich wykorzystaniu jako nośników informacji. Tak rozumiana fotonika obejmuje technikę światłowodową, optykę włóknową, elektrooptykę i optykę zintegrowaną.

— Optoelektronika: dziedzina elektroniki zajmująca się podzespołami (dyskretnymi i układami scalonymi), których działanie opiera się na wykorzystaniu zjawisk wynikających z występującego w ciałach stałych, cieczach i gazach przetwarzania energii elektrycznej na optyczną lub odwrotnie – w wyniku wzajemnego oddziaływania z materią fotonów i elektronów. Pod względem merytorycznym wyodrębnia się w niej wyraźnie dział nazywany optoelektroniką półprzewodnikową oraz dział określany kiedyś pojęciem optoelektronika kwantowa, a obejmujący lasery na ciele stałym, gazowe i barwnikowe. Wyróżnia się również dział nazywany optoelektroniką zintegrowaną. Obecnie podziały te zacierają się z uwagi na rosnące zastosowanie podzespołów półprzewodnikowych w technice laserowej oraz postępującą integrację przyrządów optoelektronicznych i elektronicznych wytwarzanych na wspólnym podłożu.

WN — W zasadzie wszyscy się ze sobą zgadzają, różniąc się jedynie w pewnych niuansach i tylko trochę rozszerzając lub zawężając zakres znaczeniowy tego słowa w indywidualnych przypadkach. Jedyną istotną kontrowersję do tej pory stanowi moim zdaniem włączenie – lub nie – całego zakresu widmowego fal elektromagnetycznych do tej definicji. Mnie osobiście włączenie wydawało się oczywiste, gdyż foton to przecież kwant promieniowania, niezależnie od jego częstotliwości. Przeważa jednak chyba pogląd odmienny, zapewne głównie spowodowany pojawiającą się wówczas nieostrością samej definicji i być może konsekwencją objęcia przez tak zdefiniowaną fotonikę zagadnień niemających z nią nic wspólnego w powszechnym rozumieniu tego słowa, np. propagacji fal radiowych, rentgenografii, techniki radarowej. Wobec tego sam się wycofuję z poprzedniej mojej opinii i przychylam się do zdania, że to, co obecnie rozumiemy pod nazwą „fotonika", obejmuje tylko promieniowanie widzialne oraz sąsiednie zakresy podczerwieni i nadfioletu. Podtrzymuję natomiast moją opinię co do tego, że definicja fotoniki powinna wyraźnie precyzować fakt, iż zajmuje się ona wykorzystaniem promieniowania elektromagnetycznego z tego zakresu jako nośnika informacji.

Bardzo mi się podoba przewrotna wypowiedź prof. Mroziewicza. Spojrzał on na cały problem z bardzo niespodziewanej strony, tj. zastanowił się, dlaczego w ogóle pojawił się ten nowy termin i komu on był potrzebny. W swej opinii ma dużo racji. Z drugiej jednak strony bardzo mnie niepokoi w innej części jego tekstu próba wykluczenia z fotoniki generatorów i detektorów promieniowania. Skoro fotonika ma obejmować „podzespoły, urządzenia i systemy oparte na wykorzystaniu fotonów jako nośników informacji", powinna w sposób naturalny zawierać w sobie i to, co jest zarówno na początku, jak i na końcu łącza optycznego, czyli generator promieniowania i jego detektor. W przeciwnym razie będziemy mieć do czynienia z fotoniką tylko między przyrządami optoelektronicznymi.

Należy tu jeszcze przypomnieć opinię B.J. Thompsona [1], który stwierdził, że fotonika jest kluczem do nauczania i sprzedawania optyki. Jest to spójne ze słowami prof. Mroziewicza.

BM — Na zakończenie wypada stwierdzić, że niestety sprawa, którą się zajmujemy, jest w pewnym sensie beznadziejna. Termin „fotonika" będzie funkcjonował zgodnie z wolą środowisk, które mają w tej sprawie najwięcej do powiedzenia, i nie będą to środowiska polskie. My natomiast, chcąc nie chcąc, będziemy zmuszeni do tej sytuacji się dostosować, podobnie jak w wielu innych przypadkach. Nie oznacza to oczywiście, że nie warto nad zagadnieniem dyskutować, choćby w celu ujednolicenia naszych poglądów oraz stworzenia podstaw do wzajemnego zrozumienia.

TS — Moja nadzieja na precyzyjne zdefiniowanie fotoniki na nasz polski użytek okazała się trudna do spełnienia. Mimo wszystko zapytam jeszcze Panów o poglądy na sprawę nauczania fotoniki. Program nauczania (curriculum) w dzie-

dzinie fotoniki będzie się różnił od uczelni do uczelni, bo będzie zależał od nauczycieli i ich przygotowania. Niemniej jednak powinno się ustalić, co składa się na minimum programowe w fotonice. Jest to zadanie trudniejsze od poprzedniego. Nie sądzę więc, że uda się je ustalić od razu, ale może warto i tego spróbować.

WU — Na Politechnice Wrocławskiej od roku akad. 1999/2000 Wydział Podstawowych Problemów Techniki na kierunku *Fizyka techniczna* oferuje studia w dziedzinie fotoniki z oddzielną rekrutacją. Przyjmujemy rocznie ok. 50 studentów. Program nauczania został dostosowany do naszych możliwości dydaktycznych oraz badawczych i jest dostępny na stronach internetowych Politechniki Wrocławskiej [8]. Pierwsze lata pracy oceniamy bardzo pozytywnie.

WN — Zagadnienie wprowadzenia fotoniki do programów studiów uniwersyteckich jest problemem niezwykłej wagi. Dyskusja panelowa zorganizowana w trakcie XIV Szkoły Optoelektroniki PAN w Starych Jabłonkach w listopadzie 2000 r. uprzytomniła jej uczestnikom istotną potrzebę kształcenia specjalistów w dziedzinie fotoniki, na których pojawił się rosnący popyt na rynku pracy.

Studenci kierunku *Fizyka techniczna* mojego macierzystego Wydziału Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej mają kilka wykładów z pokrewnych fotonice dziedzin, np. z elektroniki kwantowej i optyki nieliniowej, fizyki laserów półprzewodnikowych, fizyki detektorów itd. Niestety, rozbudowany z oczywistych przyczyn program innych działów fizyki uniemożliwia szersze uwzględnienie fotoniki w obecnym programie studiów, natomiast szczupłość środków finansowych nie pozwala na uruchomienie fotoniki jako nowej specjalności (obecnie oferujemy trzy specjalności: fizyka ciała stałego, fizyka komputerowa i fizyka medyczna). Sadzę, że podobne trudności uniemożliwiają wprowadzenie interdyscyplinarnej fotoniki do oficjalnych programów studiów na innych wyższych uczelniach.

Obecnie doraźne rozwiązanie tego problemu widzę w odpowiednio wyprofilowanych studiach podyplomowych oraz w tzw. intensywnych programach, realizowanych we współpracy z uczelniami zagranicznymi w ramach programu Socrates–Erasmus, który jest przeznaczony do uzupełniania wiedzy w zakresie szybko rozwijających się interdyscyplinarnych działów nauki.

Artykuł został przygotowany w ramach projektu Tempus-PHARE S_JEP-12232-97.

Literatura

[1] B.J. Thompson, „Education in Optics – Challenge at Hand", *Proc. SPIE* **978**, 2 (1988).

[2] M.J. Soileau, J.E. Pearson, „Is optics a separate discipline", *Proc. SPIE* **3190**, 141 (1997).

[3] http://www.phg.ulg.ac.be/eosopen/.

[4] http://www.cpo-optics.org/.

[5] *The Photonics Dictionary*, t. 4, wyd. 44 (Laurin Publishing Company, 1998).

[6] *Harnessing light – Optical science and engineering for the 21st century* (National Academy Press, Washington, D.C. 1998).

[7] *Optics*, International Commission for Optics newsletter, styczeń 2001.

[8] http://www.if.pwr.wroc.pl.

Od optyki kwantowej do fotoniki

W dniach od 28 czerwca do 3 lipca 2001 r. odbyła się w Zakopanem konferencja „From Quantum Optics to Photonics", zorganizowana pod auspicjami Europejskiego Towarzystwa Optycznego (EOS) przez Sekcję Optyki PTF, Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego i Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod przewodnictwem Wojciecha Gawlika (UJ) i Katarzyny Chałasińskiej-Macukow (UW). Program naukowy konferencji obejmował bardzo szeroki zakres zagadnień od optyki kwantowej do fotoniki, w tym optykę kwantową i nieliniową, informację kwantową i optykę informacyjną, optoelektronikę oraz elementy i materiały stosowane w fotonice.

Głównym założeniem organizatorów było przedstawienie możliwości rozwoju, jakie pojawiają się na pograniczu dotychczasowych dyscyplin, i rozwoju nowych interdyscyplinarnych kierunków. Ta nieco ryzykowna idea oparcia programu na dość różnorodnej tematyce okazała się bardzo trafna i owocna. Doskonałe wykłady znakomitych specjalistów z różnych krajów Europy spełniły oczekiwania organizatorów i wzbudziły duże zainteresowanie uczestników.

Konferencję rozpoczął laureat przeznaczonej dla młodych badaczy Nagrody Fresnela EPS za rok 2000 – Fabien Bretenaker (Uniwersytet Nantes II, Francja). Jego wykład: „Lasery o dwóch częstościach generacji: od szumu kwantowego do fotoniki" doskonale oddawał szeroką tematykę konferencji. W wykładzie tym przedstawiono bardzo ciekawe możliwości generacji przestrajalnego promieniowania podczerwonego zmodulowanego częstościami z zakresu GHz. Christopher Dainty (Imperial College, Londyn) mówił o zastosowaniach badań rozkładu sodu w mezosferze dla optyki adaptacyjnej. Tematykę zastosowań optyki w medycynie reprezentowały wykłady: „Pomiary, modelowanie i poprawa jakości obrazu optycznego oka ludzkiego" Rafaela Navarro z Instytutu Optyki w Madrycie oraz Bronisława Grzegorzewskiego z Akademii Medycznej w Bydgoszczy na temat optycznych badań sedymentacji krwi. O swoich fascynujących eksperymentach z pojedynczymi cząsteczkami, wykonanych na Uniwersytecie w Konstancy, mówił Vahid Sandoghdar (obecnie w ETH w Zurychu). Wykład ten wprowadzał w tematykę nanostruktur i mikrorezonatorów. Kontynuowana ona była przez Macieja Bugajskiego z Instytutu Technologii Elektronowej w Warszawie, który w wykładzie „Układy fotonowe ze wzmocnieniem w rezonatorze" przedstawił wyniki swojego zespołu dotyczące m.in. laserów typu VCSEL, tj. laserów półprzewodnikowych z rezonatorem pionowym (Vertical Cavity Semiconductor Lasers), oraz Władysława Żakowicza z IF PAN, który omówił wyniki swoich badań emisji spontanicznej atomów w pobliżu rozmaitych obiektów.

Z kolei obszerną dziedzinę z pogranicza optoelektroniki i fotoniki reprezentowały wykłady Mohammada Taghizadekha (Uniwersytet Herriotta–Watta, Edynburg) nt. elementów mikrooptycznych i optoelektronicznych stosowanych w łączności optycznej, Juana Camposa (Uniwersytet Autonomiczny w Barcelonie) nt. charakteryzacji i optymalizacji wyświetlaczy ciekłokrystalicznych, B.J. Hoendersa (Uniwersytet w Groningen, Holandia) nt. rozpraszania światła na kryształach fotonowych, Ari Friberga (Politechnika Królewska, Sztokholm) nt. radiometrii z użyciem częściowo spójnych źródeł planarnych oraz Siergieja Odułowa (Ukraińska Akademia Nauk, Kijów) nt. zapisu holograficznego i mieszania czterech fal w ferroelektrykach fotorefrakcyjnych. Efekty zderzeniowe w prostych atomowych układach laserowych omówił Aleksander Plechanow (Rosyjska Akademia Nauk, Nowosybirsk), a Piotr Wasylczyk z IFD UW przedstawił bardzo ciekawe wyniki badań optycznych efektów nieliniowych za pomocą femtosekundowych impulsów laserowych.

