

PTF

DWUMIESIĘCZNIK  
POŚWIĘCONY  
UPOWSZECHNIANIU  
WIEDZY  
FIZYCZNEJ

# POSTĘPY FIZYKI

TOM 48  
ZESZYT 6  
1997

---

# POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

## ZARZĄD GŁÓWNY

Prezes:	Prof. dr IRENEUSZ STRZAŁKOWSKI
Wiceprezesa:	Prof. dr ANDRZEJ BUDZANOWSKI Prof. dr JÓZEF SZUDY
Sekretarz Generalny:	Prof. dr MACIEJ KOLWAS
Skarbnik:	Mgr WANDA DOBORZYŃSKA-GŁAZEK
Członkowie Zarządu:	Prof. dr BOGDAN CICHOCKI Prof. dr WOJCIECH GAWLIK Prof. dr STANISŁAW K. HOFFMANN Prof. dr WOJCIECH SUSKI Dr EDMUND ŚNIADEK Mgr URSZULA WOŹNIKOWSKA-BEZAK

## Redaktorzy naczelní czasopism PTF

Prof. dr ADAM SOBICZEWSKI – *Postępy Fizyki*  
Prof. dr JERZY PROCHOROW – *Acta Physica Polonica A*  
Prof. dr ANDRZEJ STARUSZKIEWICZ – *Acta Physica Polonica B*  
Dr hab. MAREK KORDOS – *Delta*  
Prof. dr ANDRZEJ JAMIOŁKOWSKI – *Reports on Mathematical Physics*  
Dr ZOFIA GOŁĄB-MEYER – *Foton*

## Przewodniczący oddziałów Towarzystwa

Prof. dr ANDRZEJ MAZIEWSKI (Białystok)	Prof. dr LESZEK WOJTCZAK (Łódź)
Prof. dr BRONISŁAW GRZEGORZEWSKI (Bydgoszcz)	Dr STANISŁAW CHABIK (Opole)
Prof. dr MARIAN GŁOWACKI (Częstochowa)	Prof. dr JERZY DEMBCZYŃSKI (Poznań)
Dr hab. LEON MURAWSKI (Gdańsk)	Prof. dr MARIAN KUŻMA (Rzeszów)
Prof. dr ZYGMUNT KLESZCZEWSKI (Gliwice)	Prof. dr HENRYK WREMBEL (Słupsk)
Prof. dr JERZY WARCZEWSKI (Katowice)	Prof. dr TADEUSZ REWAJ (Szczecin)
Dr MAREK PAJEK (Kielce)	Prof. dr WACŁAW BAŁA (Toruń)
Prof. dr WOJCIECH GAWLIK (Kraków)	Prof. dr BRONISŁAW ORŁOWSKI (Warszawa)
Prof. dr STANISŁAW HAŁAS (Lublin)	Prof. dr WŁADYSŁAWA NAWROCKA (Wrocław)

## ADRES ZARZĄDU

00-681 Warszawa, ul. Hoża 69  
tel./fax 621 26 68  
adres elektroniczny: [ptf@fuw.edu.pl](mailto:ptf@fuw.edu.pl)



POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

# POSTĘPY FIZYKI

DWUMIESIĘCZNIK POŚWIĘCONY UPOWSZECHNIANIU  
WIEDZY FIZYCZNEJ

TOM 48, ZESZYT 6  
1997

Zeszyt dofinansowany  
przez Komitet Badań Naukowych

Wydano pod patronatem  
Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Warszawa 1997

## RADA REDAKCYJNA

Andrzej K. Wróblewski - przewodniczący, Jerzy Czerwonko, Marek Demiański,  
Zofia Gołąb-Meyer, Franciszek Kaczmarek, Józef Szudy

## KOMITET REDAKCYJNY

Redaktor Naczelny: Adam Sobiczewski

Członkowie Redakcji: Tomasz Dietl, Jerzy Gronkowski, Mirosław Łukaszewski,  
Magdalena Staszal, Barbara Wojtowicz

Adres Redakcji: ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa  
adres elektroniczny: [postepy@fuw.edu.pl](mailto:postepy@fuw.edu.pl)

## Korespondenci oddziałów PTF:

Dr Maciej Horowski (Białystok)  
Prof. dr Jerzy J. Wystocki (Częstochowa)  
Dr Stanisław Zachara (Gdańsk)  
Dr Roman Bukowski (Gliwice)  
Prof. dr Wiktor Zipper (Katowice)  
Dr Małgorzata Suchańska (Kielce)  
Dr Jacek Bieroń (Kraków)  
Mgr Tomasz Durakiewicz (Lublin)  
Dr Urszula Garuska (Łódź)  
Dr Ryszard Czajka (Poznań)  
Mgr Danuta Ficek (Słupsk)  
Dr Ewa Weinert-Rączka (Szczecin)  
Dr Józefina Turło (Toruń)  
Dr Ewa Jędryka (Warszawa)  
Prof. dr Bernard Jancewicz (Wrocław)

**Richard E. Smalley**

*Center for Nanoscale Science and Technology*

*Rice Quantum Institute*

oraz

*Departments of Chemistry and Physics*

*Rice University*

*Houston, Texas, USA*

## **Odkrywanie fullerenów\***

### **Discovering the fullerenes**

*Nobel Lecture, 7 December 1996, Stockholm*

Jestem wzruszony, że jestem tu dzisiaj, i że jestem pierwszym z trzech mówców, którzy opiszą Państwu zadziwiające właściwości całkowicie nowej grupy cząsteczek węgla – fullerenów. Wzruszenie to dzielę ze mną koledzy ze słynnej fotografii (rys. 1), którzy także przybyli w tym tygodniu do Sztokholmu, by zobaczyć jak „Bucky dostaje Nagrodę Nobla”. Zdjęcie to zostało zrobione 11 września 1985 r., na dzień przed wysłaniem do redakcji *Nature* rękopisu zawierającego opis odkrycia cząsteczki  $C_{60}$  [1], a zaledwie kilka dni po samym odkryciu. Każda z osób na tym zdjęciu (z wyjątkiem damy widocznej na drugim planie – do dziś nie wiemy, kim jest ta tajemnicza kobieta) ma wielki udział w tym odkryciu, więc rozumiecie Państwo, że w naszych sercach jest też dziś nieco smutku. Nagrodę Nobla, przyznaną w tym roku w dziedzinie chemii za odkrycie fullerenów, mogą dostać nie więcej niż trzy osoby. Komitet Nagrody Nobla rozwiązał tę trudność najlepiej jak mógł. Rozumiemy to, lecz ten smutek nadal nam towarzyszy.

Z drugiej strony, ograniczenie liczby laureatów do trzech osób ma swoje dobre strony. Dowiadywałem się, co się dzieje w latach, gdy Nagrodę z fizyki lub chemii

---

\*Wykład noblowski, wygłoszony 7 grudnia 1996 r. w Sztokholmie, został przetłumaczony za zgodą Autora i Fundacji Nobla [Translated with permission. Copyright ©1997 by the Nobel Foundation] (przyp. Red.).



Rys. 1. Zdjęcie zespołu badawczego, który dokonał odkrycia fullerenów na Uniwersytecie Rice'a we wrześniu 1985 r. Stoi: Curl, klęczą (od lewej): O'Brien, Smalley, Kroto i Heath.

otrzymuje tylko jedna osoba. Powiedziano mi, że wtedy po prostu jest jeden wykład noblowski z tej dziedziny. Teraz, gdy zaczynam rozumieć, co to znaczy musieć wysłuchać – tak jak w tym roku – trzech długich wykładów z każdej z dziedzin, fizyki i chemii, tego samego dnia i w tej samej sali, widzę, że jakieś ograniczenie musi być.

Samo odkrycie było dla każdego z nas pięciu najwspanialszym doznaniem duchowym w całym życiu. Głównym przesłaniem mojego dzisiejszego wykładu jest stwierdzenie, że to doznanie duchowe, odkrycie tego, co Przyroda ma nam do powiedzenia na temat właściwości węgla, trwa nadal – badacze na całym świecie ciągle są tym zajęci. Dlatego tytułem tego wykładu nie jest „Odkrycie fullerenów”, lecz „Odkrywanie fullerenów”.

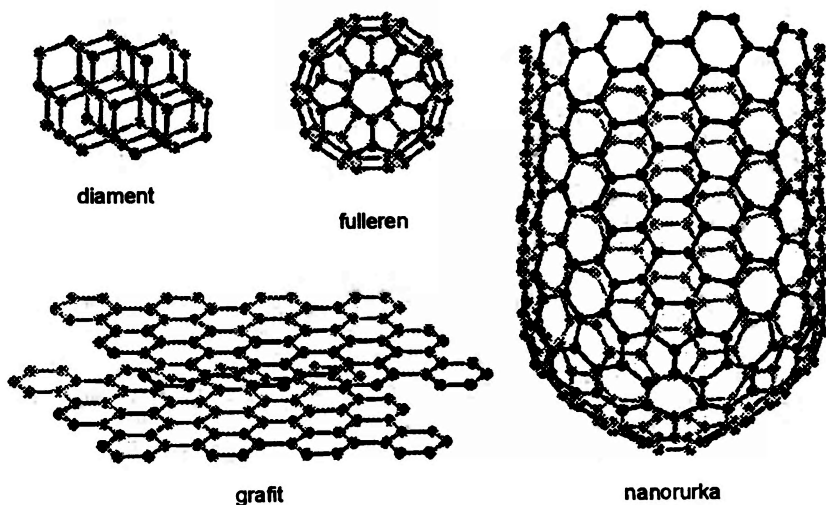
To, że ten proces ciągle trwa, wynika z prawdziwej istoty odkrycia fullerenu w 1985 r. Pięciu ludzi, widocznych na wspomnianym zdjęciu (rys. 1), to wprawdzie bardzo inteligentne osoby, ale przecież nie pierwsze, które wymyśliły dwudziestościan ścięty. Dokonano tego tysiące lat temu. Przypisuje się to Archimedesowi, ale można sądzić, że dwudziestościan został ścięty na długo przed nim. Nie byliśmy też pierwszymi ludźmi, którzy doszli do wniosku, że jeśli w wierzchołkach tej bryły umieści się atomy węgla i pozwoli się węglowi zachowywać tak, jak

sam ma ochotę, to otrzyma się ciekawy obiekt chemiczny. Do tego doszedł ponad dziesięć lat przed naszym odkryciem fizykochemik japoński E.G. Osawa [2,3], który stwierdził, że taka cząsteczka węgla będzie aromatyczna, co pozwala sądzić, że może być trwała. A jeszcze wcześniej wspaniałą wyobraźnię wykazał David Jones [4], który rozważał zamknięte klatki sferoidalne utworzone ze zwiniętych warstw grafitu. Nieco później Jones doszedł do wniosku, że na defekt, jaki trzeba wprowadzić do sieci heksagonalnej, aby otrzymać taką złożoną krzywiznę, doskonale nadaje się pięciokąt [5]. Stwierdzenie, że cząsteczka  $C_{60}$  powinna być cząsteczką zamkniętą o dużej różnicy energii orbitali HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) i LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital), co jest powszechnie uznawane za świadectwo trwałości chemicznej, pochodzi od Boczwara i Halperna [6] oraz Stankiewicza [7], którzy w ZSRR wykonali odpowiednie obliczenia metodą Hückela ponad dziesięć lat wcześniej niż my w ogóle zainteresowaliśmy się tą sprawą.

Tegorocznej Nagrody Nobla nie przyznano za odkrycie, że cząsteczka węgla w kształcie dwudziestościanu ściętego jest trwała chemicznie. Gdyby tak było, to kandydowałiby do niej Archimedes, Osawa, Jones i wspomniani naukowcy radzieccy.

Nagrodzone zostało odkrycie, że to sam węgiel tworzy cząsteczki w kształcie dwudziestościanu ściętego oraz jeszcze większych siatek geodezyjnych. Dar spontanicznego tworzenia fullerenów to przyrodzona cecha węgla, którą ma on od samego początku Wszechświata. Wiemy dziś, że by uzyskać miliardy miliardów tych cząsteczek o tak wspaniałej symetrii wystarczy po prostu wytworzyć parę atomową węgla i umożliwić jej kondensację w atmosferze helu. Ciągłe odkrywamy nowe przejawy genialnych umiejętności węgla. Okazuje się, że umie on nie tylko tworzyć struktury kuliste – może też przyjmować kształt rurek. Fragment takiej rurki pokazano na rys. 2.

Prawie każdy z nas zetknął się nieraz ze znanymi od dawna postaciami czystego węgla: diamentem i grafitem. Diament, choć tak piękny, jest znacznie mniej ciekawy niż tworzący heksagonalne płaszczyzny grafit. Jest mniej ciekawy, gdyż żyjemy w świecie trójwymiarowym, a w diamencie każdy atom jest otoczony ze wszystkich stron przez atomy węgla. Atom w sieci diamentu ma więc w naszym trójwymiarowym świecie bardzo małą szansę na zetknięcie się z czymkolwiek innym niż atom węgla: wszystkie kierunki są już zajęte. Natomiast w pojedynczej heksagonalnej warstwie grafitu atom węgla jest całkiem odsłonięty z obu stron płaszczyzny. Jest to rzadka sytuacja w świecie trójwymiarowym. Myślę, że nigdy dobrze się nie zastanawiano, jak ta sytuacja jest wyjątkowa. Oto mamy taki atom w układzie okresowym, który można do tego stopnia zadowolić zaledwie trzema sąsiadami w dwóch wymiarach, że nie ma ochoty wiązać się z niczym więcej. Jeśli



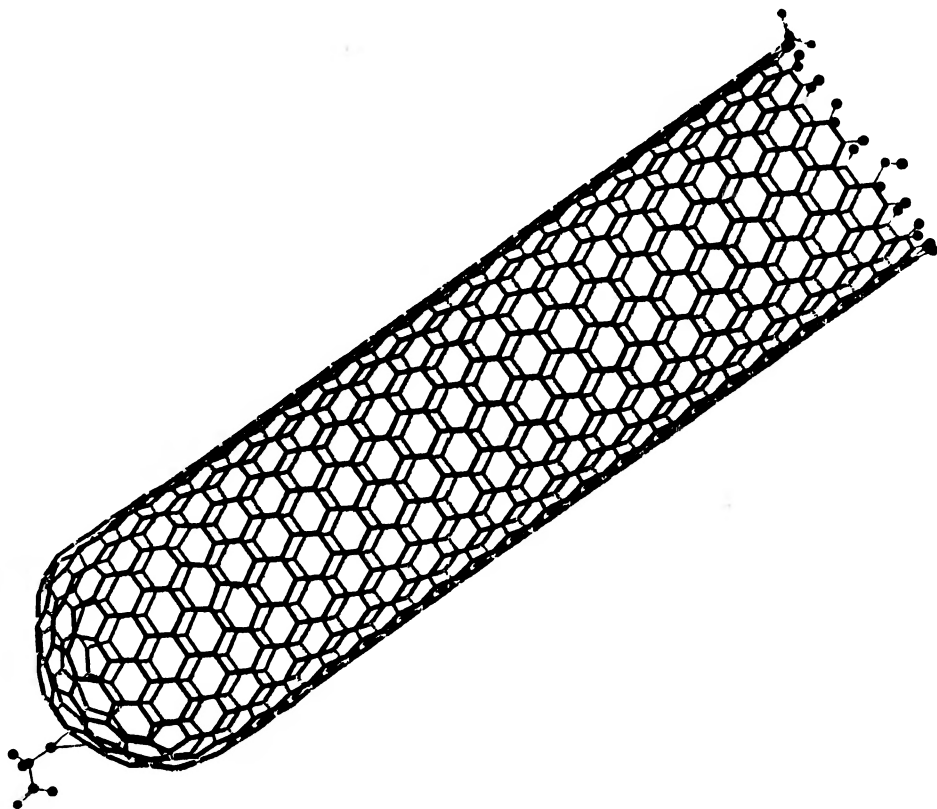
Rys. 2. Cztery doskonałe postacie krystaliczne węgla: diament, grafit,  $C_{60}$  i krótki odcinek nanorurki fullerenowej (10,10) zakończonej połówką cząsteczki  $C_{240}$ .

zblizymy do płaszczyzny inny atom – niech to będzie wręcz pojedynczy atom węgla – to zostanie on związany z warstwą jedynie przez słabą chemisorpcję. Do zniszczenia tego wiązania, a więc powrotu do czystej warstwy grafitu, wystarczy dostarczenie niewielkiej ilości ciepła. Węgiel ma rzadką umiejętność tworzenia w świecie trójwymiarowym trwałych chemicznie dwuwymiarowych struktur o jednoatomowej grubości. Sądzę, że ta jego cecha będzie miała daleko idące konsekwencje w chemii i – szerzej – w technice.

Nasze odkrycie polega na stwierdzeniu, że jeśli wytworzy się parę atomową węgla i umożliwi się jej powolną kondensację w temperaturze dostatecznie wysokiej na to, by tworzące się cząsteczki mogły ze sobą swobodnie oddziaływać, to ostatecznym produktem będą najczęściej fullereny sferoidalne. Okazuje się też, że przez dodanie do węgla kilku procent innych atomów (niklu lub kobaltu) można zmusić go do tworzenia nie tylko najbardziej symetrycznej z cząsteczek,  $C_{60}$ , oraz innych fullerenów sferoidalnych, lecz także rurek. Ze wszystkich możliwych rurek węglowych jedna jest szczególnie ciekawa [8]. Jest to tzw. rurka (10,10), pokazana na rys. 2. Zaczynamy obecnie rozumieć, że postać tej najpopularniejszej z rurek węglowych jest także zawarta w zestawie poleceń określającym, co to znaczy być atomem węgla. Do powstania rurki (10,10) prowadzą te same przyczyny, dzięki którym 30–40% produktów reakcji to cząsteczki  $C_{60}$ . Obok głównego nurtu, wiążącego do fullerenów sferoidalnych, tworzy się odnoga, prowadząca do rurek, jeśli uda nam się w jakiś sposób (np. za pomocą atomów kobaltu lub niklu) ograni-

czyć zdolność krawędzi cząsteczki do zakrzywienia się i zamknięcia. Atomy metalu uniemożliwiają powstanie siódmego, ósmego i dziewiątego pięciokąta dzięki miejscowemu podwyższeniu temperatury. Stwarza to bardzo szczególne warunki temperatury i szybkości reakcji, w których narastająca rurka zostaje wygrzana do najkorzystniejszej energetycznie postaci.

Jedne z najbardziej fascynujących możliwości przyszłych zastosowań fullerenów są związane z obiektem przedstawionym na rys. 3. Jest to krótki fragment rurki (10,10) o chemicznie zmodyfikowanych końcach. Jeden koniec rurki jest zamknięty czaszą, stanowiącą połowę fullerenu (jest to połowa bardzo szczególnego fullerenu: dwudziestościennej cząsteczki  $C_{240}$ ), a drugi koniec pozostawiono celowo otwarty. Zamknięty koniec zawiera pięciokąty, jest więc bardziej aktywny chemicznie niż jednorodny, złożony z samych sześciokątów ścianki rurki.



Rys. 3. Odcinek zmodyfikowanej chemicznie nanorurki fullerenowej (10,10) o jednym końcu otwartym.

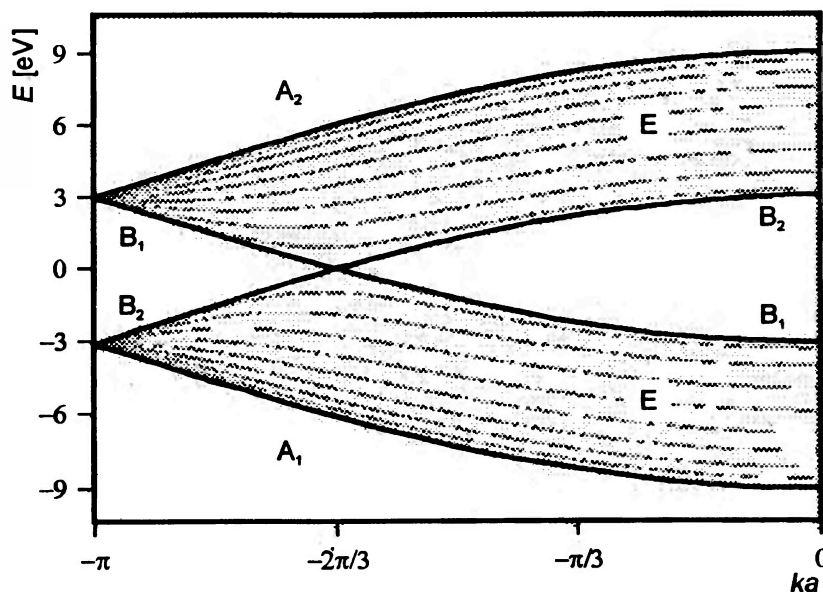
W związku z tym zamknięte końce rurek można usunąć metodami chemicznymi, np. przez gotowanie w kwasie azotowym [9]. Wiemy również, że ponowne, samorzutne zamknięcie się końców takiej rurki można uzyskać umieszczając ją w piecu i ogrzewając do  $1200^{\circ}\text{C}$ . Na końcach rurki, zarówno zamkniętych, jak otwartych bardzo łatwo powstają znakomite wiązania kowalencyjne C–O, C–N lub C–C [10], dzięki czemu do końca rurki można przyłączyć niemal każdą cząsteczkę, enzym, błonę lub warstwę. Załóżmy, że do górnego końca rurki dołączono jeden lub kilka takich obiektów (nazwijmy je A), a do dolnego – jakieś inne obiekty B. Zadziwiającą właściwością takiej rurki, której nie ma żadna inna cząsteczka znana dotychczas chemikom, jest to, że między obiektami A i B zachodzi wzdłuż rurki czysty transport metaliczny. Rurka (10,10) jest więc dla elektronów falowodem kwantowym.

Struktura pasmowa jest dla pojedynczej, płaskiej warstwy grafitu taka sama, jak dla półprzewodników o zerowej przerwie energetycznej: pasmo walencyjne i pasmo przewodnictwa stykają się na końcu strefy Brillouina. Dla energii Fermiego mamy zerową gęstość stanów, skąd wynika słabe przewodnictwo elektryczne. Gdy w młodości dowiedziałem się, że grafit jest marnym przewodnikiem, przewodzi raczej jak ołów, niż jak złoto, pomyślałem, że musi to być wynik grzechu pierworodnego, popełnionego niegdyś przez węgiel. Widocznie elektrony walencyjne atomów węgla mają skłonność do lokalizacji i nie mogą swobodnie przemieszczać się od atomu do atomu wzdłuż rozległej warstwy. Rzecz jednak nie w tym. Elektrony  $\pi$  poruszają się równie swobodnie w płaszczyźnie grafitu, jak w aromatycznym pierścieniu benzenu. W istocie rzeczy to właśnie swoboda ruchu elektronów wzdłuż pierścienia jest źródłem szczególnej trwałości chemicznej cząsteczek aromatycznych. Kłopot z przewodnictwem elektrycznym bierze się stąd, że jeśli wyznacza się strukturę pasmową heksagonalnej płaszczyzny grafitu, to ze względu na symetrię problemu dostaje się zerową gęstość stanów dla energii Fermiego. Nawet gdyby udało nam się jakimś sposobem zastąpić każdy atom węgla w sieci heksagonalnej przez atom złota, to struktura pasmowa nie zmieniałaby się. Kłopot bierze się z własności symetrii sieci heksagonalnej, a nie z delokalizacją elektronów  $\pi$  węgla.

Obecnie wiemy już, że jest pewien (choć tylko jeden) sposób na to, by zrobić metal z czystego węgla. Jeśli weźmie się płaszczyznę grafitu, wytnie z niej cienki pasek, a następnie zwinie się go w długi walec i połączy ze sobą luźne wiązania tak, by otrzymać rurkę (10,10) jak na rys. 2, to te same własności symetrii, które przeszkadzały nam w uzyskaniu właściwości metalicznych dla siatki płaskiej, teraz nam pomogą. Dla takiej walcowej sieci heksagonalnej własności symetrii implikują istnienie dwóch pasm, które przecinają się dla energii Fermiego, z grubsza w dwóch trzecich długości strefy Brillouina, jak widać to ze struktury



pasem przedstawionej na rys. 4. Co więcej, sztywność szkieletu płaszczyzny grafitu, zbudowanego z wiązań typu  $\sigma$ , uniemożliwia elektronom  $\pi$ , odpowiedzialnym za właściwości metaliczne, tworzenie niestabilności typu Peierlsa, które zwykle są plagą wszystkich jednowymiarowych struktur przewodzących [11]. Rurka fullerenowa (10,10), i ogólnie każda rurka  $(n,n)$ , będzie więc przewodem cząsteczkowym, stanowiącym jednocześnie dobry przewodnik metaliczny i „dobrą” cząsteczkę, tzn. będzie zachowywać i swą budowę, i dobre przewodnictwo także w warunkach świata rzeczywistego, tzn. w obecności powietrza i wody.



Rys. 4. Struktura pasm elektronowych nanorurki fullerenowej (10,10) wyznaczona w modelu silnego wiązania ze struktury pasm nieskończonej dwuwymiarowej warstwy grafitu [59]. Dwa pasma, których energia jest równa energii Fermiego dla  $ka = 2/3$ , mają różną symetrię, co powoduje, że rurka jest przewodnikiem metalicznym.

Sądzę, że jest całkiem prawdopodobne, iż w przyszłości szeroka gama nowych cząsteczek fullerenowych o właściwościach metalicznych, takich jak pokazana na rys. 3, będzie bez trudu dostępna w firmach sprzedających chemikalia. Proszę sobie wyobrazić, co to oznacza. W istocie każda znana nam technologia, korzystająca z tego, że elektrony przemieszczają się z jednego miejsca w drugie, może doznać rewolucyjnych zmian w wyniku dostępności przewodów cząsteczkowych z węgla. Chemicy-organicy będą budować elementy o pożądanym właściwościach. Elektronika cząsteczkowa stanie się rzeczywistością.

W chwili obecnej wydaje się, że to jest właśnie przyszłość fullerenów. Nie wygląda jednak na to, że proces ich odkrywania jest już zakończony. Może się okazać, że ten jeden mały atom z całego układu okresowego ma wiele innych zdumiewających właściwości, z których jeszcze nie zdajemy sobie sprawy.

Dzisiejsza uroczystość jest jednak poświęcona pewnemu określönemu odkryciu. Coś się zdarzyło we wrześniu 1985 r. Co to było? Jak do tego doszło? Od tego czasu zajmowaliśmy się trochę czymś, co lubię nazywać archeologią fullerenów, tzn. poszukiwaniem w przeszłości, korzystając ze źródeł pisanych i słownych, korzeni naszego odkrycia fullerenów. Odkrycie to dotyczy w swej istocie sposobu, w jaki węgiel się zestala, jego cudownego daru tworzenia klastrów (zlepków).

O tym, że węgiel ma szczególną zdolność zlepienia się w klastry w fazie gazowej przy wysokiej temperaturze, wiedzano od dawna. W odróżnieniu od innych trudnotopliwych pierwiastków układu okresowego, w parze węgla, znajdującej się w równowadze z ciałem stałym w temperaturze z przedziału 3000–4000 K dominują klastry  $C_n$ , przy czym całkiem znaczna jest w niej zawartość obiektów tak dużych, jak  $C_{15}$ . Pierwsze informacje na ten temat pochodzą z wczesnych badań produktów rozszczepienia jąder, wykonanych w Niemczech przez Hahna i Strassmanna [12]. Zauważyli oni, że w wyładowaniu łukowym wysokiej częstotliwości o elektrodach węglowych, używanym przez nich do analizy zawartości różnych pierwiastków w badanej próbce za pomocą spektroskopii mas [13], tworzą się jony klastrów węgla  $C_n^+$  o liczbie atomów sięgającej 15. Podobne wyniki otrzymano także mniej więcej w tym samym czasie w Stanach Zjednoczonych w trakcie badań w ramach Projektu Manhattan w czasie II wojny światowej [14]. We wczesnych latach pięćdziesiątych było już jasne, że w parze węgla w warunkach równowagi jest na tyle dużo małych klastrów, że wpływa to w istotny sposób na wyniki pomiarów ciepła tworzenia gazowego węgla [15,16], będącego jedną z najważniejszych stałych termodynamiki chemicznej. W 1959 r. Pitzer i Clementi wykonali pierwsze poważne obliczenia kwantowe dotyczące klastrów węgla złożonych z nie więcej niż 20 atomów [17,18] i stwierdzili, że od  $C_2$  do  $C_{10}$  mają one kształt liniowych łańcuchów, a dla większej liczby atomów przyjmują postać pojedynczych pierścieni – takich kółek hula-hoop z czystego węgla.

Choć nie zwrócono na to w owym czasie specjalnej uwagi, jest to wynik zadziwiający. Oto węgiel jest w stanie tworzyć klastry, które są tak trwałe, że dominują w parze węgla – jest ich znacznie więcej niż pojedynczych atomów – nawet w temperaturze 3000–4000 K, a przecież ich postać opisuje liczba koordynacyjna równa zaledwie dwa! Wszystkie inne pierwiastki trudnotopliwe, jak platyna, wolfram, czy tantal, uzyskują dużą energię kohezji przez ciasne upakowanie w kryształach objętościowym lub w cieczy, w układach o liczbie koordynacyjnej od 8 do 12. I choć klastry tych metali w fazie gazowej tworzą struktury zwarte [19], w któ-

rych każdy atom jest otoczony w trzech wymiarach tak dużą liczbą atomów, jak tylko jest to możliwe, to nie mają one na tyle dużej energii kohezyjnej, by dominować w parze. Przeciwnie, pary tych metali są niemal całkowicie jednoatomowe. W temperaturze powyżej 1000 K para każdego pierwiastka układu okresowego, znajdująca się w równowadze z czystą fazą zestaloną, zawiera głównie albo pojedyncze atomy, albo cząsteczki dwuatomowe – węgiel jest jedynym wyjątkiem. Węgiel, który tworzy tak wiele dużych klastrów, że pomiar ciepła tworzenia traci sens, robi to w tak beczelnie cyrkowy sposób, że dwa z trzech dostępnych mu wymiarów ma „związane na plecach”.

Przeglądając dziś dane literaturowe na temat klastrów czystego węgla w fazie gazowej, dostępne do połowy 1984 r., widzi się jasno, że wyniki doświadczeń nie wskazywały na istnienie niczego ciekawszego niż takie klastry jednowymiarowe [20,21]. Model łańcuchów liniowych i pojedynczych pierścieni dobrze wyjaśniał wszystkie dane doświadczalne, a liczba klastrów malała tak znacznie dla ich rozmiaru wynoszącego dwadzieścia kilka atomów, że nie było powodu myśleć o tym, co się będzie działo dla jeszcze większych klastrów. W świetle tego, co dziś wiemy o fullerenach, zastanowienie się nad tym mogło być bardzo owocne. W końcu, w miarę dalszego wzrostu rozmiaru klastrów z pewnością musiały pojawić się próby tworzenia struktur dwu- i trójwymiarowych. Jak wyglądałyby takie struktury? Oszacowanie energii swobodnych wiązań powinno doprowadzić do wniosku, że zaczną tworzyć się warstwy grafitu, które następnie zwiną się i utworzą zamknięte klatki.

Jednak nic nie wskazuje na to, że ktokolwiek przeprowadził takie rozumowanie. Wprawdzie w połowie lat sześćdziesiątych Jones rozważał zwiniecie się warstw grafitowych w cząsteczki „puste w środku” [4], a Osawa na początku 1970 r. wyczarował obraz węgla w strukturze o kształcie piłki futbolowej [2], wreszcie w 1973 r. Halpern ukończył pierwsze z serii obliczeń metodą Hückela, które wykazały, że powinny to być cząsteczki w kształcie zamkniętej powłoki o dużej różnicy energii orbitali HOMO i LUMO, lecz nikt nigdy nie zasugerował, że takie obiekty mogą się tworzyć samorzutnie w parze węgla w czasie jej kondensacji. Zagadka kuli fullerenowej nie polegała nigdy na tym, czy będzie ona trwała, gdy już powstanie. W końcu jej struktura nie narusza żadnych praw chemii organicznej. Tajemnicą, którą trzeba było odkryć, jest fakt, że jedną z „cech wrodzonych” węgla jest jego wspaniała zdolność tworzenia biernych chemicznie warstw dwuwymiarowych, samorzutnego budowania fullerenów, w szczególności cząsteczek  $C_{60}$ , z zadziwiająco dużą wydajnością, i to wszystko z nieładu pary węgla w temperaturze kilku tysięcy stopni.

Do pojawienia się takich idei niezbędne były nowe dane doświadczalne – dane dotyczące tego, co się stanie, gdy para węgla stanie się przesycona, pozwoli

się jej na zestalanie, i małe klastry, będące w równowadze z ciałem stałym, zaczęły rosnąć. Warunkiem pojawienia się takich danych było powstanie nowych metod doświadczalnych, metod pozwalających na dokładne badanie właściwości klastrow węgla w czasie ich wzrostu w zakresie rozmiaru klastra od 40 do 100 atomów, w którym wymiarowość cząsteczki wzrasta – jak obecnie wiemy – od 1 do 2. Taką metodą była metoda wiązek klastrow wykorzystująca odparowanie laserowe, wprowadzona w latach osiemdziesiątych.

Metoda naddźwiękowych wiązek klastrow z odparowaniem laserowym powstała na Uniwersytecie Rice'a w latach 1980–81 jako narzędzie do badania klastrow praktycznie wszystkich pierwiastków układu okresowego, także pierwiastków wysoce trudno topliwych [22-26] oraz półprzewodników, jak krzem [27] i arsenek galu [28]. Celem tych badań było poznanie właściwości materii złożonej z elementów o rozmiarach pośrednich między atomami a kryształami objętościowymi. Metoda ta była owocem dziesiątek lat rozwoju metod wiązek atomowych i cząsteczkowych, a w szczególności powstania metody „domieszkowanych” (ang. seeded) naddźwiękowych wiązek cząsteczkowych, w których następuje „zamrożenie” znacznej liczby przejść rotacyjnych i oscylacyjnych, dzięki czemu staje się możliwe dokładne badanie cząsteczek wieloatomowych [29-32]. Prócz możliwości badania zwykłych, trwałych chemicznie cząsteczek wieloatomowych pozwala ona także na otrzymywanie ultrazimnych klastrow van-der-waalsowskich tworzonych przez te cząsteczki ze sobą oraz z innymi obiektami, w tym – w takich ultraniskich temperaturach – nawet z atomami helu [33]. Wzbudzenie silnym laserem impulsowym w obrębie samej dyszy, wytwarzającej wiązkę naddźwiękową, umożliwiło badanie wolnych rodników – bardzo aktywnych chemicznie elementów cząsteczek [34]. Te wczesne prace dotyczące wolnych rodników doprowadziły następnie do użycia metody domieszkowanych wiązek naddźwiękowych do badania atomów pierwiastków trudno topliwych i ich klastrow.

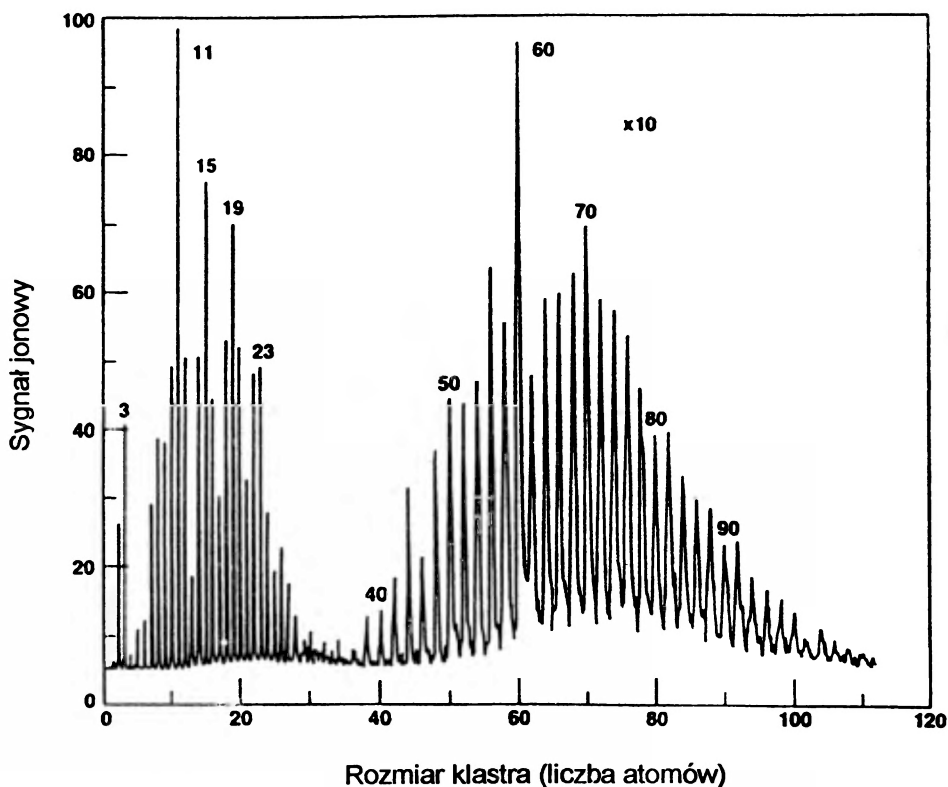
Dostępność wiązek klastrow pierwiastków trudno topliwych dała początek nowej, rozległej dziedzinie badań. Ponieważ klastry mogą być uważane za bardzo małe cząstki krystaliczne (o rozmiarach rzędu nanometrów), które mają powierzchnię (w istocie większa ich część to właśnie powierzchnia), metoda naddźwiękowych wiązek klastrow metalicznych jest też nową metodą badań powierzchni [35]. Mój zespół z Uniwersytetu Rice'a zaangażował się bardzo silnie w rozwój takich badań. Rozwinęliśmy i zastosowaliśmy w tych badaniach nowe metody badania struktury elektronowej klastrow wykorzystujące jedno- i dwufotonową fotojonizację wiązką laserową z użyciem metody czasu przelotu do wyznaczania widma mas [25,36,37], a także metody spektroskopii fotodysocjacyjnej, spektroskopii fotoelektronów przy wzbudzeniu w zakresie nadfioletu i inne [38-41]. Do badań w zakresie chemii powierzchni klastrow o rozmiarach rzędu nanometrów

wprowadziliśmy rozwiązanie, polegające na użyciu komory o szybkim przepływie substratów reakcji, dołączonej do wylotu dyszy naddźwiękowej [42-44]. Rozwinęliśmy także wiele metod, w których jony klastrow lewitują w polu magnetycznym i są badane metodami rezonansu cyklotronowego [45-47]. Wczesne lata osiemnastie były dla naszej grupy na Uniwersytecie Rice'a okresem bardzo intensywnej i owocnej pracy – wiele się wówczas nauczyliśmy.

Źródło wiązki naddźwiękowej z odparowaniem laserowym i współpracujące z nim układy detekcyjne, używane przez nas do badania klastrow metali i półprzewodników złożonych z 2–200 atomów, można uważać za rodzaj nowego mikroskopu, który pozwala „widzieć” właściwości zlepków atomów o rozmiarach rzędu nanometrów w sposób zupełnie nowy i niezwykle dokładny. Mierząc jakąkolwiek wielkość dla klastra w wiązce naddźwiękowej wiedzieliśmy, że charakteryzuje ona nie zaburzony klaster, biegnący swobodnie w przestrzeni. Rozwinęliśmy tę metodę, by wprowadzić do chemii powierzchni rodzaj nacisku intelektualnego: chcieliśmy wykonać pomiary tak podstawowe, by teoretycy nie mogli spać w nocy, póki ich nie wyjaśnią. Choć wówczas, gdy rozwijaliśmy te badania we wczesnych latach osiemnastych, nie zdawaliśmy sobie jeszcze z tego sprawy, tworzyliśmy w ten sposób przyrząd i kierunek badań, który miał później doprowadzić do odkrycia fullerenów. Trzeba było jedynie umieścić pod tym nowym „mikroskopem” węgiel i poprawić trochę ostrość, by po raz pierwszy „zobaczyć” fullereny w całej krasie.

