

POSTĘPY FIZYKI

TOM **51** ZESZYT **3** ROK **2000**



DWUMIESIĘCZNIK
POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO



UŁAMKOWY EFEKT HALLA

GRANTY KBN Z FIZYKI
O NAUCZANIU MATEMATYKI
ANALOGIE W NAUCZANIU FIZYKI

POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

ZARZĄD GŁÓWNY

Prezes: Prof. Ireneusz Strzałkowski
Wiceprezisi: Prof. Krzysztof Ernst
Prof. Karol I. Wysokiński
Sekretarz Generalny: Prof. Maciej Kolwas
Skarbnik: Dr hab. Witold D. Dobrowolski
Członkowie ZG: Prof. Katarzyna Chałasińska-Macukow
Prof. Bogdan Cichocki
Prof. Wojciech Gawlik
Prof. Jerzy Nowak
Prof. Jerzy Warczewski
Mgr Urszula Woźnikowska-Bezak

REDAKTORZY NACZELNI CZASOPISM PTF

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

PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW PTF

Prof. Andrzej Maziewski (Białystok)
Prof. Ryszard Siuda (Bydgoszcz)
Prof. Kazimierz Dziliński (Częstochowa)
Prof. Eugeniusz Czuchaj (Gdańsk)
Dr Andrzej Klimasek (Gliwice)
Dr hab. Andrzej Burian (Katowice)
Prof. Zbigniew Włodarczyk (Kielce)
Prof. Andrzej Zięba (Kraków)
Prof. Stanisław Hałas (Lublin)
Prof. Leszek Wojtczak (Łódź)
Dr Stanisław Chabik (Opole)
Prof. Jerzy Dembczyński (Poznań)
Prof. Marian Kuźma (Rzeszów)
Prof. Henryk Wrembel (Słupsk)
Prof. Adam Bechler (Szczecin)
Prof. Andrzej Bielski (Toruń)
Prof. Jacek Baranowski (Warszawa)
Prof. Witold Ryba-Romanowski (Wrocław)

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

POSTĘPY FIZYKI

RADA REDAKCYJNA

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

KOMITET REDAKCYJNY

Adam Sobiczewski – redaktor naczelny
Tomasz Dietl
Jerzy Gronkowski
Mirostaw Łukaszewski
Magdalena Staszal
Barbara Wojtowicz

KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

Mgr Maciej Piętka (Białystok)
Prof. Jerzy J. Wysocki (Częstochowa)
Dr Stanisław Zachara (Gdańsk)
Dr Roman Bukowski (Gliwice)
Prof. Wiktor Zipper (Katowice)
Dr Małgorzata Suchańska (Kielce)
Dr Jacek Bieroń (Kraków)
Dr Tomasz Durakiewicz (Lublin)
Dr Urszula Garuska (Łódź)
Dr Ryszard Czajka (Poznań)
Dr Małgorzata Klisowska (Rzeszów)
Mgr Małgorzata Kuzio (Słupsk)
Dr Janusz Typek (Szczecin)
Dr Józefina Turło (Toruń)
Dr Ewa Jędryka (Warszawa)
Prof. Bernard Jancewicz (Wrocław)

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

Ukazuje się od 1949 r.; wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne
Zeszyt dofinansowany przez Komitet Badań Naukowych
Wydano pod patronatem Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
Skład komputerowy w Redakcji, druk i oprawa: „UNI-DRUK”, Warszawa, ul. Buńczuk 7b

Ułamkowy kwantowy efekt Halla*

Horst L. Stormer

Department of Physics and Department of Applied Physics, Columbia University, New York, New York, USA

oraz

Bell Laboratories, Lucent Technologies, Murray Hill, New Jersey, USA

The fractional quantum Hall effect

Nobel Lecture, 8 December 1998, Stockholm

1. Wstęp

Ułamkowy kwantowy efekt Halla jest zjawiskiem fizycznym w znacznym stopniu sprzecznym z naszą intuicją. Wynika z niego, że elektrony działając zespołowo mogą utworzyć nowe cząstki, o ładunku mniejszym niż ładunek każdego z nich. Nie tego należałoby oczekiwać. Przedmioty tworzące zbiór mogą się łączyć, aby utworzyć większy obiekt, mogą też zachować swój rozmiar, ale nie tworzą niczego mniejszego. Gdyby nowe cząstki były podwójnie naładowane, nie byłoby to tak paradoksalne – elektrony mogą „trzymać się razem” i formować pary. Ale ładunki ułamkowe są rzeczywiście bardzo dziwne. Nie dość, że są mniejsze niż ładunek każdego z elektronów składowych, to wynoszą dokładnie $1/3$ albo $1/5$ albo $1/7$ itd. ładunku elementarnego. Ponadto wiemy na pewno, że żaden z elektronów nie rozpadł się na części.

Ładunek ułamkowy jest najbardziej zagadkową obserwacją, ale są również inne. Liczby kwantowe – zwykle całkowite lub połówkowe –

okazują się również ułamkami takimi jak $2/5$, $4/9$ i $11/7$, a nawet $5/23$. Ponadto kwanty pola magnetycznego mogą zostać dołączone do każdego z elektronów, tworząc jeszcze inne obiekty. Takie cząstki złożone mają własności bardzo różne od własności elektronów. Czasami wydają się nieczułe na silne pola magnetyczne i poruszają się po liniach prostych, gdy tymczasem nagi elektron krążyłby po ciasnej orbicie. Ich masa nie jest związana z masą tworzących je elektronów, ale pojawia się na skutek oddziaływań z sąsiadami. Co więcej, dołączone pole magnetyczne drastycznie zmienia charakter cząstek, z fermionów na bozony i ponownie na fermiony, w zależności od natężenia pola. Na koniec, jak się przypuszcza, niektóre z tych cząstek złożonych zlewają się, aby utworzyć pary, z grubsza podobne do par elektronowych w nadprzewodnictwie.

Wszystkie te dziwne zjawiska występują w dwuwymiarowych układach elektronowych poddanych działaniu silnych pól magnetycznych w niskich temperaturach – tylko elektrony i pole magnetyczne. Elektrony znajdują się w ciele sta-

*Wykład noblowski, wygłoszony 8 grudnia 1998 r. w Sztokholmie, został przetłumaczony za zgodą Autora i Fundacji Nobla [Translated with permission. Copyright ©1999 by the Nobel Foundation] (przyp. Red.).

łym na styku dwóch nieco różniących się półprzewodników. To jest obecnie najbardziej gładka płaszczyzna, jaką możemy wytworzyć, aby ograniczyć ruch elektronów do dwu wymiarów. Resztę zapewnia mechanika kwantowa.

Doświadczenia są w większości bardzo proste. Mając do dyspozycji pole magnetyczne, zwykle wytwarzane przez łatwy do nabycia magnes nadprzewodzący, oraz temperatury bliskie zera bezwzględnego, zwykle 1/100 do 1/10 kelwina, uzyskane dzięki dostępnej w handlu chłodziarce helowej, potrzebujemy jedynie baterii, opornika i woltomierza. W rzeczywistości, aby zwiększyć szybkość zbierania danych, stosuje się nieco bardziej wyrafinowane instrumenty.

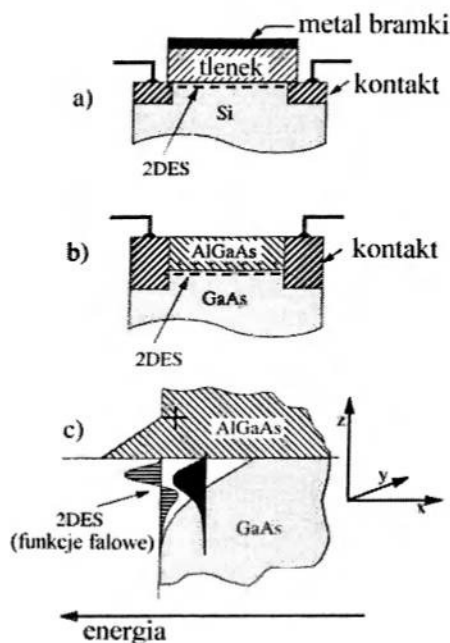
Próbki wykonuje się z superczystych materiałów półprzewodnikowych. Są one kluczowym składnikiem eksperymentów. Przed zapuszczeniem się w tajemnicze korytarze fizyki wielu cząstek w dwu wymiarach, każdy powinien docenić wyrafinowane technologie, które uczyniły podróż możliwą.

2. Dwuwymiarowe układy elektronowe

W świecie trójwymiarowym stworzenie układu dwuwymiarowego wymaga zwykle powierzchni substancji albo granicy między dwiema substancjami oraz siły, która ciała tam utrzymuje. Kule bilardowe – przyciskane do powierzchni stołu siłą grawitacji – są często cytowanym modelem. Elektrony mogą być utrzymywane na powierzchni ciekłego helu lub niektórych izolatorów. Trzyma je tam pole elektryczne, które dociska je do wysoce nieprzenikliwej bariery. Najskuteczniejszą metodą tworzenia dwuwymiarowych układów elektronowych (2DES) jest ograniczenie ruchu elektronów w ciele stałym do granicy między półprzewodnikiem a izolatorem albo między dwoma różnymi półprzewodnikami. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z tzw. krzemowym tranzystorem typu MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), w którym gaz dwuwymiarowy tworzy się pomiędzy krzemem a tlenkiem krzemu (rys. 1a).

W tranzystorze MOSFET elektrony znajdują się po krzemowej stronie złącza, przyciskane do wysoce nieprzenikliwego szkła z tlenku krzemu polem elektrycznym pochodzącym od metalowej elektrody umieszczonej na powierzchni. Możli-

wość zmiany koncentracji elektronów – a co za tym idzie, oporu elektrycznego – za pomocą elektrody (zwanej bramką) czyni z tej struktury idealny tranzystor. Struktury typu MOSFET – będące centralnym składnikiem wszystkiego, od komputera do zegarka cyfrowego – są koniem roboczym dzisiejszego, wartego ok. 140 miliardów dolarów, przemysłu krzemowego.



Rys. 1. a) Schemat krzemowego tranzystora typu MOSFET. Dwuwymiarowy gaz elektronowy (2DES) znajduje się na granicy pomiędzy krzemem a tlenkiem krzemu. Elektrony są utrzymywane przy powierzchni tlenku przez pole elektryczne przyłożone do metalu bramki. b) Schemat modulacyjnie domieszkowanego heterozłącza arsenek galu/aluminoarsenek galu (GaAs/AlGaAs). Gaz dwuwymiarowy znajduje się w złączu pomiędzy GaAs a AlGaAs. Elektrony są utrzymywane przy powierzchni AlGaAs przez pole elektryczne pochodzące od naładowanych domieszek krzemu (+), znajdujących się w AlGaAs. c) Zależność energii elektronów od położenia w modulacyjnie domieszkowanej strukturze (bardzo podobne warunki energetyczne panują w tranzystorze typu MOSFET). Energia rośnie w lewo. Elektrony są uwięzione w trójkątnej studni kwantowej na granicy złącza. Zajmują dyskretne stany energetyczne, skwantowane w kierunku z (czarne, poziomo zakresowane). W niskich temperaturach i przy niskich koncentracjach tylko najniższy (czarny) stan elektronowy jest obsadzony. Elektrony są całkowicie zlokalizowane w kierunku z , ale mogą się poruszać w płaszczyźnie x - y .

W strukturze MOSFET elektrony mogą się poruszać w płaszczyźnie złącza, ale są związane w kierunku prostopadłym. Ściśle rzecz biorąc, na skutek praw mechaniki kwantowej, w kierunku

prostopadłym elektrony nie mogą poruszać się wcale. Pole elektryczne elektrody tak silnie dociska nośniki do powierzchni szkła, że stają się one uwięzione i tylko zbiór dyskretnych stanów staje się w tym kierunku kwantowo dozwolony (rys. 1c). W niskich temperaturach, znacznie niższych niż przerwa energetyczna pomiędzy tymi stanami, przy odpowiednio niskiej koncentracji wszystkie elektrony obsadzają najniższy z poziomów. Jeśli chodzi o ruch w kierunku z , elektrony zachowują się jak cząstki silnie związane. Mogą się natomiast swobodnie poruszać w płaszczyźnie x - y . Krzemowy tranzystor typu MOSFET jest prawie idealną realizacją pojęcia elektronowego układu dwuwymiarowego i znaczna część fizyki 2DES na nim się opiera.

Choć dobre i uniwersalne, struktury MOSFET mają swoje ograniczenia. Przebywając na granicy między krystalicznym półprzewodnikiem a amorficznym szkłem, elektrony są rozpraszane przez nierówności powierzchni złącza lub przez domieszki obecne w warstwie szklistej. Rozpraszanie elektronów jest niepożądane. W sposób przypadkowy wybija ono nośniki z ich trajektorii, zakłócając obserwacje „czystej” sytuacji, w której zachowanie elektronów jest określone wyłącznie przez ich oddziaływania wzajemne i oddziaływanie z polem magnetycznym. Oczywiście elektrony są również rozpraszane przez drgania atomów, tzw. fonony. Ochłodzenie próbek do temperatury bliskiej zera bezwzględnie redukuje te drgania do poziomu, przy którym stają się one zaniedbywalne w porównaniu z rozpraszaniem na domieszkach.

Elektrony związane na granicy dwóch różnych krystalicznych półprzewodników wydają się stworzone do realizacji jeszcze „lepszyc” układów dwuwymiarowych niż krzemowe tranzystory typu MOSFET. Domieszkowane modularynie heterozłącza arsenek galu/aluminoarsenek galu (GaAs/AlGaAs) stanowią układ przewyższający inne pod względem przydatności do badań podstawowych oraz najbardziej wymagających zastosowań.

3. Domieszkowanie modulacyjne

Czyste półprzewodniki nie przewodzą elektryczności w niskich temperaturach. Nie ma w nich swobodnych elektronów, które mogłyby

poruszać się w kryształach. Wszystkie zostały konsumowane przez wiązania, które utrzymują ciało stałe w całości. Aby przewodzić prąd, półprzewodniki wymagają dodania niewielkiej liczby domieszek w procesie zwanym domieszkowaniem. Domieszkowanie ustanawia coś w rodzaju fizycznego „paragrafu 22”: bez domieszek nie ma swobodnych elektronów, ale domieszkowanie generuje niedoskonałości, które silnie rozpraszają właśnie wprowadzone wolne nośniki. W trójwymiarowych półprzewodnikach trudność ta jest praktycznie nie do obejścia. W dwóch wymiarach jednak istnieje sposób. Można odseparować ruchliwe elektrony od domieszek, z których pochodzą, poprzez umieszczenie ich w różnych, sąsiadujących płaszczyznach. Odpowiednie warstwy powinny być na tyle blisko, aby umożliwić przechodzenie elektronów z domieszek, ale wystarczająco daleko, by zapobiec rozpraszaniu elektronów na naładowanych macierzystych jądrach domieszek, które elektrony zostawiają za sobą. Epitaksja z wiązek molekularnych (MBE) dostarcza odpowiednich narzędzi do realizacji takiego przedsięwzięcia.

MBE jest w zasadzie techniką napyłania w wysokiej próżni, która umożliwia nanoszenie wysokiej jakości cienkich warstw półprzewodników jednej na drugą. Wynaleziona pod koniec lat 60. przez Ala Cho w Laboratoriach Bella, stanowi podstawę dużego przemysłu produkującego wydajne optoelektroniczne i elektroniczne urządzenia, przede wszystkim dla potrzeb telekomunikacji. Jedną ze standardowych kombinacji materiałów stosowanych we wzroście kryształów metodą MBE jest GaAs i AlGaAs. Są to półprzewodniki o praktycznie tej samej odległości między atomami (stałej sieci), ale różniące się nieco energiami elektronów swobodnych (powinowactwem elektronowym). Elektrony lekko „przedkładają” GaAs nad AlGaAs – o ok. 300 meV w typowej kanapce. Prawie identyczna stała sieci gwarantuje złącze praktycznie wolne od defektów i naprężeń, a więc wysokiej jakości. Różnica w powinowactwie elektronowym umożliwia elektronom trzymanie się na dystans od ich macierzystych domieszek.

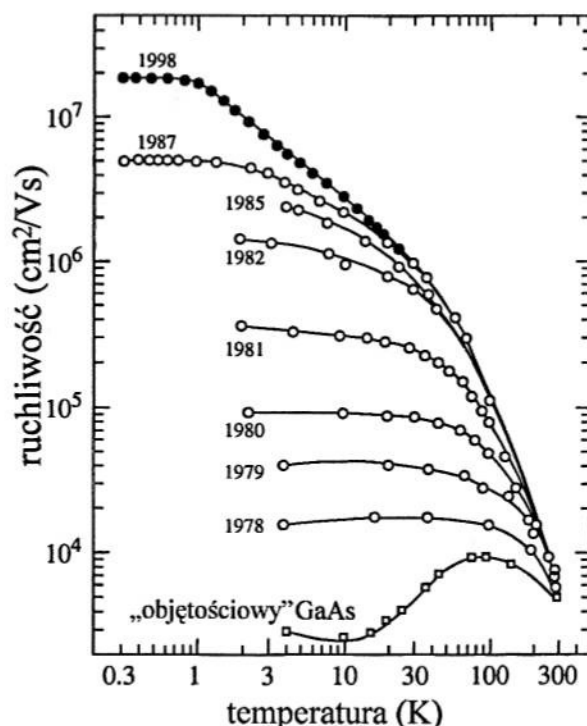
W swojej najczęstszej realizacji, gaz dwuwymiarowy w hodowanej metodą MBE kanapce GaAs/AlGaAs znajduje się po stronie GaAs pojedynczego złącza z AlGaAs (rys. 1b). Gruba na kilka mikrometrów warstwa GaAs wzrasta na

podłożu z GaAs o grubości 1/2 mm. Podłoże stanowi wzorec dla osadzanych atomów, a także utrzymuje mechanicznie końcową strukturę. Warstwę GaAs pokrywa się następnie grubą na ok. 0,5 μm warstwą AlGaAs. Podczas dokonywanego w warunkach najwyższej czystości precyzyjnego wzrostu kolejnych warstw atomowych wprowadza się do AlGaAs domieszki krzemu w odległości ok. 0,1 μm od złącza. Każda domieszka krzemowa ma na zewnętrznej powłoce o jeden elektron więcej niż atom galu, który zastępuje w ciecie stałym. Krzem łatwo traci ten dodatkowy elektron, który wędruje w materiale jako elektron przewodnictwa. Szukając stanu o najniższej energii elektron zapuszcza się poza energetyczną krawędź i „spada” do arsenku galu, który jest tylko 0,1 μm dalej. W superczystej warstwie GaAs takie elektrony przewodnictwa mogą poruszać się praktycznie bez przeszkód ze strony domieszek krzemu, z których pochodzą, bo te pozostały w warstwie AlGaAs, po drugiej stronie bariery. Stosując domieszkowanie modulacyjne „możesz zjeść ciastko i mieć je nadal”.

Przyciąganie ze strony wszystkich tych dodatnio naładowanych (strata jednego elektronu) nieruchomych jonów krzemu utrzymuje ruchliwe elektrony przy barierze z AlGaAs w obszarze złącza (rys. 1c). Warunki są zupełnie analogiczne do warunków w krzemowym tranzystorze MOSFET, w którym metalowa bramka przyciąga elektrony do bariery z tlenku krzemu. Pojawia się taka sama kwantyzacja ruchu w kierunku z i nośniki stają się kwantowo związane na złączu, ale pozostają ruchliwe w płaszczyźnie x - y . Przewaga, jaką domieszkowane modulacyjnie heterozłącze GaAs/AlGaAs ma nad krzemowym tranzystorem typu MOSFET, wynika z obecności atomowo gładkiej granicy między dwoma krystalicznymi półprzewodnikami wysokiej czystości.

Miarą swobody, z jaką elektrony poruszają się w materiale, jest ruchliwość elektronowa. W niskich temperaturach, gdy rozpraszanie na fononach jest zaniedbywalne, ruchliwości w dzisiejszych heterozłączach GaAs/AlGaAs przewyższają ruchliwości w tranzystorach typu MOSFET prawie 1000-krotnie! Takie domieszkowane modulacyjnie próbki są dzisiaj najlepszą realizacją koncepcji dwuwymiarowego metalu, prawie wolnego od szkodliwego rozpraszania ze strony ośrodka (rys. 2). Najdobitniej wyraża to średnia droga

swobodna, jaką przebywa elektron, zanim ulegnie rozproszeniu. Wynosi ona ok. 1/5 mm, co oznacza że elektrony przewodnictwa mijają bez zderzeń milion atomów półprzewodnika.