Dwa wykłady dotyczyły zagadnień kwantowej informacji: Marek Żukowski z IF UG mówił o związku informacji kwantowej z zastosowaniem interferencji wielofotonowej, zaś Bjoern Hessmo (Politechnika Królewska, Kista, Szwecja) o niektórych aspektach splątania kwantowego. Konferencję zamykały dwa referaty z zakresu fizyki zimnych atomów: Marek Trippenbach z IFD UW omówił zachowanie się kondensatu Bosego–Einsteina w tzw. sieciach optycznych, a Jerzy Zachorowski (IF UJ) przedstawił wyniki spektroskopowych badań z pierwszą polską pułapką magnetooptyczną na Uniwersytecie Jagiellońskim.

W konferencji wzięło udział ok. 100 uczestników, w tym ok. 30 spoza Polski. Uzyskali oni nie tylko lepszą orientację w najbardziej aktualnych tematach współczesnej optyki i tendencjach jej rozwoju, ale również motywację do dalszych własnych poszukiwań nowych problemów. Wydaje się, że optyka stwarza idealną perspektywę dla takich krajów, jak Polska, które dysponują sporym potencjałem intelektualnym, ale nie mogą sobie pozwolić na poważne inwestycje. We współczesnej optyce bowiem od nakładów finansowych ważniejsze jest know-how. Liczą się też szerokie kontakty i wymiana międzynarodowa, w której Polska od dawna aktywnie uczestniczy.

Podczas konferencji odbyło się też doroczne spotkanie członków EOS (EOS Annual Meeting) z walnym zebraniem członków tego stowarzyszenia. Odbyły się również zebrania komitetu wykonawczego, zarządu i komitetu doradczego EOS. Sekcja Optyki PTF jest członkiem zbiorowym EOS, w którego władzach jest Kata-

rzyna Chałasińska-Macukow (Komitet Doradczy) i Wojciech Gawlik (Rada Dyrekcyjna).

Wojciech Gawlik
Instytut Fizyki UJ
Kraków

Katarzyna Chałasińska-Macukow
Wydział Fizyki UW
Warszawa

Pasywacja powierzchni półprzewodników

W dniach 10–13 września 2001 r. w hotelu „Narcyz" w Ustroniu odbyło się międzynarodowe seminarium naukowe „II International Seminar on Semiconductor Surface Passivation – SSP 2001". Seminarium, zorganizowane pod auspicjami Sekcji Nauki o Powierzchni Polskiego Towarzystwa Próżniowego (PTP), było już drugim, kolejnym spotkaniem naukowym specjalistów zajmujących się badaniami naukowymi z zakresu pasywacji powierzchni półprzewodników w aspekcie zastosowań w mikro- i nanoelektronice. O randze Seminarium świadczy fakt, że było konferencją satelitarną do odbywającej się w Krakowie międzynarodowej konferencji naukowej „XX European Conference on Surface Science – ECOSS 2001".

Głównym organizatorem Seminarium SSP 2001 był Zakład Mikroelektroniki Instytutu Fizyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach, a przewodniczącym Komitetu Naukowego i Organizacyjnego – autor tej notatki.

Ogółem w Seminarium SSP 2001 wzięło udział blisko 50 uczestników, w tym ponad 30 z zagranicy, m.in. z Anglii, Brazylii, Francji, Indii, Korei, Niemiec, Ukrainy, Węgier, Włoch, Rosji, Ukrainy i USA. Seminarium stało się okazją do wymiany informacji, doświadczeń i pomysłów, forum do szerokiej dyskusji na temat aktualnie prowadzonych badań z tej tematyki w świecie, oraz umożliwiło przedstawienie swoich osiągnięć naukowych, zwłaszcza młodym specjalistom. Stało się ponadto okazją do nawiązania i zacieśnienia kontaktów osobistych.

Seminarium rozpoczął autor tego sprawozdania, który m.in. serdecznie powitał uczestników SSP 2001, w tym członków Międzynarodowego Komitetu Doradczego (MKD) z jego przewodniczącym – prof. Hidekim Hasegawą z Uniwersytetu Hokkaido w Sapporo (Japonia), który z kolei powitał uczestników Seminarium w imieniu MKD, a następnie w ramach sesji otwarcia wygłosił referat plenarny pt. „Obecny stan i główne zagadnienia powierzchniowej pasywacji półprzewodników III–V – od układów półklasycznych do struktur kwantowych".

Łącznie wygłoszono 15 referatów na zaproszenie (w większości przeglądowych) i 14 komunikatów na temat aktualnie prowadzonych badań doświadczalnych i teoretycznych.

Przedmiotem pierwszej sesji tematycznej pierwszego dnia Seminarium były badania teoretyczne powierzchni półprzewodników i półprzewodnikowych granic fazowych. Referaty przeglądowe przedstawili: prof. Gan P. Srivastava z Uniwersytetu w Exeter, prof. Armando Ferraz z Uniwersytetu w São Paulo (Brazylia) oraz dr Bogusława Adamowicz z Zakładu Mikroelektroniki PŚI w Gliwicach. W trakcie kolejnej sesji tematycznej pierwszego dnia Seminarium w godzinach popołudniowych, dotyczącej nowych kierunków w badaniach doświadczalnych półprzewodnikowych granic fazowych, referaty przedstawili m.in. prof. Thomas Chasse z Uniwersytetu w Lipsku (Niemcy) oraz prof. Karsten Horn z Instytutu Fritza Habera Towarzystwa Maksa Plancka w Berlinie. Podczas ostatniej sesji tematycznej pierwszego dnia Seminarium, poświęconej zastosowaniom półprzewodnikowych struktur niskowymiarowych w fotonice, referat wygłosił prof. Maciej Bugajski z Instytutu Technologii Elektronowej w Warszawie. Na zakończenie tej sesji odbyła się ponadto prezentacja aparatury naukowej do badań powierzchni materiałów, przygotowana przez krajowych producentów i dystrybutorów – sponsorów Seminarium. W godzinach wieczornych tego samego dnia odbyła się natomiast sesja plakatowa, na której przedstawiono 15 komunikatów z prac własnych.

W drugim dniu obrad Seminarium odbyła się trzyczęściowa sesja poświęcona badaniom pasywacji siarkowej powierzchni i granic fazowych półprzewodników grupy III–V, w trakcie której referaty wygłosili m.in.: prof. Yasuo Fukuda z Uniwersytetu Shizuoka w Hamamatsu (Japonia), prof. Hyung-Ho Park z Uniwersytetu Yonsei w Seulu (Korea), prof. Ghader Eftekhari z Uniwersytetu Stanu Nowy Jork (USA) oraz dr Elena Konienkowa z Instytutu Fizyko-Technicznego im. Joffego w St. Petersburgu (Rosja). Na zakończenie obrad drugiego dnia Seminarium odbyła się sesja poświęcona zastosowaniu procesu pasywacji w technologii kontaktów elektrycznych do przyrządów mikroelektronicznych, na której referat wygłosił prof. Dieter Zahn z Uniwersytetu w Chemnitz (Niemcy).

W trzecim dniu obrad odbyła się również trzyczęściowa sesja poświęcona nowym kierunkom w pasywacji powierzchni półprzewodników i granic fazowych, na której referaty wygłosili m.in.: prof. Bernard Gruzza z Uniwersytetu Blaise'a Pascala w Clermont-Ferrand (Francja), prof. Janos Mizsei z Politechniki w Budapeszcie oraz dr Emil Pincik ze Słowackiej Akademii Nauk w Bratysławie.

Na zakończenie obrad odbyła się tzw. sesja okrągłego stołu „Stan obecny i perspektywy pasywacji powierzchni półprzewodników", którą prowadził prof. Hasegawa. Owocem bardzo ożywionej dyskusji, z udziałem obecnych na SSP 2001 światowej klasy specjalistów z zakresu pasywacji powierzchni półprzewodników, jest idea zorganizowania międzynarodowego konsorcjum wspólnych badań naukowych z tego zakresu; miałoby ono zająć się nierozwiązanymi problemami naukowymi i technologicznymi z tej dziedziny. Podsumowania bardzo interesujących obrad Seminarium dokonał również prof. Hasegawa, natomiast uroczystego zamknięcia Seminarium – przewodniczący Komitetu Organizacyjnego.

Organizatorzy wydali specjalny zeszyt z programem i streszczeniami przedstawionych referatów i komunikatów. Pełna treść referatów plenarnych oraz komunikatów plakatowych po recenzjach zostanie opublikowana w specjalnym numerze *Vacuum*, czasopisma o zasięgu światowym z tzw. listy filadelfijskiej, wydawanego przez Elseviera.

W ramach programu socjalnego Seminarium, któremu towarzyszyła niestety chłodna jesienna pogoda, odbyły się m.in. przyjęcie powitalne uczestników, tradycyjna uroczysta kolacja oraz ognisko z pieczeniem kiełbasek.

W powszechnej opinii uczestników, w tym wielu wybitnych specjalistów z tematyki powierzchni półprzewodników (także członków komitetów redakcyjnych światowych czasopism naukowych), Seminarium SSP 2001 dobrze wypełnia lukę w systemie konferencji naukowych z tematyki pasywacji powierzchni półprzewodników organizowanych w świecie. Zgodnie ze wstępnymi ustaleniami kolejne Seminaria SSP będą dalej organizowane cyklicznie co 2 lata, z udziałem specjalistów z ważniejszych ośrodków światowych z tej tematyki.

Seminarium było finansowane częściowo z opłat konferencyjnych wnoszonych przez uczestników, sponsorów, a częściowo z dotacji Komitetu Badań Naukowych, m.in. poprzez Polskie Towarzystwo Próżniowe.

Jacek Szuber
Instytut Fizyki PŚl
Gliwice

Fizyka i Technika

W dniach 9–10 listopada 2001 r. odbyło się w Warszawie Sympozjum „Fizyka i Technika", zorganizowane na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej pod patronatem JM Rektora PW, prof. Jerzego Woźnickiego. Przewodniczącym Komitetu Programowego Sympozjum był dziekan Wydziału, prof. Franciszek Krok, a Komitetu Organizacyjnego – prof. Jerzy Garbarczyk, prodziekan ds. nauki. Celem Sympozjum było ukazanie więzi fizyki i techniki, a okazją do jego zorganizowania – obchody Roku Jubileuszowego 175-lecia tradycji Politechniki Warszawskiej i niedawna (1998 r.) setna rocznica fizyki na PW.