Tak się złożyło, że to nie my pierwsi umieściliśmy węgiel pod tym mikroskopem. W 1984 r. grupa z laboratorium firmy Exxon, kierowana przez Andrew Kaldora, użyła takiego przyrządu (zresztą zaprojektowanego i zbudowanego na Uniwersytecie Rice'a) do badania klastrow węgla w celu poznania mechanizmu narastania koksu na katalizatorach reformingowych. Otrzymali oni słynne dziś widmo mas, przedstawione na rys. 5, które ujawniło istnienie klastrow węgla złożonych z ponad 100 atomów [48]. Natychmiast stało się jasne, że możliwe będą badania całkiem nowej klasy klastrow węgla, o której istnieniu nikt dotychczas nie wiedział.

W tym widmie mas istnieją trzy wyraźnie różne obszary. Pierwszy to zakres małych klastrow, zawierających mniej niż 25 atomów – mają one postać łańcuchów i pojedynczych pierścieni [49], i są dobrze znane z wcześniejszych badań. W drugim obszarze, od 25 do 35 atomów, obserwuje się bardzo niewiele klastrow – w naszej grupie nazwaliśmy ten obszar „obszarem zabronionym”. W trzecim obszarze, rozciągającym się od 35 do ponad 150 atomów, występują tylko klastry o parzystej liczbie atomów. Na początku 1984 r. stan naszej wiedzy był taki, że badania metodą naddźwiękowej wiązki klastrow z odparowaniem laserowym wykonano już dla klastrow bardzo wielu pierwiastków i zarejestrowano widma



Rys. 5. Widmo mas klastków węgla w wiązce naddźwiękowej wytworzonych przez odparowanie laserowe z tarczy węglowej w impulsowej dyszy naddźwiękowej przy użyciu helu jako gazu nośnego [48]. Klastki węgla o parzystej liczbie atomów – od około 40 do ponad 100 atomów węgla – to fullereny. Jest to pierwszy opublikowany wynik doświadczalny dowodzący istnienia fullerenów, choć w czasie, gdy został otrzymany, nie zdawano sobie jeszcze z tego sprawy.

mas klastków charakteryzujące się różnymi „liczbami magicznymi” [35], lecz dla żadnego pierwiastka nie zaobserwowano rozkładu choćby z grubsza przypominającego widmo dla węgla, w którym występują tylko klastki o parzystej liczbie atomów. Dziś jest tak nadal: węgiel jest wyjątkowy.

Klastki o parzystej liczbie atomów w widmie mas, otrzymanym przez grupę z Exxonu, to oczywiście fullereny. Podejrzewam, że członkowie tej grupy do dziś żałują, że nie zastanowili się głębiej, dlaczego maksimum dla  $C_{60}$  jest o ok. 20% większe od swych sąsiadów. Trzeba jednak uczciwie powiedzieć, że my też tego nie zrobiliśmy. Wyniki grupy z Exxonu były powszechnie znane latem 1984 r. w rodzącym się świecie badaczy klastków metali i półprzewodników. Ja sam



widziałem te wyniki na jednej z konferencji i dyskutowałem o nich z Andym Kaldorem przez dłuższy czas. Widział je Bob Curl. Widział je Harry Kroto. Widzieli je Wolfgang Krätschmer i Donald Huffman. Żaden z nas nie zadał sobie pytania, dlaczego właściwie węgiel  $C_{60}$  jest nieco więcej niż innych klastrów o parzystej liczbie atomów, gdyż nie było go dostatecznie dużo więcej, by zacząć się nad tym zastanawiać. Jak się potem okazało, grupa z Exxonu po prostu nie „ustawiła ostrości” swego mikroskopu wiązki klastrów dostatecznie dokładnie.

Mniej więcej w tym samym czasie inna grupa badaczy, w skład której wchodził jeden z moich byłych studentów Michael Geusic, zbudowała także układ naddźwiękowej wiązki klastrów i stosowała go do badań jonów klastrów półprzewodników o wybranej masie [50]. Dowiedziawszy się o wynikach grupy z Exxonu, wykonali oni pomiary dla węgla, zaobserwowali ponownie tajemniczy rozkład mas, zawierający dla dużych klastrów tylko obiekty o parzystej liczbie atomów, a nawet wybrali  $C_{60}^+$  do badania fotofragmentacji. Jednak i oni nie zmieniali warunków panujących w dyszy w dostatecznie szerokich granicach na to, by uzyskać znaczącej dominacji klastrów  $C_{60}$ .

Konieczne „wyostrzenie” mikroskopu naddźwiękowej wiązki klastrów zostało ostatecznie dokonane w moim laboratorium na Uniwersytecie Rice’a we wrześniu 1985 r. [1,51]. Supremacja  $C_{60}$  stała się natychmiast widoczna. Zastanawiając się nad tym, co to wszystko znaczy, doszliśmy w końcu do wniosku, że  $C_{60}$  musi być zamkniętą klatką sferoidalną – żadne inne wyjaśnienie nie było zgodne z wynikami doświadczeń. Stwierdzenie, że wszystkie ciężkie klastry węgla o parzystej liczbie atomów są pustymi w środku strukturami geodezyjnymi – fullerenami – pojawiło się miesiąc później w wyniku badań aktywności chemicznej tych klastrów [52], wykonanych przy użyciu komory o szybkim przepływie substratów reakcji, dołączonej do wylotu dyszy. Piłka futbolowa  $C_{60}$  szybko stała się czymś w rodzaju kamienia z Rosetty<sup>1</sup>, prowadząc do odkrycia nowego świata tworzonych przez czysty węgiel struktur geodezyjnych o rozmiarach rzędu nanometrów.

Samo odkrycie jest już dziś tak obszernie przedstawione w licznych artykułach [53,54], monografiach [55,56] i dokumentach telewizyjnych, że powtarzanie tu jego szczegółów nie ma większego sensu. Odnieśliśmy sukces tam, gdzie dwa inne

---

<sup>1</sup> Kamień z Rosetty – płyta z czarnego bazaltu znaleziona w 1799 r. przez Boussarda, francuskiego oficera saperów, w czasie wykopalisk dokonywanych w forcie St. Julien koło Rosetty (arab. Raszid) w delcie Nilu. Na płycie w 195 r. pne. wyryto w języku egipskim, pismem hieroglificznym i demotycznym, oraz w języku greckim napis ku czci Ptolemeusza V Epifanesa, sławiący króla, że anulował dług stanu kapłańskiego. Kamień zdobyły wojska angielskie w 1801 r.; od tego czasu jest w Muzeum Brytyjskim w Londynie. Jego wielka wartość wynika stąd, że dzięki przekładowi greckiemu stał się dla J.F. Champolliona, Thomasa Younga i in. kluczem do odczytania hieroglifów egipskich (W. Kopaliński, *Słownik mitów i tradycji kultury* (PIW, Warszawa 1985)) – przyp. tłum.

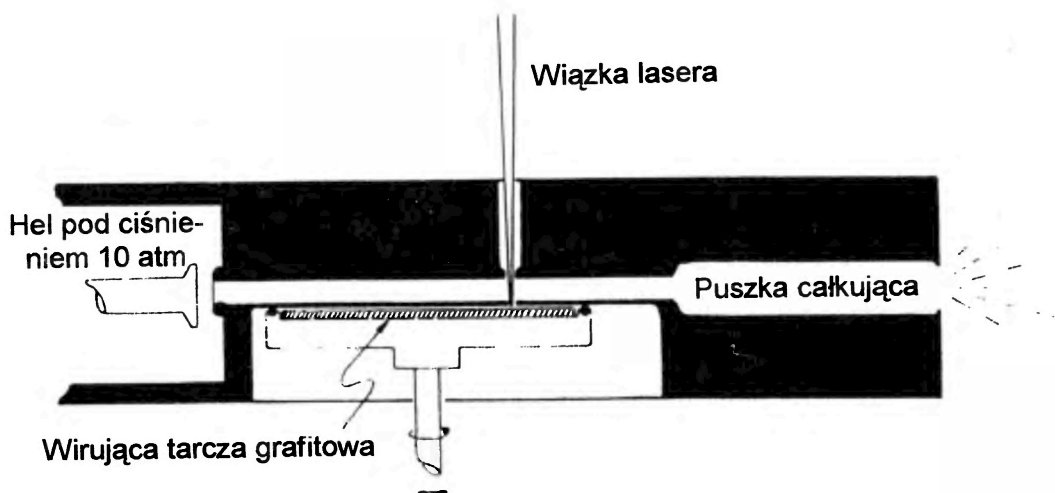


Rys. 6. Zdjęcie autora artykułu wychylającego się zza górnej części AP2 – układu naddźwiękowej wiązki klastrow z odparowaniem laserowym, za pomocą którego odkryto  $C_{60}$  i inne fullereny jesienią 1985 r.

zespoły badawcze poniosły porażkę, z co najmniej dwóch przyczyn. Po pierwsze, zbudowaliśmy lepszy „mikroskop”. To my stworzyliśmy metodę naddźwiękowej wiązki klastrow, a i potem przodowaliśmy w jej dalszym rozwoju. Użyty przez nas układ, pokazany na rys. 6, nazywany czule przez studentów „AP2”, dopuszczał użycie silniejszego przepływu gazów oraz miał bardziej nowoczesnie rozwiązaną dyszę naddźwiękową niż układy dwóch pozostałych grup. Szczególnie ważne było użycie wirującej tarczy w źródle wiązki klastrow. Rozwiązanie to zastosowaliśmy nieco wcześniej w badaniach klastrow półprzewodników: krzemu, germanu [27] i arsenku galu [28]. W ramach tych prac konieczne było możliwie silne wygrzewanie klastrow półprzewodników w źródle wiązki, tzn. w dyszy. Dla łatwej interpretacji wyników pomiarów potrzebne było stworzenie warunków, w których w rozkładzie klastrow dominują obiekty o najkorzystniejszej energetycznie postaci geometrycznej. W tym celu do dyszy dołączyliśmy wiele elementów formujących wiązkę przez ograniczanie przepływu, tworzących łącznie układ nazwany przez nas „puszką całkującą”; jest on przedstawiony na rys. 7.

Doświadczenie w pracy z tym urządzeniem, będącym swego rodzaju „kuchnią chemiczną”, doprowadziło nas do przekonania, że to chemia klastrow wyróżnia





Rys. 7. Schemat źródła wiązki naddźwiękowej z odparowaniem laserowym użytego w doświadczeniu, w którym odkryto fullereny. Należy zwrócić uwagę na fragment oznaczony jako „puszka całkująca”. Reakcje klastrow w tym obszarze powodują, że tworzy się ponad 50 razy więcej klastrow  $C_{60}$  niż innych klastrow o zbliżonej liczbie atomów. To właśnie te liczne reakcje z małymi, liniowymi i pierścieniowymi klastrami węgla, w których tworzą się klastry o większej liczbie atomów, prowadzą w efekcie do sytuacji, że w końcowym rozkładzie dominuje – dzięki swej doskonałej symetrii –  $C_{60}$ .

$C_{60}$  w stosunku do innych klastrow węgla. Zrozumieliśmy, że maksimum dla  $C_{60}$  jest ponad 50 razy silniejsze od innych maksimów rozkładu mas klastrow, gdyż  $C_{60}$  niemal nie ulega dalszym reakcjom, dającym w wyniku klastry o większej liczbie atomów. A zastanawiając się nad tym, jak to możliwe, by 60 atomów węgla połączyło się ze sobą nie pozostawiając żadnych wolnych wiązań, doszliśmy do wniosku, że  $C_{60}$  ma kształt dwudziestościanu ściętego.

Drugą przyczyną naszego sukcesu była w moim przekonaniu – by rzecz ująć jednym słowem – *karma*, czyli nasze przygotowanie do sprostania temu wyzwaniu. W trakcie badań klastrow półprzewodników stworzyliśmy z Bobem Curlem styl pracy naukowej o takim stopniu wymagań i przenikliwości intelektualnej, jakiego nie spotkałem w żadnym innym zespole badawczym. Sean O'Brien zbudował dyszę naddźwiękową dokładnie tak, że można było pokonać wszelkie trudności w pracy z klastrami półprzewodników, a Jim Heath wykształcił w sobie zadziwiającą zdolność „zmuszania aparatury” do produkowania ważnych wyników doświadczalnych. Po przyjeździe Harry’ego Kroto jego zapał i bogate doświadczenie znakomicie uzupełniły tę mieszankę. Pracując ze studentami głównie późno po

południu i wieczorem, a dyskutując ze mną bez końca w ciągu dnia, nie pozwalał nam myśleć o czymkolwiek innym niż wyniki niecierpliwie „wydzierane” z AP2 przez Heatha i O’Brieną. Wszyscy członkowie naszego zespołu latami pracy i doświadczeń zapracowali – każdy na swój sposób – na to, by w tych cudownych dniach września 1985 r. wziąć udział w odkryciu fullerenów.

W przeciwieństwie do opinii wyrażanych w większości opisów odkrycia fullerenów nie sądzę, by miało ono wielki związek z problemami astrofizycznymi, takimi jak mechanizm tworzenia się cząsteczek węgla w przestrzeni międzygwiazdowej. Choć niewątpliwie zainteresowanie tymi problemami przywiodło Harry’ego Kroto do Teksasu, a nas skłoniło do uruchomienia po raz pierwszy doświadczenia z węglem w oczekiwaniu na jego przybycie, to jednak w ostatecznym rachunku związek tego wątku badań [57,58] z odkryciem fullerenów nie był związkiem przy czynowym. Tak czy inaczej, odkrycie  $C_{60}$  i innych fullerenów musiało się dokonać w czasie najbliższego roku lub dwóch przy użyciu AP2 lub innego przyrządu tego rodzaju. Dwa inne zespoły rozpoczęły już badania węgla metodą naddźwiękowej wiązki klastrow kierując się znacznie bardziej przyziemnymi motywami. W laboratorium firmy Exxon, jak już wspomnieliśmy, starano się przede wszystkim doprowadzić do zrozumienia mechanizmu narastania węgla na katalizatorach, a w Laboratorium Bella firmy AT&T było to odgałęzienie prowadzonych od wielu lat badań półprzewodników o rozmiarach rzędu nanometrów.

Pogląd, że odkrycie fullerenów było konsekwencją badań właściwości pewnych cząsteczek w przestrzeni pozaziemskej, jest dla wielu naukowców bardzo pociągający. Trudno sobie wyobrazić kierunek badań bardziej oderwany od możliwości praktycznych zastosowań technicznych na Ziemi niż chemia przestrzeni międzygwiazdowej. Jeśli więc, jak sądzą niektórzy (w tym i ja), odkrycie fullerenów doprowadzi w przyszłości do wspaniałych rozwiązań technicznych, to można twierdzić, że podobnie owocny może być dowolny projekt badawczy, choćby wyglądał początkowo na całkiem oderwany od problemów tego świata. Dawniej i ja tak uważałem, a nawet dziś sądzę, że w takim podejściu jest trochę prawdy – ale tylko trochę. W rzeczywistości odkrycie fullerenów było konsekwencją dziesiętków lat badań i rozwoju metod badania najpierw atomów, potem cząsteczek wieloatomowych, a wreszcie skupisk atomów o rozmiarach rzędu nanometrów. Były to solidnie finansowane badania, których podjęcie było niemal na każdym etapie uzasadnione przez ich potencjalny związek z bieżącymi problemami technicznymi. W tym przypadku nadzieje na przydatność w praktyce wyników badań podstawowych sprawdziły się w znacznym stopniu.

Choć jest rzeczą zabawną zastanawiać się nad cudowną rolą zbiegów okoliczności w historii odkrycia fullerenów, to warto też poświęcić chwilę czasu na uprzytomnienie sobie, że było ono nieuniknione. Jedynym naprawdę wspaniałym

południu i wieczorem, a dyskutując ze mną bez końca w ciągu dnia, nie pozwalali nam myśleć o czymkolwiek innym niż wyniki niecierpliwie „wydzierane” z AP2 przez Heatha i O’Briena. Wszyscy członkowie naszego zespołu latami pracy i doświadczeń zapracowali – każdy na swój sposób – na to, by w tych cudownych dniach września 1985 r. wziąć udział w odkryciu fullerenów.

W przeciwieństwie do opinii wyrażanych w większości opisów odkrycia fullerenów nie sądzę, by miało ono wielki związek z problemami astrofizycznymi, takimi jak mechanizm tworzenia się cząsteczek węgla w przestrzeni międzygwiazdowej. Choć niewątpliwie zainteresowanie tymi problemami przywiodło Harry’ego Kroto do Teksasu, a nas skłoniło do uruchomienia po raz pierwszy doświadczenia z węglem w oczekiwaniu na jego przybycie, to jednak w ostatecznym rachunku związek tego wątku badań [57,58] z odkryciem fullerenów nie był związkiem przy czynowym. Tak czy inaczej, odkrycie  $C_{60}$  i innych fullerenów musiało się dokonać w czasie najbliższego roku lub dwóch przy użyciu AP2 lub innego przyrządu tego rodzaju. Dwa inne zespoły rozpoczęły już badania węgla metodą naddźwiękowej wiązki klastrow kierując się znacznie bardziej przyziemnymi motywami. W laboratorium firmy Exxon, jak już wspomnieliśmy, starano się przede wszystkim doprowadzić do zrozumienia mechanizmu narastania węgla na katalizatorach, a w Laboratorium Bella firmy AT&T było to odgałęzienie prowadzonych od wielu lat badań półprzewodników o rozmiarach rzędu nanometrów.

Pogląd, że odkrycie fullerenów było konsekwencją badań właściwości pewnych cząsteczek w przestrzeni pozaziemskiej, jest dla wielu naukowców bardzo pociągający. Trudno sobie wyobrazić kierunek badań bardziej oderwany od możliwości praktycznych zastosowań technicznych na Ziemi niż chemia przestrzeni międzygwiazdowej. Jeśli więc, jak sądzą niektórzy (w tym i ja), odkrycie fullerenów doprowadzi w przyszłości do wspaniałych rozwiązań technicznych, to można twierdzić, że podobnie owocny może być dowolny projekt badawczy, choćby wyglądał początkowo na całkiem oderwany od problemów tego świata. Dawniej i ja tak uważałem, a nawet dziś sądzę, że w takim podejściu jest trochę prawdy – ale tylko trochę. W rzeczywistości odkrycie fullerenów było konsekwencją dziesiątków lat badań i rozwoju metod badania najpierw atomów, potem cząsteczek wieloatomowych, a wreszcie skupisk atomów o rozmiarach rzędu nanometrów. Były to solidnie finansowane badania, których podjęcie było niemal na każdym etapie uzasadnione przez ich potencjalny związek z bieżącymi problemami technicznymi. W tym przypadku nadzieje na przydatność w praktyce wyników badań podstawowych sprawdziły się w znacznym stopniu.

Choć jest rzeczą zabawną zastanawiać się nad cudowną rolą zbiegów okoliczności w historii odkrycia fullerenów, to warto też poświęcić chwilę czasu na uprzytomnienie sobie, że było ono nieuniknione. Jedyne naprawdę wspaniałym

bohaterem tej opowieści jest sam węgiel. Fullereny tworzą się zawsze, gdy węgiel się zestala. Potrzebowaliśmy po prostu trochę czasu, by się o tym dowiedzieć.

Tłumaczył *Mirostław Łukaszewski*

Instytut Fizyki PAN  
i Szkoła Nauk Ścisłych  
Warszawa

## Literatura

- [1] H.W. Kroto, J.R. Heath, S.C. O'Brien, R.F. Curl, R.E. Smalley, *Nature* **318**, 162 (1985).
- [2] E. Osawa, *Kagaku* **25**, 854 (1970).
- [3] E. Osawa, *Philos. Trans. Roy. Soc. London Series A - Phys. Sci. Eng.* **343**, 1 (1993).
- [4] D.E.H. Jones, *New Scientist* **32**, 245 (1966).
- [5] D.E.H. Jones, *The Inventions of Daedalus* (W.H. Freeman, Oxford 1982).
- [6] D.A. Bochvar, E.G. Galpern, *Proc. Acad. Sci. USSR* **209**, 610 (1973).
- [7] I.V. Stankevich, M.V. Nikerov, D.A. Bochvar, *Russian Chemical Reviews* **53**, 640 (1984).
- [8] A. Thess i in., *Science* **273**, 483 (1996).
- [9] S.C. Tsang, Y.K. Chen, P.J.F. Harris, M.L.H. Green, *Nature* **372**, 159 (1994).
- [10] A. Hirsch, *The Chemistry of the Fullerenes*, Thieme Organic Chemistry Monograph Series (Stuttgart 1995).
- [11] J.W. Mintmire, B.I. Dunlap, C.T. White, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 631 (1992).
- [12] O. Hahn, F. Strassmann, J. Mattauch, H. Ewald, *Naturwiss.* **30**, 541 (1942).
- [13] J. Mattauch, H. Ewald, O. Hahn, F. Strassmann, *Z. Physik* **120**, 598 (1943).
- [14] L. Brewer, P.W. Gilles, F.A. Jenkins, *J. Chem. Phys.* **16**, 797 (1948).
- [15] W.A. Chupka, M.G. Inghram, *J. Chem. Phys.* **21**, 1313 (1953).
- [16] W.A. Chupka, M.G. Inghram, *J. Phys. Chem.* **59**, 100 (1955).
- [17] K.S. Pitzer, E. Clemente, *J. Amer. Chem. Soc.* **81**, 4477 (1959).
- [18] S.J. Strickler, K.S. Pitzer, w: *Molecular Orbitals in Chemistry, Physics, and Biology*, red. P.O. Lowdin, B. Pullman (Academic Press, New York 1964), s. 281.
- [19] M.F. Jarrold, *J. Phys. Chem.* **99**, 11 (1995).
- [20] E. Dörnenburg, H. Hintenberger, *Z. Naturforsch.* **14A**, 765 (1959).
- [21] E. Dörnenburg, H. Hintenberger, J. Franzen, *Z. Naturforsch.* **16A**, 532 (1961).
- [22] T.G. Dietz, M.A. Duncan, D.E. Powers, R.E. Smalley, *J. Chem. Phys.* **74**, 6511 (1981).
- [23] D.L. Michalopoulos, M.E. Geusic, S.G. Hansen, D.E. Powers, R.E. Smalley, *J. Phys. Chem.* **86**, 3914 (1982).
- [24] D.E. Powers i in., *J. Phys. Chem.* **86**, 2556 (1982).
- [25] D.E. Powers, S.G. Hansen, M.E. Geusic, D.L. Michalopoulos, R.E. Smalley, *J. Chem. Phys.* **78**, 2866 (1983).
- [26] J.B. Hopkins, P.R.R. Langridge-Smith, M.D. Morse, R.E. Smalley, *J. Chem. Phys.* **78**, 1627 (1983).
- [27] J.R. Heath i in., *J. Chem. Phys.* **83**, 5520 (1985).
- [28] S.C. O'Brien i in., *J. Chem. Phys.* **84**, 4074 (1986).

- [29] R.E. Smalley, B.L. Ramakrishna, D.H. Levy, L. Wharton, *J. Chem. Phys.* **61**, 4363 (1974).
- [30] R.E. Smalley, L. Wharton, D.H. Levy, *J. Chem. Phys.* **63**, 4977 (1975).
- [31] R.E. Smalley, L. Wharton, D.H. Levy, w: *Chemical and Biochemical Applications of Lasers*, red. C.B. Moore (Academic Press, 1977), s. 1.
- [32] R.E. Smalley, L. Wharton, D.H. Levy, *Accounts Chem. Res.* **10**, 139 (1977).
- [33] R.E. Smalley, D.H. Levy, L. Wharton, *J. Chem. Phys.* **64**, 3266 (1976).
- [34] D.E. Powers, J.B. Hopkins, R.E. Smalley, *J. Phys. Chem.* **85**, 2711 (1981).
- [35] R.E. Smalley, w: *Comparison of Ab Initio Quantum Chemistry with Experiment for Small Molecules*, red. R.J. Bartlett (D. Reidel Publ. Co., Boston 1985), s. 53.
- [36] T.G. Dietz, M.A. Duncan, M.G. Liverman, R.E. Smalley, *J. Chem. Phys.* **73**, 4816 (1980).
- [37] D.L. Michalopoulos, M.E. Geusic, P.R.R. Langridge-Smith, R.E. Smalley, *J. Chem. Phys.* **80**, 3556 (1984).
- [38] M.D. Morse, J.B. Hopkins, P.R.R. Langridge-Smith, R.E. Smalley, *J. Chem. Phys.* **79**, 5316 (1983).
- [39] P.J. Brucat, L.-S. Zheng, C.L. Pettiette, S. Yang, R.E. Smalley, *J. Chem. Phys.* **84**, 3078 (1986).
- [40] P.J. Brucat i in., *J. Chem. Phys.* **85**, 4747 (1986).
- [41] O. Cheshnovsky i in., w: *Photoelectron Spectroscopy of Metal Cluster Ion Beams*, International Symposium on the Physics and Chemistry of Small Clusters, Richmond, Virginia, red. P. Jena, S. Kanna, B. Rao (Plenum Press, 1986).
- [42] M.D. Morse, M.E. Geusic, J.R. Heath, R.E. Smalley, *J. Chem. Phys.* **83**, 2293 (1985).
- [43] M.E. Geusic, M.D. Morse, R.E. Smalley, *J. Chem. Phys.* **82**, 590 (1985).
- [44] M.E. Geusic, M.D. Morse, S.C. O'Brien, R.E. Smalley, *Rev. Sci. Instr.* **56**, 2123 (1985).
- [45] J.M. Alford, P.E. Williams, D.J. Trevor, R.E. Smalley, *Int. J. Mass Spectr. Ion Proc.* **72**, 33 (1986).
- [46] J.M. Alford, F.D. Weiss, R.T. Laaksonen, R.E. Smalley, *J. Phys. Chem.* **90**, 4480 (1986).
- [47] J.L. Elkind, F.D. Weiss, J.M. Alford, R.T. Laaksonen, R.E. Smalley, *J. Chem. Phys.* **88**, 5215 (1988).
- [48] E.A. Rohlfing, D.M. Cox, A. Kaldor, *J. Chem. Phys.* **81**, 3322 (1984).
- [49] S. Yang i in., *Chem. Phys. Lett.* **144**, 431 (1988).
- [50] L.A. Bloomfield, M.E. Geusic, R.R. Freeman, W.L. Brown, *Chem. Phys. Lett.* **121**, 33 (1985).
- [51] R.F. Curl, R.E. Smalley, *Science* **242**, 1017 (1988).
- [52] Q.L. Zhang i in., *J. Phys. Chem.* **90**, 525 (1986).
- [53] I. Hargittai, *The Chemical Intelligencer* **1**, 6 (1995).
- [54] R.E. Smalley, *The Sciences*, March/April 1991, s. 22.
- [55] J. Baggott, *Perfect Symmetry: The Accidental Discovery of Buckminsterfullerene* (Oxford University Press, Oxford 1994).
- [56] H. Aldersey-Williams, *The Most Beautiful Molecule: The Discovery of the Buckyball* (John Wiley and Sons, Inc., New York 1995).
- [57] J.R. Heath i in., *J. Amer. Chem. Soc.* **109**, 359 (1987).
- [58] H.W. Kroto, J.R. Heath, S. O'Brien, R.F. Curl, R.E. Smalley, *Astrophys. J.* **314**, 352 (1987).
- [59] M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P.C. Eklund, *Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes* (Academic Press, San Diego 1996).

**Michael Marder**

*Center for Nonlinear Dynamics  
University of Texas at Austin  
Austin, Texas, USA*

**Jay Fineberg**

*Racah Institute of Physics  
Hebrew University of Jerusalem  
Jerusalem, Izrael*

## Jak ciała pękają\*

### How things break

*Abstract:* Solids fail through the propagation of cracks, whose speed is controlled by instabilities at the smallest scales.

#### 1. Wstęp

Galileusz dobiegał już siedemdziesiątki, miał życie złamane procesem o herzę przed trybunałem Inkwizycji, gdy osiadłszy w swej willi pod Florencją spisywał *Rozmowy i dowodzenia matematyczne w zakresie dwóch nowych umiejętności dotyczących mechaniki i ruchów miejscowych* [1]. Pierwsza z wymienionych w tytule umiejętności to badanie sił utrzymujących spójność ciał i warunków potrzebnych do jej zerwania – dialog rozwija się pod wpływem obserwacji prac przy budowie weneckiej floty. Druga z nich dotyczy praw opisujących lot pocisków.

W następnych stuleciach różnie toczyły się losy obu zapoczątkowanych wówczas dziedzin. Jedna stała się ważną gałęzią techniki budowy maszyn, druga zaś stanowi dziś główną część wstępnych kursów fizyki. Mimo że i dzisiaj, tak jak

---

\* Artykuł, opublikowany w *Physics Today* 49, nr 9, 24 (1996), został przetłumaczony za zgodą Autorów i Wydawcy [Translated with permission. Copyright ©1996 by American Institute of Physics] (przyp. Red.).

w czasach Galileusza, budowa statków wymaga dokładnej znajomości granic wytrzymałości materiałów, zagadnienie to do dzisiaj nie doczekało się pełnej analizy. Już Galileusz trafnie określił główną trudność: „... nie można większych wymiarów wywodzić z mniejszych w stosunku ponoszonego ciężaru; bywają bowiem maszyny dobrze działające przy małych wymiarach, a niemożliwe przy większych” ([1], s. 10). Minęły niemal trzy stulecia od napisania tych słów, nim nauka sięgnęła do atomowej skali zjawisk i zaczęła udzielać odpowiedzi na postawione w nich pytanie o zależność wytrzymałości od rozmiarów ciał.

Mimo ogromnego rozwoju fizyki ciała stałego w tym stuleciu fizycy poświęcili niewiele uwagi pytaniu, jak ciała pękają. Przynajmniej w części działo się tak dlatego, że pytanie okazało się za trudne. Pęknięcie pojawia się jako szczelina w skali atomowej, osiąga rozmiary makroskopowe, jest zjawiskiem nieodwracalnym i przebiega daleko od stanu równowagi. W tych warunkach zawodzi wiele podstawowych narzędzi fizyki ciała stałego. Nie ma np. doskonale regularnej sieci atomowej pozwalającej wyznaczyć kwantowy ruch elektronów, a rozprzestrzenianie się pęknięcia jest tak szybkie, że w pobliżu jego początku nie można poprawnie zdefiniować nawet tak podstawowego pojęcia jak temperatura. Trzeba także wpisać w koszty własne zakłopotanie, gdy przychodzi powiedzieć kolegom, że pracuje się nad pękaniem ciał. Granice wytrzymałości materiałów wynikające z modelu idealnego ciała stałego są całkowicie błędne – w rzeczywistości wynikają one bowiem z odporności najsłabszego miejsca na najbardziej niszczące naprężenia.

## 2. Rozerwanie ośrodka idealnego

Oto jak pękałoby idealne ciało stałe. Załóżmy, że siła  $F$  rozciąga klocek o wysokości  $h$  i powierzchni przekroju  $A$  (rys. 1). Klocek zostanie rozerwany na dwie części, gdy tworzące go atomy zostaną rozsunięte ponad odległość zerwania. Aby ocenić wartość potrzebnej do tego siły  $F_B$  przypomnijmy, że moduł Younga  $E$  wiąże naprężenie  $\Sigma$  z wywołanym przez nie wydłużeniem ciała  $\delta h$  wzorem

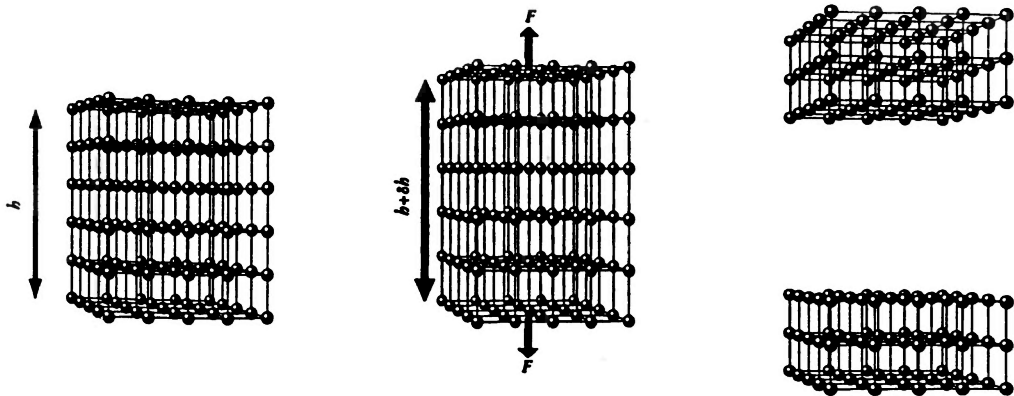
$$\Sigma = \frac{F_B}{A} = \frac{\delta h}{h} E . \quad (1)$$

Przypuśćmy, że klocek zostanie przerwany, gdy odległość między atomami zwiększy się o 20%; odpowiada temu naprężenie krytyczne

$$\Sigma_c = E/5 . \quad (2)$$

Rzut oka na tab. 1 pokazuje, że wyznaczona przez równ. (2) teoretyczna wytrzymałość materiałów jest z grubsza 100 razy większa od rzeczywistej. Naturalne





Rys. 1. Idealny kryształ o długości początkowej  $h$  zwiększa swoją długość o  $\delta h$ , proporcjonalnie do działającej siły  $F$ . Kiedy  $\delta h$  przekracza wartość krytyczną, kryształ pęka na dwie równe części. Taki mechanizm udało się jednak zaobserwować jedynie w specjalnie przygotowanych włóknach szklanych i niektórych metalach [2].

wyduje się uznanie tej rozbieżności za wynik zbyt grubych przybliżeń poczynionych przy wyprowadzaniu wzoru (2), jednak, jak wykazały szczegółowe obliczenia w ramach o wiele dokładniejszych, kwantowych wersji rachunku, nasze przybliżenie jest całkiem dobre i błędu należy szukać gdzie indziej.

Inżynier i fizyk w różny sposób będą szukali najlepszego materiału na budowę domu. Inżynier wybierze cegłę, bo tak robią wszyscy. Fizyk sięgnie do badań podstawowych. Studiując układ okresowy poszuka materiału o najsilniejszych wiązaniach chemicznych i najwyższej temperaturze topnienia – jego pierwszy wybór padnie więc na diament. Szukając czegoś tańszego zdecyduje się w końcu na bezpostaciowy związek krzemu z tlenem, ze względu na łatwość znalezienia surowców

Tabela 1. Teoretyczna i mierzona wytrzymałość mechaniczna niektórych materiałów.

Materiał	Moduł Younga $E$	$E/5$	Wytrzymałość teoretyczna	Wytrzymałość mierzona
Żelazo	16	3	3	0.085
Miedź	19	4	3	0.049
Krzem	18	4	3	0.062
Szkło	7	1	4	0.002



i siłę wiązań. Wszystko będzie dobrze, dopóki ktoś nie rzuci pierwszego kamienia. W rzeczywistości bowiem relacja między siłą wiązań chemicznych i wytrzymałością materiału jest o wiele bardziej skomplikowana – lepiej niech już fizycy uznają doświadczenie praktyków, dopóki nie potrafią wyjaśnić, dlaczego nie należy budować szklanych domów.

### 3. Powstawanie pęknięć

Wytrzymałość materiału określają jego defekty, musimy więc porzucić badanie ośrodka doskonałego i zająć się modelami, w których defekty odgrywają decydującą rolę. Pierwszy taki model skonstruował G.E. Inglis w roku 1913. Badał on dużą płytę z materiału sprężystego z otworem w kształcie elipsy. Przykładając jednorodne naprężenie rozciągające  $\Sigma$  z dala od otworu stwierdził, że naprężenia w pobliżu wąskiego końca otworu są  $2(l/\rho)^{1/2}$  razy większe od  $\Sigma$ , gdzie  $l$  oznacza długość otworu, a  $\rho$  promień jego krzywizny. Podobnie jak naładowane ostrze wytwarza wielkie pole elektryczne, tak krawędź szczeliny jest źródłem ogromnych naprężeń. Jeśli defekt jest wystarczająco cienki, to nawet nie musi być specjalnie długi, żeby bardzo osłabić materiał, w którym się znajduje. Jak wynika z tabeli, kruche materiały pękają przy naprężeniach sto razy mniejszych niż można by oczekiwać. Załóżmy, jak zrobił to A.A. Griffith w roku 1921, że w zwykle stosowanych materiałach znajdują się liczne szczeliny, na krawędziach których naprężenia przekraczają wartość krytyczną, podczas gdy w większości materiału utrzymują się w bezpiecznych granicach. Przyjmując  $\rho = 0.1$  nanometra i  $l = 1$  mikrometr otrzymujemy  $(l/\rho)^{1/2} \approx 100$ . To rozumowanie wyjaśnia obserwowaną wytrzymałość materiałów kruchych, jest bowiem niezwykle trudno wytworzyć materiał pozbawiony mikrometrowych rys na powierzchni [2,3]. Warto zauważyć, że nie zakładaliśmy żadnej krytycznej gęstości defektów; wystarczy nawet pojedyncza szczelina. Dlatego właśnie w konstrukcjach, gdzie wytrzymałość jest szczególnie istotna, jak samoloty czy reaktory jądrowe, statystyczna analiza częstości występowania defektów nie wystarcza do zapewnienia bezpieczeństwa i konieczne jest drobiazgowe badanie każdego elementu. Ponadto należy szczególnie starannie projektować kształt elementów, aby unikać warunków sprzyjających powstawaniu pęknięć (por. Uzupełnienie 1).

### 4. Materiały kruche i ciągliwe

Do największych sukcesów fizyki ciała stałego należy wyjaśnienie różnic między właściwościami materiałów. Dlaczego niektóre ciała przewodzą, a inne są izolatorami? Wyjaśnia to teoria pasmowa. Dlaczego niektóre ciała są przezroczyste

ste, a inne nie? Odpowiadają na to obliczenia oddziaływania światła z materią. Najważniejszym faktem jakościowym dotyczącym właściwości mechanicznych ciał stałych jest obserwacja, że pewne ciała uderzone pękają, a inne tylko zmieniają kształt. Dlaczego?