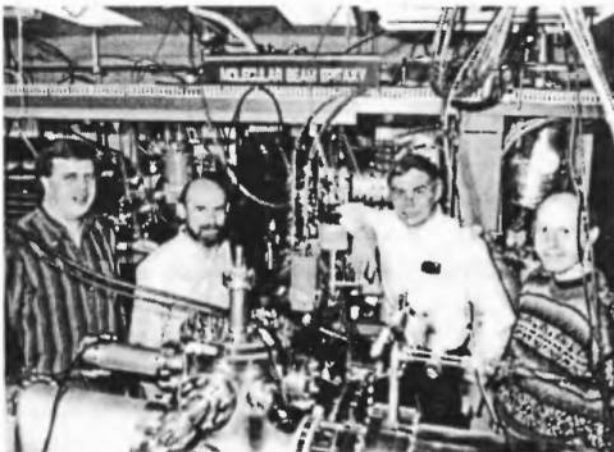
Rys. 2. Postęp, jaki przez lata dokonał się w ruchliwości (μ) dwuwymiarowych elektronów w modulacyjnie domieszkowanym złączu GaAs/AlGaAs; ruchliwość przedstawiono w funkcji temperatury. W wysokich temperaturach μ jest ograniczona przez rozpraszanie na fononach sieci. W najniższych temperaturach μ jest ograniczona przez rozpraszanie na domieszkach i defektach. „Objętościowy” GaAs przedstawia dane dla charakterystycznej próbki litej. Od rozpoczęcia domieszkowania modulacyjnego μ wzrosła ponad 1000 razy. Ruchliwość $2 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ oznacza, że elektron w półprzewodniku przebywa balistycznie między zderzeniami dystans ok. 1/5 mm (!).

Domieszkowanie modulacyjne zostało wynalezione i zrealizowane w 1977 r. przez czterech badaczy w Laboratoriach Bella. Rysunek 3 przedstawia ich fotografię zrobioną mniej więcej w tym czasie, na której zgromadzili się wokół jednej z wczesnych maszyn MBE. Od tamtych początkowych lat technologia epitaksji z wiązek molekularnych niezmiennie się rozwijała i maszyny MBE urosły jeśli chodzi o rozmiary i stopień złożoności. Rysunek 4 przedstawia fotografię dzisiejszej, produkującej wysokoruchliwe próbki maszyny MBE w Laboratoriach Bella oraz badaczy, którzy używają jej do wytwarzania najznakomit-

szych w świecie domieszkowanych modulacyjnie struktur.



Rys. 3. Wynalazcy procesu domieszkowania modulacyjnego zgrupowani w 1978 r. wokół wczesnej wersji układu do epitaksji z wiązek molekularnych w Laboratoriach Bella. Od lewej: Willy Wiegmann, Art Gossard, Horst Stormer i Ray Dingle.

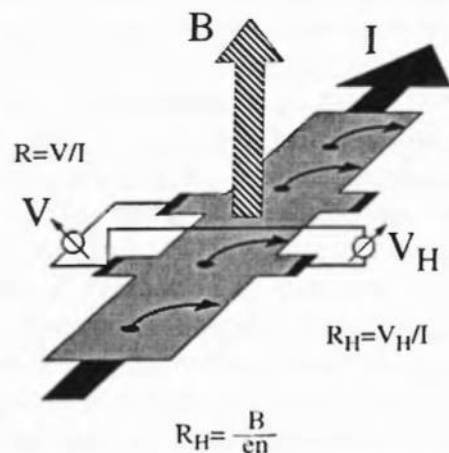


Rys. 4. Dzisiejsze stanowisko do superczystej epitaksji z wiązek molekularnych w Laboratoriach Bella. Stoją: Loren Pfeiffer (w środku po prawej) i Ken West (w środku po lewej), którzy syntetyzują materiał o najwyższej w świecie ruchliwości. Dołączyli do nich Ken Baldwin (po lewej), który pracuje ze mną od prawie 20 lat, i Amir Yacoby (po prawej), który po doktoracie pracował nad jednowymiarowymi drutami.

4. Efekt Halla

Efekt Halla został odkryty w 1879 r. w cienkiej złotej folii przez Edwina Halla, studenta ostatniego roku Uniwersytetu Johns Hopkinsa w Baltimore. Przepuszczając prąd o natężeniu I

przez cienką warstwę metalu, mierzył on dwa charakterystyczne napięcia (rys. 5). Pierwsze z nich, V , było napięciem wzdłuż kierunku prądu, które, podzielone przez I , wyznacza elektryczny opór R materiału. Drugie, V_H , było napięciem poprzecznym w stosunku do kierunku prądu, które powinno być równe zero, ponieważ prąd płynie prostopadle do niego. Taka była rzeczywiście obserwacja Halla, póki nie przyłożył on pola magnetycznego B prostopadle do warstwy metalu. Wywołało to pojawienie się niezerowego napięcia V_H , poprzecznego do kierunku prądu. Na podstawie różnych doświadczeń Hall ustalił, że V_H jest proporcjonalne do natężenia prądu I oraz proporcjonalne do pola magnetycznego B . Zatem, oznaczając V_H/I jako opór elektryczny R_H , otrzymano $R_H \propto B$. Od tego czasu zjawisko to jest znane jako efekt Halla. Występujące w nim napięcie V_H jest napięciem Halla, które podzielone przez natężenie prądu I staje się oporem Halla, R_H .



Rys. 5. Geometria próbki, stosowana do pomiarów magnetooporu R i oporu Halla R_H w funkcji natężenia prądu I i pola magnetycznego B . Napięcie podłużne V jest mierzone wzdłuż kierunku prądu, a V_H oznacza napięcie Halla, mierzone prostopadle do tego kierunku. Gęstość elektronów na cm^2 jest oznaczona jako n , a ładunek elektronu jako e . Czarne kropki reprezentują elektrony, które są odchylane w kierunku krawędzi próbki przez wywołaną polem magnetycznym siłę Lorentza.

Źródłem efektu Halla jest klasyczna elektrodynamika. Przyłożone pole magnetyczne wywiera na elektrony, które średnio rzecz biorąc poruszają się w kierunku prądu, działającą poprzecznie siłę (siłę Lorentza). Elektrony są popychane w kierunku jednej z krawędzi próbki (w zależności od kierunku pola), co prowadzi do akumulacji ładunku na jednej z powierzchni bocznych. To na-

gromadzenie ładunku ostatecznie prowadzi do pojawienia się napięcia w kierunku poprzecznym do płynącego prądu. Oczywiście im większe pole, tym silniejsze odchylenie i większe R_H . Ponadto im mniejsza gęstość elektronów, tym większe R_H . To na pierwszy rzut oka wydaje się sprzeczne z intuicją, ale jest również raczej proste. Aby wytworzyć to samo natężenie prądu przez mniejszą liczbę elektronów, muszą one szybciej się poruszać. Szybsze elektrony doświadczają większej siły Lorentza i wytwarzają większe V_H , a co za tym idzie większe R_H .

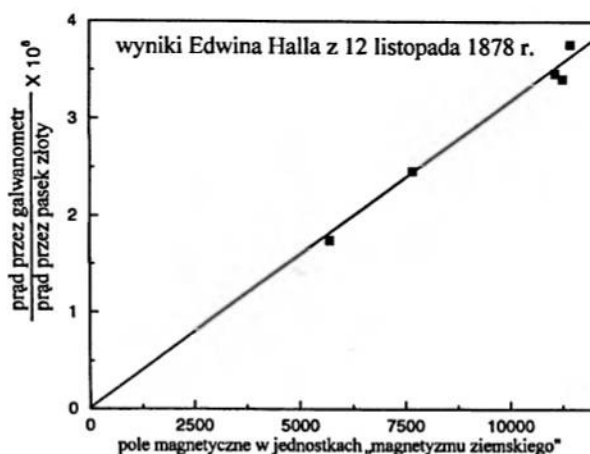
W swej ostatecznej postaci $R_H = B/(ne)$, gdzie n jest gęstością elektronów w materiale mierzoną na cm^2 (jednostkę powierzchni), równą gęstości elektronów N na cm^3 (jednostkę objętości) razy grubość próbki, natomiast e jest ładunkiem elektronu. Zauważmy, że nie pojawia się żaden inny parametr elektronu, taki jak masa, ani żaden inny parametr materiału – tylko gęstość elektronów. Co najbardziej godne uwagi, R_H nie zależy od kształtu próbki¹. W istocie rzeczy, nawet zestaw otworów wywierconych w próbce nie zmienia wyniku. Dziurkowana warstwa metalu ma taki sam opór hallowski jak warstwa jednolita, jeżeli tylko kontakty elektryczne pozostają ze sobą połączone. Dzięki niezależności od wszystkich wewnętrznych i zewnętrznych parametrów, efekt Halla stał się uniwersalnym narzędziem do wyznaczania gęstości swobodnych elektronów w przewodnikach elektrycznych. W szczególności, korzystając z efektu Halla mierzy się koncentrację elektronów w półprzewodnikach, która zmienia się w szerokim zakresie.

W 1879 r. Edwin Hall odkrył, że w normalnym przewodniku opór R_H zależy liniowo od natężenia pola magnetycznego B (rys. 6). W 1980 r. Klaus von Klitzing odkrył, że w przypadku dwuwymiarowego układu elektronowego ta zależność jest całkiem inna.

5. Całkowity kwantowy efekt Halla

Przeprowadź doświadczenie Halla w niskich temperaturach ciekłego helu (ok. 4 K) i bardzo silnych polach magnetycznych (ok. 10 T) na dwuwymiarowym gazie elektronowym krzemowego tranzystora typu MOSFET, a otrzymasz schodkową

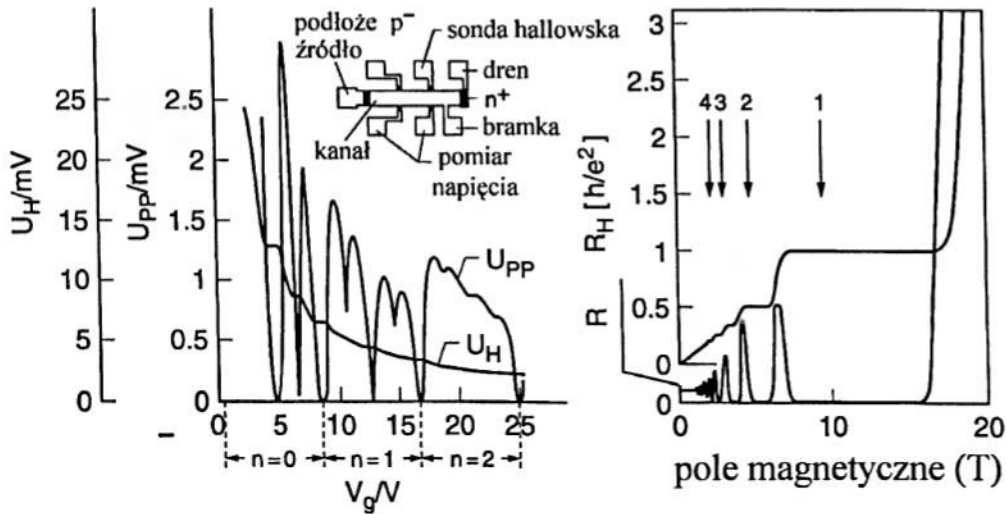
zależność oporu hallowskiego od pola magnetycznego zamiast liniowej zależności uzyskanej przez Edwina Halla (rys. 7). Co jeszcze bardziej zaskakujące, wartość R_H na poziomych odcinkach stopni jest skwantowana z dokładnością kilku części na miliard (!) i wynosi $R_H = h/(ie^2)$, gdzie i jest liczbą całkowitą, a h jest stałą Plancka ($R_H \approx 25,812... \text{ k}\Omega$ dla $i = 1$). W 1990 r. kwant oporu h/e^2 , mierzony za pomocą tego całkowitego kwantowego efektu Halla (IQHE – Integral Quantum Hall Effect) z dokładnością do ośmiu cyfr znaczących, stał się światowym wzorcem oporu. Magnetoopór R mierzony dla skwantowanego R_H spada do pomijalnie małych wartości. Jest to również znak rozpoznawczy całkowitego kwantowego efektu Halla, bezpośrednio związany z kwantyzacją.



Rys. 6. Dane Edwina Halla z 1878 r., narysowane według tabeli z jego publikacji. Skala na osi pionowej jest proporcjonalna do napięcia Halla V_H z rys. 5, a skala na osi poziomej jest proporcjonalna do pola magnetycznego. Liniowa zależność pomiędzy V_H i B , a co za tym idzie pomiędzy R_H i B , jest wyraźnie widoczna. Od czasów Edwina Halla ta ściśle liniowa zależność została potwierdzona w wielu dużo bardziej precyzyjnych doświadczeniach.

Dlaczego układy dwuwymiarowe zachowują się inaczej? Skąd się biorą stopnie i minima? Klasycznie, elektrony w silnym polu magnetycznym są zmuszane do ruchu po kołowych orbitach, podążając za siłą Lorentza. Kwantowo, tylko niektóre orbity są dopuszczalne i istnieje tylko dyskretny zbiór energii. Sytuacja przypomina dyskretny zbiór orbit, które istnieją w atomie. Energetycznie, te tzw. poziomy Landaua two-

¹ Pod warunkiem, że ma ona kształt zbliżony do wydłużonego prostokąta (przyp. tłum.).



Rys. 7. Po lewej: oryginalne dane z 1980 r., przedstawiające odkrycie całkowitego kwantowego efektu Halla przez Klausa von Klitzinga w dwuwymiarowym układzie elektronowym krzemowego tranzystora typu MOS-FET. Zamiast gładkiej krzywej von Klitzing obserwował płaskie stopnie na napięciu Halla (U_H) i znalazł towarzyszące im głębokie minima magnetooporu (U_{PP}). Na osi poziomej odłożono napięcie bramki (V_G), które zmienia gęstość nośników n . Po prawej stronie pokazano równoważne dane, otrzymane dla dwuwymiarowego gazu elektronowego w GaAs/AlGaAs. Ponieważ dane te wykreślono w funkcji pola magnetycznego, mogą być one bezpośrednio porównane z danymi Edwina Halla z rys. 6. Zamiast widocznej tam liniowej zależności oporu Halla od pola magnetycznego mamy tu szerokie stopnie R_H i dodatkowo głębokie minima R .

rzę drabinę równoodległych stanów o energiach proporcjonalnych do pola magnetycznego B : $E_i = (i - 1/2)\hbar eB/(2\pi m)$, ($i = 1, 2, 3, \dots$), gdzie m jest masą elektronu, a $\hbar$ – stałą Plancka. (W trakcie tego wykładu zaniedbujemy efekty pochodzące od spinu elektronu. To upraszcza dyskusję bez znacznej utraty ogólności). Elektron może obsadzać tylko powyższe stany, natomiast nie może mieć energii z obszaru dużych przerw energetycznych pomiędzy poziomami Landaua. Obecność przerw energetycznych jest kluczowa dla pojawienia się całkowitego kwantowego efektu Halla. Właśnie w tym punkcie układy dwuwymiarowe różnią się zdecydowanie od elektronów w trzech wymiarach. Ruch w trzecim wymiarze, wzdłuż pola magnetycznego, może dodać dowolną ilość energii do energii poziomu Landaua. Dlatego też przerwy energetyczne są zamykane, czyli wyeliminowane, a to z kolei uniemożliwia wystąpienie kwantowego efektu Halla. Właścią układów dwuwymiarowych, obok istnienia przerw energetycznych, jest ściśle skwantowanie liczby elektronów obsadzających każdy z poziomów Landaua. Liczba ta, d , taka sama dla każdego z poziomów, wyrażona jest liczbą orbit na centymetr kwadratowy próbki. Okazuje się, że $d = eB/h$. Zauważmy, że ta pojemność poziomu

Landaua, zwana także jego degeneracją, zależy tylko, pomijając stałe fizyczne, od pola magnetycznego B . Żaden z parametrów materiału nie pojawia się w jakikolwiek sposób. Degeneracja jest zatem wielkością uniwersalną, niezależną od użytej próbki.

Załóżmy, że próbka ma ustaloną w dwóch wymiarach gęstość elektronów, równą n . W niskich temperaturach, gdy wszystkie elektrony starają się spaść na stan dostępny o najniższej energii, dla wystarczająco silnego pola magnetycznego wszystkie obsadzą najniższy poziom Landaua, zapelniając go tylko częściowo. Gdy pole jest zmniejszane, ilość wolnego miejsca kurczy się zgodnie z $d = eB/h$. Dla $B_1 = nh/e$, najniższy poziom Landaua jest zapelniony całkowicie. Każda dalsza redukcja pola wymaga, aby jeden z elektronów opuścił najniższy stan i koszt energii $\hbar eB_1/(2\pi m)$ przebył przerwę energetyczną do poziomu Landaua powyżej. Zmniejszając pole do $B_2 = (nh/e)/2 = B_1/2$, zapelniamy całkowicie dwa poziomy Landaua i jeden elektron jest zmuszony do przejścia na trzeci poziom itd. W ten sposób stworzyliśmy sekwencję pól, $B_i = (nh/e)/i$, dla których wszystkie elektrony zapelniają całkowicie niższe poziomy Landaua, a wyższe poziomy są utrzymane w stanie zu-

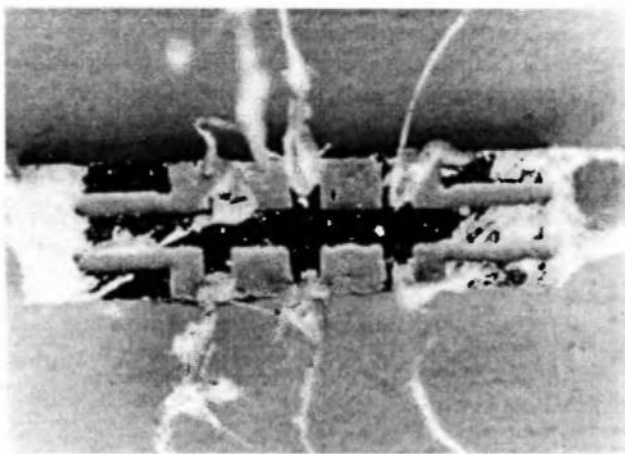
pełnie nieobsadzonym. W tych specjalnych punktach osi pól magnetycznych magnetoopór skokowo znika, a opór hallowski przyjmuje bardzo szczególne wartości. Wstawiając wartości wyróżnionych pól B_i do wyrażenia na klasyczny opór Halla $R_H = B/(ne)$, otrzymujemy skwantowany opór Halla $R_H = h/(ie^2)$, $i = 1, 2, 3, \dots$. Wprawdzie jest to pożądaný wynik, ale nie może on być uznany za prawdziwy znak rozpoznawczy IQHE, którym są szerokie stopnie R_H i rozległe minima R .

Zgodnie z powyższym wyprowadzeniem, R_H przyjmowałaby skwantowane wartości tylko dla bardzo precyzyjnie określonych pól magnetycznych B_i . Byłaby to kiepska podstawa do budowy wzorca, ponieważ precyzja, z jaką R_H przyjmowałaby wartości skwantowane, zależałaby od dokładności, z jaką wyznaczamy B . W rzeczywistości, opór hallowski R_H w całkowitym kwantowym efekcie Halla przyjmuje wartości skwantowane dla skończonego przedziału pól wokół B_i .

Przyczyna powstawania stopni i szerokich minimów leży w lokalizacji elektronów. Mimo najwyższej staranności, z jaką wytwarza się układy dwuwymiarowe, na granicy złącza pozostaje pewna liczba energetycznych dolin i pagórków, pochodzących od reszkowych defektów, stopni lub domieszek. Każdy z poziomów Landaua odtwarza ten pofałdowany krajobraz. Gdy poziom Landaua jest wypełniany elektronami, niektóre z nich są pułapkowane (lokalizowane) i stają się odizolowane od reszty. Takie elektrony nie uczestniczą już w przewodnictwie elektrycznym przez próbkę; obszary, gdzie są one zlokalizowane, stają się nieaktywne i działają jak zbiór otworów wyciętych w warstwie dwuwymiarowej. Podobnie jak w perforowanej folii metalowej, obszary te nie wpływają na pomiary gęstości elektronów swobodnych, poruszających się w płaskich obszarach krajobrazu energetycznego, omijających wzgórza i doliny. Jak długo obsadzanie lub depopulacja poziomu Landaua napęnia lub opróżnia wyłącznie stany zlokalizowane w pobliżu ekstremów energetycznych, a obszary zdelokalizowane są w pełni obsadzone, opór Halla próbki, R_H , i magnetoopór, R , pozostają stałe. Ponieważ w przewodzących obszarach poziom Landaua jest całkowicie wypełniony, utrzymuje się skwantowana wartość oporu hallowskiego. Elektrony zlokalizowane stanowią zbiornik nośników, który powoduje, że w energetycznie płaskich obszarach próbki poziom

Landaua jest kompletnie obsadzony dla skończonych przedziałów pola magnetycznego i pojawia się poziomy stopień na oporze poprzecznym oraz znikający opór podłużny całkowitego kwantowego efektu Halla.

Dokładność kwantyzacji nie zależy ani od kształtu i rozmiarów próbki, ani od tego, jak dokładnie starano się wykonać kontakty (rys. 8 przedstawia szczególnie jaskrawy przykład). Na skutek kaprysu natury, istnienie i precyzja całkowitego kwantowego efektu Halla wymaga istnienia niedoskonałości w próbce. Bez takich zanieczyszczeń nie byłoby IQHE. Zamiast niego, nawet w układach dwuwymiarowych, wróciłibyśmy do linii prostej Edwina Halla.



Rys. 8. Zdjęcie próbki GaAs/AlGaAs. Jej rozmiar wynosi ok. $6 \times 1,5$ mm. Czarny obszar (w rzeczywistości powierzchnia lustrzana odbijająca czerń kamery) to nienaruszona powierzchnia nad gazem dwuwymiarowym. Szare obszary to miejsca, z których materiał został usunięty, aby ograniczyć przepływ prądu do centrum próbki. Białe obszary to krople indu, użyte jako kontakty do gazu dwuwymiarowego. Dołączono do nich złote druty. Próbkę, taką jak ta, przygotowaną bez specjalnej dbałości o zachowanie wymiarów i czystość, wykazują dokładność kwantyzacji oporu hallowskiego rzędu kilkudziesięciu części na miliard. Pokazany egzemplarz jest próbką, na której w 1981 r. odkryto ułamkowy kwantowy efekt Halla.