W piątek 9 listopada o godz. 10 rano w pięknie odrestaurowanej Auli Wydziału JM Rektor otworzył wystawę poświęconą historii PW i współczesnym badaniom uprawianym w Instytucie Fizyki. W godzinę potem w auli wykładowej nastąpiło otwarcie Sympozjum. Dziekan Krok serdecznie przywitał wszystkich licznie zgromadzonych gości i prominentów, w tym: JM Rektora i prorektorów PW; byłego rektora Uniwersytetu Warszawskiego, prof. Andrzeja K. Wróblewskiego; senatora Zbigniewa Romaszewskiego, fizyka; dziekanów wydziałów PW oraz zaprzyjaźnionych dziekanów wydziałów fizyki innych uczelni i dyrektorów instytutów Polskiej Akademii Nauk; wreszcie prezesa-elekta Polskiego Towarzystwa Fizycznego, prof. Macieja Kolwasa. Odnosząc się do tematu Sympozjum, prof. Krok nazwał fizykę zwornikiem nauk technicznych i przypomniał, że już przed 100 laty prof. Wiktor Biernacki wykładał fizykę w tym samym gmachu. Następnie rektor Woźnicki przypomniał, że WF jest najmłodszym wydziałem Politechniki (został utworzony w końcu 1998 r. jako kontynuacja części dawnego Wydziału Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej) i potwierdził zamiar budowy siedziby Wydziału Matematyki i Nauk Informacyjnych, również wydzielonego podówczas z WFTiMS. „Fizyka, matematyka i technika – powiedział – leżą w wierzchołkach jednego trójkąta". Zaraz potem dziekan bratniego Wydziału Fizyki UW, prof. Katarzyna Chałasińska-Macukow, w bardzo serdecznym wystąpieniu nazwała fizykę matką nauk technicznych i pogratulowała dziekanowi Krokowi sukcesów WF PW za jego kadencji, kończąc słowami: „Franku, tak trzymać!". Tę część Sympozjum zakończył jego gospodarz, czyli prof. Krok, odczytaniem życzeń od: ministra nauki, prof. Michała Kleibera; JM Rektora Politechniki Poznańskiej, prof. Jerzego Dembczyńskiego; dziekana Wydziału Fizyki i Techniki Jądrowej Akademii Górniczo-Hutniczej, prof. Kazimierza Jelenia; wreszcie od mieszkającego w Marsylii prof. Józefa Hurwica, wielce zasłużonego dla rozwoju fizyki na PW emerytowanego profesora tej Uczelni, który niestety z powodów od siebie niezależnych nie mógł wziąć udziału w Sympozjum.

Dziekan Krok otwiera – w obecności rektora Politechniki Warszawskiej, prof. Woźnickiego – wystawę w Auli Wydziału poświęconą 150-leciu tradycji PW (fot. Andrzej Orłowski).

Następne sesje aż do końca Sympozjum prowadził prodziekan Garbarczyk. Wszystkie referaty (z jednym wyjątkiem) były półgodzinne, a dyskusję nad nimi słuchacze mogli prowadzić z wykładowcami podczas przerw na kawę. Piątkową sesję poranną rozpoczął wykład dzielnie walczącego z przeziębieniem prof. Włodzimierza Zycha (WF PW), który szczegółowo i za pomocą wielu pięknie przygotowanych reprodukcji starych zdjęć i innych materiałów przedstawił historię ponadstuletniej obecności fizyki na swej macierzystej uczelni. Kolejne referaty (prof. Lucjana Jacaka z Instytutu Fizyki Politechniki Wrocławskiej o kwantowych komputerach, prof. Jacka Baranowskiego z Instytutu Fizyki Doświadczalnej UW o nie-

bieskiej optoelektronice i prof. Tomasza Dietla z IF PAN o spintronice) przeniosły słuchaczy w przyszłość zastosowań fizyki w technice informacyjnej, rozpościerającą się przed nami w coraz realniejszym kształcie. Wrażenie obcowania z najbardziej aktualnymi tematami współczesnego pogranicza fizyki i techniki pogłębiło zwiedzanie Centrum Fotoniki i Nowych Materiałów WF UW.

Fragment auli wykładowej na początku pierwszej sesji Sympozjum. W pierwszym rzędzie władze dziekańskie Wydziału Fizyki PW – od prawej: prof. Krok, prof. Bacewicz i prof. Garbarczyk (fot. Andrzej Orłowski).

Po przerwie obiadowej wysłuchaliśmy 3 referatów. Najpierw prof. Jerzy Kociński (WF PW) opowiedział o pracach Mieczysława Wolfkego i Szczepana Szczeniowskiego, wybitnych fizyków pracujących na PW. Następnie prof. Leszek Adamowicz (WF PW) w referacie przygotowanym wspólnie z prof. Ireneuszem Strzałkowskim ukazał sprzężenie fizyki i techniki w dziedzinie badań materiałowych. Wreszcie na koniec tej sesji prof. Łukasz A. Turski z Centrum Fizyki Teoretycznej PAN i Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego wygłosił godzinny wykład o symetrii i prawie podobieństw w fizyce oraz materii ożywionej. O godzinie 18 w krużgankach Auli rozpoczęło się spotkanie towarzyskie, podczas którego P.T. Dziekani i znamienici goście z innych uczelni wygłosili krótkie adresy, przekazując najlepsze życzenia dla gospodarzy Sympozjum. Piękna iluminacja dachu Auli i smaczne jadło stworzyły doskonałą atmosferę dla ożywionych, trwających kilka godzin rozmów kuluarowych.

W sesji sobotniej, trwającej od 9 rano do niemal drugiej po południu, wygłoszono 8 półgodzinnych wykładów. Najpierw o poszukiwaniu nowych źródeł energii w dziedzinach, którymi się zajmują, mówili dwaj gospodarze Sympozjum: prof. Krok (w jonice ciała stałego) i prof. Rajmund Bacewicz (w fotowoltaice). Następnie prof. Antoni Rogalski z Wojskowej Akademii Technicznej dokonał szerokiego przeglądu współczesnych detektorów podczerwieni, wspominając także o detektorach innych zakresów promieniowania elektromagnetycznego. Kolejne dwa wykłady po przerwie na kawę przedstawili znów profesorowie WF PW: Janusz Hołyst przekonał wszystkich słuchaczy o użyteczności badań chaosu deteministycznego w technice, a Jan Żebrowski opowiedział o zastosowaniach różnych metod fizycznych w diagnostyce medycznej. Następne dwa interesujące wykłady dotyczyły półprzewodników. Najpierw prof. Maciej Bugajski z Instytutu Technologii Elektronowej przedstawił przegląd najnowszych osiągnięć fotoniki półprzewodnikowej, a potem dr hab. Mirosław Karpierz z WF PW omówił badania optoelektroniczne i fotoniczne prowadzone w swym macierzystym ośrodku. Bardzo ciekawy był także ostatni wykład, wygłoszony przez prof. Jana Plutę z WF PW i przedstawiający wyniki współprac międzynarodowych z ośrodkami amerykańskimi i francuskimi w dziedzinie fizyki jądrowej. Sympozjum zakończyło krótkie pożegnanie uczestników przez prof. Kroka.

Podsumowując moje wrażenia jako słuchacza wykładów i uczestnika innych punktów programu Sympozjum pragnę podkreślić, że uważam je za bardzo udane przedsięwzięcie, i gratuluję Organizatorom pomysłu oraz jego wykonania. Program był ciekawy merytorycznie i rzeczywiście pozwalał słuchaczom nie tylko zorientować się w kilku ważnych i aktualnych nurtach badań fizycznych o dużym potencjale zastosowań w technice, lecz także lepiej poznać badania prowadzone na Wydziale Fizyki PW. Wypada tylko żałować, że w audytorium było stosunkowo mało młodzieży – studentów i doktorantów WF PW, była to bowiem świetna okazja zapoznania ich z fizyką „na gorąco". Myślę jednak, że ewentualne następne środowiskowe sympozja o podobnym charakterze – jeśli będą organizowane, co byłoby ze wszech miar wskazane – odbędą się już z licznym udziałem młodych adeptów fizyki, także z innych ośrodków warszawskich.

Jerzy Gronkowski
Instytut Fizyki Doświadczalnej UW
Warszawa

RECENZJE

Fizyka polimerów

Władysław Przygocki, Andrzej Włochowicz: *Fizyka polimerów. Wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001, s. 368.

Niekrystaliczne ciała stałe stanowią specyficzną klasę materiałów o zwartym upakowaniu atomów, charakterystycznym dla stanów skondensowanych zarówno krystalicznych jak i ciekłych. Od stanu krystalicznego odróżnia je brak dalekiego uporządkowania, a od stanu ciekłego – zdolność zachowania określonego kształtu. Klasycznym przykładem niekrystalicznego ciała stałego są polimery organiczne, których nieregularna przestrzenna struktura cząsteczkowa przeciwdziała krystalizacji.

W ostatnich latach nastąpił ogromny wzrost znaczenia polimerów w technologii przemysłowej; nie sposób przecenić ich roli również w procesach życiowych. Liczba naturalnych i sztucznie wytwarzanych związków polimerowych jest ogromna. Inżynieria chemiczna projektuje polimery pod kątem specyficznych zastosowań jako materiały konstrukcyjne, w kosmetykach i lekach. Trwają prace nad poszukiwaniem nowych, udoskonalonych polimerów, np. przewodzących prąd elektryczny, dających światło pod wypływem przepływu prądu lub użytecznych w bateriach słonecznych. Dalsze możliwości zastosowania polimerów wydają się nieograniczone. Obok zalet polimery wykazują także wady, np. niedegradowalność biochemiczną odpadów zawierających polimery oraz zmianę właściwości optycznych lub elektrycznych pod wpływem światła, temperatury i cech środowisk, w których funkcjonują. Wyjaśnienie właściwości polimerów sprowadza się do znalezienia ich korelacji ze strukturą, opisywaną w sposób tradycyjny lub językiem stosowanym do opisu syntezy chemicznej.

Fizyka polimerów W. Przygockiego i A. Włochowicza jest podręcznikiem przeznaczonym dla studentów wydziałów chemicznych, włókienniczych, fizycznych i inżynierii materiałowej oraz inżynierów zainteresowanych zastosowaniem polimerów. Wymaga ona od czytelnika przygotowania z termodynamiki oraz znajomości ogólnych mechanicznych właściwości materiałów. Nie jest to pierwsza pozycja napisana przez tych naukowców. Inny przykład ich współpracy to *Fullereny – nowa alotropowa odmiana węgla* (Wyd. PŁ, 1996) oraz *Fulereny i nanorurki. Własności i zastosowanie* (WNT, 2001).

Prof. dr hab. Andrzej Włochowicz ukończył Wydział Włókienniczy Politechniki Łódzkiej w 1955 r. Doktorat uzyskał w 1963 r., habilitował się 7 lat później. Od 1972 r. pracuje w Filii PŁ w Bielsku-Białej (obecnej Akademii Techniczno-Humanistycznej). Głównym obszarem jego zainteresowań jest fizyka włókien, w szczególności zastosowanie w niej dyfrakcji rentgenowskiej. Zajmuje się także chemią polimerów włóknotwórczych i włókien. Jest autorem bądź współautorem ok. 200 artykułów w krajowych i zagranicznych czasopismach naukowych. Dr Władysław Przygocki jest także pracownikiem ATH.

Na polskim rynku wydawniczym począwszy od 1970 r. pojawiały się książki poświęcone właściwościom fizycznym polimerów. Były to: H. Morawetz, *Fizykochemia roztworów makrocząsteczek* (1970); G.W. Urbańczyk, *Fizyka włókna. Molekularna i nadmolekularna struktura włókna* (1970); J.F. Rabek, *Podstawy fizykochemii polimerów* (1977); B. Łączyński, *Tworzywa wielkocząsteczkowe. Rodzaje i własności* (1982); M. Kryszewski, *Semiconducting Polymers* (1980); W. Przygocki, *Metody fizyczne badań polimerów* (1990); R. Zallen, *Fizyka ciał amorficznych* (1994); F. Starzyk, *Wstęp do fizyki makrocząsteczek* (1998); W. Łużny, *Wstęp do nauki o polimerach* (1999). Każda z nich omawia różne właściwości polimerów, często ujmując ten sam materiał w nieco inny sposób i używając różnej terminologii, zaczerpniętej głównie z języka opisu syntezy. *Fizyka polimerów* jest podręcznikiem, który porządkuje i zbiera obecny stan wiedzy dotyczący polimerów, ujmując temat w sposób jednolity, i dzięki temu jest bardzo cenną pozycją.