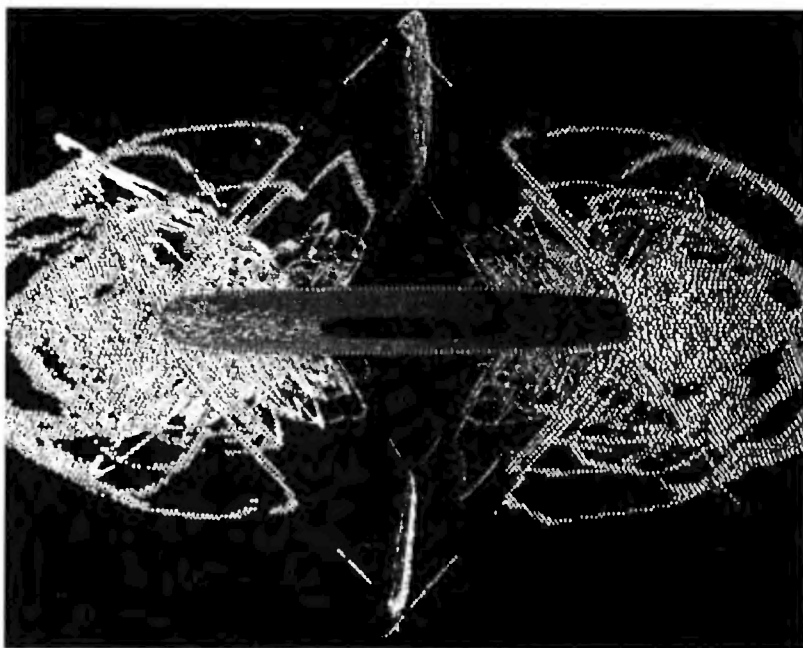
Ostatnie z pytań jest po prostu inaczej sformułowanym pytaniem o to, dlaczego pęknięcie rozprzestrzenia się w ośrodku. Weźmy kawałek materiału, zrobimy w nim nacięcie i zaczniemy rozciągać. W ośrodku kruchym nacięcie ulega spontanicznemu zaostreniu i zagłębia się w materiał rozcinając go niczym nóż o grubości pojedynczej warstwy atomowej [3]. W materiale ciągliwym ślad piły stępia się i poszerza na skutek pełzania materiału i potrzeba dużego wysiłku, żeby spowodować dalsze zagłębianie się szczeliny w ośrodek.

Nie znamy zadowalającej odpowiedzi na pytanie, dlaczego jedne materiały są kruche, a inne ciągliwe – wygląda na to, że producent atomów przemilczał tę informację w instrukcji obsługi. Najlepiej rozwinięte podejście do tego problemu zakłada istnienie mikroszczelin w kryształach (poza tym idealnym) i bada, co się dzieje po przyłożeniu wolno rosnących naprężeń. James Rice i Robb Thomson pokazali w 1974 r., jak można w przybliżeniu ocenić, czy pęknięcie rozprzestrzeni się w głąb materiału, czy też zamiast tego na krawędzi szczeliny powstanie w kryształach dyslokacja powodująca stępienie ostrza tej krawędzi [4]. Rysunek 2 przedstawia wyniki wielkiej symulacji komputerowej, w której badano eliptyczną szczelinę w miedzi – jednym z najplastyczniejszych metali. Z każdego końca defektu wyrasta kłębek nici, pokazujących położenie osi dyslokacji podróżujących w głąb kryształu w najbardziej nieoczekiwanych kierunkach i stanowiących przeszkodę dla dalszego powiększania się pęknięcia.

Kruchość i ciągliwość nie są w gruncie rzeczy związane z rodzajem atomów tworzących ośrodek. Dla większości materiałów istnieje dobrze zdefiniowana temperatura, w której zmienia się on z kruchego w ciągliwy. Dla krzemu temperatura ta wynosi około 500°C [3]. To przejście nie jest jeszcze tak dobrze zrozumiałe, jak lepiej znane zmiany stanu skupienia.

## 5. Dynamika defektów

Pęknięcia i szczeliny nie byłyby groźne, gdyby nie rozprzestrzeniały się w materiale. Naturalne jest więc dążenie do szczegółowego poznania ich dynamiki. Pierwsze obliczenia w tym kierunku przeprowadził Nevill Mott pod wpływem katastrof statków serii „Liberty” w czasie II wojny światowej (patrz Uzupełnienie 1). Praca ta dała początek cieszącej się zadziwiającym powodzeniem teorii skalowania, przedstawionej w Uzupełnieniu 2.



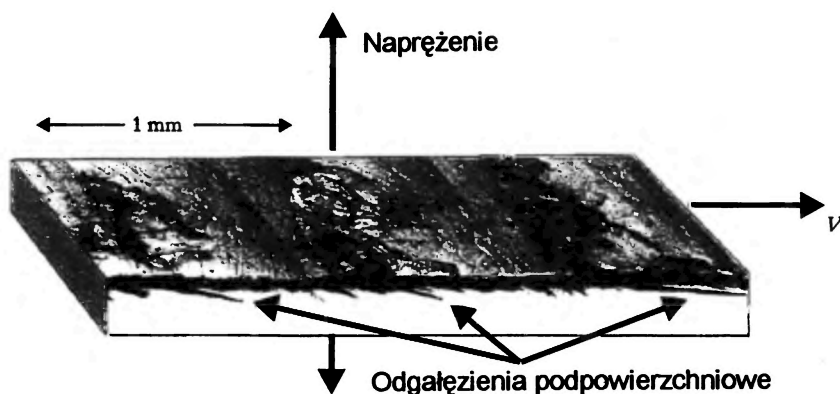
Rys. 2. Symulacja komputerowa materiału ciągłego z użyciem 35 milionów atomów. Eliptyczna szczelina (w środku rysunku) w miedzianej folii o grubości  $0.1\ \mu\text{m}$  poddawana jest rozciąganiu w kierunku pionowym. Przed rozpoczęciem ruchu pęknięcia w kierunku poziomym brzegi otworu stają się źródłem kłębków dyslokacji (jasne linie) – niektóre z nich zderzają się bezpośrednio nad szczeliną. Pokazane są tylko atomy na powierzchni szczeliny i wzdłuż osi dyslokacji. Symulację przeprowadzili Shuija Zhou, David Beazley, Peter Lomdahl i Brad Holian z Wydziału Teorii Narodowego Laboratorium w Los Alamos.

Ten jakościowy model wyjątkowo dobrze przetrwał postęp w stosowanych metodach matematycznych. Jedyne, co można mu zarzucić to fakt, że nigdy nie zgadzał się z doświadczeniem [5]. Wszystkie równania opisujące ruch pęknięcia przewidują, że powinno ono rozprzestrzeniać się z prędkością wzrastającą aż do osiągnięcia prędkości fali Rayleigha – fali dźwiękowej biegnącej wzdłuż płaskiej powierzchni ośrodka sprężystego lub fal sejsmicznych biegnących wzdłuż powierzchni Ziemi. Już w 1937 r. doświadczenia wykazały jednak, że rozwój pęknięcia w szkłe osiąga co najwyżej połowę tej prędkości [6]. Jeśli naszym głównym celem jest powstrzymanie pęknięcia wielkich tankowców, to pytanie o dokładną wartość prędkości, z jaką szczelina rozprzestrzenia się w poprzek kadłuba może wydawać się nieco ezoteryczne. Jeśli jednak pragniemy dokładnie zrozumieć warunki powodujące rozwój szczeliny, to prawidłowe odtworzenie tej prędkości stanowi niezbędny krok wstępny naszej analizy.

Pierwsza wskazówka, że rozwój pęknięcia może być bardziej skomplikowany niż prostoliniowy ruch cząstek pochodziła z badania powierzchni krawędzi powstającej szczeliny. Na powierzchniach tych znajdują się widoczne gołym okiem nierówności (pokazane na rys. 3), pojawiające się w pewnej odległości od początku wzrastającej szczeliny. Przed kilku laty wraz z Harrym Swinneyem i Stevem Grossem opracowaliśmy metodę pozwalającą rejestrować prędkość pęknięcia z częstością dwudziestu megaherców w seriach sięgających dziesiątków tysięcy pomiarów i osiągnąć przy tym dokładność do około 20 metrów na sekundę [7]. W metodzie tej próbka z pleksiglasu lub szkła pokrywana jest bardzo cienką warstwą aluminium, pozwalającą dokładnie śledzić zmiany oporu elektrycznego w czasie procesu rozrywania. Badaliśmy długie próbki kruchych materiałów z nacięciem na jednym z boków wykonanym przed przyłożeniem naprężenia. Ogromne bogactwo zebranych danych pozwoliło wyróżnić następujące trzy fazy rozwoju pęknięcia:

1) **Narodziny:** Długie, ostre nacięcia początkowe stają się szybko rozprzestrzeniającymi się pęknięciami już przy niewielkich naprężeniach, podczas gdy krótkie i tępo zakończone wymagają aż dziesięciokrotnie większych naprężeń do spowodowania ich ruchu. Jednak we wszystkich niemal przypadkach obserwowaliśmy prędkości końcowe przekraczające 200 m/s (stanowiące więc znaczny ułamek prędkości dźwięku) i osiągane w ciągu niecałej mikrosekundy.

2) **Dzieciństwo:** Początkowe fazy rozwoju pęknięcia polegają na stałym, spokojnym ruchu w głąb próbki. Obie nowo powstające powierzchnie szczeliny są gładkie niczym powierzchnie luster, jak to pokazano w prawej dolnej części

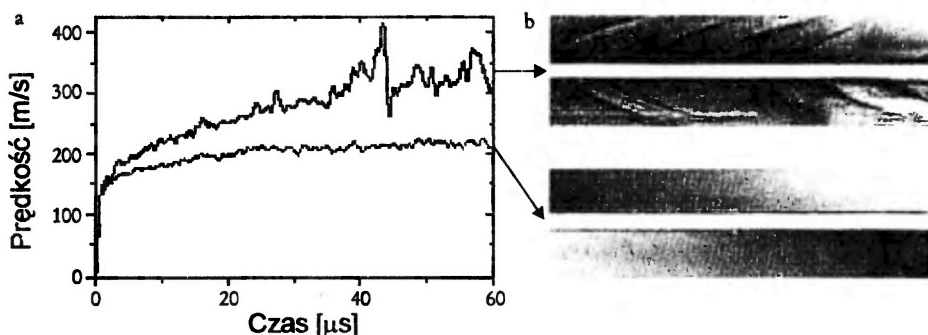


Rys. 3. Gdy pęknięcie przekracza prędkość krytyczną dla pleksiglasu, powierzchnia powstającej szczeliny staje się nierówna z charakterystyczną długością fali około 1 milimetra. Szorstkość brzegów szczeliny związana jest z tworzeniem odgałęzień (pęknięcia) pod ich powierzchniami. Amplituda nierówności jest dwa rzędy wielkości mniejsza od długości powstających podpowierzchniowych odgałęzień.

rys. 4 – gładki, powolny wzrost prędkości ilustruje dolna krzywa w lewej części rysunku. W przypadku długich i ostrych szczelin proces przebiega w ten właśnie sposób aż do pełnego rozerwania próbki.

3) *Kryzys*: Po przekroczeniu wartości krytycznej dalsze zmiany prędkości odbywają się skokami o częstości sięgającej setek kiloherców, jak pokazuje górna krzywa na rys. 4, a powstające powierzchnie stają się coraz bardziej szorstkie (rys. 3).

Proces pęknięcia materiałów kruchych wykazuje więc niestabilność dynamiczną, uniemożliwiającą osiąganie tak wielkich prędkości propagacji, jak to wynika z klasycznych teorii pęknięcia dynamicznego.



Rys. 4. Pęknięcia pleksiglasu rozwijają się z prędkościami zależnymi od wartości siły rozrywającej. (a) Stosunkowo małym siłom towarzyszy spokojne rozprzestrzenianie się pęknięcia z gładkim, powolnym wzrostem prędkości w czasie (dolna krzywa). Powyżej prędkości krytycznej pojawiają się gwałtowne skoki wartości prędkości (górna krzywa). (b) Powolne pęknięcia mają tendencję do tworzenia gładkich powierzchni (dolna część rysunku). Ruchowi z prędkością przekraczającą wartość krytyczną towarzyszy powstawanie gęstych małych odgałęzień biegnących w głąb powstających powierzchni (część górna).

## 6. Źródła dynamicznej niestabilności

W cieniu teorii powstawania i rozwoju pęknięć materiałów zawsze kryły się zagadkowe sprzeczności. Elizabeth Yoffe przeprowadziła pierwsze szczegółowe obliczenia dynamiki pęknięcia i wskazała na analogie ze szczególną teorią względności, gdy szybkość propagacji szczeliny zbliża się nie do prędkości światła, a do prędkości dźwięku. Rozkład naprężeń wokół czubka tworzonej szczeliny ma wówczas uniwersalny kształt, ulegający skróceniu w kierunku szybkiego ruchu. Yoffe zaobserwowała dalej, że po osiągnięciu około 60% prędkości dźwięku w rozkładzie tym pojawiają się dodatkowe maksima, mogące powodować odstępstwa od ruchu prostoliniowego.

Rozprzestrzeniające się pęknięcie jest jeszcze bardziej podatne na niestabilności niż to wynika z analizy Elizabeth Yoffe. Emily Ching, Hiizu Nakanishi i James Langer [9] stwierdzili bowiem, że jeżeli zanalizować rozkład naprężeń przed poruszającą się szczeliną, to naprężenie rozrywające ma największą wartość dla kierunków prostopadłych do kierunku ruchu. Wynikałoby z tego, że każde pęknięcie powinno zawsze posuwać się prostopadle do siebie samego, a więc stabilny ruch byłby zupełnie niemożliwy.

W ten sposób, w ramach klasycznej teorii sprężystości, założenie o stabilności propagacji szczeliny prowadzi do równania ruchu nie odpowiadającego rzeczywistości, a dokładniejsza analiza stabilności pęknięć prowadzi do wniosku, że w ogóle nie powinny się one rozprzestrzeniać.

Trudności te częściowo usunęły obliczenia sięgające atomowej skali zjawisk. Istnieje szczególna postać sił międzyatomowych, odkryta przez Leonida Slepjana [10], która pozwala analitycznie rozwiązać zagadnienie rozprzestrzeniania się szczeliny w sieci atomowej. Pęknięcia opisywane takim modelem mają kilka zaskakujących cech, znajdujących jednak swoje odbicie w następujących wynikach doświadczalnych [11]:

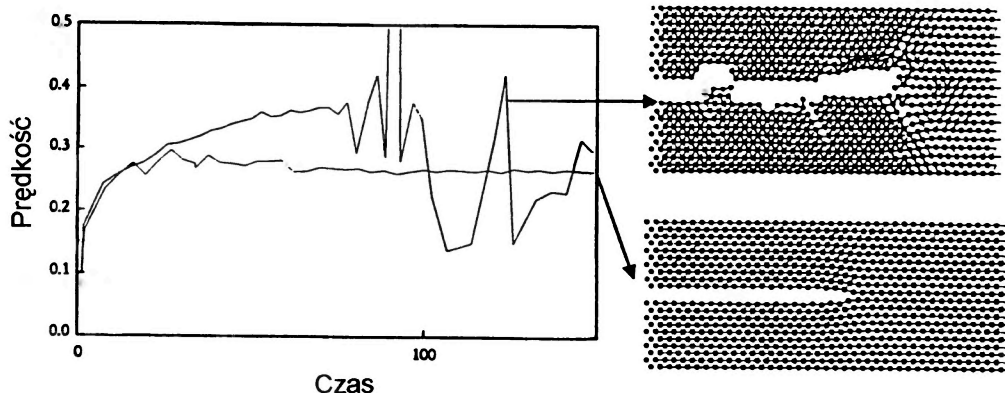
1) **Narodziny:** W pewnym zakresie prędkości stabilne rozprzestrzenianie się szczeliny jest niemożliwe. Zakres ten rozpoczyna się od zera i sięga do około 20% prędkości dźwięku – powyżej tej prędkości ruch staje się możliwy.

2) **Dzieciństwo:** Po zakresie prędkości zabronionych następuje zakres, w którym ruch szczeliny ze stałą prędkością jest dozwolony i całkowicie stabilny. Jednakże bez zmiany naprężeń zewnętrznych stabilna byłaby także szczelina nieruchoma.

3) **Kryzys:** Powyżej pewnej wartości krytycznej ruch jednostajny szczeliny staje się niestabilny.

Dokładne badania rozwiązań opisanych modeli pokazują, jak unikać niestabilności czyhających w teorii ośrodków ciągłych oraz jak rozdziela się ostrze szczeliny, gdy naprężenia stają się zbyt duże. W zakresie małych prędkości rozwiązania odpowiadające propagacji ze stałą prędkością są całkowicie stabilne. Wraz ze wzrostem prędkości relatywistyczne skrócenie odkryte przez Elizabeth Yoffe zyskuje na znaczeniu, aż wreszcie zaczynają pękać poziome wiązania równoległe do biegnącej szczeliny. Czy przebieg pęknięcia osiągnie to stadium, zależy oczywiście od wielkości sił rozrywających. Kiedy już jednak to nastąpi, dalszy jednostajny ruch prostoliniowy jest niemożliwy. Wyniki symulacji widoczne w górnej prawej części rys. 5 pokazują, że po osiągnięciu tej granicy ruchowi szczeliny towarzyszy powstawanie licznych odgałęzień.

Po zaobserwowaniu rozgałęziających się struktur w naszych symulacjach [12] zaczęliśmy je także odnajdywać w wynikach doświadczeń. Pierwsze, nie dość prze-



Rys. 5. Symulacje komputerowe przeprowadzone w ramach prostego modelu atomowego pokazują przejścia między gładkim rozwojem pęknięcia (prawa dolna część rysunku i odpowiadająca jej krzywa) i gwałtownym tworzeniem gałęzi bocznych w ruchu niestabilnym. Symulacja ta wykazuje zadziwiającą analogię z doświadczeniem – podobnie jak w doświadczeniu, przejście zależy od energii zgromadzonej na prawo od szczeliny. Prędkość wyrażona jest tu ułamkiem prędkości dźwięku, a czas w liczbie okresów drgań atomowych.

myślane podejście, polegało na próbie zeszlifowania kawałka pleksiglasu, co niemal doprowadziło do spalenia szlifierki (Fineberg nie poczuwa się do odpowiedzialności za laboratoryjne wyczyny Mardera), ale później szło nam już dużo lepiej [13], co potwierdza prawa górna część rys. 4. W pleksiglasie siatka odgałęzień staje się tak gęsta, że wystarcza to do zrozumienia, dlaczego nie jest możliwe osiągnięcie teoretycznie przewidzianej prędkości maksymalnej [14]. Gdy niestabilność już się pojawi, dalsze zwiększanie obciążenia wytwarza bowiem tylko większą liczbę odgałęzień niemal bez zwiększania prędkości ruchu. W niektórych symulacjach, jak w pokazanej w lewej części rys. 5, zwiększenie obciążenia prowadziło nawet do spowolnienia propagacji pęknięcia. Ponad 90% energii dostarczanej krawędzi pęknięcia ulegać może pochłonięciu wskutek niestabilności warstwy podpowierzchniowej.

## 7. Klucz i szklanka

Inżynierowie zajmujący się wytrzymałością materiałów wnieśli w tym studium ogromny wkład do zwiększenia bezpieczeństwa konstrukcji. Próby zrozumienia przebiegu pęknięcia na poziomie zjawisk atomowych nie odegrały na razie porównywalnej roli. Łatwo zrozumieć dlaczego.



Powszechnie używane materiały uzyskiwano w wyniku długiego procesu prób i błędów, trwającego tysiące lat [2]. Mikroskopowa struktura tych materiałów bywa niewiarygodnie skomplikowana. Na przykład pleksiglas, który na rys. 4 i 5 beztrzesko porównywaliśmy z siecią trójkątną, w rzeczywistości składa się z łańcuchów, każdy o długości miliona monomerów, tworzących spletaną strukturę amorficzną. Żelazo staje się użyteczne po wprowadzeniu do niego ściśle określonych domieszek podczas skomplikowanego procesu produkcji. Drewno – najczęściej używany materiał budowlany – swoje cudowne własności mechaniczne zawdzięcza procesom, których jeszcze nie nauczyliśmy się naśladować.

Zielone gałązki gną się, a suche łamią i o ile dyslokacje przedstawione na rys. 2 wyjaśniają ciągliwość kryształów miedzi, to w niczym nie pomagają zrozumieć zachowania amorficznego pleksiglasu, nie wspominając nawet o drewnie. Przeważająca część fizyki ciała stałego zadowala się obliczeniami dotyczącymi kryształów. O ile jednak kryształ doskonały może być świetnym przewodnikiem, to zupełnie nie nadaje się on na cegłę. Największe wyzwanie dla fizyki polega dziś na zasypaniu przepaści między prostotą używanych modeli i bogactwem form rzeczywistego świata. Symulacje komputerowe mają tu ważną rolę do spełnienia [15,16] i mogą już obejmować imponującą liczbę atomów. Jednak postęp w pojęciowym zrozumieniu zjawisk będzie miał równie wielkie znaczenie. Komputer może bowiem dziś zanalizować ruch 100 milionów atomów w ciągu kilku pikosekund, a potrzebne jest zrozumienie zachowania  $10^{23}$  atomów w czasie sięgającym minut, a nawet lat.

Jak zauważył Eugene Wigner, fizyka ciała stałego „naukowo zajmuje się zjawiskami znanymi nam już z życia codziennego. Nie boimy się, na przykład, że upuszczony klucz rozprysnie się na kawałki, jak by to się stało ze szklanką” [17]. To właśnie takie doświadczenia, znane małym dzieciom, zdają się najsilniej opierać zrozumieniu przez naukowców.

Pierwsze mikroskopowe wyjaśnienia granic wytrzymałości materiałów zaczęły się już pojawiać – o wiele więcej jest jednak jeszcze do zrobienia.

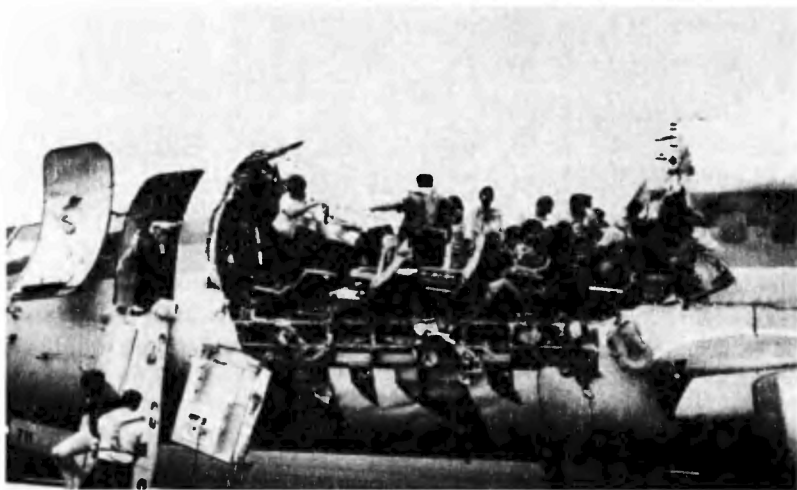
Autorzy wyrażają podziękowanie US-Israel Binational Foundation za sfinansowanie ich współpracy w ramach grantu 920-00148. Michael Marder dziękuje także Texas Advanced Research Program, Alcoa Foundation, Exxon Foundation oraz National Science Foundation za wsparcie finansowe udzielone w ramach grantu DMR-9531187.



### Uzupełnienie 1: Początki mechaniki pękania

Szybkie postępy w zrozumieniu mechanizmów pękania towarzyszyły badaniom skutków wielkich katastrof. W roku 1919 wybuch wypełnionego melasą zbiornika o wysokości 15 m i szerokości 18 m spowodował w Bostonie śmierć dwunastu osób i kilku koni. Konsultant sądowy zakończył wówczas swą wypowiedź stwierdzeniem: „Jedynie co mogę stwierdzić z niewzruszoną pewnością, to oczywisty fakt, że co najmniej połowa uczonych na pewno się myli” [18].

W tym stuleciu najdonioślejsze zdarzenia miały miejsce w czasie II wojny światowej. Ogromne zapotrzebowanie na frachtowce oceaniczne spowodowało wprowadzenie do produkcji statku typu „Liberty” – pierwszego statku o całkowicie spawanym kadłubie. Z niemal 4700 statków tego typu wyprodukowanych w czasie wojny, ponad 200 uległo katastrofom – były nawet takie, które pękły na pół, gdy były zacumowane w porcie, a w ponad 1200 odkryto większe lub mniejsze pęknięcia. Właśnie te katastrofy spowodowały powstanie mechaniki pękania. Zmieniono sposób budowy statków usuwając na przykład ostre kąty luków i rozwijając metody dokładnego sprawdzania wytrzymałości używanych materiałów. We wczesnych latach pięćdziesiątych pękanie materiałów przesładowało przemysł lotniczy podczas prób zbudowania odrzutowca pasażerskiego. Źle umieszczone nity spowodowały katastrofę dwóch brytyjskich samolotów Comet i w ten sposób przyczyniły się do przeniesienia gros cywilnej produkcji lotniczej do Stanów Zjednoczonych. Dziś samoloty są poddawane programowi szczegółowych badań uznających, że każda konstrukcja musi mieć jakieś defekty, ale defekty przekraczające pewne rozmiary nie mogą być tolerowane. Procedury są ulepszone po każdym wypadku – ostatnio po oderwaniu się górnej części kadłuba podczas lotu.



## Uzupełnienie 2: Jak rozwija się pęknięcie

Zajmijmy się szczeliną o długości  $l$  rozprzestrzeniającą się z prędkością  $v$  w poprzek płyty (jak przedstawiono na rysunku poniżej – po lewej). Mamy tu do czynienia z trzema rodzajami energii:

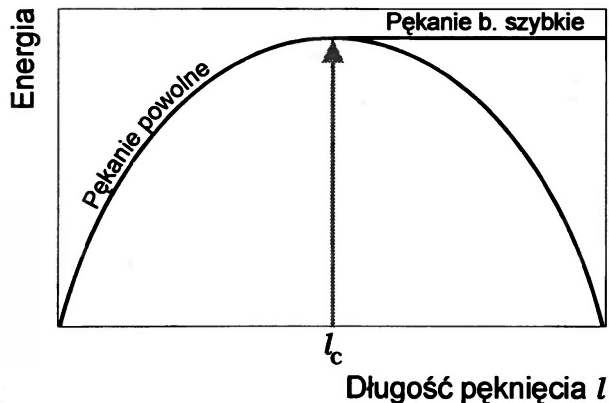
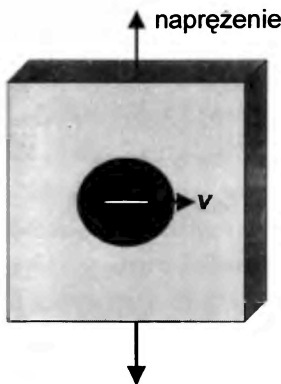
1) **Energia potencjalna:** Energia potencjalna maleje podczas rozwoju pęknięcia, a ponieważ powierzchnia obszaru, w którym to się odbywa rośnie jak  $l^2$ , to uwalniana energia potencjalna też zmienia się jak  $l^2$ . Z drugiej strony energia jest proporcjonalna do kwadratu naprężenia.

2) **Energia pękania:** Rozprzestrzenianie się szczeliny wymaga zrywania wiązań, tworzenia nowych powierzchni, a towarzyszy temu wytwarzanie ciepła – potrzebna energia rośnie proporcjonalnie do długości  $l$ .

3) **Energia kinetyczna:** Całkowita energia kinetyczna związana z ruchem szczeliny jest proporcjonalna do  $l^2 v^2$ , gdyż masa uczestnicząca w tym ruchu rośnie jak  $l^2$ .

Dla bardzo powolnych pęknięć tylko energia potencjalna i energia pękania odgrywają istotną rolę. Sumę tych rodzajów energii jako funkcję długości przedstawia wykres (poniżej – po prawej). Ze względu na to, że energia potencjalna maleje jak  $l^2$ , a energia pękania rośnie jak  $l$ , dla bardzo małych szczelin ta ostatnia jest zawsze większa i całkowita energia rośnie jak  $l$ . Gdyby tak nie było, to ciała stałe byłyby całkowicie niestabilne względem najmniejszych nawet naprężeń. W końcu jednak, powyżej długości krytycznej  $l_c$  – nazywanej punktem Griffitha – energia potencjalna przeważa nad energią pękania. Odtąd więcej energii uwalnia się niż jest pochłaniane przy wzroście długości szczeliny, a więc pęknięcie rozwija się coraz gwałtowniej. Jeśli suma energii potencjalnej i energii pękania maleje jak  $(l - l_c)^2$  dla  $l > l_c$ , a całkowita energia jest zachowana dzięki zamianie energii potencjalnej na kinetyczną, to łatwo ustalić, że pęknięcie rozwija się z prędkością

$$v(t) = v_{\max}(1 - l/l_c) .$$



Krytyczne naprężenie potrzebne do wytworzenia szczeliny o długości  $l$  rośnie jak  $l^{1/2}$ . Jak to często bywa z szacowaniami opartymi na prostych zależnościach potęgowych (argumentami skalowania), powyższe równanie jest znacznie dokładniejsze niż można by przypuszczać. Po piętnastu latach szczegółowych badań matematycznych przedstawionych w książce L. Ben Freund [8] otrzymano ten sam wzór jako wniosek z rozwiązania bardzo ogólnego zagadnienia brzegowego teorii sprężystości. W dokładnym wzorze  $v_{\max}$  okazuje się prędkością fali Rayleigha.

Tłumaczył Andrzej Majhofer

Instytut Fizyki Doświadczalnej UW  
Warszawa

### Literatura

- [1] Galileo Galilei, *Rozmowy i dowodzenia matematyczne w zakresie dwóch nowych umiejętności dotyczących mechaniki i ruchów miejscowych*, tłum. F. Kucharzewski (Wydawnictwo Kasy im. Mianowskiego, Warszawa 1930).
- [2] J.E. Gordon, *The New Science of Strong Materials, or Why You Don't Fall through the Floor*, wyd. II (Princeton Univ. Press, Princeton, N.J. 1976).
- [3] B. Lawn, *Fracture of Brittle Solids*, wyd. II (Cambridge Univ. Press, New York 1993).
- [4] R. Thomson, *Solid State Phys.* **39**, 1 (1986).
- [5] K. Ravi-Chandar, W.G. Knauss, *Int. J. Fracture* **26**, 141 (1984).
- [6] H. Schardin, L. Mucke, W. Struth, W.A. Rhein, *Glass Indus.* **36**, 133 (1955).
- [7] J. Fineberg, S. Gross, M. Marder, H. Swinney, *Phys. Rev. B* **45**, 5146 (1992).
- [8] L.B. Freund, *Dynamic Fracture Mechanics* (Cambridge Univ. Press, New York 1990).
- [9] E.S.C. Ching, H. Nakanishi, J.S. Langer, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 1087 (1996).
- [10] L.I. Slepyan, *Sov. Phys. Dokl.* **26**, 538 (1981); *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **258**, 561 (1981).
- [11] M. Marder, S. Gross, *J. Mech. Phys. Solids* **43**, 1 (1995).
- [12] M. Marder, X. Liu, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 2417 (1993).
- [13] E. Sharon, S. Gross, J. Fineberg, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 5096 (1995).
- [14] E. Sharon, J. Fineberg, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 2117 (1996).
- [15] F.F. Abraham, D. Brodbeck, R.A. Rafey, W.E. Rudge, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 272 (1994).
- [16] A. Nakano, R.K. Kalia, P. Vashishta, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 2336 (1994).
- [17] E. Wigner, *Sci. Monthly* **42**, 40 (1936).
- [18] C.F.E. Tipper, *The Brittle Fracture Story* (Cambridge Univ. Press, New York 1962).

**Constantino Tsallis**

*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Rio de Janeiro, Brazilia*

## **Rozkłady Lévy'ego\***

### **Lévy distributions**

*Abstract:* Many natural processes follow Lévy distributions, from the dynamics of a leaking tap to the foraging behaviour of wandering albatrosses. Why are they so common and how can they be used to predict the behaviour of physical systems?

#### **1. Wstęp**

Niektóre zjawiska przyrody można łatwo obserwować, podczas gdy inne wymagają do tego pewnych szczególnych warunków. To wprawdzie nie mówi nam wiele o ważności danego rodzaju zjawiska, ale wskazuje, jak często ono występuje: zjawiska pierwszego rodzaju są częste, natomiast drugiego rodzaju zachodzą rzadko. Objasnia też to pewnego stopnia, dlaczego w przyrodzie tak często występuje rozkład Gaussa: różnice wzrostu ludzi, koncentracja melaniny w skórze w danej grupie ludzi, natężenie różnych dźwięków naturalnych – te tak różne wielkości podlegają temu samemu prawu statystyki.

Jeden z najważniejszych rozkładów gaussowskich w fizyce opisuje ruch cieplny atomów i cząsteczek. Cząstki te przebywają stosunkowo małe odległości między zderzeniami, co prowadzi do przypadkowości ich ruchu i ich „normalnego” rozprzestrzeniania się. Proces ten tłumaczy, dlaczego łyżeczka cukru osładza całą filiżankę kawy i dlaczego perfumy, użyte tylko przez jedną osobę, napełniają swym zapachem cały pokój.

---

\* Artykuł, opublikowany w *Physics World* 10, nr 7, 42 (1997), został przetłumaczony za zgodą Autora i Wydawcy [Translated with permission. Copyright ©1997 by IOP Publishing Ltd.] (przyp. Red.).

Jeżeli jednak będziemy energicznie mieszać kawę w filiżance, mogą wystąpić turbulencje, cukier może się rozejść szybciej, a ruch cząstek nie będzie już opisany rozkładem Gaussa. Wyniki niedawnych pomiarów wykonanych dla pewnych płynów sugerują, że mamy tu do czynienia z rozkładem, który w 1937 r. zaproponował francuski matematyk Paul Lévy. Pionierskie prace Benoit Mandelbrota wykazały, iż w przyrodzie rozkłady Lévy'ego występują często, np. opisują one sposób, w jaki albatrosy poszukują pożywienia, a także fluktuacje cen akcji lub rytmu serca.

Statystyka zwykłej dyfuzji jest dobrze zbadana i stosujemy ją rutynowo w przewidywaniach różnych właściwości makroskopowych zbiorów atomów i cząsteczek. Granice stosowalności rozkładów Lévy'ego ustalono dopiero niedawno i skuteczność przewidywań tej teorii jest dopiero sprawdzana. Aby zrozumieć, jak do tego doszło, musimy najpierw zrozumieć prostszą statystykę zwykłej dyfuzji.

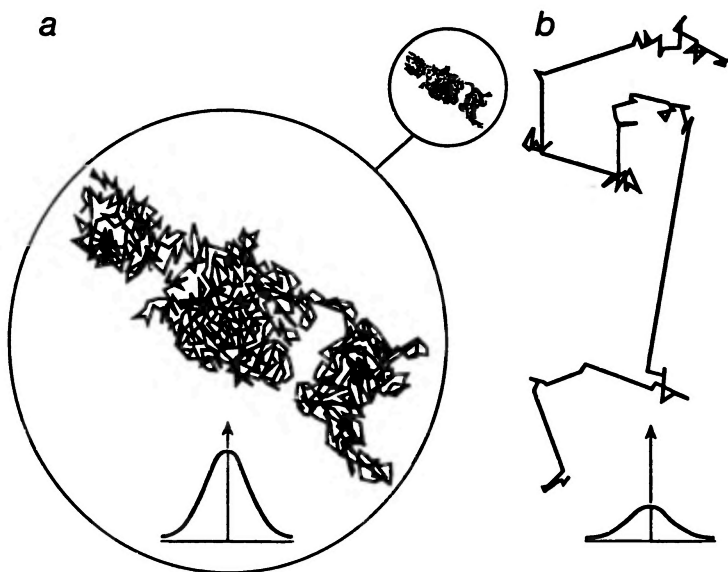
## 2. Ruch molekularny

W 1828 r. Robert Brown badał ruch cząstek sadzy w naczyniu z płynem i uzyskał wyraźny dowód na to, że ruch cieplny cząstek jest ruchem przypadkowym. Jednak dopiero w 1905 r. Einstein opracował teoretyczne podstawy ruchów Browna<sup>1</sup>. Opisał on ruch indywidualnych cząstek stosując sformułowaną nieco wcześniej statystykę Boltzmanna-Gibbsa i wykazał, że makroskopowe właściwości dyfuzji są zgodne z rozkładem Gaussa (rys. 1a).

Aby to lepiej zrozumieć, powtórzmy tu rozumowanie Einsteina używając języka teorii informacji. Dla uproszczenia wyobraźmy sobie, że dyfuzja zachodzi w jednym wymiarze. Prawdopodobieństwo, że cząstka wykona pojedynczy skok o długości  $x$  jest opisane rozkładem  $p(x)$ . Boltzmann pokazał, że opis mikroskopowy można łączyć ze światem makroskopowym przez entropię  $S$  (patrz Uzupełnienie 1). Jest ona w istocie miarą niepewności położenia cząstki i dąży zawsze do maksimum w układzie zmierzającym do równowagi termodynamicznej.

Problem sprowadza się wówczas do znalezienia maksimum entropii  $S = - \int p(x) \ln p(x) dx$  przy dwóch ograniczeniach. Pierwszym jest warunek, że suma prawdopodobieństw musi wynosić 1:  $\int p(x) dx = 1$ ; drugim – że skoki są zwykle bardzo małe, a więc cząstka prawie zawsze przesuwa się do położenia pobliskiego. Oznacza to, że wariancja wielkości  $p(x)$ , która charakteryzuje szerokość rozkładu, musi być skończona. Dla każdego rozkładu wariancja  $\sigma^2$  jest wartością oczekiwaną  $x^2$  i dana jest wyrażeniem  $\langle x^2 \rangle = \int x^2 p(x) dx$ .

<sup>1</sup> Niezależnie od niego zrobił to w tym samym czasie Marian Smoluchowski (przyp. Red.).



Rys. 1. W ruchu Browna (a) cząstka wykonuje przypadkowe skoki; każdy skok jest zwykle mały. Wynikającą stąd zwykłą dyfuzję opisuje rozkład Gaussa, dla którego wariancja – charakteryzująca szerokość rozkładu – jest skończona. W dyfuzji typu Lévy'ego (b) długie przeloty występują na przemian z krótszymi skokami, cząstka przebywa więc w znacznie większym obszarze. Wariancja rozkładu Lévy'ego jest rozbieżna.

Metoda zwana rachunkiem wariacyjnym pozwala obliczyć taki rozkład  $p(x)$ , który daje maksimum entropii z zachowaniem dwóch wyżej wymienionych ograniczeń. W wyniku otrzymujemy rozkład Gaussa  $p(x) = (1/\pi kT)^{1/2} \exp(-x^2/kT)$ , gdzie  $k$  jest stałą Boltzmanna,  $T$  temperaturą, a  $kT = 2\sigma^2$ . Ten rozkład odpowiada skokowi pojedynczemu, nas jednak interesuje zachowanie, które można zaobserwować, a więc musimy znaleźć rozkład związany z wieloma skokami.

W statystyce Gaussa rozkład dla  $N$  skoków ma taką samą postać, jak rozkład dla pojedynczego skoku:  $p(x; N) = (1/\pi NkT)^{1/2} \exp(-x^2/NkT)$ . Taki wynik pozwala przewidzieć różne właściwości makroskopowe układu. Na przykład stwierdzamy, że  $\langle x^2 \rangle$  jest proporcjonalne do  $Tt$ , gdzie  $t$  jest czasem trwania procesu. Jest to w gruncie rzeczy prawo Ficka, któremu podlegają ruchy Browna, co wyjaśnił Einstein w 1905 r.

Przy wyprowadzaniu rozkładu Gaussa korzystaliśmy przede wszystkim z dwóch podstawowych praw termodynamiki. Po pierwsze, że entropia układu zawsze dąży do maksimum – innymi słowy zakładaliśmy słuszność „zasady wariacyjnej”. Po drugie, iż warunki nałożone na wariancję zapewniają, dzięki tzw.

centralnemu twierdzeniu granicznemu, że każdy układ o skończonej wariancji zawsze dąży do rozkładu gaussowskiego. Taki rozkład nazywa się „atraktorem”.