W genialnym eksperymencie myślowym Bob Laughlin potrafił wyjaśnić istnienie i precyzję całkowitego kwantowego efektu Halla na podstawie zestawu bardzo prostych składników, z jakich zbudowane było doświadczenie (patrz jego wykład noblowski (tłumaczenie: *Postępy Fizyki* 51, 68 (2000) – Red.)). W tym podejściu, wartość $R_H = h/(ie^2) = (h/e)/(ie)$ pojawia się jako stosunek kwantu strumienia magnetycznego, $\phi_0 = h/e$,

i ładunku elektronu e , pomnożonego przez liczbę obsadzonych poziomów Landaua i . Kwanty strumienia magnetycznego to elementarne jednostki w oddziaływaniu pola magnetycznego z układem elektronów. (Pole magnetyczne jako takie nie jest skwantowane. Tym różni się od ładunku, który pojawia się w porcjach równych e . Jednakże dla potrzeb tego wykładu, dotyczącego pola magnetycznego w obecności elektronów, możemy traktować pole jako skwantowane). Wielkość R_H , która jest stosunkiem ϕ_0 do e , można traktować jako bardzo precyzyjną jednostkę miary ładunku elektronowego, wyrażonego jako $e = \phi_0/(iR_H)$. Z tego punktu widzenia doświadczenie Klausa von Klitzinga dostarcza niezwykle dokładnego elektrometru do mierzenia ładunku elektrycznego cząstek przenoszących prąd w układach dwuwymiarowych.

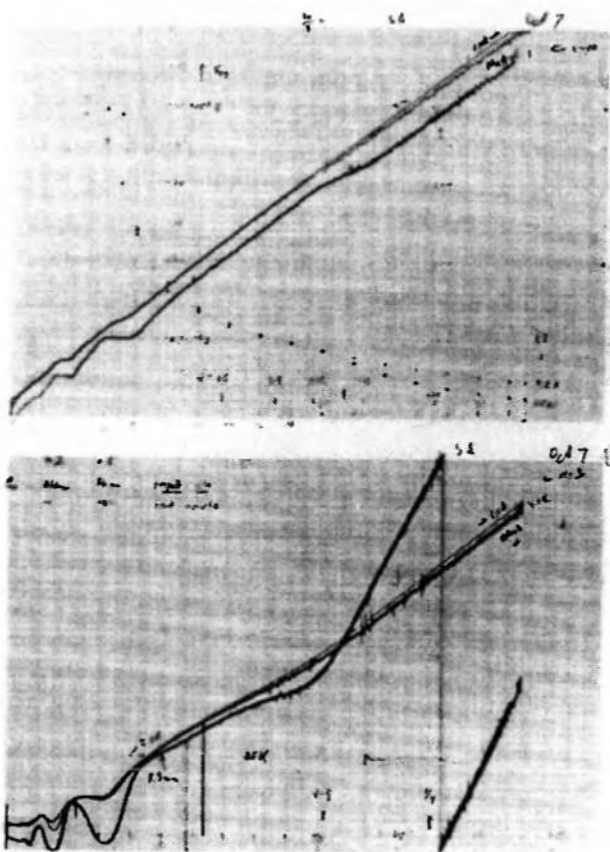
6. Ułamkowy kwantowy efekt Halla

6.1. Odkrycie

Na początku października 1981 r. Dan Tsui i ja, obaj pracując wtedy w Laboratoriach Bella, zabraliśmy nową próbkę, wykonaną z modulacyjnie domieszkowanej struktury GaAs/AlGaAs do Laboratorium Magnetycznego Francisa Bittera w MIT w Cambridge. Próbkę została wyhodowana przez Arta Gossarda, również z Laboratoriów Bella, i jego asystenta Willy'ego Wiegmana. Korzystając ze zgromadzonych w ciągu kilku lat doświadczeń w zakresie domieszkowania modulacyjnego, byli oni w stanie jako pierwsi wyprodukować strukturę o niskiej gęstości elektronowej ($n = 1,23 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) i wyjątkowo dużej ruchliwości ($\mu = 90\,000 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$). Rysunek 8 przedstawia właśnie tę próbkę. Mając do dyspozycji silne pola magnetyczne dostępne w laboratorium magnetycznym, przewidywaliśmy, że uda się nam osiągnąć tzw. granicę kwantową, w której najniższy poziom Landaua jest tylko częściowo obsadzony przez elektrony. Naszym zadaniem było poszukiwanie w tym zakresie śladów obecności tzw. sieci Wignera, kryształu elektronowego w dwu wymiarach. Teoria przewidywała powstanie takiej regularnej sieci elektronów, ale nigdy jej nie zaobserwowano.

7 października pomiary efektu Halla, przeprowadzone w temperaturze ciekłego helu (4,2 K), dostarczyły wyników przedstawionych w górnej

części rys. 9. Widać, że zależność między oporem Halla R_H a polem magnetycznym B jest niemal liniowa. Odchylenia od prostej, widoczne



Rys. 9. Dane z 7 października 1981 r. dla próbki nr 6-19-81(3) (patrz rys. 8), wykreślone na papierze milimetrycznym. W górnej części pokazano opór Halla R_H dla temperatur 4,2 K i 1,5 K w funkcji pola magnetycznego B . W dolnej części pokazano magnetoopór R w funkcji B dla zbliżonych temperatur. Odległość ok. 1,5 cm na osi poziomej odpowiada polu magnetycznemu 1 T. Struktury widoczne przy ok. 3 cm i ok. 7 cm są wynikiem całkowitego kwantowego efektu Halla, słabsze struktury przy ok. 21 cm są spowodowane efektem ułamkowym. Bazgroły w górnej części rysunku powstały na skutek ponownego użycia papieru milimetrycznego do przeliczania danych z innych przebiegów.

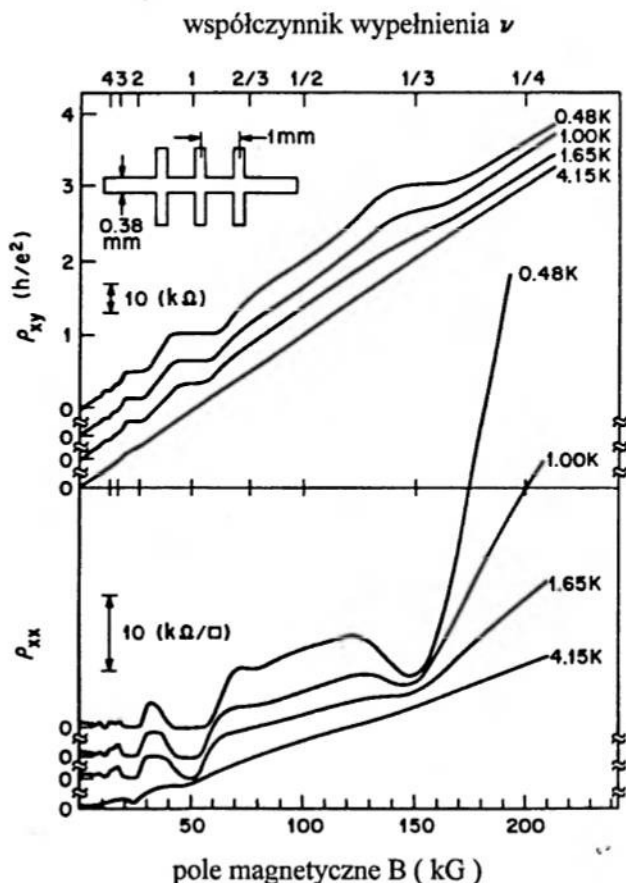
w słabszych polach, są spowodowane pojawieniem się całkowitego kwantowego efektu Halla. Wiedza o gęstości elektronów, podobnie jak wartości obserwowanych stopni oporu ($R_H = h/(ie^2)$, $i = 1, 2, 3, \dots$), jednoznacznie wskazują, że mamy do czynienia z tym zjawiskiem. Wraz z ostatnim ($i = 1$) stopniem, występującym dla $B \approx 5 \text{ T}$ (ok. 7 cm na papierze milimetrycznym), wchodzimy w obszar pól, przy których elektrony muszą zajmować najniższy poziom Landaua, wypełniając tylko ułamek ν jego pojemności. Ochłodze-

nie próbki do 1,5 K spowodowało, że cechy całkowitego kwantowego efektu Halla wzmocniły się; wykształciły się znajome płaskie stopnie (patrz górna część rys. 9). Niezwykła cecha pojawiła się przy $B = 15$ T: wykres oporu Halla zaczął odchyłać się od widocznej wcześniej linii prostej, wykazując zachowanie podobne do poprzednio obserwowanego w wyższej temperaturze 4,2 K całkowitego kwantowego efektu Halla. Ta własność była zupełnie nieoczekiwana. Poza wykształceniem się stopnia na wykresie R_H , również magnetoopór R zdawał się przechodzić przez towarzyszące stopniowi minimum (patrz dolna część rys. 9).

Całkowity kwantowy efekt Halla, powstający na skutek pełnego obsadzenia poziomów Landaua, nie mógł występować, ponieważ powyżej 5 tesli najniższy poziom był tylko częściowo zajęty. Co więcej, opór Halla w miejscu zmiany nachylenia wykresu znacznie przewyższał największy możliwy opór w całkowitym kwantowym efekcie Halla, $R_H = h/e^2 \approx 25$ k Ω . Dan Tsui niefrasobliwie odmierzył palcami dystans między $B = 0$ a ostatnim stopniem całkowitego kwantowego efektu Halla (7 cm) i za pomocą tej jednostki wyznaczył położenie nowego efektu. W wyniku otrzymał trzy i wykrzyknął „kwarki!”. Chociaż w oczywisty sposób żartował, dzięki swej wyostrzonej intuicji dotknął samej istoty zaobserwowanego zjawiska.

Podążając za doświadczeniem myślowym Laughlina i przyjmując kwantyzację oporu Halla za miarę ładunku cząstki, stwierdziliśmy, że pojawienie się stopnia trzy razy wyższego niż ostatni stopień całkowitego kwantowego efektu Halla oznacza istnienie ładunku $q = \phi_0/(3h/e^2) = e/3$. Oczywiście, nasz niskotemperaturowy i niskoenergetyczny eksperyment (mili-eV, a nie miliony eV) nie mógł wytworzyć niczego nawet najdalej spokrewnionego z kwarkami (subatomowymi cząstkami obdarzonymi ładunkiem $1/3$), jak się jednak okazało, obecność ułamkowo naładowanych cząstek należy traktować śmiertelnie poważnie. Wtedy nie wiedzieliśmy, co właśnie odkryliśmy. Artykuł z wynikami doświadczenia (patrz rys. 10), opublikowany w marcu 1982 r. w *Physical Review Letters*, autorstwa Tsui, Stormera i Gosarda, zawiera dyskusję, czy otrzymane wyniki są przejawem krystalizacji Wignera lub czegoś równoważnego, ale również uwagę o ładunku ułamkowym. Nie ma żadnych zdjęć z tych październiko-

wych dni 1981 r. Przedstawiam za to na rys. 11 fotografię zespołu, wykonaną z okazji pierwszego doświadczenia w superniskiej temperaturze i supersilnym polu magnetycznym w Laboratorium Magnetycznym Francisa Bittera w MIT.



Rys. 10. Pierwsza publikacja na temat ułamkowego kwantowego efektu Halla. Wartości oporu Halla (tutaj ρ_{xy}) i magnetooporu (tutaj ρ_{xx}) otrzymano dla tej samej próbki, co dane z rys. 9. Współczynnik wypełnienia Landaua ν pokazano na górnej osi. Struktury dla $\nu = 1, 2, 3, \dots$ są wynikiem całkowitego kwantowego efektu Halla. Struktury dla $\nu = 1/3$ są spowodowane efektem ułamkowym. Wymiary próbki i temperatury pomiarów podano obok.

6.2. Pochodzenie

Całkowity kwantowy efekt Halla można zrozumieć, opierając się wyłącznie na skwantowanym dwuwymiarowym ruchu pojedynczych elektronów w obecności pola magnetycznego i przypadkowych fluktuacji potencjału złącza, odpowiedzialnych za lokalizację stanów. Obecność elektronów towarzyszących pojawia się jedynie w najprostszym sposobie – jako wypełnianie pustych stanów poziomu Landaua. Oddziaływanie elektrostatyczne

(tzw. oddziaływanie Coulomba) pomiędzy identycznie naładowanymi nośnikami jest nieistotne dla zrozumienia całkowitego kwantowego efektu Halla. Dlatego jest on nazywany efektem jedno-cząstkowym.



Rys. 11. Pierwsze zakończone sukcesem uruchomienie naszej chłodziarki rozcieńczalnikowej w silnych polach magnetycznych. Napis głosi: 85 mK, 280 kG, 16 lutego 84. Dumni operatorzy, poczynając od lewego górnego rogu zgodnie z ruchem wskazówek zegara, to: Albert Chang, Peter Berglund (który ponosił największą odpowiedzialność za konstrukcję i wykonanie instrumentu), Greg Boebinger, Dan Tsui i Horst Stormer.

Z drugiej strony, ułamkowego kwantowego efektu Halla nie można już zrozumieć na podstawie zachowania pojedynczych elektronów w polu magnetycznym. Występowanie przerwy energetycznej, tak istotne dla ścisłej kwantyzacji w efekcie całkowitym, jest również kluczowe, jak się oczekuje, dla występowania efektu ułamkowego. Jednakże wszystkie indukowane polem magnetycznym przerwy energetyczne zostały wykorzystane w efekcie całkowitym i pojawiały się jako całkowita kwantyzacja oporu Halla $R_H = h/(ie^2)$, $i = 1, 2, 3, \dots$. Inne przerwy energetyczne, występujące przy ułamkowym zapełnieniu poziomu Landaua, muszą mieć odmienne pochodzenie.

Źródłem ułamkowego efektu Halla jest oddziaływanie między elektronami. Dlatego też jest on określany jako efekt wielocząstkowy lub korelacyjny, ponieważ naładowane elektrony unikają się wzajemnie, korelując w zawiły sposób swe względne położenia. W całkowitym efekcie Halla nie mają możliwości, aby od siebie stronić. Zajmując całkowicie obsadzone poziomy Landaua, elektrony są już „gęsto upakowane” bez możliwo-

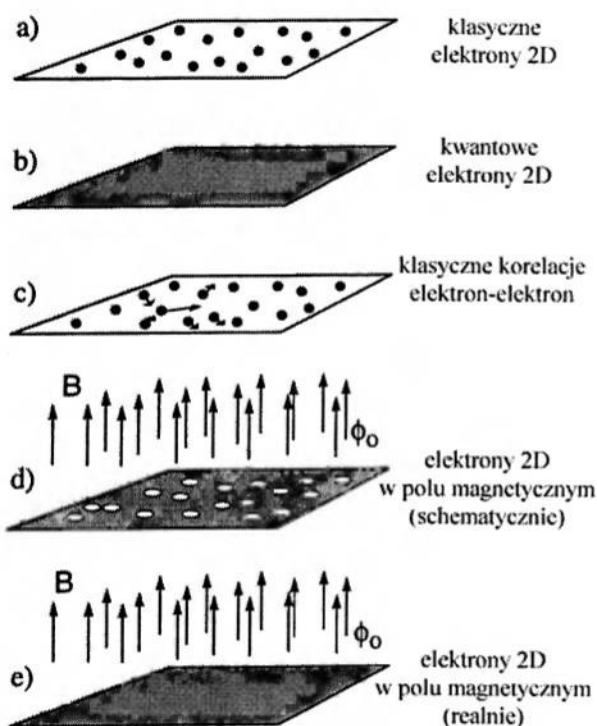
ści dalszych uników. Przy ułamkowym zapełnieniu jest inaczej. Na poziomie Landaua jest dużo „przestrzeni”. Elektrony mają możliwość, aby się wzajemnie unikać w energetycznie najkorzystniejszy sposób. Kryształ elektronowy, którego szukaliśmy i w którym elektrony zajmują ustalone, maksymalnie od siebie oddalone położenia, byłby statycznym wzorem minimalizującym energię oddziaływania. W ułamkowym kwantowym efekcie Halla elektrony zajmują jeszcze korzystniejszy, nie przewidziany przez teorię stan, uczestnicząc w wyszukany, wzajemnym, kwantowym tańcu.

Efekty wielociałowe są wielkim wyzwaniem dla teorii. W większości przypadków powodują jedynie małe poprawki w zachowaniu się elektronów i można je uwzględnić w sposób przybliżony. Często takie podejście jest całkiem wystarczające, ale zdarza się, że oddziaływania wielocząstkowe są istotą zjawiska fizycznego. Nadprzewodnictwo i nadciekłość są tego przykładem. Aby wyjaśnić ich występowanie, należało wymyślić nowe, wyrafinowane metody teoretyczne. Pojawienie się ułamkowego kwantowego efektu Halla wymaga takiego nowego sposobu myślenia.

Bob Laughlin miał właściwe podejście teoretyczne i wynalazł elegancką funkcję falową, która opisuje kwantowe zachowanie wszystkich tych elektronów dla ułamka $1/3$ (jak również dla wszystkich innych stanów $1/q$) za pomocą zwięzłego równania, zawierającego około 15 znaków. Jest to tryumf teorii wielu cząstek. Bob Laughlin przedstawił również powód istnienia przerwy energetycznej oraz pochodzenie najbardziej tajemniczego ładunku $e/3$ (patrz jego wykład noblowski). W dalszej części spróbuję dać czytelnikom pojęcie o pełnym prostoty pięknie fizycznych koncepcji używanych przy opisie ułamkowego kwantowego efektu Halla. Zamiast zwracać się do ekspertów, którzy mają do dyspozycji kilka doskonałych monografii (patrz bibliografia), mój wykład adresuję do nastawionych naukowo laików, którzy chcieliby uchwycić sens istnienia zjawiska tak dziwnego, jak ułamkowy kwantowy efekt Halla. Dyskusja nie będzie podążała drogą historyczną. Wykorzysta natomiast ideę tworzenia się z elektronów i pola magnetycznego nowych cząstek złożonych. Z perspektywy tego modelu uroda elektronowych korelacji wewnątrz dwuwymiarowych poziomów Landaua zajaśnieje pełnym blaskiem.

6.3. O elektronach i kwantach strumienia

W modelu klasycznym elektrony dwuwymiarowe (2D) zachowują się jak naładowane kule bilardowe na stole (rys. 12a). Na podstawie różnej historii są one rozróżnialne i ich losy można śledzić indywidualnie. W ujęciu mechaniki kwantowej elektrony są rozmyte na powierzchni stołu. Są one swoiście nierozróżnialne i można jedynie podać prawdopodobieństwo znalezienia elektronu – jakiegokolwiek elektronu – w każdym szczególnym położeniu. W idealnym układzie dwuwymiarowym to prawdopodobieństwo jest absolutnie jednorodne na całej płaszczyźnie. Elektrony zachowują się jak pozbawiona wewnętrznej struktury ciecz (rys. 12b). Nie należy jednak sądzić, że ich ruchy nie są skorelowane. Te identycznie naładowane nośniki silnie się wzajemnie unikają, jak pokazano na rys. 12c w reprezentacji klasycznej. To samo zachodzi w kwantowej cieczy z rys. 12b. Wpływa to na prawdopodobieństwo znalezienia elektronu tutaj, jeżeli inny elektron zaobserwowano tam (na przykład obok), nie da się tego jednak przedstawić graficznie tak prosto, jak na rys. 12c.



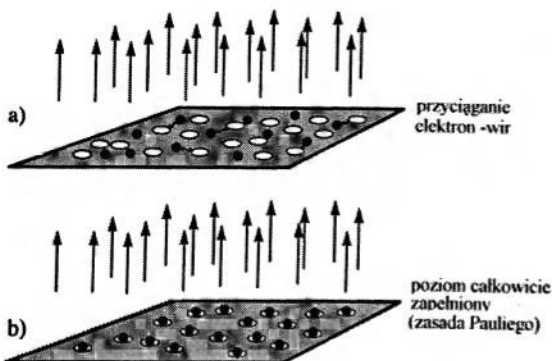
Rys. 12. Schematyczne rysunki dwuwymiarowego gazu elektronowego w różnych przybliżeniach. Czarne kropki przedstawiają elektrony. Białe dziury reprezentują wiry. Strzałki obrazują kwanty strumienia ϕ_0 pola magnetycznego B .

Ważnym pojęciowym krokiem naprzód było uświadomienie sobie, że przyłożenie pola magnetycznego B można traktować jako utworzenie niewielkich wirów w tym jeziorze ładunku – jednego na każdy kwant strumienia pola $\phi_0 = h/e$ (rys. 12d). Pojęcie wiru jest jak najbardziej na miejscu, bo każdy z nich wywołuje kwantowe „zawinięcie” – obrót fazy. Wewnątrz wiru ładunek elektronowy jest zaburzony, spada do zera w centrum i powraca do średniej gęstości ładunku otaczającego na krawędzi. Rozmiar wiru odpowiada z grubsza powierzchni zajmowanej przez kwant strumienia magnetycznego (pole powierzchni $\times B = \phi_0$). W związku z tym można uważać, że każdy wir przenosi jeden kwant strumienia. Oczywiście, podobnie jak elektrony, wiry są jednolicie rozmyte na płaszczyźnie. Zgodnie z wymogami mechaniki kwantowej, prawdopodobieństwo znalezienia elektronu – tak samo jak wiru – pozostaje całkowicie jednorodne (rys. 12e). Jednakże obraz elektronów i wirów dostarcza intuicyjnego sposobu patrzenia na korelacje elektron-elektron w obecności pola magnetycznego.