Omawiana książka składa się 12 rozdziałów, z których każdy stanowi odrębną całość, zakończoną zestawieniem literatury źródłowej. Dzięki temu każdy z tych rozdziałów można czytać nie znając treści rozdziału poprzedniego. Dla wielu czytelników może to stanowić zaletę tego podręcznika.

W pierwszym rozdziale opisano strukturę makrocząsteczek, wprowadzając podstawowe definicje i pojęcia, m.in. takie jak konfiguracja, stereoizomeria i konformacja, w drugim zaś – przemiany fazowe występujące w polimerach, z wprowadzeniem klasyfikacji tych przemian według Ehrenfesta. Do opisu zjawisk w otoczeniu punktu krytycznego użyto wykładników krytycznych, które są mało czułe na szczegóły budowy mikroskopowej układu, lecz określone głównie przez jego właściwości makroskopowe. Za układ modelowy przyjmuje się często model Isinga zastosowany dla układu magnetycznego, który umożliwił postęp teorii wielu właściwości polimerów, m.in. teorii elastyczności kauczuku, właściwości fizycznych makrocząsteczek w roztworach, przy obliczaniu elektrycznych momentów dipolowych, anizotropii polaryzowalności makrocząsteczek itp.

Rozdział 3 wprowadza czytelnika w świat modeli perkolacji i fraktali matematycznych w zastosowaniu do wiązań i węzłów sieci polimerowych. Żele polimerowe, czyli półstałe układy dwuskładnikowe o dużej zawartości cieczy, przedstawiono w rozdz. 4. Omówiono teorie żelowania, zarówno klasyczną jak i perkolacyjną.

Modelom uporządkowania w stanie amorficznym poświęcony jest rozdz. 5. Przedstawiono w nim również metody doświadczalne badania polimerów: rozpraszanie

neutronów, interferencję fotoelektronów (EXAFS), niskokątowe rozpraszanie promieniowania rentgenowskiego (SAXS), a ponadto konformację makrocząsteczek w stanie amorficznym w fazie skondensowanej z uwzględnieniem różnych modeli.

W rozdz. 6 dotyczącym stanu szklistego najwięcej uwagi poświęcono mechanizmowi przejścia fazowego do stanu szklistego, czyli wyznaczaniu temperatury zeszklenia, opisowi tego przejścia, wpływowi różnych czynników na temperaturę zeszklenia oraz teoretycznym modelom przemiany w stan szklisty.

Ważną właściwością polimerów jest możliwość ich mieszania z innymi polimerami, co w efekcie daje układy wieloskładnikowe, których właściwości są różne od właściwości polimerów wyjściowych. Opis takich mieszanin przedstawiono w rozdz. 7. Omówiono zarówno metody przygotowania mieszanin polimerowych, jak i teorie równowagi fazowej, sposoby określenia jednorodności czy kinetykę podziału fazowego.

Zjawiska powierzchniowe bardzo często decydują o możliwościach zastosowania polimerów w życiu codziennym. Szczególnie istotne są zjawiska występujące na styku powierzchni polimeru z substancją ciekłą, które decydują o możliwościach zastosowań polimerów. Poświęcono im rozdz. 8. Napięcie powierzchniowe, kąt zwilżania, ciśnienie pod zakrzywioną powierzchnią, adhezja, adsorpcja oraz metody ich pomiarów są tematami tego rozdziału.

Metody badania samej struktury molekularnej powierzchni przedstawiono w następnym rozdziale – dziewiątym. Omówiono metody spektroskopii fotoelektronowej XPS, UPS, SIMS, a także mikroskopii tunelowej i mikroskopii sił atomowych.

W rozdz. 10 przedstawiono proces topnienia polimerów i problemy z tym związane, poświęcając sporo miejsca metodom pomiaru temperatury topnienia. Uwypuklono wpływ częściowej krystaliczności i masy cząsteczkowej na temperaturę topnienia. Przedyskutowano zachowanie kopolimerów i mieszanin polimerowych w procesie topnienia. Z rozdziału tego wynika, że choć topnienie jest bardzo ważnym i znanym od dawna procesem, nie jesteśmy wciąż w stanie ściśle uwzględnić wszystkich jego aspektów.

Osobne zagadnienie to sieci polimerowe. Sieciowanie zmienia całkowicie właściwości badanych polimerów (rozdz. 11). Szczególnie widoczne jest to w takich właściwościach mechanicznych, jak proste odkształcenia typu rozciąganie i ścinanie oraz ściskanie hydrostatyczne. Przedstawiono ponadto charakterystyki sieci polimerowych i teorię termoelastyczności.

Na koniec, w rozdz. 12, przedstawiono wybrane właściwości polimerów stopionych. Szczególny nacisk położono na przepływy, lepkosprężystość liniową, modele mechaniczne oraz interpretację molekularną.

W książce bardzo często występuje słowo „własności", a wydaje się, że – mówiąc o cechach fizycznych i chemicznych – lepiej byłoby używać sformułowania „właściwości".

W trakcie czytania zauważyłem następujące błędy:

s. 17_7: j. (jest) $(-CH_2-CH_2)_n$, p.b. (powinno być) $(-CH_2-CH_2-)_n$;

s. 17_2: j. (T_g), p.b. T_g;

s. 18^1: jest $(-CH_3-CH-CH_2-)_n$, powinno być $(-CHCH_3-CH_2-)_n$;

s. 18^{17}: jest $(-CH_2-CH-C_6H_5-)_n$, powinno być $(-CH_2-CHC_6H_5-)_n$;

s. 19^9: jest $(-C-CH_2-CHCN-)_n$, powinno być $(-CH_2-CHCN-)_n$;

s. 26^8: j. $U_0 = 12{,}1$ kJ/mol, p.b. $U_0 = 12{,}6$ kJ/mol (lub na rys. 1.7b zamienić 12,6 na 12,1);

s. 26, wzór (1.9): j. $U(\varphi) = \frac{1}{2}U_0(1 - \cos^3\varphi)$, p.b. $U(\varphi) = \frac{1}{2}U_0(1 - \cos 3\varphi)$;

s. 37^{12}: j. wzorów (2.3), p.b. wzorów;

s. 39_{15}: j. Wzór (2.23), p.b. Wzór (1.38);

s. 57^{12}: j. Przemiany fazowe pierwszego rodzaju, p.b. *Przemiany fazowe pierwszego rodzaju*;

s. 68_{18}: j. (rys.2.7c), p.b. (rys.2.5c);

s. 152^4: j. (rys. 5.16a), p.b. (rys. 5.15a);

s. 152^{12}: j. na rys. 5.17, p.b. na rys. 5.16;

s. 163: na rys. 6.5 powinny być kółka oznaczające punkty, w których δ ulega zmianie o 10%;

s. 165^4: j. $T_H < T_g$ i $T_g < T_G$, p.b. $T_H < T_g$ i $T_G < T_g$;

s. 167_{18}: j. Jak podano w rozdziale 1, p.b. Jak podano w rozdziale 2.2;

s. 167_{15}: j. Jak wynika z rys. 3.2, p.b. Jak wynika z rys. 2.2;

s. 181^7: j. równanie (7.30), p.b. równanie (6.30);

s. 194^{10}: j. dwufazowych.6, p.b. dwufazowych.;

s. 196, rys. 7.1: brak rozróżnienia binody i spinody, trzeba poprawić strzałki na rysunku;

s. 197, równ. (7.9): brak drugiego warunku;

s. 199, rys. 7.4: na rysunku występują dwa punkty A, trzeba jeden z nich zmienić na inny;

s. 199_9: j. punkty B i B', p.b. punkty ϕ_B i $\phi_{B'}$;

s. 204, równ. (7.18): brak podania warunku;

s. 220, rys.8.4: na rysunku wykres $\cos\theta$ przekracza 1, trzeba skrócić linię;

s. 226_6: j. (rys. 8.7b), p.b. (rys. 8.8b);

s. 254^{12}: j. $E_k = \Delta E = E_3 - E_2 - E_1$, p.b. $E_k = \Delta E = E_1 - E_2 - E_3$;

s. 299^5: j. $\Delta H_m = T\Delta S_m$, p.b. $\Delta H_m = T_m^0 \Delta S_m$;

s. 328^3: w zdaniu „Korzystając z tożsamości Maxwella (11.60) i równania (11.59), otrzymujemy" jest błędne koło – równanie (11.60) miałoby być otrzymane w wyniku połączenia tegoż równania z równaniami (11.59);

s. 329_{13}: j. a równanie (12.65), p.b. a równanie (11.65);

s. 353, równ. (12.63): j. E_m, p.b. G_m;

s. 353, równ. (12.65): j. E_m, p.b. G_m;

s. 354, równ. (12.66): j. E_m, p.b. G_m;

s. 354, równ. (12.68): j. $\sigma\varepsilon_2$, p.b. ε_2;

s. 357^{15}: dodać nr wzoru (12.80);

s. 358^5: j. Na wykresie (12.19), p.b. Na wykresie (12.18);

s. 366_5: przypadkowość stochastyczna 38 – niewłaściwy nr strony.

Podręcznik Przygockiego i Włochowicza stanowi interesujące zestawienie wiedzy na temat wybranych właściwości polimerów, niezwykle cenne dla ludzi zajmujących się tą problematyką. Dzięki dołączeniu do każdego rozdziału wykazu literatury przedmiotu, zarówno w języku polskim jak i w językach obcych, książka może ułatwić dalsze studia.

Podręcznik jest dość obszerny, ale w następnych wydaniach można byłoby rozszerzyć go o wiedzę na temat właściwości fizycznych nieujętych w tej pracy, np. dotyczących optycznych i elektrycznych właściwości polimerów.

Książkę należy polecić nie tylko studentom chemii czy fizyki, ale tym wszystkim, którzy w swojej pracy zajmują się polimerami czy też się nimi interesują. Może ona także być przydatna dla naukowców w ich pracy badawczej i dydaktycznej.

Jerzy Sanetra
Instytut Fizyki PK
Kraków

KRONIKA

PTF

Komisje

Zarząd Główny PTF powołał na kadencję 2002–2004 następujące komisje i ich przewodniczących (nazwiska podajemy w nawiasach): Nagród i Odznaczeń (Henryk Szymczak), ds. Nauczania Fizyki w Szkołach Wyższych (Ireneusz Strzałkowski), ds. Nauczania Fizyki w Szkołach (Barbara Sagnowska), Historii Fizyki (Andrzej Bielski), Legislacyjną (Wiesław A. Kamiński); ds. Współpracy z Zagranicą (Szymon Bauch), ds. Nazewnictwa Fizycznego (Bernard Jancewicz) oraz Popularyzacji i Promocji Fizyki (Urszula Woźnikowska-Bezak), a także sekcje: Nauczycielską (Zofia Gołąb-Meyer) i Optyki (Wojciech Gawlik).

Przewodniczącym Komitetu Głównego Olimpiady Fizycznej jest nadal Jan Mostowski (kadencja do lipca 2002 r.).