Lévy zdał sobie sprawę, że inne rozkłady też mogą być atraktorami w skali makroskopowej. Różnica polega na tym, że te rozkłady Lévy’ego, oznaczane  $L_\gamma(x)$ , nie zanikają szybko dla dużych odległości. Podczas gdy rozkład Gaussa zanika szybko, rozkłady Lévy’ego maleją jak  $1/x^{1+\gamma}$ , gdzie wartość  $\gamma$  zawiera się między 0 i 2 (rys. 1b). Rozkład Gaussa odpowiada przypadkowi, dla którego  $\gamma = 2$ .

Oznacza to, że w rozkładach Lévy’ego możliwe są znacznie większe skoki, lub – jak je nazywamy – „przeloty”, co powoduje, iż wariancja jest rozbieżna. Słynnym przykładem jest rozkład Cauchy’ego-Lorentza, proporcjonalny do  $1/(c + x^2)$ , gdzie  $c$  jest stałą dodatnią. Dla takich rozkładów  $\gamma = 1$ ; spotykamy się z nimi w wielu sytuacjach fizycznych.

### 3. Rozkłady Lévy’ego w przyrodzie

Wiele powszechnie występujących zjawisk można opisać rozkładem Lévy’ego. Na przykład w 1993 r. C.-K. Peng i jego koledzy z Uniwersytetu Bostońskiego, Szkoły Medycznej Uniwersytetu Harvarda i Narodowych Instytutów Zdrowia w Bethesda analizowali odstępy czasu między uderzeniami serca. Stwierdzili, że zmienność odstępów obserwowanych u zdrowych osobników da się opisać rozkładem Lévy’ego o  $\gamma = 1.7$ , podczas gdy u pacjentów z ciężką niewydolnością serca rozkład był bliższy gaussowskiego. Ta różnica rozkładów może pomóc w dokładniejszym zrozumieniu procesów fizjologicznych sterujących pracą serca. Peng i jego koledzy sugerują, że ich wyniki mogą mieć swoją przyczynę w nieliniowej rywalizacji między rozgałęzieniami autonomicznego układu nerwowego.

W tym samym roku Harry Swinney i jego koledzy na Uniwersytecie Teksańskim badali przepływ cieczy w wirującym naczyniu o kształcie pierścienia. W układzie takim przepływ płynu w zasadzie zachodzi w dwóch wymiarach. Grupa Swinneya stwierdziła pojawianie się wirów w różnych miejscach cieczy, co jest objawem turbulencji. Śledzono przez długie okresy czasu ruch znaczących cząstek i okazało się, że na przemian albo pozostają one w jakimś wirze, albo przeskakują do sąsiedniego. Przeloty pomiędzy wirami podlegają rozkładowi Lévy’ego o  $\gamma = 1.3$ .

Paulo Murilo Oliveira i Thadeu Penna wraz z grupą współpracowników na Uniwersytecie w Niteroi w Brazylii badali w 1995 r. metodami doświadczalnymi i numerycznymi ciekący kran. Stwierdzili, że odstępy czasu między tworzeniem się kropli mają rozkład Lévy’ego, przy czym  $\gamma$  zawiera się w granicach 1.66–1.85. Wartość  $\gamma$  dla rozkładu uderzeń serca wynosi 1.7, a więc leży w tych samych

granicach, co wywołało uwagę Penny: „Czyżby serce było ciekącym kranem?”. Badacze ci twierdzą, że podstawą obu tych zjawisk może być taki sam proces hydrodynamiczny.

Także w roku 1995 Rosario Mantegna i Gene Stanley z Uniwersytetu Bostońskiego doszli do wniosku, że rynek finansowy również może podlegać rozkładowi Lévy'ego. Analizowali zmiany wskaźnika *Standard and Poor's 500* na giełdzie nowojorskiej między styczniem 1984 r. i grudniem 1989 r. Do środkowej części rozkładu, która była zadziwiająco stała przez okres sześciu lat, dobrze pasowała wartość  $\gamma = 1.4$ . Taka regularność może stanowić podstawę budowania ekonomicznych modeli cen akcji.

Na tym nie kończy się lista przejawów występowania rozkładów Lévy'ego w przyrodzie. Inne przykłady to ruch grup miceli cząsteczek w słonej wodzie, który badał w 1990 r. A. Ott ze współpracownikami z Ecole Normale Supérieure w Paryżu i chłodzenie laserowe poniżej energii odrzutu, nad którym pracowali na tej samej uczelni F. Bardou i współpracownicy w 1994 r.

W 1996 r. badacze z Uniwersytetu Bostońskiego i Brytyjskiego Instytutu Antarktycznego stwierdzili, że nawet wędrujące albatrosy prowadzą życie według rozkładu Lévy'ego. W poszukiwaniu pożywienia te morskie ptaki przelatują duże odległości, a potem żerują na małym obszarze, by następnie znowu odlecieć. Naukowcy badają teraz, czy zachowanie się innych żerujących gatunków, np. mrówek czy pszczoł, też podlega rozkładowi Lévy'ego.

#### 4. Poszukiwanie podstaw teoretycznych

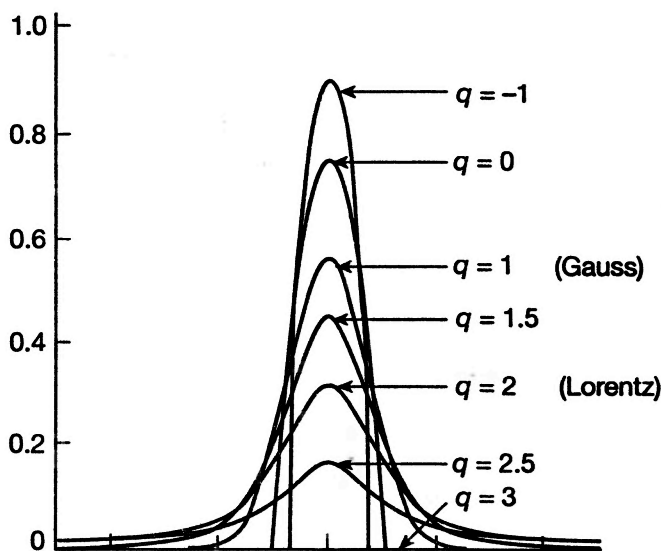
Powyższe przykłady pokazują, jak rozpowszechnione są rozkłady Lévy'ego. Nic dziwnego, że podejmowano wiele prób sformułowania statystycznych podstaw rozkładów Lévy'ego, podobnie jak Einstein, gdy tworzył statystykę ruchów Browna. Tym zagadnieniem szczególnie interesował się nieżyjący już obecnie E.W. Montroll oraz Michael Shlesinger, który pracuje teraz w Biurze Badań Marynarki USA. W 1983 r. uogólnili oni metodę stosowaną uprzednio do maksymalizacji entropii. Ich podejście polegało na zachowaniu tej samej funkcji entropii  $S = - \int p(x) \ln p(x) dx$ , lecz ze zmianą warunków nałożonych na wariancję. W zasadzie wydaje się to rozsądnym podejściem, gdyż wiemy, że wariancja rozkładów Lévy'ego jest rozbieżna. Jednak warunki, które wprowadzili, były zbyt złożone, by można je było przyjąć *a priori* i uznali, że jest to sposób niezadowalający.

Innym podejściem do problemu, które zaproponowałem w 1988 r., jest uogólnienie funkcji entropii zamiast uogólniania warunków. W 1955 r. André Souza i ja, razem z Silvio Levym z Uniwersytetu stanu Minnesota i Rogerem Maynardem z Uniwersytetu w Grenoble, pokazaliśmy, że do scharakteryzowania uogól-



nionej postaci entropii można użyć pojedynczego parametru  $q$ . Wówczas entropia wynosi  $S_q[p] = \{1 - \int [p(x)]^q dx\} / (q - 1)$ ; następnie maksymalizuje się ją przy warunku, że całka  $\int x^2 [p(x)]^q dx$  jest skończona (oraz że  $\int p(x) dx = 1$ ). Stosując tę samą metodę co przedtem stwierdzamy, że rozkład przybiera postać  $p_q(x) \propto [1 - (1 - q)x^2/kT]^{1/(1-q)}$ .

To wyrażenie dotyczy pojedynczego skoku i redukuje się do rozkładu Gaussa dla  $q = 1$  oraz rozkładu Cauchy'ego-Lorentza dla  $q = 2$  (rys. 2). W tym ogólnym przypadku nieco trudniej jest uzyskać rozkład dla wielu skoków, gdyż trzeba wtedy stosować tzw. uogólnione centralne twierdzenie graniczne Lévy'ego-Gniedienki (właściwie Lévy'ego-Chinczyna - Red.), które rozszerza zastosowanie standardowego centralnego twierdzenia granicznego na przypadki, gdy  $q$  jest większe niż  $5/3$ . Otrzymujemy wtedy rozkłady Lévy'ego, w których  $\gamma = (3 - q)/(q - 1)$ . Dla  $q$  mniejszego od  $5/3$  ostateczny rozkład, po wielu skokach, staje się gaussowski.

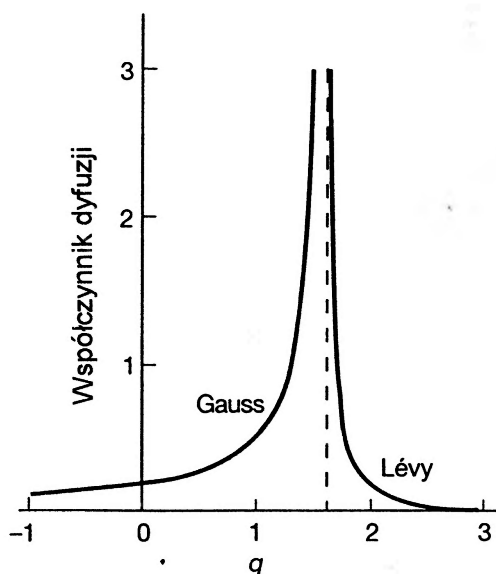


Rys. 2. Uogólniony rozkład dla pojedynczego skoku przy różnych wartościach  $q$ . Po wielu skokach wytwarza się dla  $q < 5/3$  rozkład Gaussa, a dla  $q > 5/3$  - rozkład Lévy'ego. Dla  $q = 2$  mamy rozkład Cauchy'ego-Lorentza. Dla  $q < 1$  rozkłady są bardzo wąskie i wykazują małą zmienność.

Takie uogólnione podejście powoduje, że rozkłady Lévy'ego uzyskują taką samą podstawę teoretyczną jak ruchy Browna. Metoda ta zapewnia zachowanie ważnych cech uogólnionego rozkładu, jak np. stabilności termodynamicznej, i w wyniku daje zunifikowaną statystykę dyfuzji normalnej i dyfuzji typu

Lévy'ego. Oznacza to, że prawo Ficka i związany z nim współczynnik dyfuzji zostały uogólnione w sposób spójny.

Jak już stwierdziliśmy, makroskopowe własności układu są gaussowskie dla  $q < 5/3$ , a dla  $q > 5/3$  stosuje się do nich rozkład Lévy'ego. Przy przejściu z jednego typu do drugiego współczynnik dyfuzji rośnie do nieskończoności (rys. 3). Można to sprawdzić doświadczalnie zmieniając odpowiednio parametry, np. stężenie soli w doświadczeniu Otta i współpracowników tak, aby zmieniała się wartość  $q$ .



Rys. 3. Współczynniki dyfuzji wynikające z rozkładu Gaussa i z uogólnionego rozkładu Lévy'ego stają się rozbieżne przy  $q = 5/3$ . Jest to sygnałem przejścia od jednego rodzaju rozkładu do drugiego.

Uogólnione pojęcie entropii można stosować do bardzo różnych zjawisk fizycznych (patrz Uzupełnienie 2). Co ono jednak znaczy w skali mikroskopowej? W zasadzie pociąga to za sobą naruszenie w nietrywialny sposób „zasady ergodycznej”, która mówi, że cząstka zajmuje wszystkie stany układu w którymś momencie. Ruch staje się w pewnym sensie fraktalny, co wyjaśnia dlaczego w przyrodzie spotykamy tyle struktur fraktalnych. Wiele, a może nawet wszystkie struktury fraktalne mogą powstawać dzięki zjawisku samorganizowanej krytyczności, która, jak się sądzi, jest przyczyną pojawiania się np. wad w skorupie ziemskiej. Wyraźnym znakiem, że takie struktury fraktalne istnieją, jest prawo potęgowe charakteryzujące rozkłady Lévy'ego.

Dopiero czas pokaże, czy ta uogólniona statystyka będzie tak skutecznie przewidywała przebieg pewnych procesów fizycznych, jak sformułowana przez Einsteina teoria ruchów Browna. Gdy będziemy badać kolejne układy egzotyczne, czy gdzieś daleko we Wszechświecie, czy też w fizyce ciała stałego, na pewno będą się ciągle pojawiały rozkłady Lévy'ego.

### Uzupełnienie 1. Boltzmann i entropia

Entropia jest podstawowym pojęciem termodynamiki. Sam termin „entropia” zaproponował Clausius, który jako pierwszy przedstawił jej niezwykle właściwości. Clausius stwierdził kiedyś: „Energia Wszechświata jest stała. Entropia Wszechświata dąży do maksimum.” Jednak najgłębsze znaczenie entropii odkrył w końcu XIX w. Boltzmann. Zdał on sobie sprawę, że entropii można użyć do powiązania mikroskopowych ruchów cząstek ze światem makroskopowym.

Podaną przez Boltzmann'a definicję entropii zapisujemy obecnie w postaci  $S = -k \sum_{i=1}^W p_i \ln p_i$ , gdzie  $k$  jest stałą Boltzmann'a,  $W$  liczbą możliwych stanów układu,  $p_i$  prawdopodobieństwem, że układ jest w stanie  $i$ . Jeżeli wszystkie stany są jednakowo prawdopodobne, to  $p_i = 1/W$  i wyrażenie powyższe sprowadza się do  $S = k \ln W$ . Ten właśnie wzór jest wyryty na nagrobku Boltzmann'a. Przy nieskończonej liczbie możliwych stanów entropię można wyrazić całką  $S = - \int p(x) \ln p(x) dx$ .



Nagrobek Boltzmann'a na cmentarzu w Wiedniu.

## Uzupełnienie 2. Ogólna postać entropii

Już od lat sześćdziesiątych specjaliści z dziedziny teorii informacji próbowali uogólnić boltzmannowski wzór entropii  $S = -k \sum_{i=1}^W p_i \ln p_i$ . W 1988 r. wysunąłem postulat, że podstawą uogólnienia statystyki termodynamicznej Boltzmanna-Gibbsa może być wyrażenie  $S_q = k(1 - \sum_{i=1}^W p_i^q)/(q-1)$ . W wyrażeniu tym  $q$  jest wskaźnikiem entropii i może być w zasadzie dowolną liczbą rzeczywistą. Jeżeli weźmiemy pod uwagę, że  $p_i^{q-1}$  dąży do  $1 + (q-1) \ln p_i$  w granicy  $q = 1$ , to uzyskujemy rozkład standardowy, charakteryzujący statystykę Boltzmanna-Gibbsa. W szczególnym przypadku równych prawdopodobieństw wzór Boltzmanna  $S = k \ln W$  przyjmuje uogólnioną postać  $S_q = k(W^{1-q} - 1)/(1-q)$ .

Ciekawy wynik teorii dotyczy sytuacji, gdy rozważa się jednocześnie dwa niezależne układy A i B. W standardowej statystyce termodynamicznej dochodzimy do wniosku, że entropia układu złożonego jest po prostu sumą poszczególnych entropii. Jednak w przypadku uogólnionym (kładąc  $k = 1$ ) stwierdzamy, że  $S_q(A+B) = S_q(A) + S_q(B) + (1-q)S_q(A)S_q(B)$ . Wynika stąd, że dla  $q < 1$  entropia jest większa niż suma poszczególnych entropii, a dla  $q > 1$  – mniejsza. Mówimy, że entropia jest ekstensywna dla  $q = 1$ , superekstensywna dla  $q < 1$  i subekstensywna dla  $q > 1$ .

Wagę Boltzmanna dla równowagi termodynamicznej  $\exp(-\epsilon_i/kT)$ , gdzie  $\epsilon_i$  jest energią  $i$ -tego stanu, uogólnia się do  $[1 - (1-q)\epsilon_i/kT]^{1/(1-q)}$ . Jest to bardzo ważna różnica, gdyż w przypadku nieekstensywnym ( $q \neq 1$ ) mamy zależność potęgową, a nie tradycyjną zależność wykładniczą. Prawa potęgowe mają bliskie związki z fraktalami i obserwuje się je w różnych zjawiskach przyrody.

Nieekstensywność powstaje w układach, gdzie działają siły dalekiego zasięgu, np. siły grawitacyjne we Wszechświecie lub oddziaływania dalekiego zasięgu między cząstkami w ciele stałym. Gdy wchodzi w grę długotrwała „pamięć” w skali mikroskopowej, zdarzenia są też nieekstensywne, jak np. w układach, w których czasoprzestrzeń ma w pewnym sensie strukturę fraktalną.

Astronomowie Angel Ricardo Plastino i Angel Plastino z Uniwersytetu w La Plata w Argentynie wykazali w 1994 r., że odosobnione układy grawitacyjne, jak galaktyki, mogą być nieekstensywne z  $q = -1$ . Piero Quarati i współpracownicy z Politechniki w Turynie we Włoszech stwierdzili, że strumień neutronów słonecznych charakteryzuje się wartością  $q$  nieco mniejszą od jedności, co może mieć znaczenie dla wyjaśnienia tajemniczego problemu neutronów słonecznych. Stwierdzili oni również, we współpracy z Marco Rego-Monteirem i ze mną, że prędkości gromad galaktycznych względem ich kosmologicznego układu odniesienia, zmierzone przez satelitę COBE, mogą mieć rozkład nieekstensywny o  $q \approx 0.24$ .

Jesteśmy przekonani, że istnieją już mocne podstawy teoretyczne występowania anomalnej dyfuzji typu Lévy'ego w układach fazy skondensowanej. Wykazano, że dwuwymiarowa turbulencja w czysto elektronowej plazmie jest nieekstensywna z  $q = 1/2$ , a A.K. Rajagopal z Laboratorium Badawczego Marynarki w Waszyngtonie rozwinął na przykład uogólnioną teorię reakcji liniowej, która jest stosowana rutynowo w badaniach przenoszenia w układach „normalnych”.

Nieekstensywność występuje również w teorii chaosu. Niedawno wykazaliśmy, wspólnie z Angelem Ricardem Plastinem oraz Wei-Mou Zhengiem z Instytutu Fizyki Teore-

tycznej w Pekinie, że mapa logistyczna, która pokazuje, jak układ ewoluuje, w przejściu progowym do chaosu charakteryzuje się zależnością potęgową od warunków początkowych, przy czym  $q$  jest bliskie 0.24. Francisco Tamarit i współpracownicy z Uniwersytetu Kordobańskiego w Argentynie analizowali w ten sposób model ewolucji biologicznej. Za pomocą tych uogólnionych statystyk można analizować wiele innych układów, co może doprowadzić do nowej interpretacji mechanizmów leżących u podstaw niektórych zjawisk w przyrodzie.

Źłumaczyła *Barbara Wojtowicz*

Warszawa

### Lektura dodatkowa

- B.M. Boghosian, „Thermodynamic description of the relaxation of two-dimensional turbulence using Tsallis statistics”, *Phys. Rev. E* **53**, 4754 (1996).
- R.N. Mantegna, H.E. Stanley, „Scaling behaviour in the dynamics of an economic index”, *Nature* **376**, 46 (1995).
- T.J.P. Penna i in., „Travelling salesman problem and Tsallis statistics”, *Phys. Rev. E* **51**, R1 (1995).
- M.F. Shlesinger, G.M. Zaslavsky, U. Frisch, *Lévy Flights and Related Topics in Physics* (Springer, Berlin 1995).
- C. Tsallis, „Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics”, *J. Stat. Phys.* **52**, 479 (1988).
- C. Tsallis, S.V.F. Levy, A.M.C. Souza, R. Maynard, „Statistical-mechanical foundation of the ubiquity of Lévy distributions in nature”, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3589 (1995).

## RÓŻNE

**Andrzej Z. Hryniewicz**

*Instytut Fizyki*

*Uniwersytet Jagielloński*

oraz

*Instytut Fizyki Jądrowej*

*im. H. Niewodniczańskiego*

*Kraków*

### **Problemy finansowania nauki w Polsce w świetle dwóch kadencji KBN\***

**Science financing in Poland in view of the last two terms  
of Polish State Committee for Scientific Research**

*Abstract:* On the basis of two terms (years 1991–97) of the State Committee for Scientific Research activity, problems concerning various streams of funding of the Polish science are discussed. Some controversial aspects of the funds distribution are presented.

#### **1. Budżet nauki i strumienie finansowania**

W 1994 r. przedstawiłem działalność Komitetu Badań Naukowych pierwszej kadencji [1], omawiając strumienie finansowania badań naukowych i naukowo-rozwojowych w Polsce z funduszy przyznawanych na ten cel w budżecie państwa, których dysponentem jest KBN. Finansowanie badań w dziedzinie fizyki omówiłem bardziej szczegółowo w artykule opublikowanym w *Postęпах Fizyki* [2].

---

\* Artykuł ma ukazać się także w *Nauce*, z. 1/98 (przyp. Red.).

W czasie drugiej kadencji KBN w latach 1994–97 dział 77 – nauka uległ w budżecie dalszemu zubożeniu i jest żenująco niski w stosunku do potrzeb i roli, jaką nauka odgrywa w kulturalnym i gospodarczym rozwoju każdego nowoczesnego państwa. Widać to z porównania nakładów na naukę w Polsce i w rozwiniętych krajach świata, a także z przedstawionych w tab. 1 bezwzględnych kwot przyznawanych w kolejnych latach i ich procentowego udziału w produkcie krajowym brutto (PKB).

Tabela 1. Finansowanie nauki w Polsce w latach 1991–97.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Kwota (mln nowych zł)	612.9	740.4	892.8	1165.9	1437.4	1855.0	2192.7
% PKB	0.76	0.64	0.57	0.55	0.50	0.52	0.51
Wskaźnik inflacji (%)	70.3	43.0	35.3	32.2	27.8	19.9	

Jeśli uwzględnić skumulowany wskaźnik inflacji, który w latach 1991–96 wyniósł 667%, to rzeczywiste nakłady na naukę zmalały od 1991 r. niemal dwukrotnie.

W tabeli 2 przedstawione są środki na poszczególne strumienie finansowania, przeznaczone przez KBN w kolejnych latach, w procentach nakładów w budżecie w dziale 77 – nauka. Jak widać z tej tabeli, finansowanie działalności statutowej nieznacznie wzrosło, o co usilnie ubiegały się placówki naukowe. W 1992 r. ponad dwukrotnie zmalało finansowanie prac badawczo-rozwojowych. Wysokie finansowanie tych prac w 1991 r. wynikało z decyzji Prezydium Komitetu ds. Nauki i Postępu Technicznego, podjętej w drugim półroczu 1990 r., o kontynuacji wybranych zadań Centralnych i Resortowych Programów Badań Rozwojowych (CPBR) z przeznaczeniem na ten cel 1200 mld zł. Był to balast, który obciążał budżet Komitetu Badań Naukowych w 1991 r. Kontynuacja CPBR była tłumaczona koniecznością wywiązania się z zawartych umów wdrożeniowych. Obawiam się, że mimo formalnego wykonania umów i rozliczenia wykonawców, gospodarka narodowa dużo nie zyskała z kosztującej ponad bilion starych złotych kontynuacji CPBR-ów. W 1994 r. KBN zdecydował się na drastyczne ograniczenie finansowania resortowej działalności ogólnotechnicznej (DOT).

W poprzednich artykułach [1,2] omówiłem dość szczegółowo strumienie finansowania nauki, toteż w obecnym opracowaniu nie będę do wielu spraw wracać. Chciałbym podzielić się z Czytelnikami szeregiem uwag, które dotyczą zmian

Tabela 2. Procentowy udział strumieni finansowania nauki przez KBN.

Strumień finansowania	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Działalność statutowa placówek naukowych (w tym badania własne szkół wyższych oraz Specjalne Programy i Urządzenia Badawcze (SPUB-y))	48.4	47.7	44.6	49.3	51.7	50.5	53.0
Inwestycje budowlane i aparaturowe oraz infrastruktura informatyczna nauki	9.7	12.4	11.8	10.5	14.3	13.0	11.5
Projekty badawcze (projekty badań własnych, projekty badań zamawiane, część badawcza strategicznych programów rządowych)	7.2	15.8	17.7	18.5	15.8	18.0	18.0
Prace badawczo-rozwojowe (projekty celowe)	19.3	8.5	12.6	12.3	9.8	10.4	9.1
Współpraca naukowa i naukowo-techniczna z zagranicą	2.1	2.2	2.0	2.1	2.0	1.9	2.3
Dofinansowanie działalności ogólnotechnicznej i wspomagającej badania (DOT)	13.3	13.4	11.3	7.3	6.4	6.2	6.1

i uściślenia pewnych zasad działania KBN-u, wprowadzonych w czasie drugiej kadencji, lub które należałoby uwzględnić w dalszej jego działalności.

Na wspólnym posiedzeniu Komisji Badań Podstawowych i Komisji Badań Stosowanych w Jachrance w marcu 1996 r. zaproponowano i przedyskutowano zmiany podejścia do różnych strumieni finansowania nauki. W wyniku tego spotkania Przewodniczący Komitetu powołał Zespół do Usprawnienia Działalności KBN-u, do którego miałem przyjemność należeć. Zespół przygotował i przedstawił do akceptacji szereg dokumentów, w których zostały sformułowane nowe kryteria i tryb finansowania nauki przez KBN.

Komitet coraz sprawniej i, moim zdaniem, coraz sprawiedliwiej dzieli skromne środki przeznaczone w budżecie na naukę. Jest to trudne i odpowiedzialne zadanie, więc na tym przede wszystkim skupia się uwaga członków Komitetu i Urzędu. Uważam jednak, iż większą uwagę należy poświęcić ocenie wyników badań, bo przecież od nich powinny zależeć losy placówek i zespołów badawczych. Ocena



działalności naukowej jest bardzo trudnym zadaniem, o czym przekonaliśmy się na konferencji „Ocenianie uczonych, instytucji i projektów badawczych”, zorganizowanej w marcu 1995 r. w Warszawie przez Fundację Stefana Batorego przy współudziale Komitetu Naukoznawstwa PAN. Wypowiadano na niej wiele często sprzecznych opinii, z których część wykorzystam w dalszym ciągu tego opracowania. Zanim jednak przystąpię do uwag dotyczących różnych zakresów działalności KBN-u i różnych strumieni finansowania nauki, chciałbym przedstawić swój pogląd na różnice i powiązania badań podstawowych i stosowanych. Temu zagadnieniu poświęciłem sporo uwagi (np. [3]), gdyż jestem przekonany, że podział badań na te dwa obszary ma uzasadnienie i nie zgadzam się z opinią, że godzi on w jedność nauki. Podział ten jest uzasadniony przede wszystkim ze względu na różne cele tych obszarów badań, z czego wynika różna organizacja prac badawczych, różne zasady finansowania, różny charakter współpracy międzynarodowej i odmienne kryteria oceny wyników.

Podkreślany jest związek badań stosowanych i podstawowych, wymieniane są wspólne metody i urządzenia badawcze oraz przytaczane przykłady placówek naukowych lub poszczególnych uczonych zajmujących się obu rodzajami badań. Niezaprzeczalny ścisły związek między badaniami podstawowymi i stosowanymi ma przeważnie charakter jednokierunkowy, polegający na tym, że w badaniach stosowanych wykorzystywane są osiągnięcia badań podstawowych. Napisałem świadomie „przeważnie”, gdyż znane są przypadki, gdy urządzenia i metody powstające w wyniku badań stosowanych otwierają nowe możliwości badań podstawowych.

W zakresie badań stosowanych mogą i powinny być opracowywane programy strategiczne, z których wynikają prace zamawiane i programy celowe szczególnie ważne dla rozwoju gospodarczego kraju. Projekty stosowanych badań własnych (grantów) tylko w szczególnych przypadkach powinny być całkowicie finansowane z budżetu państwa. Dotyczy to projektów, które proponują rozwiązania problemów stanowiących nowość w skali światowej, a przez to nie będących przedmiotem zamówienia nawet najbardziej przewidujących odbiorców. Dotyczy to również takich badań rozwojowych, których praktyczne zastosowanie ma bardzo daleki horyzont czasowy, wobec czego jednostki gospodarcze, nie mogąc liczyć na szybki zwrot poniesionych kosztów, nie są zainteresowane ich finansowaniem. Przykładem w skali światowej są prace nad wysokotemperaturową syntezą jądrową. Wykorzystanie w energetyce wyników tych prac przewiduje się za kilkadziesiąt lat, toteż żadna firma prywatna ani koncern energetyczny nie jest w stanie inwestować w badania, które zaowocują w tak odległej przyszłości. Sponsorem badań tego typu mogą być tylko rządy państw, a fundusze na ich prowadzenie muszą pochodzić z budżetu nauki.

W dziedzinie badań podstawowych trudno z góry przewidzieć zastosowanie wyników. Chociaż wielkie przemiany w technice wywodzą się z badań podstawowych, to jednak nie powstały na zamówienie ministrów, biznesmenów i menedżerów przemysłu, którym chodziło o nowe źródła energii, technologie przemysłowe lub środki transportu i komunikacji. Uczony nie zdaje sobie przeważnie sprawy z tego, jakie znaczenie praktyczne będzie miało dokonane przez niego odkrycie. Jest to część nauki, która wnosi wkład w kulturę ludzką i ma ogromne znaczenie światopoglądowe. Musi więc być rozwijana w każdym kraju, który ma ambicje zaznaczenia swej roli w dorobku kulturalnym świata i musi się na nią znaleźć fundusze w kasie państwowej. Wiadomo jednak, że nawet bogate kraje nie są w stanie finansować wszystkich kierunków badań. Tym bardziej w Polsce musimy dokonać rozsądnego wyboru, opartego na kompetentnej analizie sytuacji. Nie mogą tego zrobić urzędnicy, powinni o tym decydować sami uczeni. Oni powinni określić priorytetowe obszary badań, obejmujące te kierunki, w których nauka polska wnosi znaczący wkład do nauki światowej. Czy ten wkład jest rzeczywiste znaczący, pozwalają zdecydować cztery podstawowe kryteria:

- liczba prac naukowych publikowanych w recenzowanych czasopiśmie o międzynarodowym zasięgu i rozsądnie uwzględniana liczba cytowań tych prac w literaturze naukowej,
- liczba wygłaszanych referatów plenarnych na konferencjach międzynarodowych, – organizacja w Polsce międzynarodowych konferencji z danej dyscypliny naukowej,
- udział w międzynarodowych programach badawczych.

Kryteria te powinny mieć decydujące znaczenie przy określaniu priorytetowych obszarów nauk ścisłych. W przypadku nauk humanistycznych preferowane muszą być te badania, które mają szczególne znaczenie dla społecznego i kulturalnego rozwoju kraju.

W odróżnieniu od badań podstawowych badania stosowane mają charakter użytkowy – stanowią podstawę rozwoju cywilizacyjnego ludzkości. Wspólną ich cechą jest ukierunkowanie, a kryterium wartości rezultatów jest doprowadzenie do stadium wdrożenia. Rola badań stosowanych w rozwoju kulturalnym ludzkości jest inna niż badań podstawowych. Dzięki nim powstają nowe, coraz sprawniejsze sposoby kontaktów międzyludzkich, powstają nowe środki wyrazu twórczości artystycznej i nowe sposoby przekazu dorobku kulturalnego. Artysci otrzymują do dyspozycji nowe tworzywa, poszerza się krąg odbiorców kultury i zwiększa

szybkość jej upowszechniania.

Wyrażany przeze mnie pogląd o różnym charakterze badań podstawowych i stosowanych nie znaczy, że jestem zwolennikiem podziału Komitetu Badań Na-

W dziedzinie badań podstawowych trudno z góry przewidzieć zastosowanie wyników. Chociaż wielkie przemiany w technice wywodzą się z badań podstawowych, to jednak nie powstały na zamówienie ministrów, biznesmenów i menedżerów przemysłu, którym chodziło o nowe źródła energii, technologie przemysłowe lub środki transportu i komunikacji. Uczony nie zdaje sobie przeważnie sprawy z tego, jakie znaczenie praktyczne będzie miało dokonane przez niego odkrycie. Jest to część nauki, która wnosi wkład w kulturę ludzkości i ma ogromne znaczenie światopoglądowe. Musi więc być rozwijana w każdym kraju, który ma ambicje zaznaczenia swej roli w dorobku kulturalnym świata i muszą się na nią znaleźć fundusze w kasie państwowej. Wiadomo jednak, że nawet bogate kraje nie są w stanie finansować wszystkich kierunków badań. Tym bardziej w Polsce musimy dokonać rozsądnego wyboru, opartego na kompetentnej analizie sytuacji. Nie mogą tego zrobić urzędnicy, powinni o tym decydować sami uczeni. Oni powinni określić priorytetowe obszary badań, obejmujące te kierunki, w których nauka polska wnosi znaczący wkład do nauki światowej. Czy ten wkład jest rzeczywiście znaczący, pozwalają zdecydować cztery podstawowe kryteria:

- liczba prac naukowych publikowanych w recenzowanych czasopismach o międzynarodowym zasięgu i rozsądnie uwzględniana liczba cytowań tych prac w literaturze naukowej,
- liczba wygłaszanych referatów plenarnych na konferencjach międzynarodowych,
- organizacja w Polsce międzynarodowych konferencji z danej dyscypliny naukowej,
- udział w międzynarodowych programach badawczych.

Kryteria te powinny mieć decydujące znaczenie przy określaniu priorytetowych obszarów nauk ścisłych. W przypadku nauk humanistycznych preferowane muszą być te badania, które mają szczególne znaczenie dla społecznego i kulturalnego rozwoju kraju.

W odróżnieniu od badań podstawowych badania stosowane mają charakter utylitarny – stanowią podstawę rozwoju cywilizacyjnego ludzkości. Wspólną ich cechą jest ukierunkowanie, a kryterium wartości rezultatów jest doprowadzenie do stadium wdrożenia. Rola badań stosowanych w rozwoju kulturalnym ludzkości jest inna niż badań podstawowych. Dzięki nim powstają nowe, coraz sprawniejsze sposoby kontaktów międzyludzkich, powstają nowe środki wyrazu twórczości artystycznej i nowe sposoby przekazu dorobku kulturalnego. Artyści otrzymują do dyspozycji nowe tworzywa, poszerza się krąg odbiorców kultury i zwiększa szybkość jej upowszechniania.

Wyrażany przeze mnie pogląd o różnym charakterze badań podstawowych i stosowanych nie znaczy, że jestem zwolennikiem podziału Komitetu Badań Na-

ukowych na dwie Komisje. Wręcz przeciwnie, uważam że istnienie Komisji Badań Podstawowych i Komisji Badań Stosowanych utrudnia porozumienie i współpracę między przedstawicielami tych obu rodzajów działalności naukowej. Jest konfliktogeny, gdyż sprzyja rywalizacji w ubieganiu się o środki finansowe i prowadzi do odmiennych kryteriów postępowania, np. przy ocenie projektów badań własnych (grantów). Uważam, że wobec różnic celów, które przedstawiłem, granty powinny w zasadzie dotyczyć badań podstawowych, natomiast projekty celowe i projekty badań zamawianych powinny być domeną badań stosowanych.

Po tych uwagach ogólnych o rodzajach badań naukowych przejdę do omówienia problemów bardziej szczegółowych, dotyczących różnych strumieni finansowania nauki.

## **2. Finansowanie działalności statutowej placówek naukowych i badań własnych szkół wyższych**

Placówki badawcze, których działalność statutowa jest finansowana przez KBN, należą do trzech pionów: szkół wyższych, Polskiej Akademii Nauk i jednostek badawczo-rozwojowych (JBR). Kluczowym problemem jest sprawiedliwy podział środków finansowych między te trzy piony polskiej nauki. Ma to szczególne znaczenie wobec bardzo szczupłych środków w budżecie na finansowanie nauki. Należy pamiętać, że gros środków na działalność statutową otrzymywanych z KBN-u przez placówki w pionach PAN i JBR jest przeznaczane na uposażenia pracowników naukowych, które są w Polsce utrzymywane na karygodnie niskim poziomie. Nie waham się użyć określenia karygodnie, gdyż poziom uposażeń zmusza młodych adeptów nauki do rezygnacji z pracy w placówkach badawczych lub do szukania dodatkowych zarobków, co odrywa ich od pracy naukowej i marnuje potencjał intelektualny polskiej nauki. Niskie zarobki odstręczają młodzież szkolną i studentów od podejmowania kariery naukowej, co w niedalekiej przyszłości odbije się fatalnie na rozwoju kulturalnym i gospodarczym kraju.

Uczony z prawdziwego zdarzenia nawet swój wolny czas poświęca na pracę naukową, wobec czego w większości przypadków obejmowanie przez profesorów stanowisk w kilku placówkach badawczych jest nadużyciem, wymuszonym przez trudną sytuację materialną. Placówki naukowe korzystają z dodatkowego zatrudnienia profesorów, gdyż liczba profesorów wpływa na ranking i wysokość finansowania. Należy ograniczyć ten proces, ale można to zrobić pod warunkiem, że pensja profesora zatrudnionego w jednej placówce wzrośnie kilkakrotnie.

Przedstawiciele trzech pionów nauki licytują się w skargach na niski poziom finansowania działalności statutowej i przekonują rozmówców, że właśnie w ich

ponie sytuacja jest najgorsza. W prowadzonych na ten temat dyskusjach często wysuwany jest argument, że pracownicy szkół wyższych powinni więcej zarabiać, gdyż oprócz badań naukowych prowadzą działalność dydaktyczną. Rzeczywiście dydaktyka, obok badań, jest ich statutowym obowiązkiem, ale to wcale nie znaczy, że zasadnicze uposażenie pracowników naukowych w szkołach wyższych powinno być znacznie wyższe niż w placówkach PAN-u i JBR-ach. Zresztą szkolenie kadry na poziomie doktoratów i habilitacji jest również prowadzone w placówkach PAN-u i w niektórych JBR-ach.

W pracach zespołów KBN-u nad sprawiedliwym rozdziałem funduszy na działalność statutową przeszkodę stanowi brak danych o dotacjach Ministerstwa Szkolnictwa Wyższego i innych resortów nadzorujących szkoły wyższe, a także danych o zasadniczym uposażeniu pracowników naukowych. Takie dane pozwoliłyby porównać pod tym względem sytuację w placówkach szkół wyższych, PAN i JBR. Komitet Badań Naukowych musi mieć prawo uzyskiwania tych danych i powinny one być zamieszczane w corocznych ankietach nadsyłanych przez placówki badawcze.

Finansowanie działalności statutowej placówek naukowych zależy od przyznanych im kategorii. Dla placówek kategorii A odpowiedni współczynnik przy obliczaniu dotacji wynosi 1.0 – 1.2, dla placówek kategorii B jest równy 0.8, a dla placówek kategorii C – 0.6. Nic więc dziwnego, że placówki ubiegają się o zaliczenie do wyższej kategorii. W czasie drugiej kadencji KBN-u kategoryzacja placówek nie uległa dużym zmianom. W tabeli 3 podane są liczby placówek należących do kategorii A, B i C w 1994 r. i w 1997 r.