Elektrony i wiry są przeciwstawnymi obiektami; jeden reprezentuje zgromadzenie ładunku, drugi jego brak. Skorelowanie ich wzajemnych położenia może się okazać bardzo korzystne energetycznie. Szczególną korzyść można odnieść, umieszczając wiry bezpośrednio na elektronach, ponieważ wewnątrz wiru, odrzucając na zewnątrz wszystkie sąsiadujące elektrony, trzyma ładunki na dystans, redukując ich wzajemne odpychanie. Ten intuicyjny obraz wymaga pewnej elastyczności w myśleniu. Każdy z elektronów jest w centrum wiru i w tym samym czasie jest częścią zbiornika z elektronami, w którym wytwarzane są wiry otaczające wszystkie inne nośniki. Ale kto powiedział, że fizyka wielu ciał jest prosta?

Każdy elektron z a w s z e m u s i być otoczony przez jeden wir. Mówiąc w języku elektronów i wirów, jest to sposób, w jaki układ spełnia zasadę zakazu Pauliego dla elektronów, która w tej sytuacji wymaga, aby dwa nośniki nie były w tym samym miejscu. Wir zapewnia potrzebną przestrzeń życiową. Przy całkowitym wypełnieniu najniższego poziomu Landaua, gdy liczba elektronów równa się liczbie kwantów strumienia, wzajemne położenie elektronów i wirów jest całkowicie kontrolowane przez zasadę Pauliego – jeden wir na elektron, nie ma wyboru (patrz rys. 13).

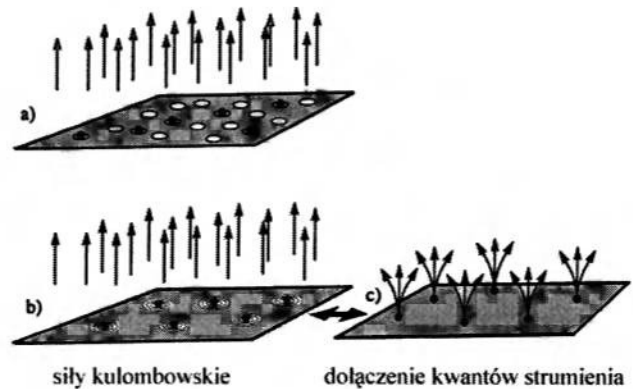
Jest to warunek $i = 1$ w całkowitym kwantowym efekcie Halla. Można go łatwo uogólnić na większą liczbę poziomów Landaua, a także na oba kierunki spinu elektronu, a co za tym idzie – na $i = 2, 3, 4, \dots$. Całkowity kwantowy efekt Halla jest wywoływany przez zakaz Pauliego dla elektronów. Jest to inny sposób wyrażenia faktu, że pozostałe elektrony wchodzą do efektu całkowitego jedynie w najprostszy sposób – poprzez zapełnianie pustych stanów. Kiedy liczba wirów zaczyna odbiegać od liczby elektronów, wtedy pojawiają się możliwości wyboru.



Rys. 13. Schematyczny rysunek przedstawiający przyciąganie między wirami a dwuwymiarowymi elektronami w obecności pola magnetycznego (a). Dla całkowicie zapełnionego poziomu Landaua, $\nu = 1$, jest tyle samo wirów co elektronów i zasada Pauliego wymusza wiązanie wirów na elektronach (b). (Spin elektronu wszędzie zaniedbujemy).

W polach magnetycznych wyższych niż wymagane dla osiągnięcia warunku $i = 1$, silniejsze pole dostarcza nadmiaru kwantów strumienia, a zatem jest więcej wirów niż elektronów. Łatwo jest spełnić zasadę Pauliego umieszczając jeden wir na każdym z elektronów (rys. 14a) – ale do dyspozycji mamy więcej wirów. Układ elektronów może znacznie zmniejszyć swą energię elektrostatyczną (kulombowską), jeżeli na każdym z nośników umieścimy więcej niż jeden wir (rys. 14b). Dodatkowe wiry na elektronie generują wokół niego większy lej, odrzucając dalej inne elektrony, a tym samym zmniejszając energię odpychania. Siłą napędową w tak ustalonym ruchu względnym elektronów nie jest już zakaz Pauliego, ale zmniejszanie energii kulombowskiej. Jest to centralna zasada, na której opierają się korelacje elektron-elektron w układach dwuwymiarowych w polu magnetycznym. Naświetlenie

problemu korelacji elektronowych w języku dołączania wirów magnetycznych ułatwia zrozumienie tych zawiłych wielocząstkowych zachowań. Ostatecznie jednak, uważanie wirów za małe lejki pozostaje tylko myślową podpórką, pomocną dla zobrazowania czegoś, co nie ma analogii klasycznych.



Rys. 14. Schematyczny rysunek przedstawiający przyciąganie między wirami a elektronami przy ułamkowym wypełnieniu poziomu Landaua $\nu = 1/3$. Teraz jest trzy razy więcej wirów niż elektronów. Zasada Pauliego jest spełniona przez umieszczenie jednego wiru na każdym elektronie (a). Umieszczenie trzech wirów na każdym elektronie redukuje odpychanie elektron-elektron (kulombowskie) (b). Na dołączanie wirów można patrzeć jako na dołączanie kwantów strumienia, co przekształca elektrony w cząstki złożone (c).

6.4. Cząstki złożone

Wiry są wyrazem kwantów strumienia w układach dwuwymiarowych i o każdym z wirów można myśleć jako o wytworzonym przez taki kwant. Korzystne pojęciowo jest reprezentowanie wirów przez ich „generatory”, same kwanty strumienia. Wtedy umieszczanie wirów na elektronach staje się równoważne przyłączaniu kwantów strumienia magnetycznego do nośników prądu (rys. 14b,c). Elektrony plus kwanty mogą być postrzegane jako nowe twory, które zaczęto nazywać cząstkami złożonymi.

Gdy obiekty te poruszają się w cieczy, kwanty strumienia działają jak niewidzialna tarcza, chroniąca przed innymi elektronami. Zastąpienie układu silnie oddziałujących elektronów układem elektronów wyposażonych w taki „pierścień ochronny” – dzięki uprzejmości pola magnetycznego – usuwa z problemu większą część oddziaływania elektron-elektron i prowadzi do cząstek złożonych, prawie wolnych od wzajemnych

oddziaływań. Zakrawa na cud, że taka transformacja od bardzo złożonego problemu wielocząstkowego, dotyczącego dobrze znanych obiektów (elektrony w polu magnetycznym), do znacznie prostszego problemu jednocząstkowego, dotyczącego dość złożonych obiektów (elektrony plus kwanty strumienia), istnieje i że została odkryta.

Cząstki złożone zachowują się inaczej niż nagie elektrony. Zewnętrzne pole magnetyczne zostało w całości wbudowane do cząstek poprzez dołączenie kwantów strumienia do elektronów. Dlatego, z perspektywy cząstek złożonych, pole magnetyczne zniknęło i nie są one poddane jego działaniu. Zamieszkują teraz pozornie wolną od pola płaszczyznę dwuwymiarową. I co ważniejsze, dołączone kwanty strumienia zmieniają charakter cząstek z fermionów na bozony i ponownie na fermiony.

6.5. Fermiony i bozony

W fizyce wyróżniamy dwa typy cząstek: bozony i fermiony. Fermiony, takie jak elektrony czy protony, mają tę własność, że wszystkie inne takie cząstki mają z a k a z przebywania w tym samym stanie kwantowym, czyli w tym samym położeniu. Podlegają one zakazowi Pauliego i zapełniają po kolei jeden dostępny stan za drugim. Bozony, takie jak fotony czy atomy helu, nie podlegają takim restrykcjom i mają tendencję do przebywania w t y m s a m y m stanie. Podlegają one statystyce Bosego–Einsteina. Mówiąc bardzo nieprecyzyjnie, zasada wykluczania dla fermionów powoduje, że Wszechświat nie zapada się (wszystkie identyczne fermiony trzymają się od siebie z daleka), natomiast statystyka Bosego–Einsteina jest źródłem takich zjawisk, jak akcja laserowa czy nadciekłość (wszystkie fotony czy atomy helu kondensują w tym samym stanie), zwykle nazywanych kondensacją Bosego. Fermiony mają spin połowkowy, podczas gdy bozony całkowity – gdzie słowo spin odnosi się do „wirowania” cząstki.

Jak pokazuje zjawisko nadciekłości w helu, można tak połączyć elementy atomów, które są fermionami (elektrony, protony i neutrony), aby „wyprodukować” bozony (atomy helu). W pewnym sensie również nadprzewodnictwo można traktować jako łączenie się dwu fermionów (elektronów) w bozony (pary Coopera), które tworzą kondensat Bosego w stanie nadprzewodzącym. Nie można jednak połączyć bozonów, aby utwo-

rzyły „kwazifermiony”. Powodem tej różnicy jest w wielkim uproszczeniu to, że połówki można dodać, aby utworzyły całość, ale liczb całkowitych nie da się dodać tak, aby utworzyły liczbę połowkową.

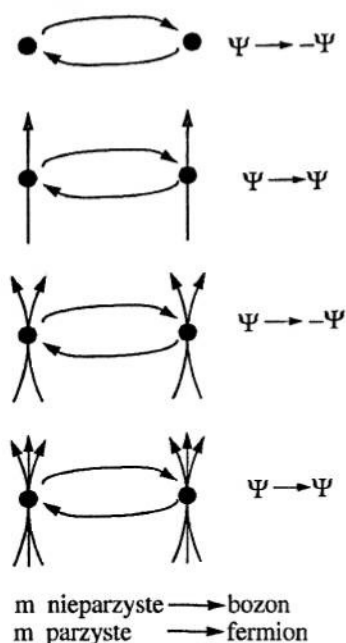
Układy fermionów i bozonów zachowują się bardzo różnie przy zamianie miejscami dwu cząstek składowych – mówi się, że mają inną statystykę. Funkcja falowa – kwantowy opis zachowania wszystkich cząstek – jest mnożona przez -1 w przypadku fermionów i przez $+1$ w przypadku bozonów. Jest to jedna z głębszych zagadek mechaniki kwantowej i w tym miejscu nie da się jej bardziej wyjaśnić. W każdym razie musimy zaakceptować nauki, jakich udziela nam natura.

6.6. Statystyka cząstek złożonych

Elektrony są fermionami. Gdy w gazie dwuwymiarowym powoli przemieszczamy dwa elektrony wokół siebie i zamieniamy je miejscami, znak funkcji falowej ulega zmianie w sposób oczekiwany dla fermionów. Dla cząstek złożonych jest inaczej (rys. 15). Dołączone kwanty strumienia muszą być wzięte pod uwagę i ich obecność zmienia statystykę cząstek. Kiedy powoli przemieszczamy dwie cząstki złożone wokół siebie i zamieniamy je miejscami, same elektrony powodują odwrócenie znaku funkcji falowej, ale każdy dołączony kwant strumienia wytwarza dodatkowy „skręt” mnożąc funkcję falową przez dodatkowe -1 . W rezultacie cząstki złożone mogą być albo fermionami, albo bozonami, w zależności od liczby dołączonych kwantów strumienia. Elektron plus parzysta liczba kwantów strumienia staje się złożonym fermionem, ponieważ funkcja falowa jest mnożona przez -1 nieparzystą liczbę razy, a więc przez -1 . Elektron plus nieparzysta liczba kwantów strumienia staje się złożonym bozonem, ponieważ funkcja falowa jest mnożona przez -1 parzystą liczbę razy, a więc przez $+1$. Ta tak zwana transmutacja statystyki cząstek przez dołączanie strumienia ma swoje głębokie źródło w dwuwymiarowości układu i odzwierciedla głęboki związek pomiędzy przestrzenią a statystyką nośników.

Akceptując fakt, że zewnętrzne pole magnetyczne może być wbudowane do cząstek złożonych i że zachowują się one zarówno jak bozony, jak i fermiony, będzie można bez trudu uzmysłowić

sobie zawikłane własności systemów dwuwymiarowych w silnych polach magnetycznych.



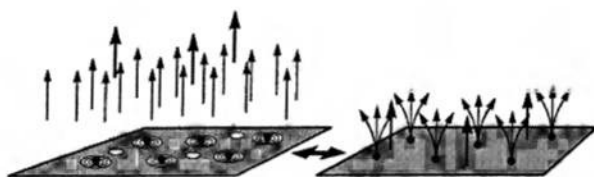
Rys. 15. Statystyka elektronów i cząstek złożonych. Zamiana miejscami dwu cząstek wpływa na funkcję falową Ψ , opisującą kwantowe zachowanie systemu. Dla elektronów funkcja jest mnożona przez -1 , co identyfikuje cząstki jako fermiony. Gdy liczba dołączonych kwantów strumienia jest nieparzysta, Ψ przy zamianie pozostaje niezmienną (mnożenie przez $+1$), co identyfikuje cząstki jako bozony. Dołączenie parzystej liczby kwantów strumienia przekształca cząstki ponownie w fermiony; m jest liczbą kwantów strumienia.

6.7. Stan ułamkowy $1/3$

Przy wypełnieniu w $1/3$ najniższego poziomu Landaua ($\nu = 1/3$), pole magnetyczne wytwarza trzy razy więcej kwantów strumienia niż jest elektronów na jednostkę powierzchni w układzie dwuwymiarowym. Oznacza to, że ciecz elektronowa zawiera trzy razy więcej wirów niż nośników. Aby zminimalizować oddziaływanie elektron-elektron, każdy elektron przyłącza trzy wiry, co utrzymuje pozostałe elektrony w optymalnej odległości. Jest to równoważne przyłączeniu trzech kwantów strumienia magnetycznego do każdego z elektronów, a to czyni z tych obiektów cząstkę złożoną (rys. 14c). Ponieważ zewnętrzne pole magnetyczne zostało w całości wbudowane do cząstek, przebywają one w obszarze pozornie wolnym od pola. Utworzone obiekty są złożonymi bozonami, jako składające się z elektronów plus

nieparzysta liczba kwantów strumienia. Będąc bozonami w polu magnetycznym pozornie równym zero, te złożone cząstki kondensują do nowego stanu podstawowego, oddzielonego przerwą energetyczną, charakterystyczną dla kondensacji Bosego. To jest właśnie poszukiwana przerwa energetyczna, wymagana dla pojawienia się kwantyzacji oporu Halla i znikania oporu podłużnego. Była ona zmierzona za pomocą różnych metod doświadczalnych, najbardziej bezpośrednio za pomocą rozpraszania światła.

Gdy pole magnetyczne rośnie i warunek $\nu = 1/3$ nie jest ściśle spełniony, tworzy się więcej nowych wirów (rys. 16). Nie przyłączają się one do żadnego z elektronów, bo zaburzyłyby to symetrię kondensatu. Niedobór ładunku w każdym z tych wirów wynosi dokładnie $1/3$ ładunku elementarnego. Te kwazidziury (lejkowate zagłębienia w jeziorze elektronów) mają dodatni ładunek efektywny, czyli o przeciwnym znaku niż ujemnie naładowane elektrony. Analogicznych argumentów można użyć dla pól nieco poniżej $\nu = 1/3$ i tworzenia kwazielektronów o ujemnym ładunku $e/3$. Kwazicząstki mogą poruszać się swobodnie po dwuwymiarowej płaszczyźnie i przewodzić prąd elektryczny. Są to słynne cząstki o ładunku $1/3$ występujące w ułamkowym kwantowym efekcie Halla i obserwowane na różne sposoby w najnowszych eksperymentach poprzez pomiar amplitudy szumu elektrycznego, który generują. Tworzenie się plateau w efekcie ułamkowym jest spowodowane przez fluktuacje potencjału, prowadzące do lokalizacji nośników, analogicznie jak w całkowitym kwantowym efekcie Halla. W przypadku efektu ułamkowego nośnikami nie są elektrony, ale zamiast nich dziwaczne, ułamkowo naładowane kwazicząstki.

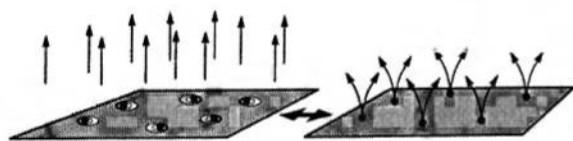


Rys. 16. Schematyczny obraz kwazicząstek o ładunku $1/3$. Dla pól nieco silniejszych niż odpowiadające $\nu = 1/3$, tworzą się dodatkowe wiry. Przedstawić je można jako zagłębienia w jeziorze elektronów. W zagłębieniach brakuje dokładnie $1/3$ ładunku elementarnego. Są to ułamkowo naładowane kwazicząstki ułamkowego kwantowego efektu Halla.

Ułamkowy kwantowy efekt Halla dla $\nu = 1/5, 1/7$ itd. z kwazicząstkami o ładunkach $e/5, e/7$ itd. można wyjaśnić w całkowitej analogii do przypadku $\nu = 1/3$ przez dołączanie do każdego z elektronów 5, 7 itd. kwantów strumienia. Co więcej, nawet stany dla $\nu = 2/3, 4/5, 6/7$ itd. oraz $\nu = 1 + 1/3, 1 + 1/5$ itd. mogą być uwzględnione w tej procedurze, na przykład stan $\nu = 2/3$ jako wypełniony poziom Landaua, na którym brakuje $1/3$ elektronów. W ten sposób można zrozumieć wszystkie ułamki dla współczynników wypełnienia poziomu Landaua $\nu = i \pm 1/q$ (często zwanych ułamkami podstawowymi). Ale jest jeszcze wiele innych.

6.8. Stan dla $\nu = 1/2$

Na pierwszy rzut oka, stan $\nu = 1/2$ powinien być podobny do stanu $\nu = 1/3$, okazuje się jednak, że różnią się one bardzo. Przy wypełnionym do połowy najniższym stanie Landaua pole magnetyczne wytwarza dwa razy więcej kwantów strumienia, a zatem dwa razy więcej wirów, niż jest nośników na jednostkę powierzchni. Przez analogię do stanu $1/3$, każdy elektron przyłącza teraz do siebie dwa wiry, co utrzymuje inne elektrony na dystans (rys. 17). Jednakże przyłączenie parzystej liczby kwantów strumienia do każdego z elektronów czyni z tych obiektów złożone fermiony, a nie bozony. To drastycznie zmienia ich zachowanie w porównaniu do stanu $\nu = 1/3$ i równoważnych współczynników wypełnienia.



Rys. 17. Schematyczne przedstawienie stanu kwantowego przy wypełnieniu poziomu Landaua $\nu = 1/2$. Dwa wiry są związane na każdym elektronie, co jest równoważne dołączeniu dwu kwantów strumienia. Niewielkie przesunięcie drugiego wiru ma reprezentować tworzenie się bardzo małych, leżących w płaszczyźnie dipoli.

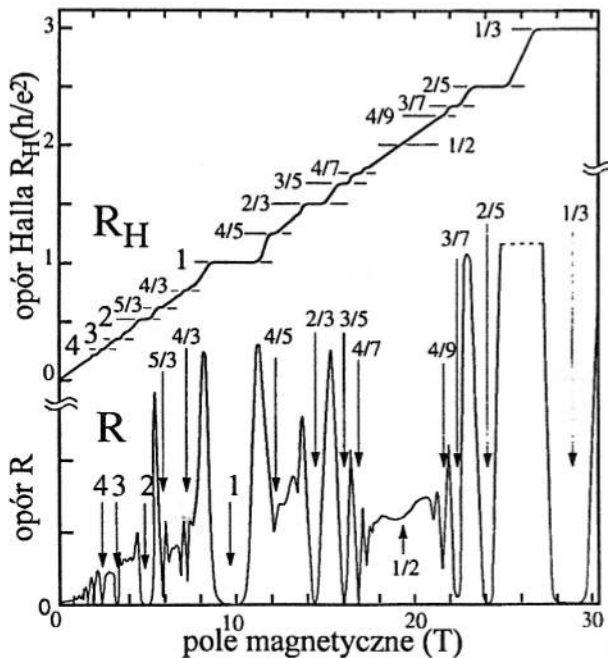
Podobnie jak dla $\nu = 1/3$, również dla $\nu = 1/2$ pole magnetyczne wbudowuje się całkowicie do wnętrza cząstek i pozornie są one umieszczone w polu zerowym. Jednakże jako fermionom nie wolno im kondensować w stanie o najniższej energii. Zamiast tego wypełniają kolejno najniższe leżące stany energetyczne aż do osiągnięcia

maksimum, przy którym wszystkie cząstki złożone obsadzają stany poniżej. Proces jest analogiczny do obsadzania stanów przez elektrony dla $B = 0$. A zatem z punktu widzenia złożonych fermionów stan $\nu = 1/2$ jest równoważny sytuacji elektronów w zerowym polu. Mimo ogromnego zewnętrznego pola magnetycznego, przy wypełnionym do połowy poziomie Landaua złożone fermiony poruszają się podobnie jak elektrony w polu zerowym. Obserwowano to bezpośrednio w doświadczeniu. Dołączenie kwantów strumienia tak przetransformowało byłe elektrony, że poruszają się one po torach prostoliniowych w silnym polu magnetycznym, gdy tymczasem normalne elektrony zakreślałyby ciasne orbity. Masa fermionów złożonych, zwykle uważana za własność cząstki, nie ma związku z masą elektronu tworzącego. Zamiast tego, masa zależy od pola magnetycznego i tylko od niego. W istocie masa ta zamiast być własnością indywidualnej cząstki ma czysto wielociałowy charakter, gdyż pochodzi wyłącznie od oddziaływań. Jest to jeszcze jeden zaskakujący wynik oddziaływań elektron-elektron w silnych polach magnetycznych. Nieobecność kondensacji i brak przerwy energetycznej uniemożliwia kwantowanie oporu Halla dla stanu $\nu = 1/2$. W tym miejscu linia efektu Halla jest gładka, zupełnie jak dla elektronów wokół $B = 0$ (patrz rys. 18).