B. W.

Tytuły profesorskie

Tytuł naukowy profesora nauk fizycznych, nadany przez Prezydenta Rzeczpospolitej Polskiej, otrzymał w dniu 13 marca 2002 r. Włodzimierz Szczepan Jaskólski (UMK); w dniu 3 kwietnia tytuły otrzymali: Antoni Ciszewski (UWr), Adam Kiejna (UWr), Maria Massalska-Arodź (IFJ, Kraków) i Krystyna Siwek-Wilczyńska (UW).

www.prezydent.pl *B. W.*

Odnowienie doktoratu Wojciecha Królikowskiego

Dnia 21 listopada 2001 r. w sali Senatu Uniwersytetu Warszawskiego w Pałacu Kazimierzowskim odbyła się w ramach dorocznego Święta Uniwersytetu Warszawskiego uroczystość odnowienia doktoratu Wojciecha Królikowskiego, emerytowanego profesora zwyczajnego UW, nestora polskiej fizyki cząstek elementarnych. Uroczystości przewodniczył JM Rektor UW, prof. Piotr Węgleński. Po krótkim, przedstawiającym przebieg przewodu odnowienia doktoratu wystąpieniu Dziekana Wydziału Fizyki UW, prof. Katarzyny Chałasińskiej-Macukow, laudację wygłosił promotor, prof. Stefan Pokorski, przedstawiając osiągnięcia naukowe i zasługi jubilata. Dorobek naukowy Wojciecha Królikowskiego jest bardzo bogaty. Obejmuje ponad 200 publikacji, a wśród nich kilka wyników o dużym znaczeniu dla rozwoju fizyki cząstek elementarnych. Należy tu przede wszystkim wymienić wysunięcie hipotezy o istnieniu neutrina mionowego oraz wprowadzenie do opisu oddziaływań silnych nowej liczby kwantowej, niezbędnej – jak się później okazało – do zbudowania teorii tych oddziaływań. Podsumowując dorobek naukowy jubilata, prof. Pokorski powiedział: „Wojciech Królikowski zajmował się z ogromną intuicją zasadniczymi problemami fizyki cząstek elementarnych".

Po wręczeniu dyplomu głos zabrał sam Jubilat. Swój wykład poświęcił charakterystyce rozwoju fizyki w drugiej połowie XX w. Tak wspominał ukształtowanie się współczesnej teorii oddziaływań fundamentalnych:

„W latach pięćdziesiątych dokonano odkrycia, które można uważać za cezurę między fizyką pierwszej i drugiej połowy wieku, Mianowicie oddziaływania słabe, odpowiedzialne za promieniotwórczość β odkrytą u zarania XX w., okazały się niesymetryczne względem odbicia przestrzennego, podobnie jak lewa dłoń, która zmienia się w lustrze w prawą. Przy tym ta asymetria jest bardzo specyficzna, w pewnym sensie maksymalna: tylko lewe struktury wewnętrzne cząstek elementarnych, będące analogią lewej dłoni, występują w słabych oddziaływaniach prowadzących do rozpadów β. Natomiast jednocześnie okazało się, że w oddziaływaniach elektromagnetycznych oraz oddziaływaniach silnych, leżących u podstaw sił jądrowych odkrytych w pierwszej połowie XX w., występują zawsze zarówno struktury lewe jak i prawe, i to w sposób symetryczny".

Wojciech Królikowski podczas uroczystości odnowienia doktoratu (fot. Marcin Kluczek, zdjęcie udostępnione przez Biuro Informacji i Promocji UW).

Na zakończenie uroczystości Rektor zaprosił zebranych na tradycyjną lampkę wina. Licznie zgromadzeni ko-

ledzy, przyjaciele i uczniowie Jubilata mieli wtedy możność składania mu gratulacji.

Odnowienie doktoratu jest najwyższym zaszczytem, jakim Uniwersytet może obdarzyć doktora, któremu przed laty nadał ten stopień. Zwykle, tak zresztą jak i w tym przypadku, jest to złoty jubileusz doktoratu. Honorowani są więc tylko najwybitniejsi i najbardziej zasłużeni ludzie Uniwersytetu. Do nich niewątpliwie profesor Wojciech Królikowski należy. Ten uczeń Wojciecha Rubinowicza podjął w latach pięćdziesiątych XX w. w ośrodku warszawskim na Hożej badania podstawowych praw rządzących strukturą materii, oparte na współczesnej teorii kwantów. Jest „ojcem" fizyki teoretycznej cząstek i oddziaływań elementarnych w Warszawie, związanym z Instytutem Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego od początku jego istnienia. Inicjując odnowienie doktoratu, społeczność tego Instytutu chciała mu oddać hołd.

Grzegorz Rohoziński

Nagroda im. Marii Skłodowskiej-Curie

W 2001 r. Wydział III Polskiej Akademii Nauk przyznał Nagrodę im. Marii Skłodowskiej-Curie prof. Jackowi Kossutowi z Instytutu Fizyki PAN. Wysoki prestiż tej nagrody przyznawanej na przemian fizykom i chemikom związany jest z faktem, że jest to wyróżnienie przyznawane przez członków PAN: chemików (chemikowi) lub fizyków (fizykowi). Podobnie jak w latach poprzednich, liczba wniosków do nagrody była duża (11); wiele propozycji zawierało rzeczywiste, dobrze udokumentowane osiągnięcia naukowe o wysokiej, światowej randze.

Jacek Kossut otrzymał nagrodę za cykl 12 prac z zakresu fizyki niskowymiarowych struktur z półprzewodników półmagnetycznych, opublikowanych w latach 1993–2001.

Dziedziną działalności naukowej prof. Kossuta jest fizyka fazy skondensowanej. Jego zainteresowania obejmują półprzewodniki, magnetyki i półmagnetyki, układy trójwymiarowe oraz struktury niskowymiarowe. Jest teoretykiem bardzo ściśle współpracującym z eksperymentatorami; sam bierze udział w realizacji doświadczeń, inicjuje nowe badania i eksperymenty. Gdy w latach siedemdziesiątych w Instytucie Fizyki powstawały pierwsze prace dotyczące półprzewodników półmagnetycznych, Jacek Kossut był jednym z głównych autorów teorii tych materiałów, która z czasem stała się polską specjalnością. Prace te stworzyły podwaliny dobrze określonej dziedziny, która w ostatnich kilku latach nabrała światowego rozgłosu w związku z nadziejami, jakie wiązane są z tzw. spintroniką (lub elektroniką spinową), czyli elektroniką wykorzystująca oprócz ładunku elektronu także jego spin, w szczególności w zjawiskach, które mogą mieć decydujące znaczenie dla kwantowego przetwarzania informacji. Laureat aktywnie pracuje również w tych kierunkach. Jego publikacje z początkowego okresu, podobnie jak inne powstające w Polsce wówczas i w latach osiemdziesiątych, dotyczyły kryształów litych, tj. takich, w których nośniki prądu zachowują się jak cząstki o trzech przestrzennych stopniach swobody. Jednocześnie światową tendencją fizyki półprzewodników od końca lat siedemdziesiątych było badanie układów niskowymiarowych, w których elektrony i dziury zachowują się jak cząstki znajdujące się w przestrzeni o efektywnie niższej wymiarowości: dwuwymiarowej w tzw. studniach kwantowych i supersieciach, jednowymiarowej w drutach kwantowych i zerowymiarowej w tzw. kropkach kwantowych. O randze tych prac świadczy choćby trzykrotne przyznanie Nagrody Nobla za prace nad układami o obniżonej wymiarowości: w roku 1986 (Klaus von Klitzing), w roku 1996 (H. Stoermer, D. Tsui i R. Laughlin) oraz ostatnio w 2000 r. (J. Kilby, H. Kroemer i Ż. Ałfiorow). Zwiększający się dystans między badaniami prowadzonymi w Polsce i w innych krajach spowodowany był brakiem dostępu do specjalistycznej aparatury, umożliwiającej otrzymywanie takich struktur półprzewodnikowych. Profesor Kossut w istotny sposób przyczynił się do zahamowania tej niekorzystnej tendencji oraz do znacznego jej zmniejszenia, tak że w chwili obecnej polscy fizycy – specjaliści od półprzewodników – mogą pracować w kraju i pracują nad tymi samymi problemami, jakimi zajmują się ich koledzy w uznanych laboratoriach światowych.

Około 1993 r., w nowych realiach w Polsce, Jacek Kossut zorganizował w IF PAN w Warszawie nowe laboratorium epitaksji z wiązek molekularnych. Należy podkreślić, że w tamtym czasie laboratorium to startowało dosłownie od podstaw pod względem wyposażenia oraz że doświadczenie osób zaangażowanych w jego uruchomienie i prowadzenie było niewielkie. Mimo że technika epitaksji z wiązek molekularnych jest techniką trudną, w krótkim czasie udało się otrzymać w laboratorium prof. Kossuta materiały o charakterystykach nieustępujących podobnym strukturom otrzymywanym w najlepszych laboratoriach światowych (w chwili obecnej w kierowanym przez niego laboratorium otrzymywane są np. studnie kwantowe z materiałów II–VI o największej na świecie ruchliwości elektronów). W wielu przypadkach materiały te są wyjątkowe w skali światowej (np. otrzymywane ostatnio struktury hybrydowe półprzewodnik półmagnetyczny–metal ferromagnetyczny czy otrzymane przed kilku już laty półprzewodniki półmagnetyczne z chromem) i świadczą o oryginalności myślenia oraz metodach pracy kierowanego przez prof. Kossuta laboratorium.

Wybór materiałów półprzewodnikowych otrzymywanych w laboratorium prof. Kossuta był głęboko przemyślany i, jak wspomniano wyżej, stanowił kontynuację polskich tradycji dotyczących półprzewodników półmagnetycznych. Równolegle z otrzymywaniem układów półprzewodników półmagnetycznych o obniżonej wymiarowości prof. Kossut zainicjował badania ich własności fizycznych, początkowo we współpracy z innymi laboratoriami w IF PAN, w Polsce i na świecie, a potem organizując własne laboratorium magnetooptyczne oraz mikroskopii sił atomowych i sił magnetycznych, w którym wypracowane

zostały unikatowe metody badania zjawisk optycznych w mikroskali. Całe przedsięwzięcie należy uznać za sukces, który zaowocował już szeregiem publikacji i zaproszeń dla prof. Kossuta i jego współpracowników do wygłoszenia referatów przeglądowych na prestiżowych konferencjach (np. ostatnio na dużej konferencji amerykańskiego Materials Research Society w Bostonie w 2000 r.), jak również zaproszeniem do napisania prac przeglądowych w ważnych seriach wydawniczych poświęconych materiałom półprzewodnikowym i magnetycznym, takich jak *Landoldt-Börnstein Tables* wydawane przez Springer Verlag czy *Handbook of Magnetic Materials* wydawany od szeregu lat przez K.W.H. Buschowa. Profesor Kossut wytworzył wokół siebie grupę o znacznym potencjale – w okresie ostatnich 5 lat w grupie tej odbyły się trzy habilitacje, trzy obrony prac doktorskich (jedna w ramach polsko-francuskiego programu wspólnych przewodów doktorskich), a trzy następne są w końcowym etapie przygotowania do obrony. Jeden z najaktywniejszych członków zespołu, Grzegorz Karczewski, otrzymał w 2001 r. tytuł profesora.

Wybór prac wymienionych we wniosku o Nagrodę im. Marii Skłodowskiej-Curie obrazuje podstawowe kierunki działalności i osiągnięcia Jacka Kossuta dokonane w ostatnim okresie. Tematyka publikacji potwierdza fakt, że konsekwentnie wprowadza on i zajmuje się badaniami obiektów o niskiej wymiarowości: quasi-dwuwymiarowymi studniami kwantowymi, quasi-jednowymiarowymi drutami kwantowymi, quasi-zerowymiarowymi kropkami kwantowymi. Do tej gamy należy dodać struktury hybrydowe, składające się z warstw półprzewodnikowych i warstw metalicznych o własnościach magnetycznych, które mogą stać się ciekawą propozycją w burzliwie rozwijającej się obecnej elektronice spinowej.