Tabela 3. Podział na kategorie placówek naukowych finansowanych przez KBN.

Pion nauki	1994				1997			
	A	B	C	Ogółem	A	B	C	Ogółem
PAN	65	14	3	82	73	9	1	83
JBR	66	85	62	213	79	79	61	219
Szkoły wyższe <sup>a</sup>	211	254	211	676	241	222	187	650
RAZEM	342	353	276	971	393	310	249	952

<sup>a</sup> Zgodnie z ustawą o szkołach wyższych podstawowymi jednostkami są wydziały, w zasadzie więc to one podlegają kategoryzacji.

Przy zaliczaniu placówek naukowych do określonych kategorii zespoły KBN-u muszą nie tylko w sposób obiektywny porównywać ich osiągnięcia, ale także

panionie sytuacja jest najgorsza. W prowadzonych na ten temat dyskusjach często wysuwany jest argument, że pracownicy szkół wyższych powinni więcej zarabiać, gdyż oprócz badań naukowych prowadzą działalność dydaktyczną. Rzeczywiście dydaktyka, obok badań, jest ich statutowym obowiązkiem, ale to wcale nie znaczy, że zasadnicze uposażenie pracowników naukowych w szkołach wyższych powinno być znacznie wyższe niż w placówkach PAN-u i JBR-ach. Zresztą szkolenie kadry na poziomie doktoratów i habilitacji jest również prowadzone w placówkach PAN-u i w niektórych JBR-ach.

W pracach zespołów KBN-u nad sprawiedliwym rozdziałem funduszy na działalność statutową przeszkodę stanowi brak danych o dotacjach Ministerstwa Szkolnictwa Wyższego i innych resortów nadzorujących szkoły wyższe, a także danych o zasadniczym uposażeniu pracowników naukowych. Takie dane pozwoliłyby porównać pod tym względem sytuację w placówkach szkół wyższych, PAN i JBR. Komitet Badań Naukowych musi mieć prawo uzyskiwania tych danych i powinny one być zamieszczane w corocznych ankietach nadsyłanych przez placówki badawcze.

Finansowanie działalności statutowej placówek naukowych zależy od przyznanych im kategorii. Dla placówek kategorii A odpowiedni współczynnik przy obliczaniu dotacji wynosi 1.0 – 1.2, dla placówek kategorii B jest równy 0.8, a dla placówek kategorii C – 0.6. Nic więc dziwnego, że placówki ubiegają się o zaliczenie do wyższej kategorii. W czasie drugiej kadencji KBN-u kategoryzacja placówek nie uległa dużym zmianom. W tabeli 3 podane są liczby placówek należących do kategorii A, B i C w 1994 r. i w 1997 r.

Tabela 3. Podział na kategorie placówek naukowych finansowanych przez KBN.

Pion nauki	1994				1997			
	A	B	C	Ogółem	A	B	C	Ogółem
PAN	65	14	3	82	73	9	1	83
JBR	66	85	62	213	79	79	61	219
Szkoły wyższe <sup>a</sup>	211	254	211	676	241	222	187	650
RAZEM	342	353	276	971	393	310	249	952

<sup>a</sup> Zgodnie z ustawą o szkołach wyższych podstawowymi jednostkami są wydziały, w zasadzie więc to one podlegają kategoryzacji.

Przy zaliczaniu placówek naukowych do określonych kategorii zespoły KBN-u muszą nie tylko w sposób obiektywny porównywać ich osiągnięcia, ale także

uwzględniać dynamikę ich rozwoju. Podejmując decyzję o zmianie kategorii trzeba porównywać nie tylko wybrane dane z ankiet nadsyłanych przez placówki, ale także ich zmiany w kolejnych latach. W 1997 r. w porównaniu z 1994 r. zmniejszyła się o 2% liczba placówek objętych kategoryzacją. Wynika to głównie ze stopniowego odchodzenia w szkołach wyższych od oceny instytutów i katedr na rzecz oceny jednostek podstawowych – wydziałów. Uważam tę tendencję za niewłaściwą, gdyż w wielu przypadkach trudno jest przyznać jedną kategorię wydziałom wielodyscyplinowym. Liczba placówek o kategorii A zwiększyła się o 15%. Przyczynił się do tego wzrost o 48% (w stosunku do 1994 r.) liczby placówek kategorii A w politechnikach.

Zespół do Usprawnienia Działalności KBN zaproponował wprowadzenie kategorii A<sup>+</sup> z ograniczeniem liczby placówek, którym przyznano by tę kategorię, do 10% placówek kategorii A w danym Zespole KBN.

Nie mogę zgodzić się z poglądem wyrażanym na konferencji Fundacji Stefana Batorego w Warszawie, że ocenę działalności placówek można oprzeć na jednym parametrze, którym może być na przykład liczba cytowań lub siła przebiccia (impact factor) publikacji. Taki parametr mógłby służyć do porównania placówek prowadzących badania podstawowe w tej samej dziedzinie i należących do tego samego pionu nauki. Stosując jako kryterium oceny liczbę cytowań lub siłę przebiccia publikacji należy zachować daleko idącą ostrożność, na co zwraca uwagę prof. A.K. Wróblewski [4].

Doświadczenie kilku lat pracy Zespołów KBN pokazało, że stosowanie do obliczania finansowania działalności statutowej algorytmu opartego na jednym parametrze – liczbie pracowników od doktora wzwyż lub liczbie tzw. przeliczeniowych pracowników uczestniczących w badaniach

$$n = L_{\text{prof.}+\text{dr hab.}} + 0.7L_{\text{dr}} + 0.4L ,$$

gdzie  $L$  jest liczbą uczestników badań bez stopnia doktora, i uwzględnienie kategorii jednostki nie wystarczają, aby określić jej dofinansowanie, które ma objąć środki na utrzymanie placówki, na wynagrodzenia pracowników i na prowadzenie badań. Okazało się, że powinien być stosowany kilkuczłonowy algorytm o większej liczbie parametrów. Przykładem może być algorytm trójczłonowy

$$S = K_u N b_1 + K_w n q b_2 + K_b n q b_3 .$$

Pierwszy człon określa środki finansowe na utrzymanie placówki, drugi – koszt wynagrodzeń pracowników uczestniczących w badaniach, a trzeci – koszt prowadzenia badań.

Koszt utrzymania jednostki jest proporcjonalny do liczby  $N$  wszystkich zatrudnionych pracowników (liczby miejsc pracy). Spotkałem się z opinią, że finansowanie utrzymania placówki proporcjonalne do liczby wszystkich zatrudnionych może skłaniać jej kierownictwo do zwiększania zatrudnienia. Opinia ta nie jest słuszna, gdyż ustalając odpowiednią wartość współczynnika utrzymania  $K_u$  można skłonić jednostkę raczej do redukcji liczby zatrudnionych, gdy zysk związany z przyjęciem nowego pracownika (zwiększenie  $N$ ) nie pokrywa faktycznego kosztu jego miejsca pracy i wynagrodzenia.

Koszt wynagrodzeń pracowników uczestniczących w badaniach zawiera współczynnik  $K_w$ . Jest to średnie roczne uposażenie zasadnicze profesora.

Koszt prowadzenia badań zawiera współczynnik  $K_b$ , którego wartość zależy od kosztów stanowisk badawczych, zakupów drobnej aparatury i materiałów oraz wymiany osobowej z zagranicą. Współczynnik  $q$  występujący w drugim i trzecim członie algorytmu (quality factor) wynika z kategoryzacji placówek i jest zawarty w granicach np. od 1.2 do 0.6.

Współczynniki  $b_1$ ,  $b_2$  i  $b_3$  określają udziały budżetu nauki w elementach finansowania działalności statutowej. Ich wartości zależą od innych niż KBN źródeł finansowania działalności placówki. Na przykład w przypadku placówek szkół wyższych ich utrzymanie i wynagrodzenia pracowników są w zasadzie pokrywane przez MEN. Biorąc jednak pod uwagę, że część pomieszczeń w szkołach wyższych jest przeznaczona wyłącznie do prowadzenia prac badawczych, a niektórzy pracownicy nie biorą bezpośredniego lub pośredniego udziału w procesie dydaktycznym, przyjęcie  $b_1 = 0.2$  i  $b_2 = 0.1$  mogłoby odzwierciedlać ten stan rzeczy. W części dotyczącej finansowania badań przez KBN należy wziąć pod uwagę, że placówki szkół wyższych otrzymują ok. 40% na badania z funduszu badań własnych i wobec tego przyjęcie współczynnika  $b_3 = 0.6$  uwzględniałoby ten fakt.

Szereg placówek, w szczególności JBR-ów, prowadzących badania stosowane, uzyskuje znaczne dochody spoza KBN-u. Problemem jest uwzględnienie tych dochodów przy obliczaniu kwot przyznawanych przez KBN na utrzymanie takich placówek i na wynagrodzenia ich pracowników (współczynniki  $b_1$  i  $b_2$  w algorytmie). Jednakowe obniżenie tych współczynników dla wszystkich JBR-ów nie byłoby sprawiedliwe, a ich zróżnicowanie oparte na „zeznaniach” placówki mogłoby prowadzić do podawania zaniżonych danych.

Rolą Zespołów KBN jest określanie współczynników  $K_u$  i  $K_b$  w zależności od charakteru i struktury placówek oraz od kosztochłonności prowadzonych badań. Współczynnik  $K_w$  mógłby być ustalany co roku dla wszystkich placówek naukowych, przy uwzględnieniu stopy inflacji i podwyżek płac pracowników sfery budżetowej.



W przypadku ustalenia preferencji pewnego kierunku badań i określenie jej za pomocą współczynnika  $p$ , finansowanie  $S^*$  działalności statutowej placówki miałyby ostateczną postać

$$S^* = pS.$$

W tabeli 4 podane są wysokości finansowania działalności statutowej w kolejnych latach w podziale na trzy piony polskiej nauki. W przypadku szkół wyższych podany jest również fundusz badań własnych.

Tabela 4. Finansowanie działalności statutowej (mln starych zł).

Placówki	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
PAN	82.4	66.9	82.5	118.0	150.5	108.7	241.3
JBR	123.2	135.8	167.6	235.3	297.7	368.5	467.5
Szkoły wyższe	56.8	79.8	85.9	121.8	159.6	198.5	239.6
Fundusz badań własnych	35.0	45.0	45.0	86.3	110.3	134.0	152.2
RAZEM	297.4	327.5	380.0	561.4	718.1	889.7	1100.6

Fundusz badań własnych jest wydzieloną częścią przyznawanego przez KBN dofinansowania działalności statutowej. Podział tego funduszu, przewidzianego w ustawie o szkolnictwie wyższym, proponuje MEN. Otrzymane z KBN-u środki są przekazywane rektorom uczelni wg opracowanego przez MEN algorytmu, a z kolei rektorzy, wg ustalonych przez siebie zasad, przyznają go jednostkom podlegającym im szkół wyższych.

### 3. Dofinansowanie specjalnych programów i urzędów badawczych (SPUB-ów)

Są to programy badawcze stanowiące część programów międzynarodowych albo unikatowe urzędy i laboratoria o znaczeniu ogólnokrajowym. W tabeli 5 podane są liczby i finansowanie SPUB-ów w kolejnych latach w rozbiciu na urzędy i stanowiska badań naukowych, udział w międzynarodowych programach badawczych oraz centra i sieci informatyczne. Najkosztowniejnymi SPUB-ami finansowanymi przez KBN w 1996 r. były: utrzymanie Polskich Stacji Polarnych Hornsund na Spitsbergenie (1130 tys. zł) i im. H. Arctowskiego na Wyspie Króla Jerzego (1500 tys. zł) oraz utrzymanie statków badawczych „Oceania”

Tabela 5. Finansowanie SPUB-ów (mln zł).

	1992	1993	1994	1995	1996	1997 (plan)
Urządzenia i miejsca badawcze						
– liczba	20	40	49	53	47	60
– finansowanie	4.1	9.8	9.7	10.6	12.4	17.7
Międzynarodowe programy badawcze						
– liczba	3	13	14	18	47	
– finansowanie	0.2	1.4	3.2	3.8	6.8	5.5
Centra i sieci informatyczne						
– liczba	–	1	7	12	22	24
– finansowanie	–	0.03	7.2	10.0	28.0	36.2
RAZEM	23	54	70	83	116	
	4.3	11.2	20.1	24.4	47.2	59.4

(1100 tys. zł) i r/v „Baltica” (1150 tys. zł). Z urządzeń badawczych w kraju najkosztowniejsze było utrzymanie basenu holowniczego i tunelu kawitacyjnego w Centrum Techniki Okrętowej w Gdańsku (850 tys. zł). Najdroższymi programami badawczymi były: satelita badawczy „Cesar” (625 tys. zł) oraz utrzymanie misji archeologicznych i archeologiczno-konserwatorskich w krajach Bliskiego Wschodu (500 tys. zł). W zakresie infrastruktury informatycznej najwięcej kosztowało utrzymanie i eksploatacja sieci komputerowej NASK (12 626 tys. zł), sieci komputerowej MAN w Środowisku Warszawskim (1875 tys. zł) i centrum KDM (UW i Politechnika Warszawska – 2400 tys. zł). Najkosztowniejszym udziałem w programach międzynarodowych było opracowanie konstrukcji i podjęcie produkcji wysoko wydajnych, energooszczędnych ekstruderów dwuślimakowych stosowanych w przetwórstwie żywności, pasz i materiałów celulozowych (Instytut Maszyn Spożywczych w Warszawie – 440 tys. zł).

Jeszcze przed wprowadzeniem SPUB-ów w 1991 r. zwracałem uwagę na szczególny charakter projektów wynikających z udziału Polski w pracach międzynarodowych instytutów naukowych lub instytutów, w których badania są prowadzone przez międzynarodowe zespoły naukowe. Programy takich badań zostały ustalone przez najbardziej kompetentne gremia specjalistów z danej dziedziny na świecie, a prace, których wykonanie zostało powierzone polskiemu zespołowi, stanowią wycinek wielkich projektów badawczych. Ich realizacja zależy od terminowego wykonania poszczególnych elementów i polscy uczeni biorący udział w takich projek-

tach muszą wywiązać się z przyjętych na siebie zobowiązań. W tej sytuacji strona merytoryczna projektu nie może budzić wątpliwości, a finansowanie nie może zostać nagle przerwane. Sprawę tę podniósł ponownie w 1995 r. prof. A.K. Wróblewski, przewodniczący Zespołu Współpracy z Zagranicą, proponując ustanowienie Długofalowych Projektów Badawczych (DPB), w których udział polskich zespołów nie może być oparty na trzyletnich „porcjach” finansowania w ramach SPUB-ów lub grantów. Uruchomienie przez KBN kilku DPB oznaczałoby zobowiązanie Komitetu do długookresowego finansowania takich projektów pod warunkiem wywiązywania się wykonawców z ustalonych harmonogramów prac.

Druga moja uwaga dotyczy kosztów SPUB-ów infrastruktury informatycznej. W 1996 r. stanowiły one 59% kosztów wszystkich SPUB-ów. W dyskusjach na posiedzeniach Komisji Komitetu doceniano znaczenie rozwoju centrów i sieci informatycznych w Polsce, ale wyrażano również pogląd, że wielkie koszty systemów opracowania danych nie będą we właściwy sposób owocować, jeśli tych danych nie będzie wskutek niedofinansowania prac naukowo-badawczych.

### 3.1. Finansowanie inwestycji

Dotacje inwestycyjne obejmują inwestycje aparaturowe, budowlane i dofinansowanie infrastruktury informatycznej. W tabeli 6 przedstawiono finansowanie tych rodzajów inwestycji.

Tabela 6. Finansowanie inwestycji (mln zł).

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Inwestycje aparaturowe	—	49.4	43.6	78.3	91.0	130.2	101.6
Inwestycje budowlane	58.7	40.2	51.4	38.8	50.0	69.5	110.6
Infrastruktura informatyczna	0.9	2.5	10.3	38.0	64.6	41.7	44.3
RAZEM	59.6	92.1	105.3	155.1	205.6	241.4	256.5

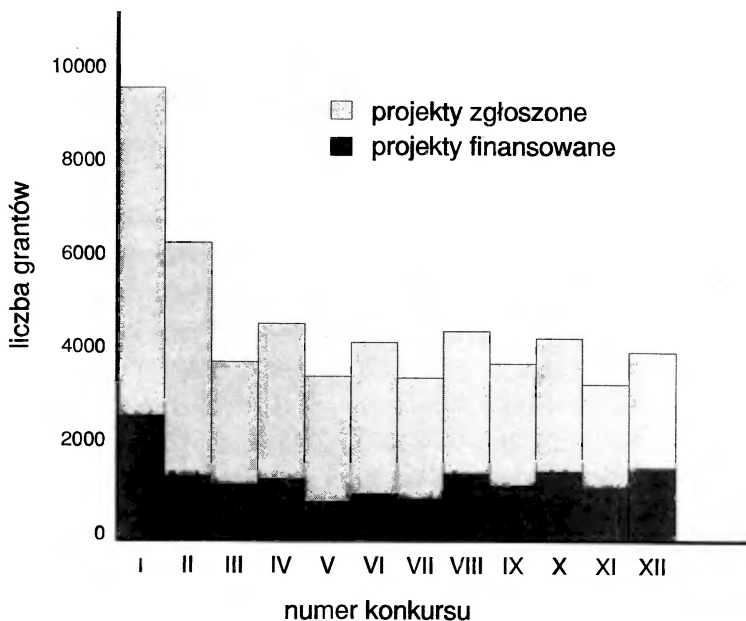
W czasie drugiej kadencji KBN została wprowadzona zmiana w trybie przyznawania środków na zakup aparatury polegająca na tym, że Zespoły ograniczają się do opiniowania wniosków tylko na zakupy dużych urządzeń badawczych, natomiast środki na zakup drobnej aparatury, w wysokości do 10% ogólnej kwoty na inwestycje aparaturowe, przydzielają placówkom bez szczegółowej specyfikacji ich przeznaczenia. W gestii kierowników placówek są decyzje o priorytetach takich

zakupów. Jest to słuszna zmiana, gdyż Zespoły nie mogą ustalać, jakie drobne urządzenia są najbardziej potrzebne danej placówce.

#### 4. Finansowanie projektów badawczych

##### 4.1. Projekty badawcze własne (granty)

Sukcesem Komitetu Badań Naukowych jest wprowadzenie systemu grantów, wysoko oceniane przez społeczność naukową. Do połowy 1997 r. przeprowadzono 11 konkursów, 71 Sekcji Zespołów rozpatrzyło 55 807 projektów, z czego 16 225 przyjęto do finansowania. Na wykresie (rys. 1) pokazana jest liczba projektów grantów zgłoszonych i przyjętych w kolejnych konkursach. Średni współczynnik sukcesu, tj. ułamek liczby grantów przyjętych do finansowania wyniósł 29.1%.



Rys. 1. Granty zgłoszone i przyjęte do finansowania w kolejnych konkursach.

Granty wprowadzają element zdrowej rywalizacji między zespołami badawczymi, w wyniku której środki finansowe są przeznaczane na realizację najważniejszych projektów i kierowane do najlepszych zespołów naukowych. Wobec szczupłości dotacji na działalność statutową granty stały się bardzo cennym źródłem dodatkowych środków na zakup niezbędnej aparatury i materiałów, współpracy z zagranicą i opłacanie pomocy technicznej.

Od początku funkcjonowania grantów stałem na stanowisku, że należy podnieść skandalicznie niskie uposażenia pracowników naukowych i umożliwić ustalanie wysokości zarobków w zależności od oceny ich działalności, a zrezygnować z honorariów w grantach. Zniesienie honorariów zmniejszyłoby znacznie liczbę zgłaszanych projektów, gdyż byłyby one wyrazem zainteresowań naukowych, a nie chęci uzyskania dodatkowych wynagrodzeń.

Drugim błędem systemu grantów było zastąpienie w 1993 r. oceny liczbowej w skali 1 – 10 przez ocenę słowną: znakomity, bardzo dobry, dobry, przeciętny, słaby i niemożliwy do przyjęcia. W celu uzyskania oceny końcowej, przez uwzględnienie ocen recenzentów, referenta wniosku i członków sekcji, i tak trzeba było poszczególnym ocenom przypisać wartości liczbowe odpowiednio: 7, 6, 4, 3, 2 i 0. W ten sposób ocena końcowa była oceną liczbową w skali 0 – 7, obliczaną przez komputer z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku. Finansowanie projektu zależało w licznych przypadkach od tego, czy jego ocena końcowa wynosiła na przykład 6.12, czy 6.15. Taki sposób doprowadził do dewaluacji najwyższej oceny. Wielu recenzentów traktowało ocenę „znakomity” jako „zasługujący na finansowanie”, inni, nieliczni recenzenci stawiali ocenę „znakomity” szczególnie wyróżniającym się projektom, a projektom wartościowym przypisywali ocenę „bardzo dobry” lub „dobry”, co prowadziło do ich dyskwalifikacji. Powołany w 1996 r. Zespół do Usprawnienia Działalności KBN zaproponował nowy formularz recenzji, który zawiera część ogólną i część szczegółową. W części ogólnej odpowiedź na pytanie, czy realizacja projektu może doprowadzić do wyników nadających się do publikacji w czasopiśmie o randze międzynarodowej, książek, monografii lub patentów o zasięgu międzynarodowym, stawia barierę grantom dotyczącym badań nie wnoszących wkładu do nauki światowej. W drugiej części punktowane odpowiedzi na pytania dają w sumie od 0 do 70 punktów. W ten sposób ostateczny wynik dzielony przez 10 zachowuje skalę 0 – 7 z dokładnością do 0.1 punkta, a to umożliwi porównanie ocen w następnych konkursach z ocenami w konkursach poprzednich.

Już poprzednio wyraziłem opinię, że granty całkowicie finansowane przez KBN powinny być domeną badań podstawowych, a w dziedzinie badań stosowanych ten strumień finansowania powinien dotyczyć tylko projektów opracowań stanowiących nowość w skali światowej. Źródłem finansowania badań stosowanych powinny być tematy zamawiane i projekty celowe.

#### *4.2. Finansowanie projektów badań zamawianych*

Projekty badań zamawianych (PBZ) obejmują zadania lub zespoły zadań badawczych lub badawczo-rozwojowych wynikających z potrzeb społecznych lub gospodarczych państwa. Wnioskodawcami mogą być kierownicy naczelnych lub

centralnych organów administracji państwowej lub wojewodowie. Tematyka badań zamawianych ma w większości przypadków charakter interdyscyplinarny. W związku z tym wnioski nie są rozpatrywane przez Zespoły dyscyplinarne KBN, ale zajmuje się nimi specjalny Zespół opiniodawczo-doradczy do spraw PBZ. Wyniki PBZ powinny być wykorzystane w praktyce, za co odpowiedzialni są wnioskodawcy. Zgodnie z uchwałą KBN o kryteriach i trybie przyznawania środków z budżetu nauki (*Sprawy Nauki*, z. 1/94) ocena i ustanowienie PBZ, a następnie wyłonienie wykonawcy odbywają się na zasadzie konkursu. Jest to zasada niezyciowa i nie jest na ogół przestrzegana. W olbrzymiej większości przypadków tryb jest następujący. Zespół naukowy pracujący nad pewnym zagadnieniem dochodzi do wniosku, że prowadzone badania spełniają warunki badań zamawianych i wobec tego warto wykorzystać ten strumień finansowania KBN-u. Zwraca się więc do odpowiedniego kierownika organu administracji państwowej lub wojewody, upoważnionych do składania wniosków, starając się go zainteresować swoimi badaniami. Jeżeli projekt jest ciekawy, to stosunkowo łatwo jest znaleźć wnioskodawcę, który go zgłosi do KBN-u i zwróci się o jego sfinansowanie w wysokości zasugerowanej przez zespół naukowy, opracowujący dane zagadnienie. KBN zachowuje pozory konkursu, ogłaszając temat projektu w *Rzeczypospolitej*, ale w rzeczywistości szczegółowa treść projektu, główny wykonawca i koszt wykonania są już ustalone. Nie uważam takiego trybu za naganny, gdyż Zespół doradczo-opiniodawczy KBN i wyznaczeni przez niego recenzenci zapewniają finansowanie tylko wartościowych projektów, ale byłoby chyba lepiej, gdyby narzucony przez życie sposób postępowania został usankcjonowany odpowiednią uchwałą.

Przewodniczący Komitetu Badań Naukowych, jako kierownik centralnego organu administracji państwowej, może również być wnioskodawcą projektów badań zamawianych. Taką drogę zgłoszenia PBZ-u wykorzystali w 1993 r. fizycy ciała stałego. Tematem projektu była fizyka i technologia niskowymiarowych struktur ciała stałego dla technik przyszłej generacji. KBN ustanowił ten dwuletni projekt i przeznaczył na jego wykonanie 3900 tys. zł. Zespół do Usprawnienia Działalności KBN zaproponował wprowadzenie zasad ustanawiania projektów zamawianych przez Komitet jako projektów „wyprzedzających”, tj. opartych na badaniach poznawczych w kierunkach, których znacząca rola w rozwoju nauki i technologii ujawni się w perspektywie kilku lat.

W tabeli 7 podane są liczby uruchomionych projektów badań zamawianych i wysokość ich finansowania w kolejnych latach.

Najkosztowniejnymi PBZ w 1996 r. były:

- Długofalowa wizja nowoczesnego rozwoju gospodarki Polski – 2 500 000 zł,
- Podzespoły i aparatura bardzo wysokiej i ekstremalnej próżni – 1 930 000 zł,

Tabela 7. Projekty badań zamawianych.

	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Liczba umów zawartych w danym roku	2	10	54	48	43	20
Liczba umów czynnych	2	11	63	104	130	97
Dofinansowanie umów czynnych (mln zł)	1.5	7.0	18.2	38.7	47.9	17.5

- Analiza i ocena średniookresowej strategii finansowej – 1 900 000 zł,
- Opracowanie systemu monitorowania produkcji oraz transportu materiałów niebezpiecznych z zastosowaniem radiokomunikacji satelitarnej oraz uruchomienie Eksperymentalnego Centrum Monitorowania i jego testowanie – 1 696 000 zł,
- Organizacja i realizacja systemu poszukiwania leków oryginalnych – 1 600 000 zł.

Pierwszy i trzeci z wymienionych projektów są ekspertyzami zamówionymi przez Ministra – Kierownika Centralnego Urzędu Planowania i przez Ministra Finansów. Mają one tak ogólny charakter i są tak kosztowne, że musi być przeprowadzone szczególnie wnikliwa i rzetelna analiza przydatności sporządzonych opracowań. Powstaje pytanie, kto ma zdecydować, czy zafundowany przez KBN prezent ma dla zamawiających resortów wartość i czy jest we właściwy sposób wykorzystywany.

#### 4.3. Finansowanie projektów celowych

System projektów celowych został wprowadzony w 1991 r. na podstawie ustawy o utworzeniu KBN. Polega na dofinansowaniu przez KBN prac badawczo-rozwojowych stanowiących część przedsięwzięcia wdrożeniowo-inwestycyjnego. Projekty celowe mogą być realizowane na zlecenie podmiotów gospodarczych i organów administracji państwowej lub samorządu terytorialnego. KBN dofinansowuje w wysokości 50% (w szczególnych przypadkach do 65%) prace badawczo-rozwojowe niezbędne do realizacji projektu celowego. Przeważająca część projektów celowych dotyczy unowocześnienia lub uruchomienia produkcji nowych wyrobów konkurencyjnych na rynku. Projekty celowe są więc domeną badań stosowanych, o czym świadczy m.in. fakt, że w ciągu sześciu lat działalności Zespół Nauk Ścisłych P3 nie rozpatrywał żadnego projektu celowego. Liczby zawartych w kolejnych latach umów na projekty celowe i udziały KBN-u w ich kosztach są przedstawione w tab. 8.

Tabela 8. Projekty celowe.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Liczba umów zawartych w roku	58	380	397	356	337	321	261
Liczba umów czynnych	58	371	732	798	732	1328	1274
Dofinansowanie umów czynnych (mln zł)	7.1	62.3	112.8	147.3	140.7	193.3	105.3

Wśród projektów uruchomionych w 1996 r. 75% dotyczyło pięciu dziedzin nauki, w tym: górnictwo, geodezja i transport – 247 projektów, inżynieria materiałowa i technologie materiałowe – 209, nauki chemiczne, chemia techniczna i inżynieria procesowa – 194, mechanika, budownictwo i architektura – 185, elektronika i energetyka – 156.

W pierwszych latach działalności KBN-u część projektów celowych stanowiła kontynuację badań prowadzonych poprzednio w ramach Centralnych i Resortowych Programów Badań Rozwojowych. Niektóre zespoły badawcze, korzystające przed 1990 r. z finansowania w tych ramach, nie tylko wykorzystywały środki przeznaczone na kontynuację CPBR-ów, na co KBN przeznaczył 1200 mld starzych zł, nie tylko zgłosiły projekty celowe, ale po ich zakończeniu przedstawiły tę samą tematykę jako projekty badań własnych (grantów).

Zdaje sobie sprawę z tego, że niektóre badania w ramach projektów celowych mogą nie przynieść oczekiwanych rezultatów. Nowym badaniom zawsze towarzyszy takie ryzyko. Jednak do końca drugiej kadencji KBN nie doczekałem się informacji, jakie i za jaką kwotę projekty celowe skończyły się niepowodzeniem. W *Sprawach Nauki* (suplementy 6/94 i 5/96) podane są wykazy tematów, realizatorów i kwot dofinansowania prac badawczo-rozwojowych będących częścią projektów celowych. Jako realizatorzy figurują podmioty uczestniczące w wykonaniu projektu, brak jest jednak informacji o kierownikach zespołów realizujących badania. Ze zrozumiałych względów nie podane są informacje dotyczące projektów celowych związanych z obronnością kraju, które są rozpatrywane przez Zespół Opiniodawczo-Doradczy ds. Obronności i Bezpieczeństwa Państwa. W latach 1992–96 dofinansowanie tych badań stanowiło 45% środków na dofinansowanie wszystkich projektów celowych. Na marginesie warto zaznaczyć, że w większości krajów świata ministerstwa obrony przeznaczają duże środki na finansowanie różnych dziedzin badań naukowych, podczas gdy w Polsce badania



związane z obronnością są finansowane ze szczupłych środków na naukę, którymi rozporządza KBN.

#### *4.4. Ocena i wykorzystanie wyników projektów badawczo-rozwojowych*

Zarówno w przypadku projektów badań zamawianych jak i projektów celowych KBN finansuje lub partycypuje w finansowaniu etapu prac badawczo-rozwojowych. Za etap inwestycyjno-wdrożeniowy odpowiedzialny jest wnioskodawca tematu zamawianego lub jednostka realizująca projekt celowy. Wnioski zawierają zobowiązania przeprowadzenia tego etapu. KBN nie ma w zasadzie żadnego wpływu na dalszy los projektów po zakończeniu i rozliczeniu etapu badawczego. Nie chcę posądzać realizatorów tych projektów o nadużywanie ufności KBN w podpisane zobowiązania, ale można zadać pytanie, jaką mamy pewność, że udział finansowy jednostki realizującej projekt celowy był właściwie wykorzystany. Inną sprawą, która nie jest dla mnie jasna, są wynagrodzenia uczestników badań. W przypadku grantów, na temat honorariów wykonawców i ich ograniczenia często były prowadzone dyskusje, w szczególności na posiedzeniach Komisji Badań Podstawowych. Uczestnicząc w posiedzeniach Komisji Badań Stosowanych nie byłem świadkiem omawiania tej kwestii w odniesieniu do projektów celowych.

Miałem nadzieję, że utworzenie Agencji Techniki i Technologii (ustawa z 12 kwietnia 1996 r.) pozwoli rozwiązać problem etapu inwestycyjno-wdrożeniowego projektów badań stosowanych. Do zadań Agencji należy, zgodnie z ustawą, promowanie i wspomaganie wdrażania innowacyjnych technik i technologii oraz komercjalizacja wyników badań. Spodziewałem się, że Agencja w ścisłej współpracy z KBN-em zadba m.in. o to, aby etap inwestycyjno-wdrożeniowy, do którego przeprowadzenia zobowiązali się wnioskodawcy i realizatorzy badań zamawianych i celowych, został zrealizowany; żeby wielkie środki finansowe wniesione przez KBN na badania rozwojowe nie zostały zmarnowane przez to, że opłacone przez KBN prace nie dały żadnych wymiernych korzyści dla gospodarki państwa. Obawiam się, że działalność Agencji Techniki i Technologii nie idzie niestety w oczekiwanym przeze mnie kierunku, a jej kontakt z KBN ogranicza się do uczestnictwa przedstawiciela Przewodniczącego Komitetu Badań Naukowych w wieloosobowej Radzie Agencji.

#### *4.5. Strategiczne Programy Rządowe*

Strategicznym Programem Rządowym (SPR) jest program przygotowania i przeprowadzenia działań, których wynikiem ma być osiągnięcie celów ważnych dla całego państwa. SPR jest ustanawiany przez Radę Ministrów na wniosek naczelnego lub centralnego organu administracji państwowej. Komitet Badań Naukowych finansuje część badawczą SPR-ów.

W czasie pierwszej kadencji KBN często była poruszana sprawa utworzenia strategicznych programów rządowych. Wydawało się, że cały szereg zagadnień związanych ze zdrowiem ludności, ochroną środowiska, nowymi technologiami i materiałami ważnymi dla gospodarki kraju zasługuje na to, żeby nadać im rangę SPR-ów i uzyskać z budżetu państwa dodatkowe środki na finansowanie prowadzonych w ich ramach prac badawczych. Szereg propozycji wysuwanych na posiedzeniach Komisji KBN nie znalazło jednak aprobaty. Dotyczyło to między innymi zgłoszonego przez mnie projektu pod nazwą „Rozwój i wdrażanie nowoczesnych, energooszczędnych i bezodpadowych technologii opartych na materiałach o nowych własnościach, mikroelektronice i sterowaniu komputerowym”. Moim zdaniem brak aprobaty Komisji wynikał przede wszystkim z braku przekonania o dodatkowym finansowaniu z budżetu państwa badań w wybranych dziedzinach, a wobec tego finansowanie SPR-ów z działu 77 budżetu uszczuplałoby finansowanie innych dziedzin.

W 1995 r. został ustanowiony SPR pod nazwą „Bezpieczeństwo i ochrona zdrowia człowieka w środowisku pracy”, a w 1996 r. rozpoczęto finansowanie dwóch SPR-ów z dziedziny obronności i bezpieczeństwa państwa. Na realizację badań wydatkowano w 1996 r. kwotę 60.2 mln zł, co stanowiło 11% finansowania wszystkich projektów badawczych.

## **5. Finansowanie współpracy naukowej i naukowo-technicznej z zagranicą**

Wydatki w tym rozdziale stanowią ok. 2% budżetu nauki i praktycznie na takim samym poziomie utrzymują się w kolejnych latach działalności KBN. Nie jest to jednak jedyne źródło finansowania współpracy międzynarodowej. Wymiana osobowa i udział w konferencjach są finansowane w ramach działalności statutowej placówek i w ramach projektów badawczych (grantów, SPUB-ów, projektów celowych itd.). W zasadzie ten rozdział budżetu dotyczy współpracy międzynarodowej wynikającej z umów międzyrządowych, ale wiele placówek w sposób bardzo szeroki traktuje to ograniczenie, gdyż umowy o współpracy w dziedzinie nauki zostały przez Polskę zawarte z większością krajów świata. We wnioskach o finansowanie wymiany osobowej powoływano się na istniejącą umowę niezależnie od tego, czy dana placówka była w niej *explicite* wymieniona, czy też nie. Wnioski są corocznie rozpatrywane przez doradczo-opiniotawczy Zespół ds. Współpracy Naukowej i Naukowo-Technicznej z Zagranicą. Liczba wniosków w kolejnych latach wzrastała lawinowo, co obrazuje tab. 9.

Ogromna liczba wniosków, mimo że były one składane do 30 września poprzedniego roku, powodowała, że decyzje zapadały ze znacznym opóźnieniem,

Tabela 9. Finansowanie współpracy z zagranicą.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Liczba rozpatrywanych wniosków	861	1335	2757	3543	4020	5480	>8000
Przyznane kwoty (mln zł)	12.4	16.1	17.8	23.8	28.4	36.7	53.1
% budżetu nauki	2.03	2.16	1.99	2.04	1.98	1.91	2.34

a o pozytywnych decyzjach, w szczególności dotyczących wymiany osobowej, placówki były informowane nawet w IV kwartale roku realizacji. Od 1997 r., w którym liczba wniosków przekroczyła 8000, Zespół ds. Współpracy z Zagranicą przyznaje placówkom kwoty na wymianę osobową w globalnej wysokości. Kierownik placówki może więc decydować o realizacji najkorzystniejszych projektów wymiany, z tym, że w pierwszej kolejności powinny być realizowane tematy ujęte w protokołach wykonawczych do umów międzyrządowych. W gestii Zespołu Współpracy z Zagranicą pozostaje podejmowanie decyzji w sprawie opłacania składek na rzecz organizacji międzynarodowych i finansowania konferencji międzynarodowych w Polsce. W tabelach 10 i 11 przedstawione jest finansowanie współpracy z zagranicą w 1997 r. w układzie resortowym oraz główne kierunki współpracy w 1996 r.

Tabela 10. Finansowanie współpracy z zagranicą w 1997 r. w układzie resortowym (w tys. zł).

	Wymiana	Konf.	Składki	Razem
Państwowa Agencja Atomistyki	2 385	262	13 198	15 845
Polska Akademia Nauk	6 421	1 632	3 153	11 206
Min. Edukacji Narodowej	9 032	1 420	399	10 851
Min. Ochr. Środ., Zas. Natur. i Leśnych	283	43	6 111	6 437
Min. Gospodarki	2 698	415	90	3 203
Min. Zdrowia i Opieki Społecznej	828	265	263	1 356
Inne resorty	1 966	616	1 619	4 201
RAZEM	23 613	4 653	24 833	53 099

Najwyższy udział Państwowej Agencji Atomistyki spowodowany jest składkami na rzecz organizacji międzynarodowych, jak CERN (8565 tys. zł w 1997 r.) i ZIBJ (4752 tys. zł w 1997 r.).

Tabela 11. Główne kierunki finansowania współpracy z zagranicą w 1996 r. (mln zł).

Składki do organizacji międzynarodowych	15.15
Konferencje międzynarodowe w Polsce	3.25
Biuro Współpracy Zagranicznej PAN <sup>a</sup>	5.60
Wymiana osobowa	12.66
w tym:	
USA	3.80
Francja	1.39
Rosja	1.26
Niemcy	1.12
Organizacje międzynarodowe	1.02
Włochy	0.84
Chiny	0.79
Ukraina	0.75
Wielka Brytania	0.69
Japonia	0.61
Inne kraje	0.39

<sup>a</sup> Środki na finansowanie współpracy określonej w umowach i porozumieniach zawartych przez PAN są bezpośrednio przyznawane Akademii.