Różnica pomiędzy $\nu = 1/3$ a $\nu = 1/2$ jest uderzająca. W jednym przypadku mamy do czynienia z kondensatem Bosego wykazującym kwantowy efekt Halla i dającym wkład do ułamkowo naładowanych cząstek. W drugim, mimo ogromnych pól magnetycznych i cząstek, których masa pochodzi od oddziaływań, mamy do czynienia z morzem Fermiego. Jeden kwant strumienia na elektron powoduje wszystkie te różnice.

Istnieje wiele fascynujących, otwartych pytań związanych ze stanem $\nu = 1/2$, na przykład: jak zmienia się masa złożonych fermionów ze zmianą ich energii i jaka jest mikroskopowa struktura cząstek, a także, jak spin elektronu (który pomijaliśmy w trakcie tego wykładu) wpływa na tworzenie się cząstek złożonych. Wyłania się piękny obraz, na którym złożone fermiony wyglądają jak małe dipole. Podczas gdy jeden z wirów jest umieszczony bezpośrednio na elektronie (zasada Pauliego), drugi jest nieco przesunięty względem tego idealnego centrum, czyniąc z całego obiektu dwu-

wymiarowy elektryczny dipol. Jest to bardzo obiecujące dla dalszych odkryć i rozważań teoretycznych.



Rys. 18. Ułamkowy kwantowy efekt Halla, tak jak jest mierzony dzisiaj w modulacyjnie domieszkowanej strukturze GaAs/AlGaAs z gazem elektronowym o ultrawysokiej ruchliwości. Widocznych jest wiele ułamków. Najwyraźniejsza sekwencja, $\nu = p/(2p \pm 1)$, zbiega do $\nu = 1/2$ i jest omówiona w tekście.

6.9. Te wszystkie inne stany ułamkowe

Kondensacja Bosego złożonych bozonów, składających się z nieparzystej liczby kwantów strumienia, wyjaśnia pojawianie się kwantowego efektu Halla przy współczynnikach wypełnienia poziomu Landaua bliskich ułamkom podstawowym $\nu = i \pm 1/q$ ze skwantowanym oporem Halla $R_H = h/(\nu e^2)$ i jednocześnie głębokimi minimumi towarzyszącego mu magnetooporu R . Jednakże w ciągu ostatnich lat odkryto całe mnóstwo innych stanów ułamkowych. Rysunek 18 przedstawia jeden z najlepszych dostępnych dzisiaj zbiorów danych, otrzymany dla próbki o ruchliwości wielu milionów cm^2/Vs . Jakie jest pochodzenie wszystkich tych stanów? Model złożonych fermionów oferuje wyjątkowo przejrzysty obraz sytuacji. Przedyskutujemy go dla wyraźnej sekwencji ułamków $2/5, 3/7, 4/9, 5/11, \dots$ i $2/3, 3/5, 4/7, 5/9, \dots$ (tzn. $\nu = p/(2p \pm 1)$, $p = 2, 3, 4, \dots$) wokół $\nu = 1/2$.

Przy połówkowym wypełnieniu układ elektronowy przekształca się w złożone fermiony zbudowane z elektronów niosących po dwa kwanty strumienia. Zewnętrzne pole magnetyczne zostaje wbudowane do wnętrza cząstek, które zajmują płaszczyznę dwuwymiarową, pozornie wolną od pola. Ponieważ są fermionami, zbiór cząstek złożonych przypomina zbiór elektronów o tej samej gęstości w polu $B = 0$. Co się dzieje, gdy pole zaczyna się różnić od zera? W przypadku elektronów ich ruch staje się skwantowany na elektronowych orbitach Landaua. Elektrony wypełniają swoje poziomy Landaua, napotykają elektronowe przerwy energetyczne i wykazują dobrze znany całkowity kwantowy efekt Halla. Złożone fermiony w okolicach $\nu = 1/2$ podążają tą samą drogą. Gdy pole magnetyczne przestaje ściśle spełniać warunek $\nu = 1/2$, ich ruch staje się skwantowany na „złożonofermionowych” orbitach Landaua. Zaczynają wypełniać swoje „złożonofermionowe” poziomy Landaua, napotykają „złożonofermionowe” przerwy energetyczne i wykazują całkowity kwantowy efekt Halla. Jednakże jest to efekt całkowity nie dla elektronów, ale dla złożonych fermionów. Zachodzi on dokładnie dla $\nu = p/(2p \pm 1)$, co odpowiada występowaniu charakterystycznych własności efektu ułamkowego. W istocie, oscylujący przebieg magnetooporu R w efekcie ułamkowym w okolicy $\nu = 1/2$ mocno przypomina oscylacje R w pobliżu $B = 0$ i jeśli przesuniemy je od $B = 0$ do $\nu = 1/2$, to dane zaczęłyby się pokrywać. Jest to z wielu względów godne uwagi.

Złożone fermiony są w stanie „przetrwąć” dodatkowe (efektywne) pole magnetyczne (odstęstwa od warunku $\nu = 1/2$) i orbity tych cząstek złożonych odtwarzają orbity elektronowe dla odpowiednio słabszych pól z otoczenia $B = 0$. Złożone fermiony są nadal „dobrymi” cząstkami. Skomplikowany problem wieloelektronowy dla pewnych wymiernych współczynników wypełnienia został w ten sposób zredukowany do problemu jednocząstkowego i całkowitych współczynników wypełnienia „złożonofermionowych” poziomów Landaua w efektywnym polu magnetycznym. Nawet zmiany rozmiaru przerw energetycznych między stanami ułamkowego efektu Halla można traktować jako wynikające z drabiny poziomów Landaua dla złożonych fermionów. Jeszcze bardziej uderzające jest to, że znakomitą

kwantową funkcję falową dla stanów ułamkowych można po prostu otrzymać z elektronowych poziomów Landaua. Dlatego też ułamkowy kwantowy efekt Halla dla elektronów można traktować jako całkowity kwantowy efekt Halla dla złożonych fermionów.

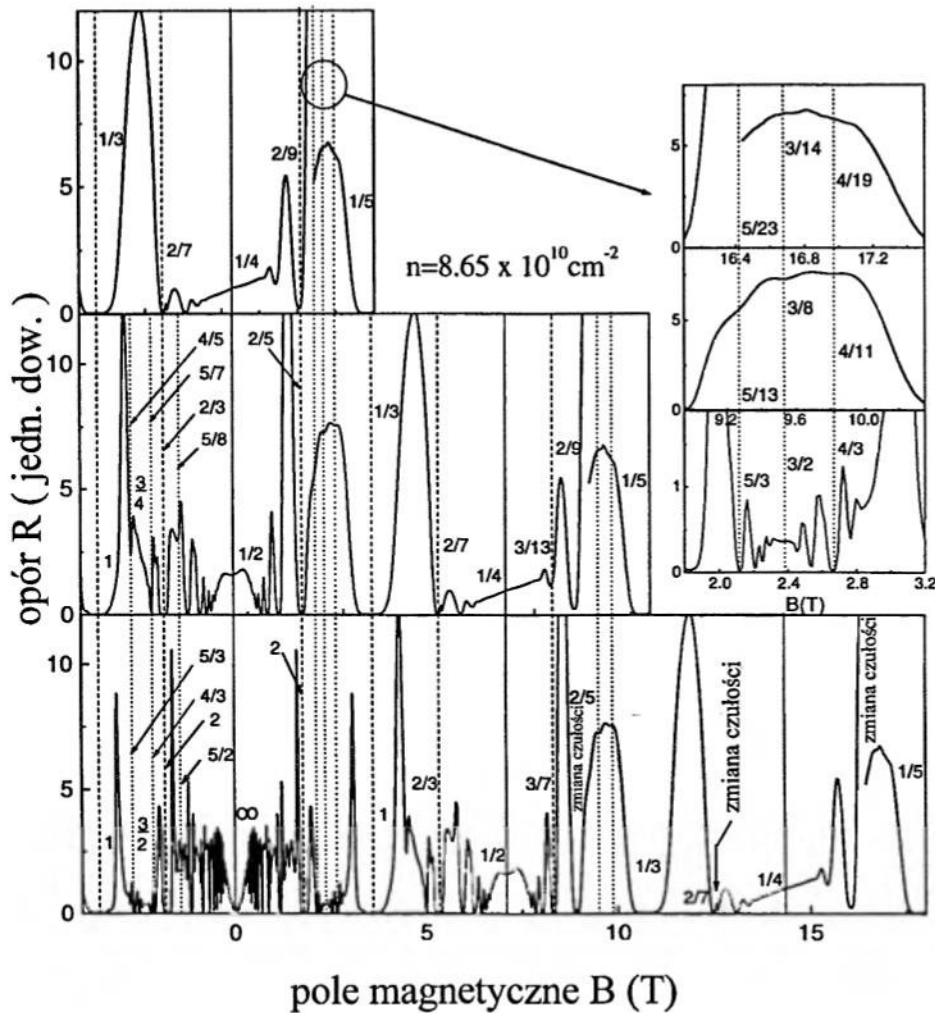
Model złożonych fermionów odniósł wyjątkowy sukces, jeśli chodzi o przewyższanie trudności, jakie napotykamy badając różnorodność stanów ułamkowych. Model ten może być dogodnym punktem wyjścia nawet dla stanu $1/3$. Ruch złożonych fermionów, które pojawiły się przy $\nu = 1/2$, dla $\nu = 1/3$ jest już skwantowany i cząstki obsadzają najniższy z poziomów Landaua. Dlatego stan ułamkowy $\nu = 1/3$ jest równoważny stanowi całkowitemu $i = 1$ dla utworzonych przy $\nu = 1/2$ złożonych fermionów. Analogicznie jak dla elektronów, przypadający na każdy ze złożonych fermionów kwant strumienia wytwarza wir w „złożonofermionowej” cieczy i aby spełnić zasadę Pauliego, wir ten zlokalizowany jest dokładnie nad kwazicząstką. Każdy z elektronów, który aby stać się fermionem złożonym już wcześniej miał dwa kwanty strumienia, dostaje teraz trzeci kwant, dokładnie tyle, ile potrzeba, aby utworzyć stan $\nu = 1/3$. Kondensacja Bosego złożonych bozonów jawi się teraz jako kwantyzacja landauowska złożonych fermionów. W reżimie ułamkowego kwantowego efektu Halla są to dwie strony tego samego medalu.

Czy przy tych wszystkich podobieństwach efekt ułamkowy jest tym samym, czym efekt całkowity? Z pewnością nie. Z jednego punktu widzenia ułamkowy efekt Halla jest wynikiem złożonych zachowań (oddziaływania wielocząstkowe) prostych cząstek (elektronów) w obecności prawdziwego, zewnętrznego pola magnetycznego. Z drugiej strony są to proste zachowania (kwantyzacja landauowska) złożonych, wieloskładnikowych cząstek (złożonych fermionów) w obecności efektywnego pola magnetycznego. Ten obraz ułamkowego kwantowego efektu Halla powstawał w ciągu ostatniej dekady. Jego wyjątkowa prostota jest w równym stopniu pięknym dziedzictwem natury, co świadectwem zdolności i intuicji wielu teoretyków, którzy kształtowali ten obraz przez lata. Każdy model ułamkowego efektu Halla, który możemy zbudować, wywodzi się ze wspianego kwantowego tańca elektronów w polu magnetycznym.

Złożone fermiony są „wszędzie”. Wszystkie stany ułamkowe o parzystym mianowniku są kandydatami do ich utworzenia. Każdy z tych stanów może wytwarzać swoje własne „złożonofermionowe” poziomy Landaua, co prowadzi do całego arsenału stanów ułamkowych. Inne stany tego typu są już widoczne na rys. 18. Jeszcze więcej pojawia się ich na rys. 19. Stany ułamkowe pochodzą od $1/2$, $3/2$, $1/4$, $3/4$, $5/4$ i być może od $3/8$ oraz $3/14$. To wydaje się nie mieć końca, chociaż ostatecznie najdelikatniejsze z nich będą zniszczone przez resztkowe fluktuacje potencjału lub przez utworzenie elektronowego lub „złożonofermionowego” kryształu. Jeszcze lepsze układy dwuwymiarowe powinny zerwać zasłonę skrywającą te delikatne stany ułamkowe. Ich zwykła detekcja i klasyfikacja może się wydawać trudna do wyobrażenia. Jednakże, jak do tej pory, gdy tylko zaczynaliśmy kopać głębiej w bogatych złożach układów dwuwymiarowych i pół magnetycznych, czekała nas nagroda w postaci nowych niespodzianek. Jedna z nich właśnie się pojawiła.

6.10. Dziwny stan dla $\nu = 5/2$

Elektrony z dwoma dołączonymi kwantami strumienia są fermionami. Zapełniają po kolei najniższe stany energetyczne i są punktem wyjścia dla wielokrotnych sekwencji stanów ułamkowych. Same jednak nie mogą wykazywać ułamkowego kwantowego efektu Halla. Mimo to przy $\nu = 5/2$ efekt występuje. Stan ten ma wszystkie charakterystyczne cechy ułamkowego kwantowego efektu Halla, włączając w to obecność przerwy energetycznej i skwantowanego oporu Halla, mimo że klasyfikujemy go jako stan o parzystym mianowniku (rys. 20). Występuje on przy obsadzonym wyższym poziomie Landaua ($5/2 = 2 + 1/2$), ale ten fakt nie powinien zmieniać prostej argumentacji. Poziom Landaua poniżej jest odległy energetycznie i można go traktować jako nieaktywny. Dlatego stan $5/2$ jest w rzeczywistości stanem $1/2$ dla kolejnego, wyższego poziomu Landaua i podobnie jak stan $1/2$ powinien się zachowywać – tak jednak nie jest. Został odkryty ponad dziesięć lat temu, ale jego prawdziwe pochodzenie pozostaje tajemnicze. Wraz z nadejściem modelu złożonych fermionów stan $\nu = 5/2$ został ostatnio ponownie przeanalizowany i pojawiła się możliwość dająca dużo do myślenia.



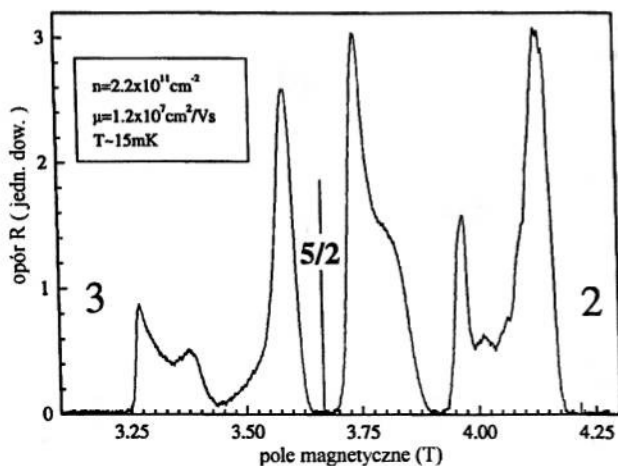
Rys. 19. Na tym rysunku są widoczne wielokrotne sekwencje stanów ułamkowych. Dla przejrzystości pokazano tylko dane dotyczące magnetooporu. W środkowej i górnej części dane przesunięto w lewo o wartości pola magnetycznego dla odpowiednio $\nu = 1/2$ i $\nu = 1/4$. Linie pionowe uwidaczniają samopodobieństwo występujące pomiędzy różnymi sekwencjami stanów ułamkowych. Wstawka po prawej pokazuje w powiększeniu tworzenie się wciąż nowych stanów ułamkowych kwantowego efektu Halla.

Rzeczywiście, na skutek oddziaływań wielocząstkowych nośniki wypełniające do połowy następny poziom Landaua wiążą dwa kwanty strumienia – dokładnie tak, jak ich kuzyni dla $\nu = 1/2$. Tworzą się złożone fermiony, które po kolei zapełniają stany energetyczne, jak na rys. 17. Jednakże fizyka wielu ciał zmusza te cząstki do zajęcia jeszcze niższego poziomu energetycznego. W odległej analogii do tworzenia się par Coopera w normalnych układach elektronowych i ich dalszej kondensacji do stanu nadprzewodzącego z przerwą energetyczną, również złożone fermiony tworzą nowe „złożonofermionowe” pary, które kondensują do osobliwego, wielocząstkowego stanu podstawowego. Pojawiająca się przerwa energetyczna dostarcza podstawowego skład-

nika potrzebnego do obserwacji charakterystycznych cech kwantowego efektu Halla. Jest to niezwykle fascynujący scenariusz, ponieważ sugeruje on, że decydującą rolę mogą odgrywać korelacje elektronowe wyższego rzędu, inne niż występujące w modelu fermionów i bozonów złożonych. Oczekuje się również, że własności tworzących się cząstek będą bardzo niezwykle (nieabelowość).

Obecnie nie jest jasne, czy stan 5/2 ma rzeczywiście tak skomplikowany rodowód, czy też wystarczy jakieś inne, bardziej przyziemne wyjaśnienie. Będziemy musieli poczekać na przyszłe, bardziej wyrafinowane eksperymenty, które na to odpowiedzą. Są duże szanse, że jeśli nie stan 5/2, to jakiś inny, jeszcze czekający na to, by ujrzeć światło dzienne, stan ułamkowy może mieć tak za-

wile pochodzenie. Równie dobrze mogą być jeszcze inne stany, których teraz nie możemy sobie wyobrazić.



Rys. 20. Ułamkowy kwantowy efekt Halla dla $\nu = 5/2$. Stan dla takiego ułamka o parzystym mianowniku nie powinien być dozwolony. Jego pochodzenie pozostaje niejasne. Jedną z ekscytujących możliwości jest tworzenie się par złożonych fermionów. Te niepublikowane dane uzyskali J.-S. Xia i Wei Pan z NHMFL (National High Magnetic Field Laboratory – J.W.) w Gainesville na Florydzie.

7. Wnioski

Dwuwymiarowy gaz elektronowy w silnych polach magnetycznych odkrywa przed nami zupełnie nową fizykę wielu cząstek. Ograniczone do ruchu po płaszczyźnie i wystawione na działanie pola magnetycznego dwuwymiarowe elektrony wykazują ogromnie zróżnicowane widmo nowych, fascynujących własności: całkowicie nieoczekiwane nowe stany elektronowe z ułamkowymi liczbami kwantowymi, dołączanie kwantów strumienia, nowe cząstki podlegające statystyce albo Bosego, albo Fermiego, znikanie niezmiernie silnych pól magnetycznych, masy pochodzące wyłącznie od oddziaływań elektron-elektron i być może nowy, dziwny proces łączenia się cząstek w pary. Są to najważniejsze z obserwacji i wniosków. I co najbardziej zdumiewające, dwuwymiarowe elektrony tworzą dziwaczne, ułamkowo naładowane cząstki, same nie dzieląc się przy tym na części.

Są tylko elektronami, chociaż jest ich wiele. Rzeczywiście: „Więcej znaczy inaczej”.

8. Epilog

Jestem bardzo zaszczyczony wybraniem do współudziału w wyróżnieniu o wręcz przerażającej wielkości i chciałbym wyrazić wdzięczność za otrzymanie 1/3 tej bardzo specjalnej nagrody. Niestety, jeszcze bardziej zadowalająca 1/4 pozostaje niedozwolona. Wszystko to przypisuję wielkiej przychylności losu, która towarzyszyła mi w życiu, oraz naprawdę wybitnym kolegom, z którymi miałem szczęście pracować.

I jak to często bywa, nagroda ta zostaje przyznana kilku szczęściarzom, ale tak naprawdę honoruje ogromny postęp, jaki przez lata dokonał się w fizyce wielu cząstek – w szczególności w fizyce układów dwuwymiarowych – i wielką grupę fizyków doświadczalnych i teoretyków, którzy ten postęp wywołali. Dlatego uważam, że zaszczyt tej nagrody dzielę z moimi licznymi kolegami i przyjaciółmi na całym świecie. Wszystkim im winien jestem ogromną wdzięczność.

Jeśli chodzi o nasz własny wkład, to prawdziwymi bohaterami zawodu pozostają wytwórcy materiałów. Art Gossard i Willy Wiegmann wykonali najważniejszą próbkę, w której odkryto ułamkowy kwantowy efekt Halla, i wiele więcej próbek już potem. W ciągu ostatnich dziesięciu lat Loren Pfeiffer i Ken West wzniesli sztukę i naukę wzrostu struktur dwuwymiarowych na niespotykane wyżyny. Próbkę, w których dokonano większości nowych, ekscytujących odkryć związanych z ułamkowym efektem Halla, to były ich próbki. Czarodziejstwo Kirka Baldwina w superczystych laboratoriach wzrostu kryształów i jego opieka nad tysiącami struktur stworzyły podstawę dla większości naszych doświadczeń. Al Cho, John English, Jim Hwang, Mansour Shayegan, Charles Tu, Won Tsang i Gunther Weiman również dostarczyli nieocenionej pomocy materiałowej.