Listę publikacji przedstawionych do Nagrody rozpoczyna praca teoretyczna dotycząca własności optycznych półprzewodnikowych studni kwantowych o kształcie parabolicznym. Jest to praca o charakterze teoretycznym, ale ściśle powiązana z równolegle prowadzonymi badaniami w kierowanym przez prof. Kossuta laboratorium nad tego typu strukturami kwantowymi. Ścisła współpraca z kolegami doświadczalnikami od początku działalności naukowej Kossuta stanowiła jej pewien wyróżnik. Kilka następnych prac ze spisu publikacji przedstawionych do Nagrody również ilustruje ten styl badań naukowych. Pierwsza z nich zawiera oryginalną propozycję obliczeń energii wiązania ekscytonów w bardzo płytkich studniach kwantowych, które można w szczególny sposób uzyskiwać przez dobór składu materiału magnetycznego a następnie przyłożenie pola magnetycznego w tzw. supersieciach spinowych. Praca ta dotyczyła jeszcze układów uzyskiwanych w innych laboratoriach. Praca następna jest pewnym odstępstwem od tej reguły – przeprowadzono tam obliczenia energii wiązania polaronu magnetycznego (obiektu powszechnie występującego w kwantowych strukturach o obniżonej wymiarowości wykonanych z półprzewodników półmagnetycznych) w ramach abstrakcyjnej teorii, zaproponowanej przez Stillingera, obiektów o wymiarowości niecałkowitej. Okazuje się – wynika to również z prac Kossuta – że podejście takie jest proste i pozwala uniknąć żmudnych obliczeń wariacyjnych, dając jednocześnie poprawny ilościowo opis energii obserwowanych obiektów. Kolejna publikacja, której część doświadczalna wykonana była w laboratoriach Instytutu im. Joffego w Sankt Petersburgu, a wybór i przygotowanie odpowiednich próbek i częściowa interpretacja wyników – w Warszawie, wpisuje się w bardzo aktualny temat dotyczący badania anizotropii optycznej w strukturach kwantowych o symetrii blendy cynkowej. Pokazuje m.in., że w strukturach takich nie wolno zapominać o nierównoważności tak podobnych kierunków krystalograficznych, jak [110] i [1$\bar{1}$0], zwłaszcza w układach naprężonych, które, wydawałoby się, są w dużej mierze równoważne z punktu widzenia zjawisk optycznych i magnetooptycznych. Duże znaczenie tej pracy odzwierciedlone jest jej opublikowaniem w prestiżowym *Physical Review Letters*.

Następna praca stanowi kolejny przykład bezpośredniego sprzężenia prac teoretycznych prof. Kossuta z wynikami poszukiwań doświadczalnych: duża liczba prac wychodzących z laboratorium przez niego kierowanego dotyczy tzw. trionów, czyli naładowanych kompleksów ekscytonowych. Praca ta zawiera wyniki badań teoretycznych, mających na celu ilościowy opis tych nowo odkrytych obiektów. Wyniki tam przedstawione opisują – jak się wydaje – rzeczywistość z większą dokładnością w szerszym zakresie parametrów materiałowych niż wyniki rachunków prowadzonych przez innych badaczy. Kolejna publikacja wyjaśnia, jakie jest źródło obserwowanej wcześniej przez innych autorów zależności parametru sprzężenia wymiennego – najważniejszego parametru określającego ogromne rozszczepienie spinowe w półprzewodnikach magnetycznych, od wymiarowości układu. Teoretyczna część pracy powstała przy współpracy z teoretykiem z Instytutu im. Joffego, Igorem Markułowem, lecz Kossut wniósł do niej znaczący wkład. Praca ta daje podstawy do obliczeń całki wymiany s–d również w obiektach o jeszcze bardziej obniżonej wymiarowości niż studnie kwantowe oraz daje podstawy do manipulowania tym parametrem, czyli do tzw. inżynierii rozszczepienia spinowego w strukturach półprzewodnikowych.

Kolejna praca dotyczy bardzo aktualnej tematyki wstrzykiwania spinowego. Rok 2000 przyniósł kilka przełomowych prac na ten temat. W pracy tej wykazano, że wstrzykiwanie spinów jest procesem bardzo trwałym i nie wymaga starannego dobierania materiałów ściśle dopasowanych do siebie pod względem parametrów sieci krystalicznej przy ich wyborze na tzw. iniektor oraz detektor nośników spolaryzowanych spinowo. Następne prace na liście mają obrazować wkład do fizyki obiektów jedno- i zerowymiarowych. Dwie kolejne publikacje dotyczą drutów kwantowych, a dalsze dwie – kropek kwantowych. Pokazano, że dotychczas stosowane kryteria identyfikacji zjawisk optycznych w drutach kwantowych na podstawie ich reguł polaryzacyjnych muszą być przeprowadzone z niezwykłą starannością i krytycyzmem, co jest związane

ze skomplikowaną strukturą pasma walencyjnego w półprzewodnikach o strukturze blendy cynkowej. W szczególności zauważono, jak silnej modyfikacji ulegają wspomniane reguły wyboru dla przejść optycznych przy dalszej redukcji wymiarowości poniżej dwóch.

Prace kolejne dotyczą samopowstających kropek kwantowych w układach podwójnych warstw różniących się znacznie wartością parametru sieci. Jest to temat bardzo nowy i bardzo intensywnie badany. Są to jedne z pierwszych prac na ten temat w przypadku pary półprzewodników CdTe i ZnTe. Pokazano, że w układach takich powstaje korelacja przestrzenna kropek kwantowych o konfiguracji niespotykanej w innych układach tego typu. Listę kończy publikacja będąca początkiem nowego kierunku badań, mającego na celu wytworzenie struktur hybrydowych z półprzewodników półmagnetycznych zawierających w swoim bezpośrednim pobliżu metal ferromagnetyczny. Takie struktury hybrydowe, wymienione jako obiecujący obiekt badań jeszcze w pracach Kossuta z końca lat osiemdziesiątych, zostały dopiero teraz zrealizowane; pokazały one, że owe wczesne koncepcje nie były wyłącznie tworem teoretycznym. Prace te pokazują również, że pola resztkowe mikromagnesów mogą stanowić realną modyfikację własności optycznych struktur niskowymiarowych wykonanych z półprzewodników półmagnetycznych.

Lista prac zawartych we wniosku o Nagrodę nie obejmuje całości dokonań prof. J. Kossuta w latach 1997–2001. Można jeszcze np. wymienić prace nad technologią CdTe i ZnTe z chromem, nowe materiały, jak MnMgTe, modyfikowane w różny sposób struktury półmagnetyczne i hybrydowe.

Nagroda im. Marii Skłodowskiej-Curie została przyznana w 2001 roku prof. J. Kossutowi za wyjątkowo kompleksowy i wybitny dorobek naukowy, obejmujący technologię, prace doświadczalne i teorię niskowymiarowych struktur półmagnetycznych oraz hybrydowych.

Robert R. Gałązka

Nagroda z dziedziny kosmologii

Nagrodę Fundacji Petera Grubera z dziedziny kosmologii otrzymał w 2001 r. Martin Rees, profesor Uniwersytetu Cambridge i aktualny Astronom Królewski. Została mu przyznana za podstawowy i różnorodny wkład do naszego zrozumienia Wszechświata i odkrywanie jego złożoności. Rees odegrał zasadniczą, kierowniczą rolę w badaniu procesów fizycznych zachodzących w pobliżu czarnych dziur, promieniowania tła, kwazarów i tworzenia galaktyk. W 1968 r. wspólnie z Denisem Sciamą przewidział, że fluktuacje mikrofalowego promieniowania reliktowego wynikają z nierównomiernego rozkładu materii we Wszechświecie. Rees jest także świetnym wykładowcą i popularyzatorem astrofizyki.

Nagroda, ustanowiona w 2000 r., jest przeznaczona dla wybitnych kosmologów, astronomów, astrofizyków i filozofów nauki w uznaniu ich przełomowych odkryć teoretycznych, analitycznych lub koncepcyjnych. Sponsorują ją wspólnie Fundacja Petera Grubera i Międzynarodowa Unia Astronomiczna.

Phys. Today **54**, nr 11 (2001) *B. W.*

Stypendia FNP dla młodych naukowców

W 2002 r. Fundacja na Rzecz Nauki Polskiej przyznała już po raz dziesiąty roczne stypendia dla najmłodszych uczonych (do lat 30), którzy są pracownikami lub doktorantami w szkołach wyższych, placówkach PAN lub innych instytucjach prowadzących badania naukowe. Na konkurs wpłynęło 486 wniosków. Rada Fundacji przyznała 99 stypendiów (82 z wyższych uczelni, 13 z instytutów PAN-owskich, 4 z innych instytucji). Wśród laureatów jest 10 fizyków: Paweł Korecki (UJ), Marek Korkusiński (PWr), Marek Krośnicki (UG), Aldona Kubala-Kukuś (Akad. Świętokrzyska, Kielce), Arkadiusz Kudelski (UW), Roman Skibiński (UJ), Bartosz Such (UJ), Tomasz Ślęzak (AGH), Katarzyna Weron (UWr), Marcin Ziółek (UAM); 1 astronom: Jarosław Dyks (CAMK, Warszawa); 2 biofizyków: Tomasz Róg (UJ) i Ewa Żarnowska (AM, Wrocław)

Wysokość stypendium wynosi w tym roku 20 tys. zł. Fundacja stworzyła też możliwość przedłużenia stypendium na rok następny.

www.fnp.org.pl *B. W.*

Wykład im. Aleksandra Jabłońskiego

W dniu 28 lutego 2002 r., w 104. rocznicę urodzin Aleksandra Jabłońskiego, twórcy toruńskiej szkoły fizyki, odbył się w Instytucie Fizyki UMK już XV wykład jego imienia. Tegoroczny wykład pt. „Od diagramu Jabłońskiego do relatywistycznej chemii kwantowej" wygłosił prof. Andrzej J. Sadlej. Warto dodać, że jest on profesorem zwyczajnym nauk chemicznych i jednocześnie pełni funkcję przewodniczącego Oddziału Toruńskiego Polskiego Towarzystwa Chemicznego. W swoim bardzo skondensowanym i przejrzystym wykładzie prof. Sadlej pokazał bezpośredni wpływ teorii Jabłońskiego na rozwój i współczesne osiągnięcia chemii kwantowej.

Józefina Turło

Finanse FNP uratowane

Sąd Najwyższy w dniu 13 marca 2002 r. rozstrzygnął na korzyść Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej spór FNP z Izbą Skarbową. Przypomnijmy, że Najwyższy Sąd Administracyjny w styczniu 2001 r. uznał roszczenie Izby Skarbowej o wpłacenie przez FNP podatku od sum lokowanych w papierach wartościowych. Stosownie do tego wyroku FNP wpłaciła podatek w kwocie ponad 80 mln zł.

O rewizję wyroku NSA w tej sprawie wystąpił do Sądu Najwyższego Rzecznik Praw Obywatelskich. Zespół 7 sędziów SN po szczegółowym rozpoznaniu sprawy uznał, że FNP może korzystać ze zwolnienia podatkowego, lokując środki w papiery wartościowe. Izba Skar-

MARII CURIE-SKŁODOWSKIEJ
Biblioteka Instytutu Fizyki
Marie-Skłodowskiej I
tel. 537-62-94

bowa będzie więc musiała zwrócić Fundacji uiszczony przez nią podatek oraz odsetki od tej sumy.