## 6. Finansowanie działalności ogólnotechnicznej (DOT)

Do działalności ogólnotechnicznej i wspomagającej badania naukowe należą w szczególności zadania dotyczące działalności wydawniczej, bibliotek naukowych, upowszechniania nowych osiągnięć naukowych i technicznych oraz rozwój informacji naukowo-technicznej. Środki z tego rozdziału budżetu są kierowane do resortów i podmiotów działających na rzecz nauki oraz wydatkowane na zadania wyodrębnione, jak import czasopism, zakup oprogramowania i tworzenie baz danych. W 1996 r. na dofinansowanie DOT wydatkowano 113.5 mln zł, co stanowiło 6.12% budżetu nauki. Resortowa działalność ogólnotechniczna kosztowała 54.7 mln zł, z czego największe kwoty otrzymały: PAN (13.4 mln zł), MEN (10.9 mln zł) i Ministerstwo Przemysłu i Handlu (8.1 mln zł). Na zadania wyodrębnione wydano 46.7 mln zł, z których największy udział pochłonął import czasopism 38.8 mln zł. Dofinansowanie podmiotów działających na rzecz nauki

wyniosło 12.2 mln zł, z czego 202 stowarzyszenia otrzymały 8.1 mln zł, a 53 wydawnictwa 3.0 mln zł.

Dyskusje nad finansowaniem podmiotów działających na rzecz nauki zajmowały na posiedzeniach KBN dużo czasu, mimo że przeważnie chodziło o rozdział niezbyt wysokich kwot. Ten strumień finansowania zasilał budżet Polskiej Akademii Umiejętności<sup>1</sup> (2.8 mln zł w 1994 r.), a także działalność małych towarzystw naukowych jak np. Ostrołęckie Towarzystwo Naukowe im. Adama Chętnika (ok. 30 000 zł w 1996 r.). W racjonalnym dofinansowaniu towarzystw naukowych pomogłoby stworzenie ich rankingu. Przyznanie towarzystwom naukowym kategorii, jak ma to miejsce w przypadku placówek naukowych, ułatwiłoby podejmowanie decyzji o ich dofinansowaniu przez KBN. Prace nad taką oceną są prowadzone od kilku lat przez Radę Towarzystw Naukowych, ale chyba dotychczas nie zostały zakończone.

## 7. Uwagi końcowe

Artykuł ten nie wyczerpuje oczywiście wszystkich problemów finansowania nauki w Polsce. Mam jednak nadzieję, że pomoże członkom KBN trzeciej kadencji uzmysłwić złożoność tego zagadnienia, z czego krytycy działalności KBN bardzo często nie zdają sobie sprawy. Transformacje w nauce i edukacji zachodzą powoli. Projekty nowych ustaw i próby nowelizacji starych natrafiają na opór grup, którym są one nie na rękę. W 1993 r. wicepremier Paweł Łączkowski powołał Zespół do Spraw Transformacji w Nauce i Edukacji. Koordynatorem Zespołu był Minister Edukacji Narodowej prof. Zdobysław Flisowski. Byłem członkiem tego zespołu jako przedstawiciel Komitetu Badań Naukowych. Przygotowując się do prac w Zespole zorientowałem się, że sprawą zmian legislacyjnych w obszarze nauki i edukacji zajmowało się od 1989 r. co najmniej 17 różnych zespołów. Ich prace nie przyniosły oczekiwanych rezultatów, gdyż próby nowelizacji istniejących ustaw oraz propozycje nowych aktów prawnych natrafiały na sprzeczne interesy poszczególnych grup działających w sferze nauki i edukacji. Wyraziłem również opinię, że Zespół powinien oderwać się od bieżących kontrowersji i przedstawić wizję, jak powinna w Polsce wyglądać ta sfera działalności w perspektywie na przykład 10 lat. Uzgodnienie takiej dalekowzrocznej wizji ma szanse powodzenia, gdyż nie narusza obecnie istniejących układów, pozwoli natomiast stopniowo, w sposób konsekwentny, zbliżać się do jej realizacji, eliminując w przyszłości kroki, które byłyby z nią ewidentnie sprzeczne. Zaproponowałem, żeby minister Z. Flisowski polecił członkom Zespołu napisanie „wypracowania na zadany temat”. Pakiet

---

<sup>1</sup> W 1995 r. KBN uchwalił przyznawanie PAU dofinansowania działalności statutowej.

takich „wypracowań” stałby się przedmiotem dyskusji, która mogłaby doprowadzić do uzgodnienia jednolitego obrazu, nie obciążonego grzechami przeszłości i nie podyktowanego bieżącymi interesami grup nacisku. Moja inicjatywa była oceniona pozytywnie, ale zmiana rządu spowodowała, że po dwóch posiedzeniach Zespół przestał istnieć.

Na zakończenie chciałbym przytoczyć konkluzję zaczerpniętą z wniosków końcowych raportu Zespołu do Usprawnienia Działalności KBN, którego byłem członkiem. „Czynnikiem determinującym wypełnienie podstawowej roli Komitetu Badań Naukowych jest integracja całego środowiska naukowego przede wszystkim w kierunku udowodnienia decydentom i społeczeństwu kluczowej roli nauki w rozwoju kraju i w warunkach integracji europejskiej. Stale zmniejszające się finansowanie nauki z budżetu państwa upoważnia do stwierdzenia, że ta działalność KBN w ciągu drugiej kadencji nie była efektywna i zakończyła się porażką. Rola władz KBN i jego członków to nie tylko dzielenie przyznanych środków ale – może przede wszystkim – stworzenie »lobby«, które skutecznie przekonałoby sejm, senat, rząd i społeczeństwo o konieczności zasadniczego wzrostu środków na badania naukowe i technologiczne w Polsce”. Te słowa, skierowane do członków KBN-u trzeciej kadencji, niech ich zmobilizują do skoncentrowania się nie tylko na zadaniach bieżących, ale również strategicznych.

### Literatura

- [1] A.Z. Hrynkiewicz, „KBN z perspektywy trzech lat pierwszej kadencji”, *Sprawy Nauki*, z. 5/94, s. 3.
- [2] A.Z. Hrynkiewicz, „Blaski i cienie Komitetu Badań Naukowych z perspektywy trzech lat pierwszej kadencji”, *Postępy Fizyki* **46**, 259 (1995).
- [3] A.Z. Hrynkiewicz, „Badania naukowe podstawowe i stosowane”, *Sprawy Nauki*, z. 4/92, s. 7; *Nauka Polska*, z. 1/93, s. 11.
- [4] A.K. Wróblewski, „Co należy wiedzieć o cytowaniach prac naukowych”, *Sprawy Nauki*, z. 2/96, s. 3.

## DYDAKTYKA FIZYKI

Henryk Piersa

*Katedra Fizyki  
Katolicki Uniwersytet Lubelski  
Lublin*

### Niektóre doświadczenia myślowe w uzasadnianiu relacji nieoznaczoności

#### Some gedanken experiments for explanation of the uncertainty principle

*Abstract:* Some gedanken experiments for pedagogical explanation of the uncertainty principle are critically discussed.

Spośród wielu doświadczeń myślowych wykorzystywanych do uzasadniania relacji nieoznaczoności najczęściej przywoływane jest doświadczenie z mikroskopem lub dyfrakcją cząstek na szczelinie. Omawiany w drugim doświadczeniu obraz dyfrakcyjny fali płaskiej na szczelinie odpowiada dyfrakcji obserwowanej na ekranie położonym w dużej odległości od szczeliny (dyfrakcja Fraunhofera). Jednocześnie czyni się założenie, że w akcie ugięcia nie ulega zmianie moduł wektora pędu cząstki, a zmienia się tylko jego kierunek. Wskutek tego pojawia się mała składowa pędu  $\Delta p_x$  (prostopadła do jego kierunku przed ugięciem), traktowana jako nieoznaczoność pędu. Żądanie to jest spełnione, gdy kąt  $\alpha$  między maksimum i pierwszym minimum dyfrakcyjnym ma małą wartość. Małość kąta powoduje z kolei, iż szerokość szczeliny  $\Delta x$  (utożsamiana z nieoznaczonością położenia) nie może być zbyt mała. W rezultacie uzasadniona na podstawie tego rozumowania relacja

$$\Delta x \Delta p_x \approx h \quad (1)$$

stosuje się do przypadku niezbyt wąskich szczelin  $\Delta x$  i niezbyt dużych wartości  $\Delta p_x$ .

W najczęściej podawanej wersji, rozumowanie wykorzystujące doświadczenie z mikroskopem zawiera dwie przesłanki o wątpliwej mocy uzasadniającej. Pierwsza z nich utożsamia nieoznaczoność położenia mikroobiektu  $\Delta x$  ze zdolnością rozdzielczą mikroskopu (dokładniej z odwrotnością tej wielkości)

$$\Delta x \approx \lambda / \sin \alpha, \quad (2)$$

druga wiąże się z określeniem nieoznaczoności pędu cząstki.

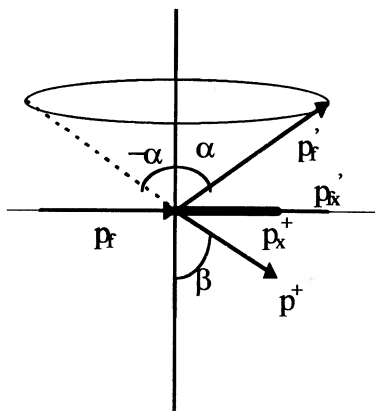
Na rysunku 1, pod obiektywem mikroskopu, schematycznie zaznaczono kierunek fotonu padającego o pędzie  $p_f$ , rozproszonego po komptonowsku o pędzie  $p'_f$  oraz odrzuconego elektronu o pędzie  $p^+$ . W dyskutowanym rozumowaniu jako nieoznaczoność  $x$ -owej współrzędnej pędu elektronu  $\Delta p_x = p_x^+$  przyjmuje się odpowiednią współrzędną rozproszonego fotonu (przy uzasadnianiu tego twierdzenia, w sposób jawny lub nie, przywołuje się zasadę zachowania pędu (por. np. [1]))

$$p'_{fx} = p'_f \sin \alpha = h / \lambda^+ \sin \alpha. \quad (3)$$

Tymczasem  $p'_{fx}$  oraz

$$p_x^+ = p^+ \sin \beta \quad (4)$$

mają różne wartości liczbowe. Dlatego ze wzorów (2) i (4) nie wynika relacja (1).



Rys. 1.

Trudność związaną z określeniem nieoznaczoności  $x$ -owej współrzędnej pędu elektronu usuwa poniższe rozumowanie, zasugerowane autorowi przez prof. Marka Kusia.



Niech  $\lambda^+$  i  $\lambda^-$  oznaczają długość fali fotonu rozproszonego odpowiednio pod kątem  $\alpha$  i  $-\alpha$  (rys. 1), a  $p_x^+$  i  $p_x^-$  – współrzędne pędu elektronu przy tych sposobach rozproszenia. Zasada zachowania pędu w tych oddziaływaniach ma postać

$$\begin{aligned} p_x + h/\lambda &= p_x^+ + (h/\lambda^+) \sin \alpha , \\ p_x + h/\lambda &= p_x^- - (h/\lambda^-) \sin \alpha , \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie  $p_x$  i  $\lambda$  oznaczają odpowiednio  $x$ -ową współrzędną pędu elektronu oraz długość fali fotonu przed rozproszeniem.

Odejmując stronami wyrażenia (5) dostajemy:

$$|p_x^+ - p_x^-| = h \sin \alpha (1/\lambda^+ + 1/\lambda^-) . \quad (6)$$

Definiując lewą stronę (6) jako nieoznaczoność  $x$ -owej współrzędnej pędu elektronu  $\Delta p_x$  oraz przyjmując, że (co do rzędu wielkości) spełniona jest równość

$$\lambda^+ \approx \lambda^- \approx \lambda , \quad (7)$$

z (6) otrzymujemy

$$\Delta p_x = 2(h/\lambda) \sin \alpha . \quad (8)$$

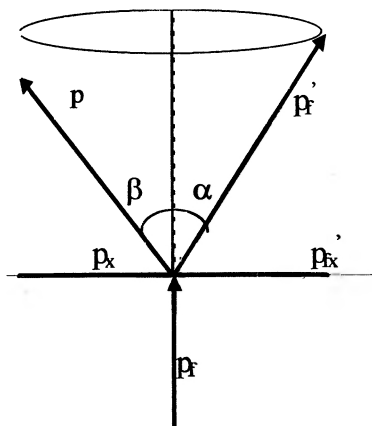
Przeprowadzone dla  $\lambda = 10^{-2}$  Å oraz  $\alpha = 60^\circ$  i  $-\alpha = -60^\circ$  oszacowania dają:  $\lambda^+ \approx 1.3 \times 10^{-2}$  Å,  $\lambda^- \approx 5.5 \times 10^{-2}$  Å. Co do rzędu wielkości równość (7) jest w tym przypadku prawie spełniona. Mnożąc stronami (2) i (8) otrzymujemy (1).

Wątpliwej przesłanki nie zawiera rozumowanie towarzyszące rzadziej spotykanej wersji doświadczenia myślowego z mikroskopem [2], w której foton biegnie równolegle do osi optycznej obiektywu i po rozproszeniu wchodzi do mikroskopu (rys. 2). W tym przypadku, zgodnie z zasadą zachowania pędu,

$$p'_{fx} = p'_f \sin \alpha = p \sin \beta . \quad (9)$$

Jako nieoznaczoność współrzędnej pędu elektronu  $p_x$  przyjmowane jest wyrażenie  $p_x = p \sin \beta$  równe wielkości  $p'_f \sin \alpha$ . Na nieoznaczoność położenia ponownie przyjmuje się wyrażenie (2).

Opis obydwu wersji doświadczenia myślowego z mikroskopem pozwala wnosić, że zaobserwowanie położenia elektronu jest równoznaczne z wejściem rozproszonego na nim fotonu do obiektywu. Tymczasem, zgodnie z teorią Abbego, formowanie obrazów w mikroskopie dokonuje się dzięki interferencji ugiętych na szczegółach przedmiotu (i aperturze przyrządu) wiązek światła.



Rys. 2.

Z dokładnością do czynnika liczbowego rzędu jedności wzór (2) otrzymuje się przy założeniu, że do obiektywu wchodzi wiązkę ugięte zerowego rzędu na dwóch małych otworkach kołowych, oddległych od siebie o  $\Delta x$ , przy ich oświetleniu falą płaską, biegnącą równolegle do osi optycznej przyrządu [3]. Przy tym zakłada się, że wspomniane wiązki spełniają kryterium Rayleigha: maksimum dyfrakcyjne pochodzące od jednego otworka pokrywa się z pierwszym minimum dyfrakcyjnym wytworzonym przez drugi otworek.

Jeżeli wzór (2) ma być stosowany do fotonu rozproszonego na elektronie, w wersji odpowiadającej rys. 2, to należałoby wykazać, że ten foton spełnia wymienione warunki. W przeciwnym wypadku będzie to (wcale nie oczywiste) założenie, przyjęte w celu uzasadnienia relacji (1).

## Literatura

- [1] L.I. Schiff, *Mechanika kwantowa* (Warszawa 1977), s. 22-3; B. Średniawa, *Mechanika kwantowa* (Warszawa 1981), s. 57-8; V. Acosta i in., *Podstawy fizyki współczesnej* (Warszawa 1981), s. 135-7; M. Born, *Atomic Physics* (London-Glasgow 1947), s. 94-5.
- [2] W. Rubinowicz, *Kwantowa teoria atomu* (Warszawa 1957), s. 276-7.
- [3] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics* (Oxford-London-Los Angeles 1968), s. 417.

## ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

**Highly Conducting Materials  
for Molecular Electronics (ISME '97)**

W dniach od 8 do 12 czerwca 1997 r. odbyło się w Puszczykowie k. Poznania V Międzynarodowe Seminarium „Highly Conducting Organic Materials for Molecular Electronics” (ISME '97). Seminarium zostało zorganizowane przez Instytut Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu i było pomyślane jako międzydyscyplinarne spotkanie fizyków, chemików oraz materiałoznawców, prowadzących badania doświadczalne i teoretyczne materiałów organicznych o wysokiej przewodności elektrycznej, mogących znaleźć zastosowanie w dynamicznie rozwijającej się elektronice molekularnej (kryształy soli z przeniesieniem ładunku, polimery, fullereny, interkalowane grafity, warstwy Langmuira-Blodgett).

Historia konferencji ISME rozpoczyna się w roku 1985, kiedy to grupa fizyków z IFM PAN w Poznaniu, której przewodniczył prof. Andrzej Graja, zorganizowała w Czerniejewie dwustronne spotkanie polsko-francuskie na temat przewodników organicznych. Seminarium polsko-francuskie były następnie kontynuowane w Nancy (Francja) w 1987 r. oraz ponownie w Czerniejewie w 1989 r. W roku 1988 ta sama grupa zainicjowała analogiczne spotkania polsko-rosyjskie (Czerniejewo 1988), które kontynuowano w Czernogółowie (Rosja) w 1990 r. oraz w Kiekrzu k. Poznania w 1992 r. Szerokie zainteresowanie tymi spotkaniami, także przez naukowców z innych krajów, zachęciło grupę fizyków z Poznania do zrezygnowania z ich dwustronnego charakteru i zorganizowania konferencji międzynarodowej. Pierwsze międzynarodowe seminarium ISME odbyło się w Zajączkowie w roku 1994 i, w nawiązaniu do serii poprzednich spotkań, zostało nazwane „IV Seminarium”.

Do Puszczykowa na ISME '97 przyjechało 76 naukowców z 12 krajów (Polska – 30, Francja – 12, Rosja – 11, Niemcy – 10, Japonia – 4, Grecja i Litwa – po 2, Chiny, Estonia, Łotwa, Portugalia i Wenezuela – po 1). Program naukowy składał się z wykładów plenarnych oraz komunikatów ustnych i plakatowych; wygłoszono 9 wykładów i 22 komunikaty oraz przedstawiono 46 plakatów. Prace przedstawione na konferencji w Puszczykowie zostaną opublikowane w zeszycie specjalnym czasopisma *Synthetic Metals*.

W ostatnich latach jednym z najważniejszych problemów w dziedzinie materiałów molekularnych jest poszukiwanie nowych przewodników organicznych zawierających trwałe momenty magnetyczne. M. Kryszewski (Łódź) mówił o materiałach nanokompozytowych utworzonych przez przewodzący polimer oraz paramagnetyczne cząsteczki. Kompozyty te wykazują superparamagnetyzm, który może zostać zmodyfikowany przez odpowiedni dobór oddziaływań paramagnetycznych cząsteczek z przewodzącą matrycą. P. Cassoux (Tuluza, Francja) omawiał oddziaływania między elektronami przewodnictwa w warstwach organicznych i spinami zlokalizowanymi na nieorganicznych jonach.

Głównym tematem jego wykładu były sole utworzone przez organiczny donator BETS (bis(etylenoditiolo)tetraselenufulwalen) z różnymi magnetycznymi anionami. W kryształach  $\lambda$ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$  zaobserwowano oddziaływania między elektronami przewodnictwa oraz spinami zlokalizowanymi na magnetycznych anionach. L. Ouahab (Rennes, Francja) poświęcił swój wykład syntezie, strukturze i własnościom fizycznym kryształów, w których występuje przewodząca sieć utworzona przez cząsteczki TTF (tetratiofulwalen) lub BEDT-TTF (bis(etylenoditiolo)tetratiofulwalen) oraz paramagnetyczna podsieć składająca się z nieorganicznych anionów. M. Almeida (Sacavém, Portugalia) opisywał molekularne przewodniki utworzone przez cząsteczki perylenu oraz kompleksy metali przejściowych  $M(\text{nmt})_2$  ( $M = \text{Ni, Pt, Pd, Fe}$ ; nmt – 1,1-ditio-2,2-dicyjano-etylen). Kryształy te wykazują wyjątkowe własności wynikające z współistnienia kwazijednowymiarowych przewodzących łańcuchów oraz łańcuchów zlokalizowanych spinów.

Trzy wykłady były poświęcone badaniom własności elektronowych niskowymiarowych przewodników organicznych. D. Schweitzer (Stuttgart, Niemcy) skupił uwagę na organicznym nadprzewodniku  $\kappa$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ , który jest kryształem o krańcowo wyraźnych kwazidwuwymiarowych własnościach elektronowych. Powierzchnia Fermiego tego kryształu była badana metodą oscylacji kwantowych de Haasa-van Alphen oraz Szubnikowa-de Haasa. K. Andres (Garching, Niemcy) rozważał niezwykle własności kryształów  $\kappa$ -(BEDT-TTF) $_2$ [N(CN) $_2$ ]X ( $X = \text{Cl, Br, I}$ ), w których dużą rolę pełnią krytyczne korelacje elektronowe. H. Tajima (Tokio, Japonia) w swoim wykładzie przedstawił przegląd molekularnych przewodników, w których funkcje Blocha w pasmie przewodnictwa są utworzone przez dwa orbitale molekularne (lub więcej); są to tzw. układy dwu- lub wielopasmowe. Własności elektronowe niskowymiarowych przewodników organicznych dyskutowane były również w wielu komunikatach ustnych i plakatowych.

S. Roth (Stuttgart, Niemcy) wygłosił wykład na temat molekularnych prostowników i tranzystorów, skupiając się przede wszystkim na urządzeniach wytworzonych na bazie ftalocyjanin i nanorurek węglowych. V.M. Yartsev (Caracas, Wenezuela) mówił na temat przejścia fazowego między stanem neutralnym a jonowym w kryształach organicznych oraz nakreślił perspektywy praktycznego zastosowania takich przejść.

Kilka komunikatów ustnych oraz wiele referatów plakatowych było poświęconych fullerenom oraz różnym materiałom, w których fullereny stanowią zasadniczą część składową. M. Tokumoto (Tsukuba, Japonia) mówił o wytwarzaniu i badaniach własności fizycznych ferromagnetycznych kryształów oraz cienkich warstw TDAE-C $_{60}$  (TDAE – tetrakis(dimetylamino)etylen). Niezwykle interesującym odkryciem jest obserwacja ferromagnetyzmu w niektórych cienkich warstwach już w temperaturze  $T = 80 \text{ K}$ ! F. Kajzar (Saclay, Francja) przedyskutował nieliniowe własności struktur wielowarstwowych i kompozytów C $_{60}$  z różnymi donorami elektronów.

Wspomnieć należy również o wielu komunikatach ustnych i plakatach dotyczących przewodzących polimerów, polimerowych diod luminescencyjnych, warstw Langmuira-Blodgett, a także nowych materiałów o wysokiej przewodności elektrycznej, zarówno kryształów z przeniesieniem ładunku, jak i polimerów.

Uczestnicy spotkania ISME '97 mieli okazję bliżej się poznać nie tylko podczas sesji naukowych, lecz także podczas kilku imprez towarzyskich. W programie konferencji znalazła się wycieczka do Rogalina, gdzie uczestnicy zwiedzili rokokowy pałac, dawną siedzibę Raczyńskich, oraz zobaczyli słynne dęby rogałińskie. Zorganizowano również kon-

cert Capelli Zamku Rydzynskiego, specjalizującej się w muzyce myśliwskiej, oraz ognisko, na którym można było skosztować pieczeni z dzika i polskiego krupniku.

*Roman Świątlik*

Instytut Fizyki Molekularnej PAN  
Poznań

### **Japońsko-Polskie Sympozjum Półprzewodników Półmagnetycznych**

W dniach 11–12 września 1997 r. w Warszawie odbyło się Japońsko-Polskie Sympozjum nt. Półprzewodników Półmagnetycznych. Organizatorem spotkania był prof. Andrzej Twardowski z Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego.

Fizycy japońscy od wielu lat uczestniczą w badaniach półprzewodników półmagnetycznych. W ostatnich latach rozpoczęto tam realizację wielu projektów badawczych dotyczących efektów spinowych w nanostrukturach półprzewodnikowych. Wyprowadziło to Japonię na pozycję jednego z liderów badań nad półprzewodnikami półmagnetycznymi. Fizyka półprzewodników półmagnetycznych jest także w Polsce jednym z wiodących tematów w zakresie badań ciała stałego. Nawiązanie ściślejszej współpracy obu środowisk było motywem organizacji Sympozjum.

W czasie sympozjum referaty wygłosiło 15 fizyków japońskich z wiodących ośrodków naukowych Tokio, Osaki, Yokohamy, Tsukuby i Sendai. Wyniki badań prowadzonych aktualnie w Polsce przedstawiono w 15 referatach wygłoszonych przez fizyków z Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie oraz Uniwersytetu Warszawskiego. Referaty inaugurujące sympozjum wygłosili prof. N. Miura z Uniwersytetu Tokijskiego oraz prof. R.R. Gałązka z Instytutu Fizyki PAN.

Tematykę naukową sympozjum zdominowały badania półprzewodników półmagnetycznych III-V z Mn ( $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  i  $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ) oraz niskowymiarowych struktur półmagnetyków II-VI z Mn. Omówiono również ostatnie prace dotyczące półmagnetyków II-VI z innymi jonami metali przejściowych (Fe, Cr, Co) oraz półmagnetyków IV-VI z Gd, Yb i Cr.

Jednym z najżywiej dyskutowanych tematów były własności magnetyczne półprzewodników półmagnetycznych, a w szczególności problem indukowania w materiałach półmagnetycznych porządku ferromagnetycznego poprzez odpowiednio wysoką koncentrację nośników. Ostatnie wyniki prowadzonych w Japonii badań cienkich epitaksjalnych warstw  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  wskazują na istnienie w tym materiale fazy ferromagnetycznej z temperaturą Curie  $T_C = 110$  K przy raczej niskich koncentracjach Mn. Przesunięcie tej granicy do obszaru temperatur pokojowych jest podstawowym wyzwaniem technologii warstw GaMnAs. Niezwykle interesujące wydaje się również odkrycie w heterostrukturach (In,Mn)As-GaSb ferromagnetyzmu wywołanego oświetleniem struktury. Proponowany model fizyczny wiąże powstanie fazy ferromagnetycznej z indukowaną optycznie wysoką koncentracją dziur w warstwie InMnAs. Mechanizmy fizyczne tych efektów oraz ich związek z badanymi w IF PAN efektami indukowanych koncentracją nośników przejść

paramagnetyk – ferromagnetyk i ferromagnetyk – szkło spinowe były jednym z zagadnień dyskutowanych podczas sympozjum.

Jakościowo nowym wynikiem jest również odkrycie własności ferromagnetycznych studni kwantowych w strukturach  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  -  $\text{Cd}_{1-y-z}\text{Mg}_y\text{Zn}_z\text{Te:N}$ , w których oddziaływanie ferromagnetyczne związane jest także z nośnikami ładunku.

Kilka referatów dotyczyło magneto optycznych i magnetotransportowych badań niskowymiarowych struktur półmagnetyków II-VI z Mn, które otrzymano metodą epitaksji z wiązek molekularnych w Instytucie Fizyki PAN. Ostatnio w tej grupie materiałów pojawiły się jakościowo nowe możliwości w związku z opanowaniem metod domieszkowania warstw epitaksjalnych.

Uczestnicy sympozjum zostali przyjęci przez Prorektora Uniwersytetu Warszawskiego prof. M. Nawrockiego. Po zakończeniu sympozjum japońscy goście odwiedzili również Żelazową Wolę.

Prace sympozjum przebiegały sprawnie, w bardzo żywej i sympatycznej atmosferze. Przyczyni się ono niewątpliwie do dalszego rozwoju współpracy japońsko-polskiej w badaniach półprzewodników półmagnetycznych.

*Tomasz Story*

Instytut Fizyki PAN  
Warszawa

## RECENZJE

J.M. Żurada, M. Barski, W. Jędruch: **Sztuczne sieci neuronowe**  
Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996, s. 375

Recenzowana książka jest podręcznikiem akademickim do studiowania sztucznych sieci neuronowych. Jest to opracowana na nowo i przystosowana dla polskich czytelników wersja książki Jacka M. Żurady *Introduction to Artificial Neural Systems*, wydanej przez West Publishing Company, St. Paul, USA, w roku 1992. W środowiskach akademickich podręcznik ten cieszy się dużą popularnością i jest używany w ponad 120 uczelniach na świecie. J.M. Żurada jest profesorem inżynierii elektrycznej na Uniwersytecie Louisville w USA, a M. Barski i W. Jędruch są pracownikami naukowymi Politechniki Gdańskiej.

Sztuczne sieci neuronowe to bardzo obszerny dział wiedzy o systemach złożonych, będący w stanie rozkwitu od początku lat 80-tych. Jest to dziedzina interdyscyplinarna, obejmująca badania na styku informatyki, biologii, psychologii, fizyki, elektroniki. Mówiąc zwięźle, głównym zagadnieniem sztucznych sieci neuronowych jest stworzenie systemów przetwarzania informacji imitujących funkcjonowanie układu nerwowego. Stosowane tutaj metody są bliskie metodom sztucznej inteligencji. Jednak obie dyscypliny różnią się między sobą w istotny sposób. Obecnie istnieje bardzo wiele rozmaitych modeli sztucznych sieci neuronowych. Mają one pewne cechy wspólne. Można powiedzieć, że sztuczne sieci neuronowe to układy zbudowane z dużej liczby prostych elementów przetwarzających (neuronów), połączonych ze sobą w sposób równoległy. Konfiguracja neuronów jest dobierana pod kątem realizacji określonego celu. Wartości połączeń (tzw. wagi synaptyczne) są najczęściej dopasowane w trakcie procesu iteracyjnego, którego celem jest spełnienie pewnej funkcji działania sieci. Zazwyczaj optymalizacji wag dokonuje się na podstawie pewnego zbioru przykładów. A więc można powiedzieć, że sztuczne sieci neuronowe są to maszyny uczące się na przykładach. Jest to istotna zaleta praktyczna, decydująca o atrakcyjności tych modeli. Dają one realne możliwości wspomagania decyzji w sytuacjach, w których nie istnieją modele obiektów bądź procesów, a nawet nie ma szans na ich opracowanie. Z tego punktu widzenia rozwiązania oferowane przez zastosowanie sieci neuronowych mają charakter heurystyczny. Liczba publikacji dotyczących teorii i zastosowań sieci neuronowych jest ogromna. Według statystyki prowadzonej przez Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) w 1996 r. sieci neuronowe znalazły się na pierwszym miejscu wśród dyscyplin obejmujących wszystkie działy informatyki, elektroniki i elektrotechniki.

Również w Polsce powiększa się grono osób specjalizujących się w tej dziedzinie, o czym świadczy istnienie Polskiego Towarzystwa Sieci Neuronowych, organizowanie specjalnych konferencji oraz wydanie kilku książek autorów polskich i tłumaczeń. Sieci neuronowe są też obecnie wykładane na wielu wydziałach politechnik, uniwersytetów oraz wyższych uczelni ekonomicznych.

Napisanie podręcznika akademickiego o sieciach neuronowych, uwzględniającego szeroki zakres tematyczny i ogromną liczbę publikacji, który przy tym zadowoliłby większość czytelników jest niezwykle trudne. Uważam, że Autorom recenzowanej książki udało się to zadanie zrealizować.

Główną zaletą tej książki w porównaniu z innymi wydanymi dotychczas po polsku jest jasność i zrozumiałość wykładu. Trudny temat został podany w sposób przyjazny dla studentów. Oczekuje się od nich tylko znajomości matematyki na poziomie pierwszych lat studiów technicznych. Uważam, że Autorzy dokonali właściwej selekcji problemów. Nie próbują przedstawić jak największej liczby modeli, przykładów ich zastosowań, rzadkich wariantów sieci, które mogą zainteresować tylko niewielu specjalistów. Wybrane (i ważne) treści przedstawiają bardzo wnikliwie, toteż uważni czytelnicy mają możliwość dokładnego zrozumienia treści.

Książka składa się z 8 rozdziałów. We Wprowadzeniu podano główne role, jakie mogą pełnić sztuczne sieci neuronowe, a więc klasyfikacja, aproksymacja, sterowanie, optymalizacja, pamięć asocjacyjna. Przedstawiono także rys historii sieci neuronowych, poczynając od modelu neuronu McCullocha i Pittsa z roku 1943. W rozdziale 2 zdefiniowano podstawowe modele neuronów oraz sieci neuronowych (sieci jednokierunkowe i rekurencyjne). Omówiono najważniejsze algorytmy uczenia sieci, ilustrując je prostymi przykładami. Rozdział 3 poświęcony jest jednowarstwowemu klasyfikatorom neuronowym. W elementarny sposób wprowadzono pojęcia analizy dyskryminacyjnej jako teoretycznej podstawy działania perceptronu liniowego. Następny rozdział zawiera opis najszerzej stosowanego modelu sieci neuronowych – wielowarstwowej sieci jednokierunkowej. W tym ujęciu jest to rozszerzenie perceptronu jednowarstwowego, umożliwiające klasyfikację w przypadku zbiorów nieseparowalnych liniowo. Warstwa neuronów ukrytych pozwala kształtować ściany rozdzielające podzbiory przypadków należących do różnych klas. Warto podkreślić walory dydaktyczne fragmentu tekstu opisującego uczenie sieci metodą propagacji wstecznej błędu wraz z modyfikacjami i wskazówkami doboru parametrów procesu uczenia oraz architektury sieci, czyli liczby warstw oraz neuronów w kolejnych warstwach. W rozdziale 5 wprowadzono sieć jednowarstwową ze sprzężeniem zwrotnym, zwaną siecią Hopfielda. Za podstawę Autorzy przyjęli interpretację tej sieci jako układu elektronicznego, co jest oczywiście bardziej zrozumiałe dla studentów nauk technicznych. Podano proste metody badania dynamiki sieci zbudowanych z kilku jednostek oraz przykłady zastosowań: sieć sumującą z wyjściem cyfrowym i sposób rozwiązania zadania komiwojażera. Pominęto atrakcyjne dla fizyków związki teorii sieci Hopfielda z fizyką szkieł spinowych. W rozdziale 6 ukazano sieć Hopfielda jako pamięć asocjacyjną. Zachowując elementarny styl wykładu przedstawiono zasadę działania i właściwości tego modelu pamięci w sposób matematycznie poprawny i zrozumiały, dochodząc do oszacowania pojemności pamięci w przypadku uczenia metodą Hebb'a. W drugiej części rozdziału opisano pewne uogólnienie modelu Hopfielda – dwukierunkową i wielokierunkową pamięć asocjacyjną. Rozdział 7 zawiera omówienie sieci samoorganizujących się: sieci Hamminga, sieci Kohonena, sieci z kontrapropagacją oraz sieci rezonansu adaptacyjnego ART1. W rozdziale 8 omówiono wybrane zastosowania sieci neuronowych: modyfikację sieci Hopfielda do modelowania zadań programowania liniowego, rozpoznawanie pisma ręcznego za pomocą wielowarstwowej sieci jednokierunkowej, przykłady wykorzystania sieci wielowarstwowych z propagacją wsteczną błędu do identyfikacji obiektów



i do sterowania (np. sterownik neuronowy odwróconego wahadła). Nieco szerzej przedstawiono sieci wielowarstwowe sterujące kinematyką manipulatorów. Zamieszczono także zastosowania tych sieci jako systemów eksperckich, wspomagających diagnozy medyczne. Wspomniano o możliwościach zastosowań sieci Kohonena.

W spisie literatury zaznaczono wkład polskich naukowców w dziedzinę sztucznych sieci neuronowych i wymieniono wiele wydanych po polsku książek pomocniczych.

Zaletą książki jest wiele starannie opracowanych zadań do samodzielnego rozwiązania o zróżnicowanych stopniach trudności. Jest to cenny dodatek dla wykładowców i studentów, którego nie ma w innych wydanych w Polsce książkach o sieciach neuronowych.

Do książki dołączona jest dyskietka z programem symulacyjnym Netlab, działającym w środowisku Windows (3.1 lub 95). Jej wykorzystanie ułatwia zrozumienie treści książki i zachęca do samodzielnego studiowania.

Do ogólnie pozytywnej opinii można dodać parę uwag krytycznych. Wydaje się, że należałoby jasno zaznaczyć zależność pojemności pamięci asocjacyjnej Hopfielda od zastosowanego algorytmu uczenia sieci. Również wyraźny niedosyt odczuwam po przeczytaniu rozdz. 8 o zastosowaniach sieci neuronowych. Jest on zaledwie lakoniczny. Przecież głównym atutem sieci neuronowych mają być korzyści wynikające z ich zastosowań! Tymczasem przedstawiono materiał raczej przestarzały, np. próby rozpoznawania pisma. Może warto byłoby ukazać istotne sukcesy sieci neuronowych w takich dziedzinach jak neuronowa filtracja sygnałów, czy prognozy giełdowe.

Autorom udało się trudne zadanie wprowadzania polskiej terminologii. W kilku miejscach występują jednak językowe potknięcia, np. w podpisie pod rys. 2.11 należałoby napisać o dwóch przyciągających punktach stałych. Na s. 51 zamiast „opóźnienie nieskończenie małe” powinno być „dowolnie małe”. Procesy uczenia sieci bywają określane jako nauka lub trening.

Książka jest estetycznie wydana i zawiera wiele starannie wykonanych ilustracji.

Reasumując, uważam, że jest to dobrze napisany podręcznik, użyteczny dla studentów, wykładowców i wszystkich osób, które chcą dowiedzieć się, czym są sztuczne sieci neuronowe i jak je stosować w praktyce. Polecam wykorzystać ją w dydaktyce jako pierwszy tekst dla studentów. Po jej przestudiowaniu można ze zrozumieniem korzystać z bardziej zaawansowanych monografii oraz oryginalnych prac ogłaszanych w czasopiśmie naukowych.

*Stanisław Jankowski*

Instytut Podstaw Elektroniki PW  
Warszawa

**List otwarty**  
**Zebrania Delegatów Polskiego Towarzystwa Fizycznego**  
**do Ministra Edukacji Narodowej**  
**w sprawie projektu reformy programów nauczania**

My, fizycy i nauczyciele fizyki zebrani na XXXIV Zjeździe Fizyków Polskich, zorganizowanym przez Polskie Towarzystwo Fizyczne, po analizie dokumentu pt. „Podstawy programowe obowiązkowych przedmiotów ogólnokształcących” i po publicznej dyskusji na Zjeździe, stwierdzamy co następuje:

Doceniamy w pełni konieczność gruntownej reformy nauczania. Podpisujemy się w pełni pod sformułowanymi przez MEN celami nauczania. Jednak wielce niepokojące jest dla nas zredukowanie pozycji fizyki, modelowej nauki ścisłej, opartej na matematycznym opisie zjawisk, do roli jednego z kilku składników jakościowego i ogólnikowego wykształcenia ogólnoprzyrodniczego.

Obok tych niebezpiecznych zmian programowych w dokumencie założono drastyczną redukcję liczby godzin fizyki, nieproporcjonalnie dużą w stosunku do innych przedmiotów.

W programie szkoły średniej szczególnie niepokoi zburzenie zestawu profili: matematyczno-fizycznego, biologiczno-chemicznego, humanistycznego i językowego na rzecz włączenia fizyki do działu ogólnoprzyrodniczego. Fizyka jest bowiem modelowym dla innych nauk zastosowaniem matematyki do opisu świata. Opisowo-jakościowa metodologia innych nauk przyrodniczych jest zupełnie odmienna. Połączenie matematyki z edukacją ogólnotechniczną nie jest możliwe bez pośrednictwa fizyki, najlepiej ilustrującej zastosowania matematyki. Fizyka leży bowiem u podstaw techniki i nowych zaawansowanych technologii. Niezwykle ważna jest także rola edukacyjna fizyki jako nauki ścisłej i jednocześnie doświadczalnej w kształtowaniu umiejętności racjonalnego i logicznego myślenia. Tak więc odłączenie fizyki od matematyki i umiejscowienie jej w bloku przyrodniczym jest merytorycznie błędne i dydaktycznie szkodliwe.