Nie byłoby mnie tutaj bez wyjątkowych zdolności eksperymentalnych i bez głębokiej fizycznej intuicji stażystów po doktoracie, studentów i współpracowników z Laboratoriów Bella, Uniwersytetu Princeton i innych instytucji. Należeli do nich Jim Allen, Ray Aschoori, Edwin Batke, Peter Berglund, Greg Boebinger, Albert Chang, Rui Du, Jim Eisenstein, Erich Gornik, Taisto Haavasoja, Rick Hall, Hong-Wen Jiang, Woowon Kang, Mikko Paalanen, Wei Pan, Aron Pinczuk, Zack Schlesinger, Joe Spector, Werner Wegschei-

der, Claude Weisbuch, Bob Willett, Jian-Sheng Xia, Andrew Yeh i Amir Yacoby.

Bez moich przyjaciół i kolegów teoretyków, cierpliwie uczących mnie fizyki ułamkowego kwantowego efektu Halla, nie byłbym w stanie docenić niczego, co zostało odkryte w tej dziedzinie przez innych eksperymentatorów. Szczególnie cennych wyjaśnień udzielili mi: Nick d'Ambrumenil, Steve Girvin, Duncan Haldane, Bert Halperin, Song He, Jainendra Jain, Steve Kivelson, Bob Laughlin, Dung-Hai Lee, Peter Littlewood, Allan MacDonald, Rudolf Morf, Phil Platzman, Nick Read, Ed Rezayi, Ramamurti Shankar i Steve Simon. Są również inni, zbyt liczni, aby ich tu wymienić.

Moim nowym kolegom na Uniwersytecie Columbia dziękuję za serdeczne przyjęcie do swojego grona. Mojej żonie, Dominique, dziękuję za nieustające wsparcie i pogodę ducha. Dziękuję również mojemu producentowi.

Na koniec, chciałbym podziękować długoletniemu współpracownikowi i przyjacielowi Danowi Tsui, w charakterystyczny dla niego, lakoniczny sposób: „Dziękuję za zaproszenie do tańca”.

Tłumaczył Jerzy Wróbel
Instytut Fizyki PAN
Warszawa

Literatura

Na temat różnych zagadnień, które poruszyłem w tym wykładzie, napisano wiele monografii, a w nich cytowane są liczne prace oryginalne. Oto poniżej próbka tych książek.

Fizyka krzemowych MOSFET-ów:

- T. Ando, A.B. Fowler, F. Stern, „Electronic Properties

of Two-Dimensional Systems”, *Rev. Mod. Phys.* **54**, 437 (1983).

Epitaksja z wiązek molekularnych:

- *Molecular Beam Epitaxy*, red. A. Cho (AIP Press, Woodbury, NY 1994).
- M.A. Herman, H. Sitter, *Molecular Beam Epitaxy: Fundamentals and Current Status* (Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1998).

Domieszkowanie modulacyjne:

- E.F. Schubert, *Doping in III-V Semiconductors* (Cambridge University Press, Cambridge 1993).

Efekt Halla:

- H. Weiss, *Structure and Application of Galvanomagnetic Devices* (Pergamon Press, Oxford 1969).

Całkowity kwantowy efekt Halla:

- *The Quantum Hall Effect*, red. R.E. Prange, S.M. Girvin, wyd. 2 (Springer, New York 1990).
- T. Chakraborty, P. Pietilainen, *The Quantum Hall Effects*, Springer Series in Solid State Sciences, nr 85 (Springer, New York 1995).
- *Quantum Hall Effect: A Perspective*, red. A.H. MacDonald (Kluwer Academic Publications, Boston/Dordrecht 1990).

Ułamkowy kwantowy efekt Halla i fermiony złożone:

- *The Quantum Hall Effect*, red. R.E. Prange, S.M. Girvin, wyd. 2 (Springer, New York 1990).
- T. Chakraborty, P. Pietilainen, *The Quantum Hall Effects*, Springer Series in Solid State Sciences, nr 85 (Springer, New York 1995).
- *Quantum Hall Effect: A Perspective*, red. A.H. MacDonald (Kluwer Academic Publications, Boston/Dordrecht 1990).
- *Perspectives in Quantum Hall Effects*, red. S. Das Sarma, A. Pinczuk (Wiley, New York 1997).
- *Composite Fermions: A Unified View of the Quantum Hall Regime*, red. O. Heinonen (World Scientific, Singapore 1998).

Granty KBN z fizyki XVI i XVII konkurs

Grants in physics of the State Research Committee

Poniżej przedstawiamy listę projektów badawczych (grantów) z fizyki finansowanych przez Komitet Badań Naukowych poczynając od stycznia 1999 r. (XVI konkurs) i od czerwca 1999 r. (XVII konkurs). Ogólną informację o grantach KBN-u i wynikach I konkursu przedstawiliśmy w *Postęпах Fizyki* **44**, 131 (1993), a wyniki kolejnych konkursów są podane w *Postęпах Fizyki* **45**, 59 (1994), **45**, 365 (1994), **46**, 55 (1995), **47**, 263 (1996), **48**, 43 (1997), **49**, 42 (1998) oraz **50**, 85 (1999). Wiele informacji o działalności KBN-u zawierają także artykuły A.Z. Hrynkiwicz: *Postępy Fizyki* **46**, 259 (1995) oraz **48**, 565 (1997).

Na XVI konkurs wpłynęło 139 wniosków: 114 „zwykłych”, 8 od „młodych badaczy” (w spisie: MB) i 17 „promotorskich” (w spisie: P). Przyznano finansowanie 54 wniosków „zwykłych”, 4 „młodych badaczy” i 16 „promotorskich”. Oceny projektów dokonał zespół w składzie: profesorowie Jacek Kossut (IF PAN, przewodniczący), Jerzy Czerwonko (PWR), Krzysztof Ernst (UW), Andrzej Graja (IFM PAN), Jerzy Kijowski (UW), Andrzej Kołodziejczyk (AGH), Stanisław Łęgowski (UMK), Krzysztof Parliński (IFJ), Krzysztof Pomorski (UMCS), dr hab. Ewa Rondio (IPJ), profesorowie Józef Spałek (UJ), Marek Zrałek (UŚI) i Olgierd Żogał (INTiBS PAN).

Na XVII konkurs wpłynęło 171 wniosków: 134 „zwykłych”, 7 od „młodych badaczy” i 30 „promotorskich”. Przyznano finansowanie 28 wniosków „zwykłych”, 3 „młodych badaczy” i 18 „promotorskich”. Oceny projektów dokonał zespół w składzie: profesorowie Bożena Hilczer (IFM PAN, przewodnicząca), Stanisław Dembiński (UMK), Krzysztof Ernst (UW), Marek Jeżabek (IFJ), Jerzy Langer (IF PAN), Władysław Adam Majewski (UG), Roman Micnas (UAM), Andrzej Michał Oleś (UJ), Krzysztof Pomorski (UMCS), Jerzy Przystawa (UWr), dr hab. Ewa Rondio (IPJ) i prof. Olgierd Żogał (INTiBS PAN).

Łącznie w 17 dotychczasowych konkursach w Sekcji Fizyki zawarto 1401 umów, czyli średnio w każdym konkursie finansowano ponad 80 projektów.

Lista projektów została opracowana we współpracy z Panią mgr inż. Martą Minorską z Sekcji Fizyki KBN.

Redakcja

XVI konkurs

Kierownik projektu

Tytuł projektu

Liczba wykonawców; czas
(w miesiącach); koszt (w zł)

METODY MATEMATYCZNE, TEORIA POŁA FIZYKA STATYSTYCZNA, ASTROFIZYKA

prof. Władysław Adam Majewski (IFTiA UG)

Kwantowe układy dynamiczne; konstrukcje konkretnych modeli i ich własności

7 36 150 000

dr hab. Piotr Bizoń (IF UJ)

Globalna dynamika układów grawitujących 4 36 86 800

dr hab. Witold Kondracki (IM PAN)

Geometryczne aspekty nieliniowych teorii pola 5 36 84 000

dr Andrzej Drzewiński (INTiBS PAN)

Zastosowanie renormalizacji White'a do całościowego opisu zjawisk krytycznych i przejść fazowych w układach mezoskopowych 3 35 80 000

dr hab. Piotr Pełowski (IF UMK)

Klasyczny chaos a własności układów kwantowych 5 30 78 000

prof. Piotr Kosiński (KFT UŁ)			
Klasyczne i kwantowe modele rozwiązywalne i kwaziröwiązywalne	5	23	69 000
prof. Krzysztof Wódkiewicz (IFT UW)			
Diagnostyka klasycznych i kwantowych własności interferencyjnych promieniowania elektromagnetycznego	2	24	44 000
prof. Piotr Garbaczewski (IFT UW)			
Modelowanie losowe nieliniowych układów dynamicznych	2	24	41 000
prof. Bogdan Cichocki (IFT UW)			
Dynamiczne funkcje rozproszeniowe dla układów oddziałujących cząstek Browna	2	24	36 000
prof. Andrzej Fuliński (IF UJ)			
Efekty współdziałania procesów deterministycznych i losowych	1	24	32 800
dr hab. Jan Jacek Żebrowski (IF PW)			
Dynamika symboliczna i lokalne miary uporządkowania wybranych układów dynamicznych (P)	3	24	30 000
dr Mariusz Dąbrowski (KF USz)			
Aspekty kosmologiczne teorii superstrun i M-teorii	1	36	29 700
dr hab. Ziemowit Popowicz (IFT UW)			
Całkowalne uogólnienie równania Kortewega-de Vriesa	1	24	21 000
prof. Jarosław Piasecki (IFT UW)			
Stany stacjonarne i prawa podobieństwa: efekty zderzeń nieelastycznych	1	24	17 000
prof. Tadeusz Paszkiewicz (IFT UW)			
Badanie akustycznych własności kryształów w pobliżu granicy przejścia fazowego półprzewodnik-metal (P)	2	12	15 000
mgr Daniel Wójcik (CFT PAN)			
Niskowymiarowe oddziałujące układy dynamiczne (MB)	1	12	10 000
dr Wojciech Florek (IF UAM)			
Ruch ładunków elektrycznych w potencjale periodycznym i zewnętrznym polu magnetycznym	2	12	9995
dr Grzegorz Musiał (IF UAM)			
Przejścia fazowe isingowskie w trójwymiarowym modelu Ashkina-Tellera	4	12	9960

FIZYKA POŚREDNICH I WYSOKICH ENERGII

dr hab. Agnieszka Zalewska (IFJ)			
Testowanie Modelu Standardowego i jego supersymetrycznych rozszerzeń w zderzeniach e^+e^- przy najwyższych energiach	10	24	180 000
prof. Stefan Pokorski (IFT UW)			
Badanie oddziaływań od skali Plancka do skali elektrosłabej	11	24	158 000
prof. Roman Hołyński (IFJ)			
Poszukiwanie plazmy kwarkowo-gluonowej: eksperyment PHOBOS przy akceleratorze RHIC	17	36	150 000
dr hab. Jan Figiel (IFJ)			
Eksperyment ZEUS: analiza fizyczna, obsługa obecnego i budowa nowego monitora świetlności	15	24	124 440

dr hab. Wojciech Dominik (IFD UW)			
Optymalizacja detektorów gazowych o równoległych płaskich elektrodach wysokoenergetycznych do rejestracji promieniowania jonizującego o dużym natężeniu	7	24	100 000
prof. Danuta Kisielewska (WFiTJ AGH)			
Eksperyment ZEUS: analiza fizyczna, system gazowy kalorymetru uzupełniającego BAC oraz projekt modernizacji monitora świetlności	12	24	100 000
prof. Ewa Skrzypczak (IFD UW)			
Zderzenia jąder i protonów o energiach 30–160 GeV/n z jądrami; eksperyment NA49 w CERN	12	18	93 927
dr hab. Danuta Kiełczewska (IFD UW)			
Badanie oscylacji neutrin oraz poszukiwanie rozpadu protonu w detektorze Super-Kamiokande	2	24	65 000
prof. Jerzy Szwed (Inst. Inf. UJ)			
Funkcje struktury leptonów	6	24	55 000
mgr Bożena Boimska (IPJ)			
Badanie korelacji pomiędzy charakterystykami kinematycznymi, podłużnymi i poprzecznymi, cząstek naładowanych (p, π, K) produkowanych w zderzeniach $p-p$ i $p-Pb$ przy pędzie pocisku 158 GeV/c (MB)	1	12	10 000

FIZYKA JĄDROWA I FIZYKA PLAZMY

prof. Jan Styczeń (IFJ)			
Badanie współistnienia kształtów w jądrach egzotycznych	9	36	130 000
prof. Wiesław Kamiński (IF UMCS)			
Jądrowe procesy egzotyczne	6	36	110 000
dr Adam Maj (IFJ)			
Powstawanie i rozpad jądra złożonego badane przy pomocy gigantycznego rezonansu dipolowego	6	24	100 000
prof. Stanisław Drożdż (IFJ)			
Model powłokowy ze sprzężeniem do kontinuum: fizyka egzotycznych procesów jądrowych	4	36	79 000
prof. Jerzy Jastrzębski (ŚLCJ UW)			
Promieniowanie X atomów antyprotonowych – natężenia i efekty izotopowe (P)	2	24	25 000
prof. Jerzy Jastrzębski (ŚLCJ UW)			
Efekty silnego oddziaływania i rezonansu E2 w ciężkich atomach antyprotonowych (P)	2	24	25 000
dr hab. Krystyna Siwek-Wilczyńska (IFD UW)			
Badanie produkcji mezonów dziwnych w zderzeniach $^{96}\text{Ru}+^{96}\text{Ru}$ oraz $^{96}\text{Ru}+^{96}\text{Zr}$ przy energii wiązki 1,69 GeV na nukleon (P)	2	12	12 500

FIZYKA ATOMOWA I MOLEKULARNA OPTYKA, AKUSTYKA

dr hab. inż. Henryk Fiedorowicz (IO WAT)			
Badanie akcji laserowej w rentgenowskim zakresie widma zachodzącej w kanale			

plazmowym wytwarzanym w wyniku naświetlania impulsowej tarczy gazowej promieniowaniem laserowym	10	30	150 000
prof. Wojciech Gawlik (IF UJ) Zimne atomy w pułapce magnetoptycznej	10	24	150 000
prof. Karol Musioł (IF UJ) Mieszanie czterech fal w spektroskopii atomowej i spektroskopii plazmy.	8	24	150 000
dr hab. Włodzimierz Jastrzębski (IF PAN) Wyznaczanie potencjałów oddziaływania atomów metali alkalicznych związanych w cząsteczkę dwuatomową	9	30	125 000
dr Jerzy Pełka (IF PAN) Badania struktur cienkowarstwowych z zastosowaniem zjawisk rentgenowskiej optyki powierzchniowej i komplementarnych metod nierentgenowskich	19	36	100 000
dr Marek Polasik (WCh UMK) Teoretyczne badania widm rentgenowskich oraz ich zastosowania do analizy jonizacji w procesach zderzeniowych i wyznaczania zmiany konfiguracji atomów d-elektronowych pod wpływem otoczenia chemicznego	9	36	90 000
dr hab. Ryszard Horodecki (IFTiA UG) Kwantowe splątanie i kwantowa teoria informacji	3	36	60 000
dr hab. Lidia Smentek (IF UMK) Teoretyczny opis spektroskopowych własności jonów ziem rzadkich w kryształach (II)	2	36	50 000
dr Jacek Semaniak (IF WSP Kielce) Badanie rekombinacji dysocjatywnej jonów molekularnych z elektronami swobodnymi w pierścieniach akumulacyjnych	1	18	23 000

METALE, MAGNETYKI, NADPRZEWODNIKI

prof. Henryk Puzkarski (IF UAM) Efekty powierzchniowe i rezonansowe w widmach magnonowych nowych materiałów magnetycznych (wielowarstw, supersieci, ziaren i kompozytów)	10	36	150 000
dr hab. Janusz Wolny (WFiTJ AGH) Struktura i analiza dyfrakcyjna układów aperiodycznych	7	36	119 200
dr Krzysztof Szymański (IF UwB) Badanie własności magnetycznych układów nieuporządkowanych technikami spolaryzowanego źródła mössbauerowskiego, magnetometrii, transportu i rozpraszania komptonowskiego	14	24	105 000
dr hab. Ewa Talik (IF UŚI) Hodowla i własności monokryształów R_3T , RMn_2 , RMn_4Al_8 oraz $RTAl$ ($R = Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er$; $T =$ metal przejściowy 3d, 4d, 5d)	6	36	100 000
dr hab. Grażyna Sznajd (INTiBS PAN) Rekonstrukcja gęstości z projekcji liniowych i powierzchniowych: teoria i zastosowania	5	36	80 000

prof. Stanisław Robaszkiewicz (IF UAM) Własności elektromagnetyczne i termodynamiczne modeli nadprzewodników z lokalnym parowaniem elektronowym (P)	2	18	22 000
dr hab. Grzegorz Kamieniarz (IF UAM) Symulacje numeryczne własności fizycznych układów wykazujących przejście spinowe Peierlsa na przykładzie $CuGeO_3$ (P)	5	24	20 000
dr hab. Jerzy Konior (IF UJ) Badanie oddziaływań efektywnych generowanych przez sprzężenie elektron-fonon w nadprzewodnikach wysokotemperaturowych (P)	2	9	10 000
dr hab. Kazimierz Łątka (IF UJ) Badanie własności krystalicznych i magnetycznych związków $RTSn$; $R = La-Gd$, $T = Ag, Au$ (P)	2	9	10 000
mgr Krzysztof Wiśniewski (IF UMK) Badania absorpcji w stanie wzbudzonym w dielektrykach domieszkowanych jonami metali przejściowych i ziem rzadkich (MB)	1	12	10 000
dr Jacek Prokop (IFJ) Gigantyczny magnetoopór w modelowym układzie cienkowarstwowym	3	12	9950

KRYSTAŁY MOLEKULARNE I POLIMERY, CIECZE

prof. Bożena Hilczer (IFM PAN) Protonowe przewodniki superjonowe: przejścia porządek-nieporządek	8	30	150 000
dr Tomasz Martyński (IF PP) Oddziaływania molekularne w monowarstwach dwuskładnikowych mieszanin ciekłokrystalicznych	8	36	145 000
prof. Robert Hołyst (IChF PAN) Fluktuacje topologiczne i powierzchnie uporządkowane	6	36	108 000
prof. Jan Godlewski (WFTiMS PG) Zjawiska fotoelektryczne w wybranych heterozłączach organicznych	4	36	78 710
dr hab. Anna Rubaszek (INTiBS PAN) Nielokalne efekty korelacyjne przy interpretacji danych doświadczalnych anihilacji pozytronów względem struktury elektronowej metali i półprzewodników	4	24	40 000
dr Tadeusz Kosztolowicz (IF WSP Kielce) Doświadczalne i teoretyczne badania dyfuzji w układach membranowych	5	24	32 000
dr hab. Danuta Wróbel (IF PP) Mechanizmy dezaktywacji energii wzbudzenia barwników porfiryńowych w układach modelowych (P)	4	24	30 000
dr hab. Wojciech Nawroć (IF UAM) Badanie własności fizycznych i przemian fazowych w wybranych solach pirydynowych z jednowartościowymi anionami (P)	2	21	28 000
dr Tomasz Błachowicz (IF PŚI) Doświadczalna analiza zależności dyspersyjnych stałych sprężystych w kryształach piezoelektrycznych o zbliżonej budowie			

krystalograficznej w hiperdźwiękowym zakresie częstotliwości – analiza teoretyczna w oparciu o formalizm kwantowych stanów koherentnych	1	24	23 000
dr hab. Antoni Kocot (IF UŚI) Badanie uporządkowania orientacyjnego dyskotycznych ciekłych kryształów (P)	4	18	22 500
prof. Mieczysław Chybicki (WFTiMS PG) Przemiany strukturalne w metalach – symulacje MD (P)	2	24	20 000
mgr Ewa Maria Chrzumnicka (IF PP) Uporządkowanie molekularne w polimerach ciekłokrystalicznych domieszkowanych barwnikami dichroicznymi (MB)	2	12	10 000

PÓŁPRZEWODNIKI I IZOLATORY

dr hab. Czesław Koepe (IF UMK) Zmiany stanów ładunkowych jonów metali przejściowych i ziem rzadkich w dielektrykach w aspekcie zastosowań optoelektronicznych	6	36	135 000
prof. Andrzej Twardowski (IFD UW) Oddziaływanie wymienne w warstwach epitaksjalnych i niskowymiarowych strukturach kwantowych $Ga_{1-x}Mn_xAs$	11	30	120 000
dr hab. Zbysław Wilamowski (IF PAN) Relaksacja spinowa w dwuwymiarowym gazie elektronowym	8	30	100 000
prof. Janusz Adamowski (WFiTJ AGH) Badanie własności elektronowych półprzewodnikowych kropek kwantowych (P)	2	24	30 000
prof. Jacek Baranowski (IFD UW) Eksperymentalne wyznaczanie struktury elektronowej w układach niskowymiarowych (P)	2	12	11 000
mgr Jacek Zakrzewski (IF UMK) Wyznaczanie wartości dyfuzyjności termicznej i przerwy energii wzbronionych w mieszanych kryształach $Zn_{1-x}Be_xSe$	1	9	10 000