Uchwała Sądu Najwyższego ma nie tylko znaczenie dla sprawy finansowania nauki, ale ma także charakter precedensowy, istotny dla innych organizacji pozarządowych.

www.fnp.org.pl *B. W.*

Rocznice

Wśród rocznic przypadających w bieżącym roku mamy stulecie urodzin Diraca, Kastlera i Wignera.

Paul Adrien Maurice Dirac (1902–84) stworzył w latach 20. podstawy elektrodynamiki kwantowej i sformułował słynne równanie opisujące ruch relatywistycznego elektronu. Przewidział istnienie antycząstek i ogólnie antymaterii. W 1933 r. otrzymał (wspólnie z Erwinem Schrödingerem) Nagrodę Nobla z fizyki. Odkrył niezależnie od Fermiego prawa statystyki kwantowej fermionów i wysunął hipotezę o zmienności wartości stałej grawitacyjnej.

Alfred Kastler (1902–84), fizyk francuski, sformułował zasady i rozwinął metody doświadczalne podwójnego rezonansu i pompowania optycznego, co skierowało spektroskopię atomową na badania nowej wówczas dziedziny problemów związanych z oddziaływaniem między atomami i polem promieniowania. W 1966 r. otrzymał Nagrodę Nobla z fizyki za „odkrycie i rozwinięcie optycznych metod badania rezonansów częstości radiowych w atomach". W 1964 r. Polskie Towarzystwo Fizyczne nadało mu godność członka honorowego.

Jenó Pál (Eugene Paul) Wigner (1902–95), fizyk amerykański pochodzenia węgierskiego, rozwinął pojęcie symetrii (parzystości i odwrócenia czasu) w zastosowaniu do mechaniki kwantowej. Wspólnie z G. Breitem podał wzór na przekrój czynny w jądrowych zjawiskach rezonansowych oraz wysunął ideę spinu izotopowego (izospinu). W czasie wojny zajmował się projektowaniem reaktorów produkujących pluton, gdy jednak zdał sobie sprawę z potwornych skutków broni jądrowej, podpisał w 1945 r. apel przeciwko jej użyciu. W 1963 r. otrzymał (niezależnie od J.H.D. Jensena i Marii Goeppert-Mayer) Nagrodę Nobla z fizyki za swój wybitny wkład do fizyki jądrowej oraz badania roli symetrii i niezmienniczości w mechanice kwantowej.

Sto pięćdziesiąt lat temu urodził się w Strzelnie k. Kruszwicy Albert Abraham Michelson (1852–1931), fizyk amerykański, profesor uniwersytetów w Cleveland i Chicago. W 1907 r. otrzymał Nagrodę Nobla z fizyki za „skonstruowanie precyzyjnych przyrządów optycznych i wykonanie za ich pomocą pomiarów spektroskopowych i metrologicznych". Między innymi ulepszył metodę Fizeau wyznaczania odległości kątowej dwóch źródeł światła. W 1881 r. wykonał doświadczenie, które później w ulepszonej, bardziej precyzyjnej postaci przeprowadził wraz z E.W. Morleyem, wykazujące, że ruch źródła nie ma wpływu na prędkość światła. Stanowiło ono dowód, że nie istnieje hipotetyczny eter.

Czterysta lat mija od urodzenia Ottona von Guericke (1602–86), fizyka i burmistrza Magdeburga, który prowadził doświadczenia z dziedziny hydro- i aerostatyki i wykazał istnienie ciśnienia atmosferycznego (słynne półkule magdeburskie).

Sto lat temu, w 1902 r., Nagrodę Nobla z fizyki otrzymali dwaj Holendrzy: Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928) i Pieter Zeeman (1865–1943) „w uznaniu ich nadzwyczajnych zasług, jakie oddali swoimi badaniami wpływu magnetyzmu na zjawisko promieniowania". Zeeman odkrył (w 1897 r.) i badał zjawisko rozszczepienia linii widmowych w polu magnetycznym, zjawisko, którego na próżno w swoim ostatnim doświadczeniu poszukiwał Faraday w 1862 r. Zeeman przewidział też, że linie w widmie Słońca powinny być poszerzone (rozszczepione) skutkiem działania olbrzymiego pola magnetycznego Słońca. Lorentz sformułował teorię elektronową, która wyjaśniła zjawisko Zeemana, zjawisko skręcania płaszczyzny polaryzacji w polu magnetycznym, zjawiska załamania, odbicia i dyspersji światła i zależność współczynnika załamania od gęstości ośrodka, znalazł wyrażenie na siłę działającą na ładunki poruszające się w polu magnetycznym, podał wzory na przekształcenie czasoprzestrzeni między układami inercjalnymi (transformacje Lorentza).

B. W.

Koniec z habilitacją?

Habilitacja, ten decydujący etap kariery naukowej w uczelniach krajów niemieckojęzycznych (a także i polskich), prawdopodobnie skończy się wkrótce w Niemczech. Od dawna wśród społeczności uniwersyteckiej narasta tam odczucie, że system akademicki jest przestarzały i wymaga reformy. W tym duchu minister nauki RFN, pani Edelgard Bulmahn, proponuje skasować habilitację dającą *veniam legendi* (prawo wykładania), zwykle w obrębie jednego tylko wydziału, a w to miejsce wprowadzić w ciągu najbliższych 10 lat system „młodszych profesorów", angażowanych na okres 6 lat. Chodzi o to, aby dać młodym naukowcom więcej niezależności i szansę stworzenia własnych zespołów badawczych. Byłoby to wzorowane na praktyce, jaką stosują instytuty Maksa Plancka, Niemieckiej Fundacji Badawczej i prywatnej fundacji Volkswagena. Tam już od połowy lat 90. tworzy się pod kierunkiem młodych naukowców grupy badawcze, składające się zwykle ze „świeżo upieczonego" doktora, doktoranta i technika.

System proponowany przez Edelgardę Bulmahn wzbudza na ogół entuzjazm młodych badaczy, wielu obawia się jednak sztywnych ram czasowych, które przewidują, że 12 lat ma trwać zrobienie pracy doktorskiej, staż podoktorski i zatrudnienie jako „młody profesor". Wydaje się, że zostawia to zbyt mało czasu na praktykę podoktorską, w ciągu której trzeba nie tylko dobrze poznać różne metody badawcze, ale również nabyć umiejętność kierowania zespołem. Istnieje też obawa, co dalej po tych 12 latach.

W listopadzie 2001 r. odbyło się w Monachium zebranie naukowców (młodych i starszych), przedstawicieli różnych fundacji oraz redakcji *Nature*. Wyrażono opinię, że może warto, choć przez pewien czas, umożliwić dwutorowość kariery – albo jako „młodzi profesorowie", albo drogą habilitacji. Padały też głosy, że projektowane zmiany mogą stać się jakąś mieszanką tradycyjnego systemu niemieckiego i typowo amerykańskiej drogi do kariery akademickiej.

Nature **415**, nr 6869 (2002) *B. W.*

Tydzień Comeniusa w Lublinie

W dniach 26–30 listopada 2001 r. odbywał się w całej Europie „Tydzień Comeniusa", którego celem było przedstawienie prac wykonywanych przez szkoły w ramach projektu Socrates–Comenius.

Może przypomnijmy: Comenius, czyli Jan Amos Komenský, duchowny braci czeskich, pedagog, reformator szkolnictwa, twórca nowoczesnej pedagogiki, urodził się w 1592 r. na Morawach, a zmarł w 1670 r. w Amsterdamie. Opracował projekt jednolitego systemu szkolnego (dla całej ludności, bez względu na pochodzenie i płeć). Jego program nauczania miał dawać pożyteczną wiedzę o świecie i umożliwiać dzieciom nauczenie się tego, co wiedzieć powinny. Zalecał też nauczanie początkowe w językach ojczystych, a łacinę dopiero w szkole średniej.

Wśród wielu placówek oświatowych pracujących w projekcie Socrates–Comenius jest też nasza szkoła – IX LO im. Mikołaja Kopernika w Lublinie. Od sierpnia 2000 r. pilotujemy trzyletni projekt, którego tematem jest „Badanie zanieczyszczeń w naszym środowisku". Partnerami naszego Liceum są szkoły średnie z Austrii (Graz) i Hiszpanii (Colmenar Viejo k. Madrytu). Przedmiotem są badania zanieczyszczeń wody, gleby i powietrza. Badania te, wykorzystujące metody fizyczne i chemiczne, wykonuje młodzież ze szkół uczestniczących w projekcie pod kierunkiem swoich nauczycieli.

Tydzień Comeniusa był okazją do popularyzacji naszego projektu w samej szkole, w naszym mieście i w regionie oraz prezentacji naszych wyników, które obejmują pomiary hałasu, stężenia ozonu, dwutlenku siarki i tlenków azotu w powietrzu, a także poziomu promieniowania i elektrosmogu.

Małgorzata Kaczorowska-Litak

Bajkonur do muzeum

Kosmodrom Bajkonur przestanie niedługo być miejscem startu satelitów rosyjskich. Rosjanie będą teraz umieszczać na orbicie satelity, zarówno wojskowe jak i cywilne, z kosmodromu Plesieck w północno-zachodniej Rosji. Ta zmiana umotywowana jest głównie przyczynami finansowymi – koniecznością płacenia Kazachstanowi czynszu za użytkowanie kosmodromu. Przeprowadzka już się rozpoczęła i ma być ukończona w 2005 r.

Bajkonur jest historycznym miejscem, z którego został wysłany w 1957 r. na orbitę pierwszy sztuczny satelita – Sputnik 1.

Nature **416**, nr 6880 (2002) *B. W.*

Wyniki konkursu PTZE

Polskie Towarzystwo Zastosowań Elektromagnetyzmu ogłosiło w 2001 r. konkurs na najlepszą pracę magisterską lub doktorską z dziedziny zastosowań elektromagnetyzmu (patrz Kronika 2/2001). Jury konkursu, składające się z członków PTZE, postanowiło przyznać 2 pierwsze nagrody (po 2500 zł). Otrzymali je:

— dr Sławomir Bytner (IPPT PAN, Warszawa) za pracę doktorską „Zasady wariacyjne i homogenizacja niejednorodnych ośrodków magnetosprężystych i magnetotermosprężystych",

— dr Wojciech Burlikowski (IETiP, Politechnika Śląska, Gliwice) za pracę doktorską „Opracowanie polowej analityczno-numerycznej metody obliczeń momentów pasożytniczych synchronicznych, związanych z wyższymi harmonicznymi przestrzennymi przepływu w silnikach indukcyjnych klatkowych".

Następna edycja konkursu odbędzie się w bieżącym roku. Informacje można uzyskać telefonicznie (22) 8123050, lub przez pocztę elektroniczną: krawczyk @iel.waw.pl; są one także na stronie internetowej: www.iel.waw.pl/ptze/konkurs.htm.

Andrzej Krawczyk

M.G. Basow (1922 – 2000)

Śmierć Mikołaja Basowa bardzo mnie poruszyła, bo w końcu 1960 r. w jego laboratorium maserowym w moskiewskim FIAN-ie uczyłem się elektroniki kwantowej. Kontakt z tym wiodącym laboratorium nawiązał Arkadiusz Piekara i wysyłał mnie do Moskwy na terminowanie w dziedzinie maserów amoniakalnych.