W projekcie MEN wśród konkretnych zadań szkoły znajduje się wiele propozycji godnych poparcia, np. „Poznajowanie znaczenia odkryć w naukach przyrodniczych dla rozwoju cywilizacji”, „Modelowanie rzeczywistości przyrodniczej z wykorzystaniem metod i narzędzi informatycznych”, „Posługiwanie się modelami matematycznymi do opisu zjawisk fizycznych i rozwiązywania problemów fizycznych”. Jednak wobec znacznej redukcji godzin fizyki realizacja tych ambitnych założeń jest nierealna.

Uważamy również, że eliminowanie zajęć z fizyki w obecnym programie szkolnym jest niebywale szkodliwe dla prawidłowego wykształcenia młodego pokolenia.

Fizyka powinna być nauczana przez cztery lata liceum w wymiarze nie mniejszym niż dwie godziny tygodniowo.

Podkreślamy jeszcze raz, że ścisłe metody rozumowania połączone z badaniami doświadczalnymi z zakresu fizyki doprowadziły do rewolucji technicznej początku XX wieku i do rewolucji informatycznej końca XX wieku. W obu przełomowych okresach ludzie z wykształceniem fizyczno-matematycznym odegrali główną rolę. Musimy dążyć ze wszystkich sił do wyrobienia powszechnego przekonania, że bez właściwego umiejscowienia fizyki w programach edukacji narodowej i w programach badań naukowych nasz kraj nie będzie odpowiedniej rangi partnerem w światowej społeczności XXI wieku.

Bardzo prosimy Pana Ministra o jak najszybsze podjęcie kroków pozwalających na uniknięcie powyższych błędów, nie rezygnując z pozytywnych aspektów reformy nauczania. Nasze środowisko zgłasza gotowość do współpracy z MEN w tej sprawie.

*Fizycy zgromadzeni na XXXIV Zjeździe Fizyków Polskich  
Polskie Towarzystwo Fizyczne  
Sekcja Nauczycielska Polskiego Towarzystwa Fizycznego*

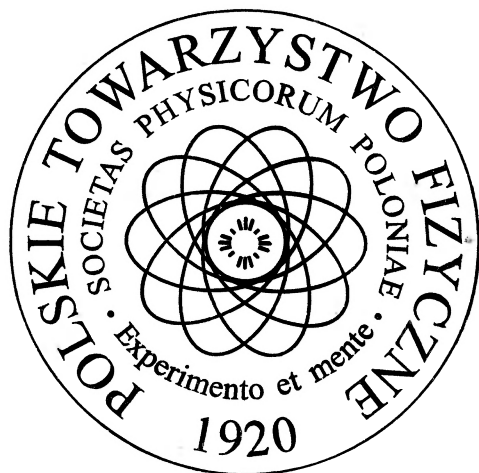
Katowice, 18 września 1997 r.

## K R O N I K A

### PTF

#### Godło PTF

W wyniku konkursu na emblemat i dewizę Polskiego Towarzystwa Fizycznego komisja konkursowa wybrała projekt prof. Stanisława Hałasa (UMCS), który tu reprodukuje. Godło to można umieszczać na pismach zarówno Zarządu Głównego, jak i oddziałów.



Według tego wzoru będzie zrobiona pieczęć okrągła PTF, a również znaczki, które członkowie będą mogli kupować w swoich oddziałach.

#### Włodzimierz Zawadzki laureatem Medalu Smoluchowskiego

Polskie Towarzystwo Fizyczne uhonorowało w 1997 r. swoim najwyższym wyróżnieniem – Medalem Mariana Smoluchow-

skiego – prof. dra hab. Włodzimierza Zawadzkiego z Instytutu Fizyki PAN.

Medal został przyznany za całokształt dorobku naukowego Laureata i został mu wręczony podczas XXXIV Zjazdu Fizyków Polskich we wrześniu 1997 r. Zjazd ten miał wyjątkowo prestiżowy charakter ze względu na udział w nim czterech laureatów Nagrody Nobla. Włodzimierz Zawadzki wygłosił referat „Półwzględność w półprzewodnikach” nawiązujący do jego oryginalnych prac wskazujących na pewne ważne analogie formalne niektórych problemów występujących w fizyce półprzewodników z mechaniką relatywistyczną.

Włodzimierz Zawadzki jest jednym z najbardziej znanych w świecie fizyków polskich. Ma w swoim dorobku naukowym 173 prace naukowe ogłoszone w najbardziej prestiżowych czasopismach. Opublikował wiele artykułów przeglądowych w różnych wydawnictwach monograficznych, w tym niektóre wspólnie z wybitnymi fizykami zagranicznymi, jak laureaci Nagrody Nobla J. Robert Schrieffer, Leo Esaki czy Klaus von Klitzing. O wielkim autorytecie, jakim Zawadzki cieszy się na tzw. międzynarodowym rynku naukowym, świadczy ogromna liczba referatów wygłoszonych przez niego na zaproszenie organizatorów największych i najważniejszych międzynarodowych kongresów i konferencji naukowych. Przejawem popularności międzynarodowej są również liczne zabiegi czynione przez najważniejsze uniwersytety Europy i USA dotyczące ścigania Zawadzkiego na paromiesięczne wizyty naukowe. Na uczelniach starego i nowego

kontynentu wygłosił on ponad 150 wykładów seminaryjnych. Jest również wykładowcą bardzo chętnie zapraszany na międzynarodowe szkoły fizyki organizowane na całym świecie. Jako wybitny autorytet w dziedzinie fizyki półprzewodników jest zapraszany do komitetów programowych i doradczych najbardziej prestiżowych konferencji naukowych.

Wielki talent naukowy Zawadzkiego ujawnił się natychmiast po ukończeniu studiów na Uniwersytecie Warszawskim i rozpoczęciu w 1961 r. pracy naukowej w Instytucie Fizyki PAN. Miałem okazję te początki jego błyskotliwej kariery naukowej obserwować z bliska, gdyż w latach sześćdziesiątych prowadziliśmy wspólne badania wpływu struktury pasm energetycznych na dynamikę elektronów w półprzewodnikach. Dotyczyło to w szczególności opracowania teorii zjawisk przenoszenia elektronów w półprzewodnikach z tzw. wąską przerwą energetyczną, charakteryzujących się bardzo silną „nieparabolicznością” pasm energetycznych (niekwadratową zależnością pomiędzy energią i pędem elektronu). W pracach z tego okresu osiągnięte zostało maksymalne możliwe uogólnienie teorii dla przypadku nieparaboliczności występującej jednocześnie z niesferycznością powierzchni izoenergetycznych. Zawadzki zwrócił uwagę na podobieństwo pomiędzy zachowaniem się relatywistycznych elektronów w próżni i własnościami elektronów w półprzewodnikach z wąską przerwą energetyczną. Jego prace teoretyczne z tego obszaru zainteresowań zawierają szereg pozycji wspólnych dla obu dziedzin, jak np. możliwość wystąpienia samorzutnej kreacji par elektronowo-dziurowych w małych układach półprzewodnikowych. Całą tę dziedzinę badań, dotyczącą relatywistycznych analogii w półprzewodnikach, Zawadzki nazywał (bardziej hasłowo niż merytorycz-

nie) „półwzględnością w półprzewodnikach”.



Włodzimierz Zawadzki (fot. Lech Kowalski).

Włodzimierz Zawadzki zajmował się właściwie zawsze problemami należącymi do awangardy światowych badań półprzewodnikowych. Jego naukowe zainteresowania zmieniały się, począwszy od zjawisk przenoszenia nośników prądu poprzez optykę i magnetooptykę, własności termodynamiczne, efekty spinowe, własności domieszek, tunelowanie, magnetyzację, zjawiska półmagnetyczne, aż po gorące elektroniki. Do każdej z tych dziedzin wносił oryginalny i znaczący wkład. Niektóre z jego wyników mają znamiona odkryć. Należą do nich: zniszczenie kwantyzacji Landaua poprzecznym polem elektrycznym, otwarcie przerwy energetycznej polem magnetycznym w półprzewodnikach z zerową przerwą, indukowanie fononami przejść spino-

wych, magnetyzacja indukowana światłem w półmagnetykach, ułamkowa wymiarowość w heterozłączach, kwantyzacja magnetoprzewodnictwa w układach balistycznych, kinetyczne wiązanie ruchu w heterozłączach, dyskretne stany akceptorowe w pasmie przewodnictwa, polarony międzypasmowe.

Zawadzki jest autorem pierwszych opracowań teoretycznych dotyczących zależności spinowego czynnika  $g$  od energii elektronów w półprzewodnikach z wąską przerwą energetyczną, indukowanych polem elektrycznym harmonicznym rezonansu cyklotronowego, mechanizmu dwufotonowych przejść międzypasmowych, polaronów dwumodowych, magnetyzacji oraz ciepła właściwego i siły termoelektrycznej dwuwymiarowego gazu elektronowego, hybrydowej kwantyzacji magnetoelektrycznej, optycznych przejść międzypasmowych z emisją fononów, jak również lasera w skrzyżowanych polach elektrycznym i magnetycznym.

Powyższe wyliczenie problemów rozwiązanych przez Zawadzkiego świadczy o wszechstronności jego zainteresowań. We wszystkim, czym się zajmował, zawsze potrafił dostrzec poważny problem naukowy i skutecznie go rozwiązać. Jest on niewątpliwie uczonym wysokich lotów, który wniósł do fizyki półprzewodników oryginalny wkład o nieprzemijającej wartości naukowej. Świat naukowy potrafił to dostrzec i docenić.

Charakterystyka Włodzimierza Zawadzkiego byłaby jednak niepełna, gdyby ograniczyć ją tylko do działalności naukowej. Jego pozanaukowe zainteresowania to: muzyka (sam gra na fortepianie), literatura, którą wzbogacił tomami wierszy *Wańka Wstańka*, *Szekspir Socjału* oraz powieścią *Wielki Inkwizytor*. We wcześniejszych latach interesował się czynnie sportem uprawiając judo. Osobiście czer-

pię głęboką satysfakcję z faktu uhonorowania Włodka Medalem Mariana Smoluchowskiego nie tylko dlatego, że byłem jednym z wnioskodawców przyznania mu tego Medalu, nie tylko dlatego, że w początkach jego kariery naukowej blisko współpracowaliśmy i jesteśmy zaprzyjaźnieni, ale przede wszystkim dlatego, że polskie środowisko fizyków uznało i doceniło to, co o Zawadzkim, jako wybitnym uczonym, wiadomo było na świecie od dawna.

Jerzy Kołodziejczak

## Nagroda Nobla z fizyki

Tegoroczną nagrodę Nobla z fizyki otrzymali: Steven Chu z Uniwersytetu Stanforda w Kalifornii, Claude Cohen-Tannoudji z Ecole Normale Supérieure i Collège de France w Paryżu i William D. Phillips z National Institute for Standards and Metrology w Gaithersburgu koło Waszyngtonu, za rozwój metod chłodzenia i pułapkowania atomów za pomocą światła laserowego.

Może wydawać się zaskakujące to, że „lekkie” fotony optyczne w makroskopowy sposób zaburzają ruch „ciężkich” atomów, poruszających się w temperaturze pokojowej z prędkościami 300 – 1000 m/s. Należy jednak zdać sobie sprawę z tego, że choć pęd fotonu optycznego jest bardzo niewielki w stosunku do pędu pojedynczych atomów, to dzięki intensywności światła laserowego atom może pochłaniać ogromną liczbę fotonów. Wprawdzie po każdej absorpcji fotonu laserowego atom powraca do stanu podstawowego emitując foton, a więc doznaje odrzutu, ale dla emisji spontanicznej średni pęd związany z odrzutem uśrednia się do zera ze względu na izotropowość tej emisji, zaś sumaryczny pęd przekazany w absorpcji z ukierunkowanej wiązki laserowej może być duży.



Od lewej: S. Chu, C. Cohen-Tannoudji, W.D. Phillips.

W ten sposób za pomocą sił optycznych można spowolnić, a nawet całkowicie zatrzymać skolimowane, termiczne wiązki atomowe, zderzając je z przeciwbieżnymi wiązkami laserowymi. Podobnie przez oświetlenie współbieżnym promieniem laserowym można przyspieszać wiązki atomowe. Można także zmienić ich kierunek lub ogniskować, a więc manipulować w podobny sposób, jak to od dawna robi się za pomocą pól magnetycznych i elektrycznych z wiązkami cząstek naładowanych. Nowością w przypadku sił optycznych jest jednak to, że teraz taką możliwość manipulacji mamy w stosunku do atomów obojętnych, oraz to, że przez dobór częstości światła uzyskujemy selektywność, którą można wykorzystać np. do rozdzielania izotopów.

Działając tego typu siłami optycznymi ze wszystkich stron można gaz atomowy ochłodzić od temperatury pokojowej do ułamka mK. Ochłodzenie gazu atomowego odbywa się przez oświetlenie go wzdłuż trzech prostopadłych kierunków przez trzy

pary przecinających się w jednym miejscu i przeciwnie skierowanych wiązek laserowych, które działają ciśnieniem światła do środka przecięcia.

Może się tu nasuwać analogia z laserową kompresją plazmy w doświadczeniach nad syntezą termojądrową. Tam jednak wiązki laserowe o ogromnych mocach pochłaniane są przez całą próbkę paliwa termojądrowego, w konsekwencji ściskają ją i rozgrzewają. W chłodzeniu laserowym stosowane są znacznie słabsze lasery, których częstość światła jest dobrana nieco poniżej częstości przejścia atomowego. To odstrojenie sprawia, że pochłaniać światło laserowe mogą jedynie te atomy, które energię brakującą do rezonansowego wzbudzenia uzupełnią przez swoją energię kinetyczną. W tym procesie ogromną rolę pełni zjawisko Dopplera: aby pochłonać światło o częstości niższej od częstości przejścia nieruchomego atomu, atom musi poruszać się w kierunku przeciwnym do kierunku rozchodzenia się wiązki światła. W ten sposób przekaz pędu, a więc i ciśnienie świa-



tła, od wszystkich wiązek będą skierowane przeciwnie do ruchu atomów i będą te atomy spowalniać oraz zagęszczać. (Odwrotny przekaz pędu, czyli przyspieszanie atomów, a więc rozgrzewanie gazu, zachodzi przy przeciwnym odstrojeniu lasera, tzn. powyżej częstotliwości przejścia w nieruchomym atomie). Ruch ten jest tak samo hamowany, jak ruch ciał w gęstej, lepkiej cieczy – stąd nazwa takiego układu – melasa optyczna. Atomy w melasie są wprowadzone bardzo zimne – powolne, ale nie są zlokalizowane w jakimkolwiek miejscu. Mogą dyfundować wewnątrz melasy i wypadać z niej, np. pod wpływem grawitacji.

Możliwość lokalizacji pojawia się, gdy do opisanej melasy optycznej dodamy słabe, niejednorodne pole magnetyczne (gradient rzędu 1 mT/cm) i odpowiednio spolaryzujemy wiązki świetlne. Wówczas, dzięki zjawisku Zeemana, ciśnienie światła będzie działało tylko na te atomy, które znajdują się w odpowiednim polu magnetycznym. Kształtując tak gradient tego pola, aby na atomy opuszczające centrum melasy działała siła zawracająca je z powrotem, otrzymujemy tzw. pułapkę magnetooptyczną, w której można przetrzymać obojętne atomy (przypomnijmy, że w 1989 r. za opracowanie elektrostatycznych pułapek na jony Nagrodę Nobla otrzymali Hans Dehmelt i Wolfgang Paul).

O zastosowaniu laserów do chłodzenia mówiło się od wczesnych lat siedemdziesiątych. Zdaniem autora tej notatki największe zasługi we wczesnych etapach tych badań wnieśli A. Ashkin, A.P. Kazanczew i W.S. Letochow. Tegoroczni laureaci przez wiele lat poprawiali wydajność chłodzenia i możliwości pułapkowania i byli pierwszymi, którzy wcześniejszym spekulacjom nadali konkretny kształt. Steven Chu pierwszy uzyskał zimną melasę. W. Phillips udoskonalił spowalnianie wiązek ato-

mowych i opracował sposoby pomiaru ich własności – głównie temperatury. Największy wkład C. Cohena-Tannoudjiego polega natomiast na teoretycznej analizie mechanizmów chłodzenia.

Mimo że średni przekaz pędu w izotropowej emisji spontanicznej jest zerowy, dyspersja tego przekazu jest różna od zera i odpowiada za skończoną granicę chłodzenia tym sposobem. Tę tzw. „dopplerowską granicę” można oszacować przyrównując resztkową energię kinetyczną atomu do naturalnej szerokości jego stanu wzbudzonego związanej z emisją spontaniczną. Dla atomów sodu tak wyliczona granica chłodzenia wynosi 240  $\mu$ K. Wczesne pomiary temperatury atomów w melasie potwierdzały istnienie tej granicy. Zaskoczeniem były wyniki Phillipsa, który pierwszy zmierzył tzw. subdopplerowskie temperatury, o rząd niższe od granicy dopplerowskiej.

Cohen-Tannoudji wspólnie z Jeanem Dalibardem wykazali, że w temperaturze bliskiej granicy dopplerowskiej działa dodatkowy mechanizm oziębiania pochodzący od periodycznej struktury potencjału optycznego oraz zeemanowskiej struktury poziomów atomowych (tzw. efekt Syzyfa). Można wtedy używać do chłodzenia niższych natężeń wiązek laserowych i minimalizować efekty podgrzewania przez częstą emisję spontaniczną. Zmniejszenie częstotliwości emisji spontanicznej przez chłodzony „syzyfowo” atom nie oznacza jej zupełnego wyeliminowania. Wydawało się, że każdy cykl chłodzenia musi zakończyć się nieuchronnym pozostawieniem atomowi energii odrzutu fotonu spontanicznie emitowanego w dowolnym kierunku. Temperatura związana z tą energią to tzw. granica odrzutu (ok. 2  $\mu$ K dla Na). Jak się okazało, także i tę granicę zdołano pokonać. Cohen-Tannoudji wspólnie z wieloma współpracownikami (m.in. z A. Aspectem



i E. Arimondo) zrobili to wykorzystując znane już wcześniej tzw. „stany ciemne”, czyli takie superpozycje stanów atomowych, które w wyniku interferencji kwantowej nie pochłaniają światła (a więc nie mogą emitować spontanicznie).

Obecni laureaci od dawna należeli do czołówki fizyków stosujących metody optyczne w fizyce atomowej. S. Chu, zanim zajął się zimnymi atomami, zdobył sławę znakomitego eksperymentatora badając w 1982 r. (wspólnie z A.P. Millsem w Laboratoriach Bella) widmo atomu pozytonium (związany układ pozyton-elektron). Później został profesorem w Uniwersytecie Stanforda i współpracownikiem innego noblisty Artura Schawlowa (Nobel 1981 za rozwój spektroskopii laserowej). Podobnie Claude Cohen-Tannoudji to wychowanek Jeana Brossela i Alfreda Kastlera (A. Kastler otrzymał Nagrodę Nobla w 1966 r. za pompowanie optyczne). W swych pracach z zimnymi atomami wykorzystuje swoją kwantową teorię oddziaływania atomów z polem elektromagnetycznym, którą systematycznie rozwija od czasu swej pracy doktorskiej w 1961 r. w Ecole Normale Supérieure. Teoria ta to tzw. model „atomu ubranego”, w którym atom wraz z fotonami pola świetlnego traktowany jest jako jeden układ fizyczny (atom ubrany przez fotony). W.D. Phillips z kolei jest filarem NIST w Gaithersburgu – jednego z najważniejszych i najbardziej prestiżowych rządowych laboratoriów amerykańskich.

Pułapki magnetoptyczne stały się już standardowym urządzeniem badawczym. Pozwalają one na uzyskanie bardzo zimnych, gęstych (ok.  $10^{11} - 10^{12}$  at/cm<sup>3</sup>) chmur złożonych z ok.  $10^8$  atomów. W tej chwili w świecie działa już ok. 100 pułapek magnetoptycznych. (Także i w Polsce już niedługo będziemy dysponować pułapką magnetoptyczną – dobiega końca jej budowa w Instytucie Fizyki UJ).

Pułapki magnetoptyczne stały się kamieniem milowym na drodze do niedawnego spektakularnego sukcesu innych zespołów – kondensacji Bosego-Einsteina (wymagała ona otrzymania jeszcze niższych temperatur – rzędu 10 nK i opracowania nowych metod optycznych: tzw. ciemnej pułapki magnetycznej i ochładzania przez odparowanie). Innym niezwykle interesującym kierunkiem, jaki rozwinął się dzięki chłodzeniu laserowemu, jest interferometria i optyka atomowa (chodzi tu o doświadczenia z falami materii, a nie o tradycyjną nazwę spektroskopii atomowej). Pytani o bardziej praktyczne zastosowania swych odkryć obecni laureaci wymieniają głównie możliwość budowy niezwykle dokładnych zegarów atomowych na uwiecznionych, niemal nieruchomych atomach. Są jednak i bardziej przyziemne. Otóż, metodami optycznymi udało się ochłodzić nie tylko znajdujący się w ultrawysokiej próżni gaz atomowy, ale i bryłkę ciała stałego o objętości ok. 1 cm<sup>3</sup> o ok. 16 K od temperatury pokojowej (*Phys. Rev. Lett.* **78**, 1030 (1997)). Być może uda się w ten sposób skonstruować miniaturowe chłodziarki optyczne, pozwalające na uzyskanie kriogenicznych temperatur. W ten sposób laserowe chłodzenie zawitałoby „pod strzechy”, efektownie demonstrując związek badań podstawowych z zastosowaniami.

Wojciech Gawlik

## Medal Diraca

Peter Goddard (Cambridge) i David Ian Olive (Swansea) otrzymali Medal Diraca za rok 1997 nadany im przez Międzynarodowe Centrum Fizyki Teoretycznej (ICTP) w Trieście za pionierskie badania w dziedzinie teorii strun.

*CERN Courier* **37**, nr 8 (1997)

## Rocznice Smoluchowskiego

W tym roku przypada 125. rocznica urodzin i 80. rocznica śmierci Mariana Smoluchowskiego.

Smoluchowski urodził się w 1872 r. w Vorderbrühl pod Wiedniem. W wieku 23 lat uzyskał doktorat, a w wieku lat 26 habilitował się. W okresie między uzyskaniem tych stopni pracował w Paryżu, Glasgow i Berlinie. W 1900 r. został profesorem Uniwersytetu we Lwowie, a w 1913 r. przeniósł się do Krakowa, gdzie objął Katedrę Fizyki Doświadczalnej. W 1917 r. został wybrany rektorem Uniwersytetu Jagiellońskiego, lecz w kilka miesięcy później – tuż przed objęciem urzędu – zmarł na czerwonkę. Miał wówczas 45 lat.

W swojej dwudziestoletniej karierze naukowej Marian Smoluchowski zajmował się wieloma dziedzinami fizyki (i nie tylko fizyki), ale sławę i uznanie świata nauki przyniosły mu prace z dziedziny termodynamiki oraz rola, jaką odegrał na przełomie XIX i XX w. w rozwoju atomowej teorii materii.

W ciągu całego XIX w. rozwijały się równolegle dwie teorie materii: (1) termodynamika fenomenologiczna, zapoczątkowana przez prace Sadi Carnota, który m.in. sformułował drugą zasadę termodynamiki (DZT), oraz (2) kinetyczna teoria materii (KTM), która bierze swój początek od hipotezy atomistycznej Daltona. Zgodnie z KTM zachowanie materii, a w szczególności termodynamikę fenomenologiczną, można wyjaśnić za pomocą praw mechaniki klasycznej zastosowanej do atomów i cząsteczek pozostających w nieustannym ruchu i oddziałujących przez wzajemne zderzenia. Najbardziej dramatyczne konsekwencje z teorii kinetycznej wyciągnął Boltzmann, który wprowadził do DZT rachunek prawdopodobieństwa. Według teorii Boltzmanna

najbardziej prawdopodobne procesy to te, w których entropia rośnie, ale nie są to jedyne możliwe procesy termodynamiczne.

Wbrew temu, co można dziś sądzić, na przełomie wieków teoria atomistyczna materii nie była powszechnie uznawana. W Niemczech istniała grupa wpływowych fizyków, zwana Szkołą Energistyki, reprezentowana przez takie osoby jak Ernest Mach i Wilhelm Ostwald, którzy sądzili, że atom jest zbędną, metafizyczną koncepcją. Według Ostwalda jako realność fizyczna istnieje jedynie energia. Koncepcja Boltzmanna była szczególnie ostro zwalczana przez tę grupę, co zresztą doprowadziło go do depresji i prawdopodobnie przyczyniło się do jego samobójstwa.

Ostateczny sukces teorii Boltzmanna, a zarazem bezpośredni dowód istnienia atomów, pojawił się w 1906 r., już po jego śmierci, kiedy zjawisko ruchów Browna i konsekwencje fluktuacji gęstości materii zostały właściwie zrozumiane dzięki pracom Einsteina, Smoluchowskiego i Jeana Perrina.

Ruchy Browna były znane od 1827 r., kiedy angielski botanik Robert Brown zaobserwował pod mikroskopem nieustające, chaotyczne ruchy granulek, czyli malutkich cząstek zawieszonych w cieczy. Jedną z wielu hipotez zakładała, że nieregularne ruchy granulek powodują zderzenia z cząsteczkami cieczy. Każdy taki ruch jest faktycznie fluktuacją – wyjątkowym zdarzeniem polegającym na tym, że wiele cząsteczek przekazuje granulce pęd o takim samym kierunku i zwrocie.

Marian Smoluchowski odegrał kluczową rolę w badaniach ruchów Browna. Pierwszeństwo opracowania teorii ruchów Browna należy się wprawdzie Einsteinowi, ale rola Smoluchowskiego jest niemal równie ważna, m.in. dlatego, że jego rachunki umożliwiły bezpośrednie porównanie teorii z danymi doświadczalnymi uzyskanymi

w wyniku mikroskopowych badań nad fluktuacjami zawieszin w roztworach koloidalnych, prowadzonych przez Zsigmondy'ego i Svedberga. W 1910 r. Einstein, używając wielu koncepcji i rezultatów Smoluchowskiego, rozwinął teorię fluktuacji. Prace te doprowadziły go ostatecznie do hipotezy kwantów promieniowania – fotonów, a w konsekwencji przyczyniły się do powstania mechaniki kwantowej.

Z perspektywy końca XX w. jest zupełnie oczywiste, że prace Smoluchowskiego pojawiły się w punkcie zwrotnym całego systemu fizyki, który przechodził chyba najbardziej rewolucyjne zmiany w swojej historii. Nie ma wątpliwości, że Smoluchowski zajmuje w historii tych zmian ważne miejsce obok Einsteina, Perrina i Marii Skłodowskiej-Curie.

W dniu 22 maja 1997 r. odbyło się w Instytucie Fizyki UJ Krakowskie Konwersatorium Fizyczne poświęcone pamięci i pracy naukowej Mariana Smoluchowskiego, zorganizowane przez Oddział Krakowski PTF. W spotkaniu wzięły udział 103 osoby, w tym prezes PAU prof. Kazimierz Kowalski, prorektor UJ prof. Marek Szymoński, przedstawiciele PTF z Katowic, Torunia i Warszawy, oraz Pan Stanisław Smoluchowski, przedstawiciel rodziny Mariana Smoluchowskiego.

Wygłoszone zostały dwa referaty. Profesor Bronisław Średniawa (IF UJ), specjalizujący się w historii polskiej fizyki, przedstawił życiorys, szczegółową genealogię i wiele interesujących faktów z życia Mariana Smoluchowskiego. Profesor Kazimierz Grotowski (dyrektor IF UJ) wygłosił referat „Marian Smoluchowski i jego spór z nominalistami”, w którym opisał przełom, jaki dokonał się w fizyce w początkach XX w., oraz rolę, jaką Smoluchowski odegrał w rozwoju atomistycznej teorii materii. Pełny tekst tego referatu został opublikowany w numerze 53 czasopisma *Foton*.

Na zakończenie jeszcze dwie informacje o imprezach związanych ze Smoluchowskim, jakie odbyły się w Zakopanem:

1) V Międzynarodowa Szkoła Magnetycznego Rezonansu Jądrowego (1–6 czerwca 1997 r.), na której dwie sesje zostały poświęcone zastosowaniu równań Smoluchowskiego do spektroskopii MRJ. Zastosowania te są pięknym przykładem ścisłego związku między badaniami podstawowymi i ich użytecznym wykorzystaniem. Prowadzone na początku XX w. przez Smoluchowskiego badania, których motywacją była wyłącznie czysta ciekawość, okazują się pod koniec wieku przydatne w rozwijaniu metod MRJ, wykorzystywanych m.in. w tomografii komputerowej, ratującej życie setkom tysięcy ludzi na całym świecie.

2) X Międzynarodowe Sympozjum Fizyki Statystycznej im. Mariana Smoluchowskiego (1–10 września 1997 r.). Sprawozdanie z tego sympozjum ukaze się w jednym z następnych zeszytów *Postępów Fizyki*.

Jacek Bieroń, Jacek Turnau

## Fundacja Pro Physica

Minęło już 6 lat od powołania Fundacji Pro Physica. Działania, które doprowadziły do powstania Fundacji zostały zainicjowane w początkach 1990 r. Ostatecznie ukształtowało się pięćdziesięcioosobowe grono założycieli, reprezentujących różne środowiska naukowe w kraju, którzy w listopadzie 1990 r. podpisali akt notarialny ustanawiający Fundację. Wśród założycieli znalazła się również jedna osoba prawna – Polskie Towarzystwo Fizyczne.

Fundacja wchodzi w siódmy rok swego istnienia z nowo wybraną Radą Fundacji: prof. Jerzy Prochorow (IF PAN) – przewodniczący, doc. Zbysław Wilamow-

ski (IF PAN) – zastępca przewodniczącego, prof. Michał Baj (IFD UW), prof. Jerzy Czerwono (IF PWr), prof. Henryk Lachowicz (IF PAN), prof. Jan Stankowski (IFM PAN, Poznań), prof. Andrzej Szytuła (IF UJ). Skład ten zostanie uzupełniony o przedstawiciela PTF. W nowo wybranym Zarządzie Fundacji znaleźli się: prof. Tadeusz Suski (CBW PAN, Warszawa) – prezes, dr Perła Kacman (IF PAN) – wiceprezes, doc. Marta Cieplak (IF PAN), prof. Jacek Kossut (IF PAN) i dr Wojciech Mac (IFD UW).

Fundacja, obok realizacji wielu działań krótkoterminowych, organizuje od pięciu lat „Przedszkole Fizyki Półprzewodników” dla studentów z krajów Europy Środkowej i Wschodniej. Jest to coroczna impreza poprzedzająca Międzynarodową Szkołę Związków Półprzewodnikowych w Jaszowcu. Uczestnictwo w Przedszkolu umożliwia m.in. zapoznanie się z wykładami światowej klasy specjalistów z różnych dziedzin fizyki ciała stałego oraz, co nie mniej ważne, integrację studentów wydziałów fizyki ze studentami wydziałów zajmujących się materiałoznawstwem. Inicjatywa ta zyskała szerokie uznanie, o czym świadczy zarówno liczba uczestników (rocznie ponad 100), jak i fakt, że wspierają ją finansowo KBN, MEN, Fundacja Współpracy Polsko-Niemieckiej, UNESCO, Fundacja Batorego oraz Amerykańskie Towarzystwo Fizyczne. Wydaje się, że ta udana inicjatywa, zrealizowana w środowisku fizyki półprzewodników, winna stać się typem wzorcowego przedsięwzięcia. Fundacja zachęca organizatorów różnych imprez naukowych do wykorzystania jej doświadczeń na tym polu.

Fundacja Pro Physica popiera i będzie popierać wszelkie inne inicjatywy prowadzące do zaktywizowania działalności naukowej polskich fizyków. Dlatego też jednym z ważniejszych zadań Fundacji

jest umożliwienie najzdolniejszym absolwentom wydziałów fizyki i nauk pokrewnych otrzymania ciekawej i atrakcyjnej pracy w krajowych instytucjach naukowych. Istotne są w tym względzie nie tylko starania o poprawę warunków finansowych, ale i działania na rzecz możliwości tworzenia zespołów interdyscyplinarnych dla rozwiązywania konkretnych problemów, ważnych w skali światowej.

Zgromadzenie Fundacji rozważa możliwość ustanowienia nagrody Fundacji Pro Physica. Duże poparcie uzyskała propozycja, aby nagroda ta była przyznawana za wybitne osiągnięcia w dziedzinie fizyki stosowanej. Niezależnie od tego Fundacja chciałaby nagradzać wyróżniających się badaczy z najmłodszego pokolenia.

Zarząd Fundacji Pro Physica będzie wdzięczny za wszelkie opinie i uwagi dotyczące jej działalności.

*Tadeusz Suski*

### Nowy postęp w syntezie termojądrowej

W urządzeniu JET (Joint European Torus) uzyskano ostatnio moc szczytową 13 MW i moc wyjściową 10 MW. Przez co najmniej pół sekundy udawało się utrzymać moc 10 MW. W reaktorze tym paliwem jest deuter i tryt, a produkcja cząstek  $\alpha$  wspomaga podnoszenie temperatury.

Jest to znaczące osiągnięcie i można mieć teraz nadzieję, że planowany Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termojądrowy (ITER) będzie realizowany.

*AIP Phys. News Update*, nr 346

*B. W.*

### Pół wieku tranzystora

Pięćdziesiąt lat temu, 23 grudnia 1947 r., zaczął działać pierwszy tranzystor, czyli półprzewodnikowy wzmacniacz

prądu. Zaprojektowany i zbudowany przez Johna Bardeena (1908 – 1991), Waltera Brattaina (1902 – 1987) i Geralda Pearsona (1905 – 1987) w Laboratoriach Bella był bipolarnym wzmacniaczem pozwalającym na sterowanie natężeniem prądu płynącego przez prostujący kontakt punktowy. Wielkim problemem w tym urządzeniu było uniezależnienie się od stanów powierzchniowych. Wkrótce potem William Shockley zaproponował lepsze rozwiązanie – tranzystor złączowy, w którym zasadniczą rolę odgrywa objętość półprzewodnika, a nie kontakt metal-półprzewodnik. Może warto tu wspomnieć, że praca Shockleya, Haynesa i Pearsona, przedstawiająca teorię złącza p-n i tranzystora złączowego została odrzucona przez redakcję *Physical Review*, która wysunęła zarzut, iż teoria jest nie dość ściśle przedstawiona. Praca ukazała się w 1949 r. w *Bell System Technical Journal*. Za wynalezienie tranzystora Bardeen, Brattain i Shockley otrzymali w 1956 r. Nagrodę Nobla z fizyki.

Wynalezienie tranzystora wywołało rewolucję techniczną – uzyskano możliwość znacznego zmniejszenia rozmiarów układów elektronicznych i poboru prądu. Rozpoczęła się era miniaturyzacji, rozwój układów scalonych, m.in. komputer, który kiedyś pracował z użyciem lamp elektronowych i zajmował całe pomieszczenie, możemy teraz zmieścić na biurku, a nawet na kolanach. Także zasadnicze zmniejszenie kosztów produkcji i rozmiarów odborników radiowych przyczyniło się do przełamania bariery stawianej w tamtych czasach w niektórych krajach przepływowi informacji.

B. W.

### Film z Planckiem

Z okazji 50. rocznicy śmierci Maksa Plancka (1858 – 1947) Towarzystwo Maksa

Plancka i Niemieckie Towarzystwo Fizyczne (DPG) urządziły w październiku 1997 r. w Berlinie wystawę przedstawiającą życie i osiągnięcia naukowe Plancka. Pokazano również związane z nim pamiątki, m.in. księgę protokołów zebrań DPG z zapisem wystąpienia Plancka w grudniu 1900 r., w którym przedstawiał on swoje prawo promieniowania i wprowadzał hipotezę kwantów.

Na wystawie był też wyświetlany film, nie tak dawno odnaleziony, wykonany w 1942 r. na zlecenie ministra propagandy III Rzeszy, Josepha Goebbelsa. Film, który nie był użyty do celów propagandowych, był jednym z zaplanowanej serii popularyzującej życie wielkich uczonych niemieckich. Pokazuje Plancka mówiącego o swoim życiu i pracach naukowych.

*Nature* 389, nr 6649 (1997)

B. W.

### Festiwal Nauki w Warszawie

W dniach 26–28 września 1997 r. został po raz pierwszy zorganizowany w Warszawie Festiwal Nauki. Jego pomysłodawcą jest prof. David Shugar, twórca polskiej szkoły biofizyki molekularnej, a w organizację tej imprezy włączyło się liczne grono naukowców z całej Warszawy. Jako sponsorów zyskaliśmy Komitet Badań Naukowych i PZU SA. Głównym celem Festiwalu było pokazanie podatnikowi korzyści, jakie może uzyskać dzięki rozwojowi nauki i przekonanie go, że nawet najnowsze osiągnięcia naukowe da się przedstawić w sposób przystępny i ciekawy. Dobrze obrazują to niektóre hasła Festiwalu: „Bez nauki nie ma (rozsądnej) przyszłości”, „Nauka najlepszą inwestycją”, „Nauka da się lubić”. W Festiwalu uczestniczyło ok. 50 warszawskich instytucji naukowych, od wielu wydziałów Uniwersytetu Warszawskiego i instytutów PAN, aż po Muzeum Narodowe,



czy też Akademię Teologii Katolickiej. Program Festiwalu przewidywał kilka centralnie zorganizowanych dyskusji panelowych (np. „Czym jest nauka”, lub „Sąd nad biotechnologią”), ale przede wszystkim opierał się na lokalnych imprezach przygotowanych przez poszczególne instytucje.

Znaczący udział w Festiwalu miał Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. W sobotnie przedpołudnie, 27 września, zorganizowaliśmy cykl wykładów i pokazów na różnych poziomach, aby każdy mógł znaleźć coś dla siebie. Prof. Jan Gaj i dr Krzysztof Korona prowadzili „Zabawę z fizyką”, zajęcia dla dzieci od lat 5, których uczestnicy sami wykonywali proste doświadczenia fizyczne. Dla nieco starszej widowni przeznaczona była „Fizyka dla wszystkich” (przedstawiona przez mgra Andrzeja Gołębiewskiego), zbiór najefektowniejszych pokazów, jakimi dysponuje nasza główna sala wykładowa. Bogaty program pod wspólnym tytułem „Promieniotwórczość wśród nas” przygotował Zakład Fizyki Jądra Atomowego. Były tu zarówno wykłady (np. o zastosowaniu metod jądrowych do określania wieku przedmiotów historycznych albo do badania klimatu w dawnych epokach), jak i ćwiczenia praktyczne: uczestnicy mogli sami stwierdzić, w jakim stopniu są promieniotwórcze ściany naszych mieszkań i czy po katastrofie w Czarnobylu można jeszcze jeść grzyby. Wreszcie przed gmachem Wydziału Fizyki było prezentowane ruchome laboratorium LIDAR-owe pod kierunkiem prof. Krzysztofa Ernsta, tzn. układ do laserowego badania zanieczyszczeń powietrza. W przerwie między zajęciami widzowie mogli też sprawdzić, że znajdują się na wirującej Ziemi, dzięki 12-metrowemu wahadłu Foucaulta zainstalowanemu w jednej z klatek schodowych gmachu. W ciągu sześciu godzin przez nasze imprezy przewinęło się ok. 1000 osób, przede wszystkim młodzieży

szkolnej. Dzięki anonansom prasowym dotarli do nas także widzowie spoza Warszawy. Natomiast w niedzielę, 28 września, Wydział Fizyki udostępnił swoje sale innym warszawskim instytucjom związanym z fizyką, Instytutowi Problemów Jądrowych, Centralnemu Laboratorium Ochrony Radiologicznej oraz Instytutowi Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy.