XVII konkurs

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

METODY MATEMATYCZNE, TEORIA POLA FIZYKA STATYSTYCZNA, ASTROFIZYKA

prof. Andrzej Trautman (IFT UW) Klasyczne i kwantowe teorie grawitacji oraz ich metody matematyczne	9	36	259 800
prof. Jacek Wosiek (IF UJ) Własności konforemne chromodynamiki kwantowej i kwantowej grawitacji	11	36	200 000

dr hab. Andrzej Królak (IM PAN) Analiza danych z detektorów fal grawitacyjnych	5	18	92 400
prof. Jerzy Łuczka (IF UŚI) Transport w układach nieoddziałujących i oddziałujących cząstek Browna indukowany fluktuacjami	3	24	63 820
dr Konrad Bajer (IG UW) Wpływ wirów na gradient temperatury oraz koncentrację unoszonych cząstek	3	24	50 000
prof. Krzysztof Parliński (IFJ) Własności drgań sieci krystalicznej wybranych kryształów liczone metodami <i>ab initio</i> (P)	2	21	18 840
dr Piotr Biały (IF UJ) Funkcje korelacji na fluktuujących geometriach	1	12	8 000

FIZYKA POŚREDNICH I WYSOKICH ENERGII

dr hab. Henryk Wilczyński (IFJ) Badanie promieniowania kosmicznego o skrajnie wysokich energiach w eksperymencie Auger	11	24	225 000
dr hab. Maria Różańska (IFJ) Badanie rzadkich rozpadów mezonów B w eksperymencie BELLE	9	30	190 000
dr Aleksander Żarnecki (IFD UW) Badanie rozpraszania elektron-proton w eksperymencie ZEUS przy akceleratorze HERA: badanie Modelu Standardowego i poszukiwanie „nowej fizyki”	5	18	60 000
dr hab. Jacek Ciborowski (IFD UW) Charged Current Electron Proton Interactions in the ZEUS Experiment (P)	2	18	20 150
dr hab. Bohdan Grządkowski (IFT UW) Badanie łamania symetrii CP w procesie produkcji i rozpadu par kwarków top w zderzeniach e^+e^- w minimalnym modelu supersymetrycznym (P)	2	24	18 000
mgr Krzysztof Cieślak (IFJ) Poszukiwanie przypadków produkcji par bozonów Z^0 (MB)	1	12	9 990
prof. Jan Kwiciński (IFJ) Analiza QCD głęboko nieelastycznych zderzeń lepton-hadron w obszarze małych wartości parametru x Bjorkena (P)	2	6	7 500

FIZYKA JĄDROWA I FIZYKA PLAZMY

dr hab. Barbara Wosiek (IFJ) Badanie procesów fragmentacji jąder i produkcji cząstek w zderzeniach jąder ołowiu o energii 158 GeV/nukleon z jądrami	7	36	150 000
dr hab. Andrzej Płochocki (IFD UW) Badanie promieniotwórczości nuklidów z pobliza linii $Z = N$ i linii odpadania protonu	9	24	148 150
prof. Reinhard Kulesa (IF UJ) System pozycyjnie czułych komór druto-			

wych do identyfikacji dileptonów w spektrometrze HADES (P)	2	30	29 000
prof. Bogusław Kamys (IF UJ) Niemezonowy rozpad hiperonów Λ w ciężkich hiperjadrach (P)	3	17	19 000
prof. Reinhard Kulesa (IF UJ) Badanie procesu kulombowskiej dysocjacji $^8\text{B} \rightarrow ^7\text{Be} + p$ jako metody alternatywnej pomiaru czynnika astrofizycznego dla reakcji $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ (P)	2	18	15 375

FIZYKA ATOMOWA I MOLEKULARNA OPTYKA, AKUSTYKA

prof. Czesław Szmytkowski (WFTiMS PG) Oddziaływania elektronów w zderzeniach z drobinami wieloatomowymi	7	25	188 000
dr hab. Leszek Sirko (IF PAN) Badanie zjawisk lokalizacji i chaosu w symulowanych eksperymentalnie jednowymiarowych i dwuwymiarowych układach kwantowych	6	36	170 500
dr Radosław Szmytkowski (WFTiMS PG) Funkcje Sturm–Diraca–Coulomba i ich zastosowanie w relatywistycznej fizyce atomowej	1	24	35 000
dr hab. Jerzy Kamiński (IFT UW) Procesy wielofotonowe w obecności silnej wiązki laserowej (P)	2	18	22 500
dr hab. Krzysztof Wojciechowski (IFM PAN) Zastosowanie symulacji komputerowych do badania stabilności wybranych struktur w układach cząstek z twardym rdzeniem (P)	2	14	14 000
dr hab. Piotr Kwiek (IFD UG) Dyfrakcja światła na falach ultradźwiękowych poza obszarem Ramana–Natha (P)	6	12	6600
dr hab. Ryszard Horodecki (IFTiA UG) Kompresja kwantowej informacji (P)	2	12	6000

METALE, MAGNETYKI, NADPRZEWODNIKI

prof. Robert Troć (INTiBS PAN) Silnie skorelowane stany w potrójnych związkach uranu (kontynuacja)	9	36	190 000
dr hab. inż. Marek Przybylski (WFiTJ AGH) Wpływ lokalnej struktury atomowej w interfejsach na charakter i wielkość sprzężenia magnetycznego pomiędzy warstwami ferromagnetycznymi zawierającymi Fe	9	24	170 000
prof. Andrzej Kołodziejczyk (WFiTJ AGH) Anizotropia i właściwości elektronowe wysokotemperaturowych nadprzewodników talowych i bizmutowych	9	32	166 100
prof. Bogusław Mróz (IF UAM) Spektroskopia Brillouina fononów powierzchniowych w kryształach ferroelastycznych	7	27	95 200
dr Magdalena Załuska-Kotur (IF PAN)			

Równowagowe i nierównowagowe procesy dynamiczne gazów na powierzchniach metali	4	24	90 000
prof. Stanisław Robaszkiewicz (IF UAM) Efekty separacji faz, diagonalnego nieporządku i fluktuacji fazowych w wąskopasmowych układach elektronowych	8	24	54 000
prof. Stanisław Robaszkiewicz (IF UAM) Własności transportowe i magnetyczne nowych polichalkogenidków miedzi (P)	2	18	22 500
prof. Karol Wysocki (IF UMCS) Korelacje elektronowe w układach normalnych i nadprzewodzących (P)	2	19	19 600
prof. Janusz Zieliński (IF UŚI) Znaczenie korelacji kulombowskich i pseudoszczeliny dla anizotropowego nadprzewodnictwa w dwuwymiarowym modelu Hubbarda (P)	2	18	14 040
mgr Małgorzata Adamczyk (IF UŚI) Technologia i badania mikroskopowe ceramik $(\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x)(\text{Zr}_{0,70}\text{Ti}_{0,30})\text{O}_3$ dla $x = 0,25, 0,30, 0,35$ (MB)	1	8	10 000

KRYSTAŁY MOLEKULARNE I POLIMERY, CIECZE

prof. Stefan Jurga (IF UAM) Badanie dynamiki molekularnej modelowych układów dwuwarstwowych za pomocą spektroskopii NMR	5	24	154 200
dr hab. Adam Pietraszko (INTiBS PAN) Zjawiska prekursorowe towarzyszące przemianom fazowym w ferroelastykach, ferroelektrykach i w materiałach pokrewnych	5	36	137 400
dr hab. Zbigniew Trybuła (IFM PAN) Transport ciepła i anomalie dielektryczne w kryształach ferroicznych i układach szklistych w bardzo niskich temperaturach	11	30	130 000
dr hab. Antoni Kocot (IF UŚI) Badanie efektów orientacyjnych i dynamiki molekuł w ciekłych kryształach z fazą antyferroelektryczną	9	24	120 000
prof. Stanisław Wróbel (IF UJ) Badania dielektryczne i elektrooptyczne ciekłych kryształów antyferroelektrycznych i ich mieszanin (P)	4	24	30 000
dr hab. Zygmunt Gburski (IF UŚI) Badanie absorpcji dielektrycznej w molekularnych klastrach dipolowych – symulacje komputerowe	2	18	27 350
prof. Józef Mościcki (IF UJ) Badanie ciekłokrystalicznych przejść fazowych w termotropowym układzie silnie anizotropowych cząstek (P)	2	12	15 000
dr hab. Aleksander Bródka (IF UŚI) Badanie polarnych układów ciekłokrystalicznych (P)	2	15	9840
dr hab. Maria Massalska-Arodź (IFJ) Badanie polimorfizmu i dynamiki molekularnej w etoksybenzylideno propylanilinie (EBPA) (P)	2	18	9000

PÓŁPRZEWODNIKI I IZOLATORY

prof. Tomasz Dietl (IF PAN) Niskotemperaturowe własności nanostruktur hybrydowych	17	36	290 000	prof. Bronisław Orłowski (IF PAN) Oddziaływanie zlokalizowanych elektronów (Re)4f i (TM)3d z elektronami pasma walencyjnego powierzchni półprzewodników	13	36	170 200
prof. Marek Szymoński (IF UJ) Modyfikacja powierzchni kryształów jonowych w skali nanometrycznej w wyniku procesów wzbudzanych wiązką elektronową	10	24	200 000	mgr Sebastian Maćkowski (IF PAN) Właściwości optyczne półprzewodnikowych kropek kwantowych CdTe (MB)	1	12	10 000

O nauczaniu matematyki*

Władimir I. Arnold

Instytut Matematyczny im. W.A. Stekłowa Rosyjskiej Akademii Nauk, Moskwa, Rosja

On teaching mathematics

Matematyka jest częścią fizyki. Fizyka jest nauką doświadczalną, jedną z nauk o przyrodzie, a matematyka jest tą częścią fizyki, w której doświadczenia są bardzo tanie.

Twierdzenie Jacobiego (zgodnie z którym wysokości trójkąta przecinają się w jednym punkcie) jest faktem doświadczalnym w takim samym sensie jak fakt, że Ziemia jest okrągła (to znaczy homeomorficzna z kulą), a można się o tym przekonać mniejszym kosztem.

W połowie XX w. usiłowano oddzielić matematykę od fizyki. Rezultaty okazały się katastrofalne. Dorastały całe pokolenia matematyków nie znające połowy swojej dziedziny wiedzy i oczywiście nie mające pojęcia o wszelkich innych naukach. Z kolei oni zaczęli uczyć swojej szkaradnej, scholastycznej pseudomatematyki studentów, a następnie dzieci w szkołach (zapominając o ostrzeżeniu Hardy'ego, że na szkaradną matematykę nie ma miejsca pod słońcem). Ponieważ scholastyczna, odcięta od fizyki matematyka nie nadaje się ani do nauczania, ani zastosowania w jakiegokolwiek innej nauce, zrodziła się powszechna niechęć do matematyków, i to zarówno ze strony nieszczęsnych uczniów (niektórzy z nich zostali tymczasem ministrami), jak i tych, którzy musieli matematykę stosować.

Szkaradny gmach, skonstruowany przez nie-douczone matematyków, umęczonych swoimi

kompleksami niższości i niezdolnych do poznania fizyki, przypomina poprawnie zbudowaną aksjomatyczną teorię liczb nieparzystych. Oczywiście można stworzyć taką teorię i zmusić uczniów do podziwiania doskonałości i wewnętrznej spójności powstałej struktury (w której np. zdefiniowane są: suma nieparzystej liczby składników i iloczyn dowolnej liczby czynników). Z sekciarskiego punktu widzenia istnienie liczb parzystych można wówczas zadeklarować albo jako herezję, albo stopniowo wprowadzić je do teorii uzupełnionej o kilka „idealnych” obiektów (w celu spełnienia wymagań fizyki i świata rzeczywistego).

Niestety, taka brzydka i wypaczona konstrukcja matematyki dominowała w nauczaniu matematyki przez dziesiątki lat. Powstała we Francji i szybko przeniknęła do nauczania podstaw matematyki, początkowo na uniwersytetach, potem w całym szkolnictwie (najpierw we Francji, a następnie w innych krajach, w tym Rosji).

Na pytanie: „Ile jest $2 + 3$?” uczeń francuskiej szkoły podstawowej odpowiadał: „ $3 + 2$, ponieważ dodawanie jest przemienne”. Nie wiedział, ile wynosi suma tych liczb, co więcej, nie rozumiał nawet, o co jest pytany!

Inny francuski uczeń (w moim przekonaniu całkiem rozsądny) tak podsumował matematykę: „Oto jest kwadrat, ale to jeszcze trzeba udowodnić”. Sądząc po moim doświadczeniu wyniesio-

* Artykuł, opublikowany w czasopiśmie *Uspiechi Mat. Nauk* 53, 229 (1998), został przetłumaczony za zgodą Autora i Wydawcy [Translated with permission]. Stanowi on rozszerzoną wersję wystąpienia Autora podczas dyskusji nt. nauczania matematyki, jaka odbyła się w Palais de Découverte w Paryżu dnia 7 marca 1997 r. (przyp. Red.).

nym z nauczania matematyki we Francji, pojęcie studentów uniwersytetu o matematyce (nawet tych uczących się jej w Ecole Normale Supérieure (ENS) – współczuję tym wszystkim bez wątpienia niegłupim, ale otumanionym młodym ludziom) jest tak samo słabe, jak tego ucznia.

Studenci ci np. nie widzieli nigdy paraboloidy, więc pytanie o kształt powierzchni opisanej wzorem $xy = z^2$ wprawia studiujących matematykę w ENS w zdumienie. Narysowanie na płaszczyźnie krzywej, opisanej równaniami parametrycznymi (np. $x = t^3 - 3t$, $y = t^4 - 2t^2$) jest dla nich problemem niemożliwym do rozwiązania (podobnie jak chyba dla większości francuskich nauczycieli matematyki).

Po przejrzaniu pierwszego podręcznika de l'Hôpitala o rachunku różniczkowym („rachunek różniczkowy gwoździ zrozumienia linii krzywych”) i kilku następnych aż do podręcznika Goursata można stwierdzić, że umiejętność rozwiązywania takich problemów była dawniej uważana (tak samo jak znajomość tabliczki mnożenia) za niezbędną część rzemiosła każdego matematyka.

Niewydarzeni miłośnicy „matematyki abstrakcyjnej” usunęli z kursu matematyki całą geometrię (dzięki której najczęściej pojawia się w matematyce związek z fizyką i światem rzeczywistym). Podręczniki rachunku różniczkowego napisane przez Goursata, Hermite’a i Picarda zostały ostatnio wyrzucone z biblioteki studenckiej Uniwersytetów Paryż VI i VII na kampusie Jussieu jako przestarzałe, a tym samym szkodliwe (zostały uratowane jedynie dzięki mojej interwencji).

Okazało się, że studenci ENS, którzy wysłuchali wykładów na temat geometrii różniczkowej i analitycznej (prowadzonych przez poważanych matematyków), nie są zaznajomieni ani z powierzchnią Riemanna krzywej eliptycznej $y^2 = x^3 + ax + b$, ani nawet z topologiczną klasyfikacją powierzchni (nie wspominając o całkach eliptycznych I rodzaju i własności grupowej krzywej eliptycznej, czyli o twierdzeniu Eulera–Abela o addytywności). Uczono ich jedynie o strukturach Hodge’a i różniczkach Jacobiego.

Jak mogło się to wydarzyć we Francji, która dała światu Lagrange’a i Laplace’a, Cauchy’ego i Poincarégo, Leray’go i Thoma? Wydaje mi się, że rozsądne wytłumaczenie podał I.G. Pietrowski, który uczył mnie w 1966 r., że prawdziwi matematycy nie łączą się w stada, ale słabi po-

trzebują stada, by przetrwać. Może to wynikać z rozmaitych przyczyn (np. superabstrakcji, antysemityzmu lub problemów „stosowanych i przemysłowych”), ale zasadniczą sprawą jest zawsze rozwiązanie problemu społecznego: przeżycia w lepiej wykształconym otoczeniu.

Przy okazji przypomnę ostrzeżenie Pasteura: nigdy nie było i nigdy nie będzie żadnych „nauk stosowanych”, istnieją tylko zastosowania nauk (bardzo przydatne!).

W tamtych dniach traktowałem słowa Pietrowskiego z pewnym powątpiewaniem, lecz obecnie coraz bardziej się przekonuję, że miał on rację. Spora część superabstrakcyjnej aktywności po prostu sprowadza się do bezwstydnego zagrabiania twórcom ich odkryć i następnie przypisywania ich „uogólniającym” epigonom. Podobnie jak Ameryka nie została nazwana imieniem swego odkrywcy Kolumba, tak otrzymane wyniki w matematyce nie są prawie nigdy nazywane imionami tych, którzy je uzyskali.

Chciałbym tu podkreślić, że z jakichś nieznanych mi powodów moje własne osiągnięcia nigdy nie były w taki sposób potraktowane, ale stale zdarzało się to zarówno moim nauczycielom (Kolmogorowowi, Pietrowskiemu, Pontriaginowi, Rochlinowi), jak i moim uczniom. Profesor M. Berry kiedyś sformułował następujące dwie zasady:

Zasada Arnolda. Jeśli jakieś pojęcie jest związane z czymś nazwiskiem, to nie jest ono nazwiskiem odkrywcy.

Zasada Berry’ego. Zasada Arnolda stosuje się do siebie samej.

Powróćmy jednak do problemu nauczania matematyki we Francji.

Gdy byłem studentem I roku Wydziału Mechaniki i Matematyki Uniwersytetu Moskiewskiego, wykłady rachunku różniczkowego prowadził L.A. Tumarkin, specjalista od teorii mnogości i topologii, który skrupulatnie powtórzył stary, klasyczny kurs rachunku różniczkowego typu francuskiego w wersji Goursata. Powiedział nam, że całki funkcji wymiernych wzdłuż krzywych algebraicznych można obliczyć, jeśli odpowiednia powierzchnia Riemanna jest sferą, a w ogólności nie można ich obliczyć, gdy jest to powierzchnia wyższego stopnia. Dla zapewnienia sferyczności wystarczy mieć wystarczająco dużą liczbę punktów podwójnych na krzywej danego stopnia (czyli krzywa musi być jednokreślna, co oznacza,

że możliwe jest narysowanie rzeczywistych punktów krzywej na płaszczyźnie rzutowania bez odrywania ołówka od papieru).

Fakty te działają na wyobraźnię do tego stopnia, że (nawet jeśli są podane bez żadnego dowodu) dają lepsze i bardziej poprawne wyobrażenie o nowoczesnej matematyce niż wszystkie tomy rozpraw Bourbakiiego. Istotnie, w ten sposób odkrywamy istnienie cudownego powiązania między rzeczami, które wydają się całkowicie różne: z jednej strony istnienie wyrażenia na całki w jawnej postaci i topologia odpowiedniej powierzchni Riemanna, a z drugiej – liczba punktów podwójnych i stopień odpowiedniej powierzchni Riemanna, co również przejawia się w obszarze rzeczywistym w postaci jednokreślności.

Już Jacobi zauważył najbardziej fascynującą własność matematyki, że ta sama funkcja opisuje zarówno przedstawienie liczby całkowitej jako sumy kwadratów czterech liczb, jak i rzeczywisty ruch wahadła.

Te odkrycia powiązań pomiędzy różnorodnymi obiektami matematycznymi można porównać do odkrycia związku między elektrycznością a magnetyzmem w fizyce lub z odkryciem podobieństwa geologii wschodniego wybrzeża Ameryki i zachodniego wybrzeża Afryki.

Emocjonalne znaczenie takich odkryć dla nauczania trudno jest przecenić. One właśnie uczą nas, jak szukać (i znajdować) takie cudowne zjawiska, świadczące o istnieniu harmonii we Wszechświecie.

Usunięcie geometrii z nauczania matematyki oraz rozwój z fizyką niszczą takie powiązania. Nie tylko studenci, ale również współcześni matematycy zajmujący się geometrią analityczną, nie znają np. faktu, zaobserwowanego przez Jacobiego, że cała eliptyczna I rodzaju określa czas ruchu po eliptycznej krzywej fazowej w odpowiednim układzie hamiltonowskim.

Parafrazując słynne słowa o elektronie i atomie można powiedzieć, że hipocykloida jest równie „nie wyczerpana” jak ideał w pierścieniu wielomianowym. Uczenie o ideałach studentów, którzy nigdy nie widzieli hipocykloidy jest tak samo śmieszne, jak uczenie dodawania ułamków dzieci, które nigdy nie dzieliły (przynajmniej w wyobraźni) ciastka lub jabłka na równe części. Nic więc dziwnego, że dzieci wolą dodawać licznik do licznika i mianownik do mianownika.

Słyszałem od moich francuskich kolegów, że tendencja do superabstrakcyjnych uogólnień jest ich tradycyjną cechą narodową. Nie przeczę, że to może być sprawa choroby dziedzicznej, ale pragnę podkreślić fakt, że zapożyczyłem przykład o ciastku i jabłku od Poincarégo.

Schemat konstrukcji teorii matematycznej jest dokładnie taki sam, jak w innych naukach przyrodniczych. Najpierw rozważamy niektóre obiekty i czynimy pewne obserwacje dla przypadków szczególnych. Następnie próbujemy znaleźć i znajdujemy granice zastosowania naszych obserwacji, szukając kontrprzykładów w celu zapobieżenia nieuzasadnionemu rozszerzeniu naszych obserwacji na zbyt duży przedział zdarzeń (przykład: liczba podziałów kolejnych liczb nieparzystych 1, 3, 5, 7, 9 na nieparzystą liczbę składników daje sekwencję 1, 2, 4, 8, 16, ale gdy spróbujemy to zrobić dla następnej liczby nieparzystej 11, to otrzymamy 29).