Mój mistrz po przyjeździe z Wielkiej Brytanii oznajmił mi: „Panie Janie, zbuduje Pan u nas maser amoniakalny" i nie czekając na moją reakcję, narysował schemat masera na tablicy. Po raz pierwszy usłyszałem o mikrofalowym widmie inwersyjnym amoniaku i dostałem kilka prac, wśród których były fundamentalne prace M. Basowa i A. Prochorowa z 1954 r. Kupiłem za grosze tłumaczenia rosyjskie książek C.H. Townesa i A.L. Schawlowa *Microwave spectroscopy* oraz N.F.R. Ramseya *Molecular beams*, które przez kilka lat były źródłem mojej wiedzy w tej nowej dziedzinie.

Od książki Mistrza *Mikrofale i spektroskopia mikrofalowa* rozpoczęła się ciężka praca i moja przygoda z maserami. Cały rok 1959 upłynął na konstrukcji aparatury próżniowej i mikrofalowej.

Wczytywałem się w pracę doktorską M. Basowa wykonaną pod kierunkiem A.M. Prochorowa. Basow miał ogromną posturę i był wielkim fizykiem. Ukończył mo-

skiewski Instytut Fizyki Technicznej na podstawie pracy wykonanej w Instytucie Fizyki Akademii Nauk ZSRR. Tam w roku 1950 został kierownikiem laboratorium kwantowej elektroniki i był wicedyrektorem Instytutu, będąc jednocześnie profesorem w swojej macierzystej placówce. W 1956 r. doktoryzował się w FIAN-ie. Praca miała tytuł „Generator molekularny", bo w tym czasie Rosjanie nie akceptowali amerykańskiej nazwy „maser". Świadczy o tym pierwsza monografia poświęcona maserom napisana przez współpracownika Basowa, A.N. Orajewskiego, mająca tytuł „Molekularnyje gieneratory". Dzisiaj sprawa nazewnictwa nie gra żadnej roli i Rosjanie z upodobaniem stosują terminologię angielską „maser" i „laser".

Lata po doktoracie upłynęły Basowowi na badaniu stabilności maserów amoniakalnych, które miały być wzorcami częstotliwości. W 1960 r. Arkadiusz Piekara załatwił mi dwumiesięczny pobyt w Moskwie, gdzie swój czas dzieliłem pomiędzy FIAN-em i Instytutem Krystalografii AN ZSRR, bo w tym czasie opracowywałem swój doktorat z ferroelektryków. W laboratorium Basowa pracowałem w pracowni G.M. Strachowskiego, gdzie stały trzy działające masery amoniakalne, których sygnały po zmieszaniu wykazywały zadziwiająco dużą stabilność, rzędu 10^{-12}. Nigdy nie zapomnę, jak za pomocą figur Lissajous oglądaliśmy wahania częstotliwości 0,1 Hz przy częstotliwości $f = 23870$ MHz. Basow obmyślał różnorakie zastosowania masera amoniakalnego. Wówczas wydawało się, że można będzie stabilizować częstość klistronu za pomocą masera. W jego laboratorium zastosowano w maserach efektywniejszy od kwadrupolowego, kółkowy separator Krupnowa, który zastosowaliśmy w polskiej konstrukcji masera amoniakalnego w Poznaniu.

W 1950 r. Basow razem z Prochorowem otrzymali po raz pierwszy Nagrodę Leninowską.

W 1957 r. Basow – twórca idei trójpoziomowego pompowania obsadzeń dyskretnych poziomów atomowych – zajął się laserami i tej dziedzinie poświęcił resztę swojego życia. Idea ta została zrealizowana przez Javana w laserze neonowo-helowym, lecz Basow, Krochin i Popow już w 1961 r. uzyskali drogą pompowania optycznego ujemną temperaturę w złączu p–n półprzewodnika. W 1964 r. wspólnie z O.W. Bogdanowiczem, A.N. Dewiatkowem, A.Z. Grasiukiem i W.A. Katulinem zbudowali laser półprzewodnikowy, za co dostali Nagrodę Leninowską w 1964 r. (która dla Basowa była już drugą tak prestiżową nagrodą). Następne lata wiążą się z rozwojem technik pikosekundowych, co w 1963 r. prowadzi zespół Basowa do szybkiej optoelektroniki do celów komunikacji. W 1962 r. zostaje wybrany na członka korespondenta Akademii Nauk ZSRR. W 1964 r. razem z Townesem i Prochorowem otrzymuje Nagrodę Nobla za prace w dziedzinie elektroniki kwantowej – budowę pierwszego masera. W 1967 r. zostaje członkiem rzeczywistym AN ZSRR.

Ostatni okres działalności poświęcił laserom CO_2 dużej mocy, za pomocą których dokonał kompresji wysokotemperaturowej plazmy. W plazmie tej badał procesy prowadzące do kontrolowanej syntezy termojądrowej. W tej dziedzinie duże ambicje mieli badacze w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. W związku z tym WAT nadała Basowowi doktorat honoris causa. Jako członek prezydium AN ZSRR odwiedził Polskę w 1989 r., wizytując IF PAN w Warszawie i IFM PAN w Poznaniu.

Jan Stankowski

NOWE KSIĄŻKI

- Witold M. Lewandowski, *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*, WNT, Warszawa 2001, s. 309, cena 35 zł.
- Piotr Jaracz, *Promieniowanie jonizujące w środowisku człowieka – fizyka, skutki radiologiczne, społeczeństwo*, Wyd. UW, Warszawa 2001, s. 114, cena 18 zł.
- Michał Gryziński, *Sprawa atomu*, Homo-Sapiens, Warszawa 2002, s. 203.
- Arkadiusz Liber, *Elementy fizyki współczesnej i informatyki*, Wyd. atla 2, Wrocław 2002, s. 94, cena 19 zł.
- Andrzej Bielski, Roman Ciurło, *Podstawy metod opracowania pomiarów*, wyd. II częściowo zmienione, Wyd. UMK, Toruń 2001, s. 247.
- Bernard F. Schutz, *Wstęp do ogólnej teorii względności*, z jęz. angielskiego tłum. Wojciech Kopczyński, PWN, Warszawa 2002, s. 364, cena 41 zł.
- Paul Davies, *Czas – niedokończona rewolucja Einsteina*, z jęz. angielskiego tłum. Leszek Kallas; Prószyński i S-ka, Warszawa 2002, s. 333, cena 29,90 zł.

WARUNKI PRENUMERATY

Cena prenumeraty krajowej w 2002 r. wynosi 30,00 zł za pół roku, 60,00 zł za rok. Prenumeratę można zamówić za pośrednictwem:

I. RUCH-u

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

2. Cena prenumeraty ze zleceniem dostawy za granicę: cena prenumeraty krajowej + rzeczywiste koszty wysyłki. Wpłaty przyjmuje „RUCH" S.A. Oddział Krajowej Dystrybucji Prasy na konto: PEKAO SA IV O/Warszawa nr 12401053-40060347-2700-401112-001 lub w kasie Oddziału (Warszawa, ul. Jana Kazimierza 31/33). Zlecenia na prenumeratę dewizową, przyjmowane od osób zamieszkałych za granicą, realizowane są od dowolnego numeru.

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. ZARZĄDU GŁÓWNEGO PTF

Prenumeratę można także zamówić w Zarządzie Głównym PTF, drogą wpłaty na konto ZG PTF w PKO BP IX O/Warszawa nr 10201097-335245-270-1-111 lub w Biurze Zarządu Głównego PTF. Dostawa *Postępów Fizyki* następuje drogą pocztową na wskazany adres.

III. ODDZIAŁÓW PTF

Prenumeratę można zamówić również w oddziale PTF. Członkowie PTF, którzy opłacają prenumeratę w oddziałach PTF na cały rok, otrzymują 40% zniżki. Taka sama zniżka (40%) przysługuje studentom. Dostawa *Postępów Fizyki* odbywa się za pośrednictwem oddziału PTF.

INFORMACJE DLA AUTORÓW I TŁUMACZY

Komitet Redakcyjny prosi o opracowywanie materiałów przeznaczonych do druku w *Postępach Fizyki* zgodnie z podanymi niżej zasadami:

1. Artykuły powinny mieć charakter przeglądowy i być przystępne dla ogółu fizyków.

2. Układ pracy (tytuł i autor, angielski tytuł i streszczenie, tekst, odnośniki literaturowe itd.) powinien odpowiadać formie przyjętej w *Postępach Fizyki* (patrz artykuły np. w tym zeszycie).

3. Rysunki należy wykonać starannie na oddzielnych arkuszach. Niezbędne napisy (tylko w języku polskim, z wyjątkiem reprodukowanych ilustracji o charakterze dokumentów historycznych) powinny być czytelne i dostosowane do wielkości rysunku. Opisy osi wykresów powinny odpowiadać ogólnie przyjętym regułom, np. „temperatura" lub „T [K]" czy „t [°C], a liczby w układzie dziesiętnym należy podawać z przecinkiem, nie kropką. Fotografie prosimy przysyłać w postaci odbitek, a razie ich braku – plików o odpowiednio dużej zdolności rozdzielczej.

4. Prace należy nadsyłać pod adresem: Redakcja *Postępów Fizyki*, ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa. W liście towarzyszącym prosimy podać dokładny adres (również elektroniczny) do dalszej korespondencji.

5. Prosimy autorów o nadsyłanie – wraz z wydrukami – plików, zawierających teksty artykułów oraz rysunki, pocztą elektroniczną (nasz adres: postepy@fuw.edu.pl) lub na dyskietkach czy innych nośnikach.

6. O przyjęciu pracy do druku decyduje Komitet Redakcyjny. Maszynopisów prac niezamówionych i niezakwalifikowanych do druku Redakcja nie zwraca.

7. Autora obowiązuje szybkie wykonanie korekty autorskiej.

POSTĘPY FIZYKI (ADVANCES IN PHYSICS), founded in 1949, is published bimonthly in Polish with abstracts 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.

PL ISSN 0032-5430

Cena 10,00 zł

SPIS TREŚCI

Ż.I. Ałfiorow – Podwójne heterostruktury oraz ich zastosowanie w fizyce, elektronice i technice 113

RÓŻNE
Granty KBN z fizyki: XX i XXI konkurs 131
M.R. Schroeder – Rozwój i przyszłość fizyki .. 137

ROZMOWY
Rozmowa o fotonice 149

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI 155
RECENZJE 159
KRONIKA 162

CONTENTS

Zh.I. Alferov – The double heterostructure concept and its applications in physics, electronics and technology 113

MISCELLANEA
Grants in physics of the State Committee for Scientific Research 131
M.R. Schroeder – Evolution and future of physics 137

INTERVIEWS
Conversation on photonics 149

MEETINGS AND CONFERENCES 155
REVIEWS 159
CHRONICLE 162

WKRÓTCE

- *Danuta Bauman o wykorzystaniu metod spektroskopowych do badania ciekłych kryształów*
- *Jan Klamut o tym, gdzie fizyka ma szukać szans w XXI wieku*
- *Marek W. Gutowski o prostej dostatecznie grubej*
- *Reimund Torge – Otto Lummer, Fritz Reiche i Mieczysław Wolfke: szkice biograficzne*

ZAPRASZAMY

na naszą stronę internetową – www.fuw.edu.pl/~postepy – na której dostępne są już (w formacie pdf) ***pełne teksty wszystkich artykułów*** *tomu dodatkowego Postępów Fizyki,* ***53D*** *(2002), zawierającego materiały XXXVI Zjazdu Fizyków Polskich w Toruniu w 2001 roku.*

POSTĘPY FIZYKI TOM 53 ZESZYT 3 ROK 2002