*Paweł Kowalczyk*

### Fizycy przeciw fałszerzom wina

W Centrum Badawczym w Jülich opracowano metodę analizy izotopowej pozwalającą stwierdzić czystość wina, a także określić region, z którego pochodzi.

Metoda opiera się na pomiarze stosunkowej zawartości izotopów tlenu  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ . Skutkiem odparowywania wody z winorośli zawartość  $^{18}\text{O}$  w sokach rośliny w stosunku do zawartości innych izotopów tlenu w wodzie naturalnej pobieranej przez roślinę z podłoża zwiększa się. Dolanie wody do soku winnego powoduje przesunięcie rozkładu izotopów ku niższym masom atomowym. Przez porównanie ze składem izotopowym tlenu w wodzie lokalnej i w nie zafałszowanym moszczu można również określić region pochodzenia wina.

Metoda została zaakceptowana przez odpowiedni urząd Unii Europejskiej i jej wyniki zostają dopuszczone do stosowania w ewentualnych postępowaniach sądowych.

*Phys. Bl. 53, nr 9 (1997)*

*B. W.*

### Abdus Salam (1926 – 1996)

Dnia 21 listopada 1996 r. zmarł Abdus Salam, wybitny fizyk-teoretyk, wyróżniony w 1979 r. Nagrodą Nobla za udział w stworzeniu jednolitego modelu oddziaływań elektromagnetycznych i słabych, dłu-

goletni dyrektor Międzynarodowego Centrum Fizyki Teoretycznej w Trieście, członek wielu akademii nauk, w tym PAN.

Abdus Salam urodził się 29 stycznia 1926 r. w Jhang, niewielkim mieście położonym w dzisiejszym Pakistanie. Mając 14 lat otrzymał stypendium na naukę w Government College w Lahore. W wieku 17 lat opublikował swoją pierwszą pracę, dotyczącą rozwiązywania pewnego układu równań nieliniowych, rozpatrywanego uprzednio przez S. Ramanujana, genialnego matematyka indyjskiego.

W 1946 r. Salam podjął studia matematyki i fizyki na Uniwersytecie w Cambridge. Po ich ukończeniu w 1949 r. prowadził przez pewien czas badania doświadczalne w Cavendish Laboratory, a następnie zwrócił się do N. Kemmera z prośbą o temat pracy doktorskiej z dziedziny fizyki teoretycznej. W owym okresie przedmiotem zainteresowania teoretyków były zagadnienia renormalizacji w kwantowej teorii pola, rozwiązane w przypadku elektrodynamiki przez Schwingera, Tomonagę, Feynmana i Dysona. Kemmer zasugerował Salamowi współpracę z P. Matthewsem, który wtedy kończył pracę dokorską poświęconą renormalizacji w teorii skalarniej. Salam w krótkim czasie rozwiązał trudne zagadnienie „przekrywających się rozbieżności”. Matthews został opiekunem doktoratu Salama, a później jego najbliższym współpracownikiem i przyjacielem.

Praca Salama na temat renormalizacji spotkała się z dużym uznaniem i zapewniła mu miejsce w światowej czołówce fizyków-teoretyków. W 1951 r. wraca do Pakistanu, aby objąć profesurę w Lahore. W 1954 r. zostaje wykładowcą w Cambridge, a następnie, w wieku 30 lat – profesorem fizyki teoretycznej w Imperial College Uniwersytetu Londyńskiego. Stanowisko to zajmował do końca życia. Pierwszym członkiem grupy Salama w Imperial Col-

lege został Paul Matthews. Głównym tematem badań tej grupy stają się zagadnienia symetrii oddziaływań cząstek i pola Yanga-Millsa. Symetria  $SU(3)$  („ośmiokrotna droga”) oddziaływań silnych została, niezależnie od Gell-Manna, rozwinięta w Imperial College przez Yuvala Ne’emana, który robił tam doktorat. Salam wprowadza zasadę niezmienniczości chiralnej, stanowiącą podstawę teorii neutrina.

Wraz ze swoim współpracownikiem J. Wardem, Salam podejmuje problem zastosowania teorii pól z cechowaniem do oddziaływań słabych. Badania te doprowadziły do powstania teorii przewidującej cząstki  $W$  i  $Z$  oraz istnienie prądów neutralnych, co zostało potwierdzone doświadczalnie. Za odkrycia te Abdus Salam wspólnie z Sheldonem Glashowem i Stevenem Weinbergiem otrzymał Nagrodę Nobla.

W następnych latach Salam, m.in. we współpracy z J. Patim, podejmował problemy „wielkiej unifikacji”, tzn. próby zbudowania jednolitej teorii łączącej oddziaływania słabe i elektromagnetyczne z silnymi. Salam stale śledził rozwój fizyki teoretycznej i czynnie włączał się do nowych kierunków badań, jak superstruny, supergrawitacja i dwuwymiarowe modele wysokotemperaturowego nadprzewodnictwa. Napisał także prace na temat przyczyn fizycznych asymetrii względem odbić cząstek występujących w biologii.

Pochodząc z zacofanego kraju, Salam dobrze rozumiał trudności, jakie napotyka nauka i nowoczesna technika w krajach Trzeciego Świata. Dużą część swojego życia poświęcił organizacji różnych form pomocy naukowcom w krajach rozwijających się. Z jego inicjatywy powstało w 1964 r. w Trieście Międzynarodowe Centrum Fizyki Teoretycznej (ICTP). Centrum umożliwiło fizykom – a później specjalistom z innych działów nauki, pracującym w Trze-

cim Świecie – odbywanie staży w ICTP i udział w organizowanych tam licznych konferencjach i szkołach. Niektórzy z nich zostawali współpracownikami Salama. Wokół ICTP powstało kilka innych instytucji naukowych, co uczyniło z Triestu ważny ośrodek badawczy w Europie.



Abdus Salam.

Wśród stażystów, profesorów wizytujących i uczestników konferencji w ICTP było wielu Polaków. Szczególnie bliskie kontakty z Salamem i ICTP mieli fizycy z Warszawy, Wrocławia i Krakowa. Kilka polskich instytutów badawczych ma

umowy o stałą współpracę z ICTP; były one szczególnie cenne w latach osiemdziesiątych, umożliwiając młodym polskim fizykom kontakty naukowe z zagranicą. Salam odwiedzał Polskę kilkakrotnie. Po pierwszej wizycie zaprosił piszącego te słowa do odbycia stażu naukowego w Imperial College (1959/60). Wyrazem wysokiego uznania polskiego środowiska naukowego dla Salama było nadanie mu w 1981 r. doktoratu *honoris causa* przez Uniwersytet Wrocławski (promotorem był Jan Łopuszański), a w 1985 r. – godności członka zagranicznego Polskiej Akademii Nauk. Liczne wyróżnienia nadchodziły dla Salama z całego świata. W wieku 33 lat został członkiem Towarzystwa Królewskiego. Był także członkiem Akademii Nauk USA i ZSRR.

Abdus Salam był praktykującym muzułmaninem, wyznawcą sekty Ahmadiya. Od roku 1958 był doradcą naukowym rządu Pakistanu. Po upadku Ayub Khana władze Pakistanu uznały sektę Ahmadiya za heretycką, co zmusiło Salama do ograniczenia kontaktów z ojczyzną.

W ostatnich latach życia Abdus Salam cierpiał z powodu ciężkiej choroby, która skłoniła go do rezygnacji z kierowania ICTP. Chorobę tę znośił ze stoickim spokojem i nie zaprzestawał pracy naukowej. Zmarł w swoim domu w Oksfordzie. Jego pogrzeb w miejscowości Rabwah w Pakistanie odbył się bez udziału przedstawicieli rządu.

Andrzej Trautman



## KALENDARZ IMPREZ

Informacje podajemy w następującej kolejności: data i miejsce imprezy, nazwa, instytucje organizujące, nazwisko osoby, która może udzielić bliższych informacji, Z – termin nadsyłania zgłoszeń, A – termin nadsyłania streszczeń, P – przewidziane wydanie materiałów, U – liczba uczestników, O – wysokość opłaty konferencyjnej, język (jeśli inny niż polski).

### 1998

16 – 26 lutego 1998, Przeseika

**34. Zimowa Szkoła Fizyki Teoretycznej: Od Mechaniki Kwantowej do Technologii Kwantowej**

Inst. Fizyki Teoretycznej Uniw. Wrocławskiego, pl. Maksa Born'a 9, 50-204 Wrocław; dr Zygmunt Petru, tel.: (71) 222363 lub (71) 201270, fax: (71) 214454, adr.el.: petru@ift.uni.wroc.pl.  
P, U: 100, ang.

22 – 25 kwietnia 1998, Warszawa

**5th Int. Symp. on Systems with Fast Ionic Transport**

Inst. Fizyki Pol. Warszawskiej; prof. F. Krok, IF PW, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, adr.el.: fkrok@mp.pw.edu.pl.  
P, U: 100, O: 300 USD, ang.

10 – 13 maja 1998, Jurata

**7th Spring School on Acousto-Optics and Applications**

Inst. Fizyki Doświadczalnej UG; dr Bogumił Linde, IFD UG, Wita Stwosza 57, 80-952 Gdańsk, tel: (58) 529213, fax: (58) 413175, adr.el.: fizas@univ.gda.pl lub fizbl@univ.gda.pl.  
Z: 31.1.98, O: 550 USD (łącznie z zakwaterowaniem i wyżywieniem), ang.

18 – 22 maja 1998, Borki

**5th Int. Conf. on Computer Graphics and Image Processing (GKPO '98)**

Inst. Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej oraz Pol. Śląska; GKPO '98, IPI PAN, Ordon'a 21, 01-237 Warszawa, fax: (22) 376564, informacje: <http://www.ipipan.waw.pl/MGV/GKPO98.html>.  
ang.

19 – 24 maja 1998, Łądek Zdrój

**11. Sympozjum Maxa Born'a – Anomalous Diffusion, Theory, Simulations**

Inst. Fizyki Teoretycznej Uniw. Wrocławskiego i Inst. Fizyki Doświadczalnej Uniw. Warszawskiego; prof. Andrzej Pękalski, IFT UW, pl. Maksa Born'a 9, 50-204 Wrocław, adr.el.: mborn11@ift.uni.wroc.pl; informacje: <http://www.ift.uni.wroc.pl/mborn11>.  
P, U: 80, ang.

25 – 29 maja 1998, Kazimierz Dolny

**Int. Conf. on Colorimetry**

Sekcja Polska SPIE i Inst. Optyki Stosowanej; IOS, Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa, fax: (22) 133265, adr.el.: iosto@atos.warman.com.pl.  
Z: 15.3.98, A: 15.3.98, P, O: 250 USD (wraz z zakwaterowaniem i wyżywieniem), ang.

26 – 30 maja 1998, Toruń

**XXX Symp. on Mathematical Physics with special session: „Dynamical Systems: from Integrability to Chaos”**

Inst. Fizyki UMK; M. Michalski, IF UMK, Grudziądzka 5, 87-100 Toruń, tel.: (56) 22367, fax: (56) 25397, adr.el.: [romp@phys.uni.torun.pl](mailto:romp@phys.uni.torun.pl); informacje: <http://www.phys.uni.torun.pl/~romp98/>.

Z: 3.4.98, P, O: 130 USD, ang.

6 – 7 czerwca 1998, Ustroń-Jaszowiec

**Przed szkole Fizyki Półprzewodników**

Instytut Fizyki PAN; prof. J. Kossut, IF PAN, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, tel.: (22) 8437001 w. 3193, fax: (22) 8430926, adr.el.: [kossut@ifpan.edu.pl](mailto:kossut@ifpan.edu.pl).

7 – 12 czerwca 1998, Ustroń-Jaszowiec

**XXVII Int. School on Physics of Semiconducting Compounds**

Inst. Fizyki PAN, Wydz. Fizyki UW, Centrum Badań Wysokociśnieniowych PAN; dr W. Szuszkiewicz, IF PAN, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, tel.: (22) 8435626, fax: (22) 8430926, adr.el.: [szusz@ifpan.edu.pl](mailto:szusz@ifpan.edu.pl).

U: 250, ang.

14 – 20 czerwca 1998, Jaszowiec

**4th Int. School and Symp. on Synchrotron Radiation in Natural Science**

Polskie Towarzystwo Promieniowania Synchrotronowego; dr hab. K. Ławniczak-Jabłońska, Inst. Fizyki PAN, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, tel.: (22) 8437001 w. 3384, fax: (22) 8430926, adr.el.: [synchro@ifpan.edu.pl](mailto:synchro@ifpan.edu.pl), informacje: [http://info.ifpan.edu.pl/pelkay/issrns\\_98.html](http://info.ifpan.edu.pl/pelkay/issrns_98.html).

P, U: 130, O: 300 USD, ang.

30 czerwca – 2 lipca 1998, Poznań

**XII Konferencja: Nauczanie Fizyki w Wyższych Szkołach Technicznych**

Wydział Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej; prof. Mirosław Drozdowski, WFT PP, Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel.: (61) 8782325, fax: (61) 8782324.

23 – 27 lipca 1998, Toruń

**The Jabłoński Centennial Conference on Luminescence and Photophysics**

Inst. Fizyki UMK; prof. J.S. Kwiatkowski, IF UMK, Grudziądzka 5, 87-100 Toruń, tel. (56) 21065, fax: (56) 25397, adr.el.: [lum98@phys.uni.torun.pl](mailto:lum98@phys.uni.torun.pl).

Z: 31.3.98, A: 15.4.98, P, ang.

1 – 5 września 1998, Zakopane

**32nd Solid Mechanics Conf. (SolMec '98)**

IPPT PAN i Komitet Mechaniki PAN; prof. Zenon Mróz, IPPT PAN, SolMec '98, Świętokrzyska 21, 00-049 Warszawa, tel.: (22) 8277571, fax: (22) 8269815, adr.el.: [solmec98@ippt.gov.pl](mailto:solmec98@ippt.gov.pl).

O: 300 USD, ang.

7 – 10 września 1998, Łódź

**Eurotherm Seminar on Quantitative Infrared Thermography (QIRT '98)**

Inst. Elektroniki PŁ i Polski Komitet Optoelektroniki SEP; QIRT '98, Inst. Elektroniki PŁ, Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, tel.: (42) 312637, fax: (42) 362238, adr.el.: [qirt98@ck-sg.p.lodz.pl](mailto:qirt98@ck-sg.p.lodz.pl).

Z: 15.3.98, A: 8.9.98, O: 300 ECU, ang.

15 – 18 września 1998, Gdańsk

**Krajowy Kongres Metrologii (KKM '98)**

Politechnika Gdańska; dr hab. Ryszard Roskosz, PG, Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, tel.: (58) 471397, fax: (58) 471726, adr.el.: kongres@ely.pg.gda.pl, informacje: <http://www.ely.pg.gda.pl/kongres/>.

A: 15.3.98, O: 600 zł (z wyżywieniem), ang. i pol.

12 – 16 października 1998, Zakopane

**Int. Conf. on Solid State Crystals**

Inst. Fizyki Technicznej WAT; IFT WAT, Kaliskiego 2, 01-489 Warszawa, tel.: (22) 6859558 lub (22) 6859109, fax: (22) 6669041, adr.el.: zielj@wat.waw.pl.

P, ang.

## NOWE KSIĄŻKI

- Klaus Hoffmann, *Wina i odpowiedzialność – Otto Hahn, konflikty uczonego*, z jęz. niemieckiego tłum. Krzysztof Żak; WNT, Warszawa 1997, s. 273, cena 27.00 zł.
- Robert Wieczorkowski, Ryszard Zieliński, *Komputerowe generatory liczb losowych*, WNT, Warszawa 1997, s. 134, cena 11.00 zł.
- Richard P. Feynman, „*A co ciebie obchodzi, co myślą inni?*”, z jęz. angielskiego tłum. Rafał Śmietana; Wyd. ZNAK, Kraków 1997, s. 203.
- Jean Audouze, Jean-Pierre Chièze, *Narodziny Wszechświata*, z jęz. francuskiego tłum. Jan Litwin-Staszewski; Ofic. Wyd. Volumen, Warszawa 1997, s. 176.
- Paul Suppan, *Chemia i światło*, z jęz. angielskiego tłum. Jerzy Prochorow; PWN, Warszawa 1997, s. 329.
- Michel Rival, *Wielkie eksperymenty naukowe*, z jęz. francuskiego tłum. Krzysztof Pruski, CYKLADY, Warszawa 1997, s. 191.

## ERRATA

W liście prof. Józefa Hurwica do Redakcji (*Postępy Fizyki* 48, zeszyt 4, 397 (1997)) w wierszu 8 i 9 od dołu, s. 397 zamiast „radonośny chlorek radu” powinno być „radonośny chlorek baru”. Za błąd serdecznie przepraszamy Czytelników.

*Redakcja*

## SPIS TREŚCI

### Zeszyt 1

W.A. Kamiński – Podwójny rozpad beta: laboratorium fizyki niestandardowej	....	3
<b>RÓŻNE</b>		
W. Kołos – Czy fizyk może nie być platonikiem?	.....	31
Granty KBN z fizyki – X i XI konkurs	.....	43
<b>WSPOMNIENIA – ROCZNICE</b>		
L. Piel – Wspomnienie o Włodzimierzu Kołosie (1928 – 1996)	.....	53
<b>DYDAKTYKA FIZYKI</b>		
J.E. Dmochowski – Historia Szkolnej Pracowni Przyrodniczej w Wilnie (w 75. rocznicę powstania)	.....	57
Z. Trybuła – Lato z Helem '96	.....	71
<b>ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI</b>		
W. Suski – XXVI Dni Aktynowców i Szkoła „Elektrony 5f w ciałach stałych”	.....	75
I. Strzałkowski, F. Krok – XI Dni Wymiany Doświadczeń w Nauczaniu Fizyki w Wyższych Szkołach Technicznych	.....	77
Z. Gołąb-Meyer – Konferencja GIREP-ICPE	.....	79
<b>RECENZJE</b>		
A. Einstein: Zapiski autobiograficzne (rec. A. Trautman)	.....	81
R.G. Newton: Zrozumieć przyrodę (rec. J. Mostowski)	.....	82
<b>LISTY DO REDAKCJI</b>		
A. Zastawny – Siła działająca na fluksoidy w nadprzewodniku	.....	85
<b>KRONIKA</b>	.....	87

### Zeszyt 2

S. Kryszewski – Sonoluminescencja: piekło w bąbelku	.....	103
T. Ruf, M. Cardona, H.D. Fuchs – O masach i sprężynach: fizyka półprzewodników o czystym składzie izotopowym (tłum. J. Gronkowski)	.....	121
<b>RÓŻNE</b>		
D. Shugar – Katedra Biofizyki UW a rozwój biologii molekularnej	.....	139
M. Apostol – O stanie fizyki (tłum. M. Staszal)	.....	145
<b>WSPOMNIENIA – ROCZNICE</b>		
J.A. Janik – Aspekty filozoficzne w twórczości naukowej Włodzimierza Kołosa	....	151
T. Dietl – Nevill Francis Mott (1905 – 1996)	.....	159
<b>NOWOŚCI NAUKOWE</b>		
T. Suski – Azotki: nowa klasa półprzewodników dla optoelektroniki w zakresie światła niebieskiego	.....	165

## ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

K. Rybicki – Największa konferencja fizyki cząstek w Warszawie .....	171
K.I. Wysokiński – Localization '96 .....	173

## RECENZJE

Quang Ho-Kim, Narendra Kumar, Chi-Sing Lam: Zaproszenie do fizyki współczesnej (rec. I. Białynicki-Birula) .....	177
I. Nowikow: Czarne dziury i Wszechświat (rec. K. Maślanka) .....	182

KRONIKA .....	185
---------------	-----

## Zeszyt 3

R.T. Collins, P.M. Fauchet, M.A. Tischler – Krzem porowaty: od luminescencji do diody świecącej (tłum. G. Kowalski) .....	207
---	-----

## RÓŻNE

J.M. Massalski – O układzie SI i symbolach .....	227
H. Białkowska – Dostęp kobiet do nauk ścisłych .....	235
J.M. Pimbley – Fizycy w finansach (tłum. J. Gronkowski) .....	243

## WSPOMNIENIA – ROCZNICE

M. Suffczyński – Roman Smoluchowski (1910 – 1996) .....	257
U. Woźnicka – Stulecie utworzenia Katedry Geofizyki na Uniwersytecie Jagiellońskim .....	265

## ROZMOWY

Praca musi fascynować – Rozmowa z Georgiem Bednorzem .....	271
--	-----

## NOWOŚCI NAUKOWE

J.A. Zakrzewski – Czyżby nowa fizyka poza modelem standardowym? .....	275
---	-----

## ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

H. Wrembel, I. Strzałkowski, W. Doborzyńska-Głazek – X Konferencja EPS „Trends in Physics” .....	281
J. Jarzyna, U. Woźnicka – 40 lat geofizyki jądrowej w Krakowie .....	284
J. Kowalski-Glikman – XXXIII Zimowa Szkoła Fizyki Teoretycznej .....	287

## RECENZJE

M. White, J. Gribbin: Einstein – życie nauką (rec. J. Kowalski-Glikman) .....	289
L. Lederman, D. Teresi: Boska cząstka. Jeśli Wszechświat jest odpowiedzią, jak brzmi pytanie? (rec. H. Białkowska) .....	291

KRONIKA .....	293
---------------	-----

## Zeszyt 4

R.C. Richardson – Zjawisko Pomeranczuka (tłum. W. Plesiewicz) .....	311
C. Townsend, W. Ketterle, S. Stringari – Kondensacja Bosego-Einsteina (tłum. A. Orłowski) .....	333

## RÓŻNE

M.W. Grabski – Stypendia FNP '97 .....	351
--	-----

N.D. Mermin – Dziennik noblowskiego gościa (tłum. B. Wojtowicz)	355
J. Werle – Zgromadzenie Ogólne IUPAP 1996	365
J. Gronkowski – Charpak i Garwin o energii jądrowej i rozbrojeniu	369
WSPOMNIENIA – ROCZNICE	
M. Giller – Jerzy Wdowczyk (1935 – 1996)	373
J. de Nobel – Odkrycie nadprzewodnictwa (tłum. B. Wojtowicz)	379
ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI	
W. Nowak – Modelowanie i dynamika cząsteczek biologicznych zawierających jony metali	387
RECENZJE	
M. Cyrot, D. Pavuna: Wstęp do nadprzewodnictwa. Nadprzewodniki wysokotemperaturowe (rec. A. Kołodziejczyk)	389
H.-O. Peitgen, H. Jürgens, D. Saupe: Granice chaosu. Fraktale, t. 2 (rec. M. Wolf)	392
H.Y. McSween, Jr.: Od gwiazdowego pyłu do planet (rec. K. Ziolkowski)	395
LISTY DO REDAKCJI	
J. Hurwic – Bałamutny film o Marii i Piotrze Curie	397
KRONIKA	399

## Zeszyt 5

K. Byczuk – Ciecz Luttingera w teorii i doświadczeniu	415
D.M. Lee – Niezwykłe fazy ciekłego $^3\text{He}$ (tłum. M. Załuska-Kotur)	435
RÓŻNE	
C. Jack – Sherlock Holmes bada paradoks EPR (tłum. Z. Ajduk)	483
ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI	
H.Z. Wrembel – Seminarium Fizyki i Chemii Atmosfery: NILU '97	495
RECENZJE	
H. Ibach, H. Lüth: Fizyka ciała stałego (rec. M. Załuszyński)	499
H. Haken, H.C. Wolf: Atomy i kwanty. Wprowadzenie do współczesnej spektroskopii atomowej (rec. A. Raczyński)	502
LISTY DO REDAKCJI	
E. Kapuścik – Apel do fizyków w Polsce	507
KRONIKA	509

## Zeszyt 6

R.E. Smalley – Odkrywanie fullerenów (tłum. M. Łukaszewski)	523
M. Marder, J. Fineberg – Jak ciała pękają (tłum. A. Majhofer)	541
C. Tsallis – Rozkłady Lévy'ego (tłum. B. Wojtowicz)	555
RÓŻNE	
A.Z. Hryniewicz – Problemy finansowania nauki w Polsce w świetle dwóch kadencji KBN	565

N.D. Mermin – Dziennik noblowskiego gościa (tłum. B. Wojtowicz)	355
J. Werle – Zgromadzenie Ogólne IUPAP 1996	365
J. Gronkowski – Chrapak i Garwin o energii jądrowej i rozbrojeniu	369
WSPOMNIENIA – ROCZNICE	
M. Giller – Jerzy Wdowczyk (1935 – 1996)	373
J. de Nobel – Odkrycie nadprzewodnictwa (tłum. B. Wojtowicz)	379
ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI	
W. Nowak – Modelowanie i dynamika cząsteczek biologicznych zawierających jony metali	387
RECENZJE	
M. Cyrot, D. Pavuna: Wstęp do nadprzewodnictwa. Nadprzewodniki wysokotemperaturowe (rec. A. Kołodziejczyk)	389
H.-O. Peitgen, H. Jürgens, D. Saupe: Granice chaosu. Fraktale, t. 2 (rec. M. Wolf)	392
H.Y. McSween, Jr.: Od gwiazdowego pyłu do planet (rec. K. Ziolkowski)	395
LISTY DO REDAKCJI	
J. Hurwic – Bałamutny film o Marii i Piotrze Curie	397
KRONIKA	399

## Zeszyt 5

K. Byczuk – Ciecz Luttingera w teorii i doświadczeniu	415
D.M. Lee – Niezwykłe fazy ciekłego $^3\text{He}$ (tłum. M. Załuska-Kotur)	435
RÓŻNE	
C. Jack – Sherlock Holmes bada paradoks EPR (tłum. Z. Ajduk)	483
ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI	
H.Z. Wrembel – Seminarium Fizyki i Chemii Atmosfery: NILU '97	495
RECENZJE	
H. Ibach, H. Lüth: Fizyka ciała stałego (rec. M. Załuźny)	499
H. Haken, H.C. Wolf: Atomy i kwanty. Wprowadzenie do współczesnej spektroskopii atomowej (rec. A. Raczynski)	502
LISTY DO REDAKCJI	
E. Kapuścik – Apel do fizyków w Polsce	507
KRONIKA	509

## Zeszyt 6

R.E. Smalley – Odkrywanie fullerenów (tłum. M. Łukaszewski)	523
M. Marder, J. Fineberg – Jak ciała pękają (tłum. A. Majhofer)	541
C. Tsallis – Rozkłady Lévy'ego (tłum. B. Wojtowicz)	555
RÓŻNE	
A.Z. Hryniewicz – Problemy finansowania nauki w Polsce w świetle dwóch kadencji KBN	565

## DYDAKTYKA FIZYKI

- H. Piersa – Niektóre doświadczenia myślowe w uzasadnianiu relacji nieoznaczoności 589

## ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

- R. Świetlik – Highly Conducting Materials for Molecular Electronics (ISME '97) .. 593  
T. Story – Japońsko-Polskie Sympozjum Półprzewodników Półmagnetycznych .... 595

## RECENZJE

- J.M. Żurada, M. Barski, W. Jędruch: Sztuczne sieci neuronowe (rec. S. Jankowski) 597

## KRONIKA ..... 603

## ROZCZYNY SPIS TREŚCI ..... 619

## SPIS TREŚCI WEDŁUG AUTORÓW

M. Apostol – O stanie fizyki .....	2, 145
G. Bednorz (rozmowa) .....	3, 271
H. Białkowska – Dostęp kobiet do nauk ścisłych .....	3, 235
K. Byczuk – Ciecz Luttingera w teorii i doświadczeniu .....	5, 415
M. Cardona – patrz T. Ruf, M. Cardona, H.D. Fuchs .....	2, 121
R.T. Collins, P.M. Fauchet, M.A. Tischler – Krzem porowaty: od luminescencji do diody świecącej .....	3, 207
T. Dietl – Nevill Francis Mott (1905 – 1996) .....	2, 159
J.E. Dmochowski – Historia Szkolnej Pracowni Przyrodniczej w Wilnie (w 75. rocznicę powstania) .....	1, 57
W. Doborzyńska-Głazek – patrz H. Wrembel, I. Strzałkowski, W. Doborzyńska-Głazek .....	3, 281
P.M. Fauchet – patrz R.T. Collins, P.M. Fauchet, M.A. Tischler .....	3, 207
J. Fineberg – patrz M. Marder, J. Fineberg .....	6, 541
H.D. Fuchs – patrz T. Ruf, M. Cardona, H.D. Fuchs .....	2, 121
M. Giller – Jerzy Wdowczyk (1935 – 1996) .....	4, 373
Z. Gołąb-Meyer – Konferencja GIREP-ICPE .....	1, 79
M.W. Grabski – Stypendia FNP '97 .....	4, 351
J. Gronkowski – Chrapak i Garwin o energii jądrowej i rozbrojeniu .....	4, 369
A.Z. Hryniewicz – Problemy finansowania nauki w Polsce w świetle dwóch kadencji KBN .....	6, 565
J. Hurwic – Bałamutny film o Marii i Piotrze Curie .....	4, 397
Errata .....	6, 618
C. Jack – Sherlock Holmes bada paradoks EPR .....	5, 483
J.A. Janik – Aspekty filozoficzne w twórczości naukowej Włodzimierza Kołosa .....	2, 151
J. Jarzyna, U. Woźnicka – 40 lat geofizyki jądrowej w Krakowie .....	3, 284
W.A. Kamiński – Podwójny rozpad beta: laboratorium fizyki niestandardowej .....	1, 3
E. Kapuściak – Apel do fizyków w Polsce .....	5, 507
W. Ketterle – patrz C. Townsend, W. Ketterle, S. Stringari .....	4, 333
W. Kołos – Czy fizyk może nie być platonikiem? .....	1, 31
J. Kowalski-Glikman – XXXIII Zimowa Szkoła Fizyki Teoretycznej .....	3, 287
F. Krok – patrz I. Strzałkowski, F. Krok .....	1, 77
S. Kryszewski – Sonoluminescencja: piekło w bąbelku .....	2, 103
D.M. Lee – Niezwykłe fazy ciekłego $^3\text{He}$ .....	5, 435
M. Marder, J. Fineberg – Jak ciała pękają .....	6, 541



J.M. Massalski – O układzie SI i symbolach .....	3, 227
N.D. Mermin – Dziennik noblowskiego gościa .....	4, 355
J. de Nobel – Odkrycie nadprzewodnictwa .....	4, 379
W. Nowak – Modelowanie i dynamika cząsteczek biologicznych zawierających jony metali .....	4, 387
L. Piel – Wspomnienie o Włodzimierzu Kołosie (1928 – 1996) .....	1, 53
H. Piersa – Niektóre doświadczenia myślowe w uzasadnianiu relacji nieoznaczoności ..	6, 589
J.M. Pimbley – Fizycy w finansach .....	3, 243
R.C. Richardson – Zjawisko Pomeranczuka .....	4, 311
T. Ruf, M. Cardona, H.D. Fuchs – O masach i sprężynach: fizyka półprzewodników o czystym składzie izotopowym .....	2, 121
K. Rybicki – Największa konferencja fizyki cząstek w Warszawie .....	2, 171
D. Shugar – Katedra Biofizyki UW a rozwój biologii molekularnej .....	2, 139
R.E. Smalley – Odkrywanie fullerenów .....	6, 523
T. Story – Japońsko-Polskie Sympozjum Półprzewodników Półmagnetycznych .....	6, 595
S. Stringari – patrz C. Townsend, W. Ketterle, S. Stringari .....	4, 333
I. Strzałkowski, F. Krok – XI Dni Wymiany Doświadczeń w Nauczaniu Fizyki w Wyższych Szkołach Technicznych .....	1, 77
I. Strzałkowski – patrz H. Wrembel, I. Strzałkowski, W. Doborzyńska-Głazek .....	3, 281
M. Suffczyński – Roman Smoluchowski (1910 – 1996) .....	3, 257
T. Suski – Azotki: nowa klasa półprzewodników dla optoelektroniki w zakresie światła niebieskiego .....	2, 165
W. Suski – XXVI Dni Aktywności i Szkoła „Elektrony 5f w ciałach stałych” .....	1, 75
R. Świetlik – Highly Conducting Materials for Molecular Electronics (ISME '97) ....	6, 593
M.A. Tischler – patrz R.T. Collins, P.M. Fauchet, M.A. Tischler .....	3, 207
C. Townsend, W. Ketterle, S. Stringari – Kondensacja Bosego-Einsteina .....	4, 333
Z. Trybuła – Lato z Helem '96 .....	1, 71
C. Tsallis – Rozkłady Lévy'ego .....	6, 555
J. Werle – Zgromadzenie Ogólne IUPAP 1996 .....	4, 365
U. Woźnicka – Stulecie utworzenia Katedry Geofizyki na Uniwersytecie Jagiellońskim ..	3, 265
U. Woźnicka – patrz J. Jarzyna, U. Woźnicka .....	3, 284
H. Wrembel, I. Strzałkowski, W. Doborzyńska-Głazek – X Konferencja EPS „Trends in Physics” .....	3, 281
H.Z. Wrembel – Seminarium Fizyki i Chemii Atmosfery: NILU '97 .....	5, 495
K.I. Wysokiński – Localization '96 .....	2, 165
J.A. Zakrzewski – Czyżby nowa fizyka poza modelem standardowym? .....	3, 275
A. Zastawny – Siła działająca na fluksoidy w nadprzewodniku .....	1, 85

## Informacje dla autorów

Komitet Redakcyjny prosi autorów o opracowywanie materiałów przeznaczonych do druku w *Postęпах Fizyki* zgodnie z podanymi niżej wytycznymi:

- 1) Artykuły powinny mieć charakter przeglądowy i być przystępne dla ogółu fizyków. Bardziej szczegółowe wskazówki co do ich charakteru przedstawione są w *Postęпах Fizyki* **24**, 701 (1973); **33**, 299 (1982). O przyjęciu pracy do druku decyduje Komitet Redakcyjny.
- 2) Maszynopisy pracy (**oryginał i jedną pełną – z rysunkami, tabelami itd. – kopię**) należy nadsyłać pod adresem: Redakcja *Postępów Fizyki*, ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa. W liście towarzyszącym prosimy podać dokładny adres (również komputerowy) do dalszej korespondencji.
- 3) Maszynopis winien być napisany **na arkuszach formatu A4 jednostronnie, z podwójną interlinią** (nie więcej niż 30 wierszy na stronie) i marginesem 3.5 cm z lewej strony.
- 4) Rysunki należy wykonać starannie na oddzielnych arkuszach w rozmiarze 2 do 4 razy większym niż mają być w druku. Napisy, ograniczone do minimum, winny być czytelne i tylko w języku polskim. Na odwrocie rysunku należy podać jego numer, nazwisko autora i pierwsze wyrazy tytułu pracy. Podpisy do rysunków, tabele (z ich tytułami) i spis literatury winny być napisane na oddzielnych stronach.
- 5) Układ strony tytułowej (tytuł polski, angielski, streszczenie angielskie, ...), tekstu, odnośników literaturowych itd. powinien odpowiadać formie przyjętej w *Postęпах Fizyki* (patrz artykuły np. w tym numerze).
- 6) *Postępy Fizyki* są składane komputerowo. Aby skrócić cykl wydawniczy prosimy autorów przygotowujących swe artykuły na komputerach o nadsyłanie, **wraz z maszynopisami**, tekstów artykułów pocztą elektroniczną (nasz adres: [postepy@fuw.edu.pl](mailto:postepy@fuw.edu.pl)) lub na dyskietkach, najlepiej w T<sub>E</sub>X-u, w formacie MeX. Redakcja gwarantuje zwrot dyskietek natychmiast po skopiowaniu zapisów.
- 7) Autora obowiązuje wykonanie korekty autorskiej.
- 8) Autor otrzymuje bezpłatnie 25 egz. odbitek pracy.
- 9) Maszynopisów prac nie zamówionych i nie zakwalifikowanych do druku Redakcja nie zwraca.

## WARUNKI PRENUMERATY

Cena prenumeraty krajowej w 1998 r. wynosi 13 zł 50 gr za pół roku, 27 zł za rok.

### PRENUMERATA ZA POŚREDNICTWEM „RUCH” S.A.

- 1) Wpłaty na prenumeratę przyjmują jednostki kolportażowe „RUCH” S.A. właściwe dla miejsca zamieszkania lub siedziby prenumeratora. Dostawa egzemplarzy następuje w uzgodniony sposób.
- 2) Cena prenumeraty ze zleceniem dostawy za granicę jest o 100% wyższa od krajowej. Wpłaty przyjmuje „RUCH” S.A. Oddział Krajowej Dystrybucji Prasy na konto w PBK SA XIII O/Warszawa nr 11101053-16551-2700-1-67 lub w kasach Oddziału. Dostawa odbywa się pocztą zwykłą, z wyjątkiem zlecenia dostawy pocztą lotniczą, której koszt w pełni pokrywa zamawiający.
- 3) Terminy przyjmowania wpłat od osób zamieszkałych w kraju: do 5 grudnia – na I półrocze roku następnego, do 5 czerwca – na II półrocze roku bieżącego (prenumerata krajowa) oraz do 20 listopada – na I półrocze roku następnego, do 20 maja – na II półrocze roku bieżącego (prenumerata zagraniczna).
- 4) Zlecenia na prenumeratę dewizową, przyjmowane od osób zamieszkałych za granicą, realizowane są od dowolnego numeru w danym roku kalendarzowym.

### PRENUMERATA ZA POŚREDNICTWEM ZG 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.

### PRENUMERATA ZA POŚREDNICTWEM ODDZIAŁÓW PTF

Prenumeratę można zamówić również w oddziale PTF. Członkowie PTF, którzy opłacają prenumeratę w oddziałach PTF na cały rok, otrzymują 20% zniżki. W przypadku, gdy oddział zamawia liczbę egzemplarzy przekraczającą 50% liczby członków, zniżka wynosi 30%. Taka sama zniżka (30%) przysługuje studentom, niezależnie od odsetka prenumeratorów w danym oddziale. Dostawa *Postępów Fizyki* odbywa się za pośrednictwem oddziału PTF.

### 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. Towarowa 28, 00-958 Warszawa, Poland.

## SPIS TREŚCI

R.E. Smalley – Odkrywanie fullerenów .....	523
M. Marder, J. Fineberg – Jak ciała pękają .....	541
C. Tsallis – Rozkłady Lévy'ego .....	555
RÓŻNE	
A.Z. Hryniewicz – Problemy finansowania nauki w Polsce w świetle dwóch kadencji KBN .....	565
DYDAKTYKA FIZYKI	
H. Piersa – Niektóre doświadczenia myślowe w uzasadnianiu relacji nieoznaczoności .....	589
ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI .....	593
RECENZJE .....	597
KRONIKA .....	603
ROZNY SPIS TRESCI .....	619

## CONTENTS

R.E. Smalley – Discovering the fullerenes .....	523
M. Marder, J. Fineberg – How things break .....	541
C. Tsallis – Lévy distributions .....	555
MISCELLANEA	
A.Z. Hryniewicz – Science financing in Poland in view of the last two terms of Polish State Committee for Scientific Research .....	565
PHYSICS TEACHING	
H. Piersa – Some gedanken experiments for explanation of the uncertainty principle .....	589
MEETINGS AND CONFERENCES .....	593
REVIEWS .....	597
CHRONICLE .....	603
ANNUAL TABLE OF CONTENTS .....	619