W rezultacie formułujemy dokonane przez nas odkrycie doświadczalne (np. twierdzenie Fermata albo hipotezę Poincarégo) w możliwie najbardziej jasny sposób. Następnie przychodzi trudny okres sprawdzania rzetelności uzyskanych wniosków.

W matematyce powstała w tym celu specjalna metoda. Zastosowana do świata rzeczywistego, jest ona czasem użyteczna, ale niekiedy może też prowadzić do oszukiwania samego siebie. Metoda ta nosi nazwę modelowania. Tworząc jakiś model, robimy następującą idealizację: niektóre fakty, znane jedynie z pewnym prawdopodobieństwem lub z pewnym stopniem dokładności, przyjmuje się jako „absolutnie” poprawne i uznaje za „aksjomaty”. Sens tej „absolutyzacji” polega właśnie na tym, że pozwalamy sobie operować tymi „faktami” zgodnie z zasadami logiki formalnej, deklarując jako „twierdzenia” wszystko, co możemy z nich wyprowadzić.

Jest rzeczą oczywistą, że w żadnej realnej działalności nie można w pełni polegać na takich dedukcjach, chociażby dlatego, że parametry badanego zjawiska nigdy nie są znane z absolutną dokładnością i mała zmiana tych parametrów (np. warunków początkowych procesu) może całkowicie zmienić wynik. Wskutek tego wiarygodne, długookresowe prognozy pogody są niemożliwe i pozostaną niemożliwe, niezależnie od tego, jak bardzo rozbudujemy komputery

i inne przyrządy, które zapisują warunki początkowe.

Dokładnie tak samo mała zmiana aksjomatów (których i tak nie możemy być całkowicie pewni) może na ogół doprowadzić do zupełnie innych konkluzji od tych, które uzyskano z twierdzeń wydedukowanych z przyjętych aksjomatów. Im dłuższy i bardziej kunsztowny łańcuch dedukcji („dowodów”), tym mniej wiarygodny jest końcowy rezultat.

Skomplikowane modele rzadko przydają się komukolwiek oprócz doktorantów.

Matematyczna metoda modelowania polega na pomijaniu tego nie milego problemu i na mówieniu o modelu dedukcyjnym tak, jak gdyby zgadzał się z rzeczywistością. Fakt, że ta droga, która w oczywisty sposób jest niepoprawna z punktu widzenia nauk przyrodniczych, w fizyce często prowadzi do użytecznych wyników, jest zwany „zasadą niepojętej skuteczności matematyki w naukach przyrodniczych” (lub „zasadą Wignera”).

Możemy tutaj przytoczyć uwagę I.M. Gelfanda: istnieje inne zjawisko tak niepojęte, jak niezrozumiała skuteczność matematyki w fizyce, zauważona przez Wignera, a jest nim niezrozumiała nieskuteczność matematyki w biologii.

„Subtelna trucizna edukacji matematycznej” (wg słów F. Kleina) dla fizyka polega właśnie na tym, że zabsolutyzowany model jest oderwany od rzeczywistości i nie da się już z nią porównywać. Oto prosty przykład. Matematyka uczy, że rozwiązanie równania Malthusa $dx/dt = x$ jest jednoznacznie określone przez warunki początkowe (tzn. że odpowiednie krzywe całkowe nie przecinają się w płaszczyźnie (t, x)). Ten wniosek, wynikający z przyjętego modelu matematycznego, wykazuje słabe powiązanie z rzeczywistością. Z eksperymentu komputerowego wynika, że wszystkie te krzywe całkowe mają punkty wspólne na ujemnej półosi t . I rzeczywiście, krzywe z warunkami początkowymi $x(0) = 0$ oraz $x(0) = 1$ praktycznie przecinają się dla $t = -10$, a dla $t = -100$ nie można między nie wcisnąć atomu. Własności przestrzeni przy takich małych odległościach nie dają się już opisać za pomocą geometrii euklidesowej. Zastosowanie twierdzenia o jednoznaczności w tej sytuacji w sposób oczywisty przekracza dokładność modelu. Należy o tym pamiętać w praktycznych zastosowaniach modelu, w przeciwnym razie można znaleźć się w kłopotliwej sytuacji.

Chciałbym jednak zauważyć, że to samo twierdzenie o jednoznaczności wyjaśnia, dlaczego ostatni etap przybijania statku do moła przeprowadza się ręcznie: gdyby w automatycznym sterowaniu statkiem prędkość podejścia zdefiniowano jako gładką (liniową) funkcję odległości, wówczas przybijanie statku trwałoby nieskończenie długo. Innym wyjściem byłoby uderzenie w molo (tłumione, gdyż mamy do czynienia z ciałami niedoskonale sprężystymi). Nawiasem mówiąc, problem ten musiał zostać potraktowany poważnie, gdy lądowały pierwsze pojazdy na Księżycu i na Marsie, jak również przy dokowaniu stacji kosmicznych; tutaj twierdzenie o jednoznaczności działa przeciw nam.

Niestety, ani takich przykładów, ani dyskusji o niebezpieczeństwie fetyszyzacji twierdzeń nie można znaleźć w nowoczesnych podręcznikach matematyki, nawet w najlepszych. Mam nawet wrażenie, że scholastyczni matematycy (którzy słabo znają fizykę) wierzą w zasadniczą różnicę między matematyką aksjomatyczną a modelowaniem, zwykle stosowanym w naukach przyrodniczych, które zawsze wymaga sprawdzenia wniosków za pomocą doświadczenia.

Pomijając już względny charakter początkowych aksjomatów, nie można też lekceważyć nieuchronności wystąpienia błędów logicznych w długich dowodach (np. promieniowanie kosmiczne lub oscylacje kwantowe mogą zepsuć komputer). Każdy praktykujący matematyk wie, że bez jakiejś formy kontroli (najlepiej za pomocą przykładów) po mniej więcej dziesięciu stronach połowa znaków w wyrażeniu będzie błędna i kilka dwójek z mianownika przemieści się do licznika.

Metoda zwalczania takich błędów sprowadza się do zewnętrznej kontroli za pomocą doświadczeń lub obserwacji, tak jak w każdej nauce doświadczalnej, i tego należy uczyć wszystkich uczniów w szkołach od samego początku.

Próba stworzenia „czystej” matematyki dedukcyjno-aksjomatycznej doprowadziła do odrzucenia schematu stosowanego w fizyce (obserwacja, model, badanie modelu, wnioski, testowanie za pomocą doświadczeń) i zastąpienia go schematem: definicja, twierdzenie, dowód. Nie sposób zrozumieć nie umotywowaną definicję, lecz nie powstrzymuje to „algebraików-aksjomatyków”. Chętnie zdefiniowaliby oni iloczyn liczb naturalnych za pomocą długiej reguły mnożenia.

Wtedy przemienność mnożenia staje się trudna do udowodnienia, ale nadal można ją wydedukować z podanych aksjomatów jako twierdzenie. Można wówczas zmusić nieszczęsnych studentów do nauczenia się tego twierdzenia i jego dowodu (w celu podtrzymania autorytetu zarówno nauki, jak i osób jej nauczających). Jest oczywiste, że takie definicje i dowody mogą jedynie zaszkodzić nauczaniu i zastosowaniom praktycznym.

Sposobem zrozumienia przemienności mnożenia jest przeliczenie żołnierzy według ich stopni lub obliczenie pola powierzchni prostokąta na dwa sposoby. Każda próba zrozumienia tego pojęcia bez odniesienia do fizyki oraz rzeczywistości jest sekciarska i izolacjonistyczna, a w oczach rozsądnych ludzi zaciera obraz matematyki jako pożytecznej działalności człowieka.

Ujawnię jeszcze kilka takich „sekreów” (w interesie nieszczęsnych studentów).

Wyznacznik macierzy jest (zorientowaną) objętością równoległościanu, którego krawędziami są kolumny macierzy. Gdy zaznajomi się studentów z tym sekretem (który jest starannie ukrywany w wyjałowionej algebraicznej metodzie nauczania), wówczas cała teoria wyznaczników staje się jasnym rozdziałem w teorii form multilineowych. Jeśli wyznaczniki są zdefiniowane w inny sposób, to każdy rozsądny człowiek znienawidzi po wsze czasy wszystkie wyznaczniki, jakobiany i twierdzenie o funkcjach uwikłanych.

Co to jest grupa? Algebraicy uczą, że jest to jakoby zbiór z dwiema operacjami, który spełnia dużo łatwych do zapomnienia aksjomatów. Taka definicja wywołuje naturalny protest: dlaczego jakakolwiek rozsądna osoba potrzebuje takiej pary operacji? – Och, do diabła z tą matematyką – dochodzi do wniosku student (który, być może, zostanie w przyszłości ministrem edukacji).

Sytuacja będzie zupełnie inna, jeśli rozpoczniemy nie od pojęcia grupy, ale od pojęcia przekształcenia (wzajemnie jednoznacznego odwzorowania zbioru w siebie), podobnie jak – historycznie rzecz biorąc – przebiegał rozwój tych pojęć. Zbiór przekształceń zbioru jest zwany grupą, jeśli razem z dowolnymi dwoma przekształceniami zawiera wynik ich kolejnego zastosowania, a razem z dowolnym przekształceniem zawiera jego przekształcenie odwrotne.

Jest to pełna definicja. Tak zwane „aksjomaty” są w rzeczywistości po prostu (oczywisty-

mi) własnościami grupy przekształceń. To, co aksjomatycy nazywają „grupą abstrakcyjną”, jest po prostu grupą przekształceń różnych zbiorów rozważaną z dokładnością do izomorfizmu (wzajemnie jednoznacznego odwzorowania zachowującego operacje). Jak udowodnił Cayley, na świecie nie istnieją „bardziej abstrakcyjne” grupy. Dlaczego więc algebraicy kontynuują torturowanie studentów tą abstrakcyjną definicją?

W latach sześćdziesiątych uczyłem w Moskwie młodzież szkolną teorii grup. Unikając całej tej aksjomatyzacji i trzymając się fizyki tak blisko, jak to tylko było możliwe, w ciągu pół roku doszedłem do twierdzenia Abela o nierozwiązywalności ogólnego równania piątego stopnia za pomocą pierwiastników (po drodze ucząc o liczbach zespolonych, powierzchniach Riemanna, podstawowych grupach i grupach monodromicznych funkcji algebraicznych). Wykłady te zostały później opublikowane przez jednego ze słuchaczy, W. Aleksiejewa, w postaci książki *Twierdzenie Abela w zadaniach*.

Co to jest rozmaitość gładka? W niedawno wydanej amerykańskiej książce przeczytałem, że Poincaré nie znał tego pojęcia (które sam wprowadził) i że „nowoczesną” definicję podał dopiero Veblen w późnych latach dwudziestych: rozmaitość jest przestrzenią topologiczną, która spełnia długą serię aksjomatów.

Za jakie grzechy studenci muszą próbować przedrzeć się przez te wszystkie zawilości? Przecież w książce Poincarégo *Analysis Situs* jest zamieszczona absolutnie jasna definicja rozmaitości gładkiej, znacznie bardziej użyteczna niż definicja „abstrakcyjna”.

Gładka k -wymiarowa podrozmaitość przestrzeni euklidesowej $\mathbb{R}^N$ jest podzbiorem, który w otoczeniu każdego ze swoich punktów jest wykresem gładkiego odwzorowania przestrzeni $\mathbb{R}^k$ w $\mathbb{R}^{N-k}$ (gdzie $\mathbb{R}^k$ oraz $\mathbb{R}^{N-k}$ są podprzestrzeniami współrzędnych). Jest to proste uogólnienie najzwyklejszych krzywych gładkich na płaszczyźnie (takich jak okrąg $x^2 + y^2 = 1$) oraz krzywych i powierzchni w przestrzeni trójwymiarowej.

Mamy w sposób oczywisty zdefiniowane gładkie odwzorowania pomiędzy gładkimi rozmaitościami. Dyfeomorfizmy są to odwzorowania, które są gładkie wraz z odwrotnościami.

„Abstrakcyjna” rozmaitość gładka jest podrozmaitością gładką przestrzeni euklidesowej roz-

patrywanej z dokładnością do dyfeomorfizmu. Nie istnieją na świecie „bardziej abstrakcyjne” skończenie wymiarowe rozmaitości gładkie (twierdzenie Whitneya). Dlaczego upieramy się dręczyć studentów abstrakcyjną definicją? Czyż nie byłoby lepiej udowodnić im twierdzenie o jawnej klasyfikacji zamkniętych, dwuwymiarowych rozmaitości (powierzchni)?

To właśnie to cudowne twierdzenie (z którego np. wynika, że każda zwarta, spójna, zorientowana powierzchnia jest sferą z pewną liczbą uch) daje poprawne wyobrażenie o nowoczesnej matematyce, a nie superabstrakcyjne uogólnienia prymitywnych podrozmaitości przestrzeni euklidesowej, które nie wnoszą tak naprawdę nic nowego, a są przedstawiane jako osiągnięcia aksjomatów.

Twierdzenie o klasyfikacji powierzchni jest osiągnięciem matematycznym najwyższej klasy, porównywalnym z odkryciem Ameryki czy promieniowania rentgenowskiego. Jest to prawdziwe odkrycie w naukach przyrodniczych i nawet trudno powiedzieć, czy sam ten fakt należy bardziej do fizyki, czy też do matematyki. Jego znaczenie zarówno w zastosowaniach, jak i dla potrzeb wypracowania sobie prawidłowego światopoglądu jest nieporównywalnie większe od takich „osiągnięć” matematyki, jak dowód wielkiego twierdzenia Fermata lub dowód faktu, że dowolną wystarczająco dużą liczbę całkowitą można przedstawić jako sumę trzech liczb pierwszych.

W celach reklamowych współczesna matematyka przedstawia czasem takie wyczyny jako swoje ostatnie słowo. Oczywiście to postępowanie nie tylko nie przyczynia się do społecznego uznania matematyki przez społeczeństwo, ale – wprost przeciwnie – wywołuje zdrową nieufność co do potrzeby marnowania energii na zajmowanie się egzotycznymi problemami, które prawie nikogo nie interesują (czymś w rodzaju wspinaczki po skale).

Twierdzenie o klasyfikacji powierzchni powinno zostać włączone do programu matematyki w liceum (raczej bez dowodu), ale z jakichś powodów nie jest nawet włączone do uniwersyteckich wykładów matematyki (z których, nawiasem mówiąc, we Francji w ostatnich kilkudziesięciu latach usunięto całą geometrię).

Powrót w sposobie nauczania matematyki na wszystkich poziomach od scholastycznego paplania do jej prezentacji jako ważnego działu nauki przyrodniczej jest obecnie głównym problemem

szkoły francuskiej. Ze zdziwieniem dowiedziałem się, że wszystkie książki matematyczne zawierające najlepsze i najważniejsze podejścia metodologiczne są studentom francuskim prawie nieznane (najwyraźniej nawet nie były przetłumaczone na język francuski). Wśród nich są książki: *Liczby i rysunki* Rademachera i Toetlitza, *Geometria i wyobrażenia* Hilberta i Cohn-Vossena, *Co to jest matematyka* Couranta i Robbinsa, *Jak to rozwiązać* oraz *Matematyka i rozważania probabilistyczne* Polya i *Rozwój matematyki w XIX wieku* F. Kleina.

Dobrze pamiętam, jak wielkie wrażenie zrobił na mnie w szkole kurs rachunku różniczkowego Hermite’a (który istnieje w rosyjskim tłumaczeniu!). Powierzchnie Riemanna pojawiają się w nim chyba na samym początku (cała analiza jest oczywiście oparta na liczbach zespolonych, jak być powinno). Asymptoty całek są badane za pomocą deformacji drogi na powierzchniach Riemanna i przesuwania punktów rozgałęzienia (dzisiaj nazywalibyśmy to teorią Picarda–Lefschetza; Picard, nawiasem mówiąc, był zięciem Hermite’a – zdolności matematyczne są często dziedziczone przez zięciów: dynastia Hadamard – P. Levy – L. Schwarz – U. Frisch to jeszcze jeden znany przykład w paryskiej Akademii Nauk).

„Przestarzały” kurs Hermite’a powstały sto lat temu (obecnie pewnie usunięty z francuskich bibliotek uniwersyteckich) był znacznie bardziej nowoczesny niż bardzo nudne podręczniki rachunku różniczkowego, którymi obecnie dręczy się studentów.

Jeśli matematykom nie wróci rozsądek, to użytkownicy, którzy ciągle potrzebują teorii matematycznej, nowoczesnej w najlepszym tego słowa znaczeniu i którzy zachowują zdroworozsądkową odporność na bezużyteczną aksjomatyczną paplaninę, w końcu odrzucą usługi niedouczonej scholastyki zarówno w szkołach, jak i na uniwersytetach.

Nauczyciel matematyki, który nie opanował przynajmniej niektórych tomów kursu Landaua i Lifszycy, stanie się reliktem, podobnie jak człowiek, który nie zna dzisiaj różnicy pomiędzy zbiorem otwartym i zamkniętym.

Tłumaczyła Danuta Śledziwska-Błocka
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN
Warszawa

W 115 rocznicę urodzin Jana Czochralskiego

Anna Pajączkowska

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, Warszawa

115th anniversary of birth of Jan Czochralski

W roku 2000 mija 115 lat od urodzenia (23 października 1885 r.) w Kcyni prof. Jana Czochralskiego. Kcynia jest położona w trójkącie pomiędzy Poznaniem, Gdańskiem i Warszawą, na ziemi pałuckiej, która wówczas była pod zaborem pruskim. Jan Czochralski po wstępnej nauce w Kcyni wyjechał do Berlina celem podjęcia pracy i dalszej nauki. Studiował chemię na Politechnice w Charlottenburgu. Na terenie Niemiec uczył się i pracował do roku 1928. Do Kcyni powracał wielokrotnie, gdyż tam mieszkała jego matka i tam miał swój letni dom. W okresie pobytu w Niemczech był twórcą wielu patentów oraz organizatorem i prezesem Niemieckiego Towarzystwa Metaloznawczego. W 1928 r. prof. Ignacy Mościcki, ówczesny prezydent Rzeczypospolitej Polski, chemik, profesor Politechniki Warszawskiej, zaprosił Jana Czochralskiego do powrotu do kraju. Czochralski objął Katedrę Metalurgii i Metaloznawstwa na Wydziale Chemii Politechniki Warszawskiej, a następnie powierzono mu organizację Instytutu Metalurgii i Metaloznawstwa przy Politechnice. Współpracował z wieloma firmami oraz działał w wielu towarzystwach naukowych. Do wybuchu II wojny światowej pracował na Politechnice Warszawskiej. Wraz z wybuchem wojny działalność Politechniki jako uczelni została zawieszona. W czasie wojny pracował w zakładzie badawczym na terenie Politechniki. Po wojnie powrócił do Kcyni. Umarł

w Poznaniu 22 kwietnia 1953 r. i jest pochowany w Kcyni.

Jego silne związki z Niemcami, zawodowe i rodzinne, rzutowały na szereg podejrzeń dotyczących jego zachowań w czasie okupacji hitlerowskiej. Należy jednak podkreślić, że wielu badaczom działalności prof. Czochralskiego (w tym i autorce tego artykułu) nie udało się znaleźć faktów obciążających osobę Profesora; pozostają one jedynie w sferze pomówień i domysłów pewnych osób. Istnieją natomiast dowody na to, że w czasie okupacji wspierał artystów, współpracował z AK i pomagał ludziom w getcie. Po wojnie prześladowały go więzienie i dochodzenie, które z braku dowodów winy zostało umorzone i został zwolniony z więzienia. Fakty te jednak spowodowały, że był zmuszony opuścić Politechnikę i powrócił do Kcyni, a działania Urzędu Bezpieczeństwa towarzyszyły mu do ostatnich dni przed śmiercią.

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

Dzisiaj jego nazwisko wiąże się z metodą otrzymywania monokryształów, którą zapoczątkował w 1916 r., kiedy prowadził badania nad krystalizacją metali. Badał szybkość krystalizacji metali przez zanurzanie kapilary w tyglu z roztopionym metalem i powolne jej przesuwanie ku górze. W wyniku tego procesu wyciągania cieczy z tygla i jej chłodzenia otrzymywał wykrystalizowany metal w postaci pręcika o średnicy ok. 1 mm. Ten pomysł po wielu latach, w 1950 r., wykorzystali amerykańscy uczeni G.K. Teal i J.B. Little z Bell Labs do wyciągania monokryształów germanu i metodę tę nazwali metodą Czochralskiego. Potem została ona zastosowana do krzemu, a następnie do otrzymywania wielu innych monokryształów związków i roztworów stałych, stosowanych szeroko do dzisiaj w mikroelektronice. Dlatego mówimy, że był prekursorem rozwoju światowej elektroniki. Obecnie istnieje wiele modyfikacji tej metody, która jest dostosowywana do właściwości otrzymywanych materiałów, a jednocześnie badane są mechanizmy towarzyszące procesom wzrostu tych kryształów. Właśnie ze względu na to szerokie zastosowanie metody krystalizacji i otrzymywania kryształów o najwyższej jakości strukturalnej nazwisko Jana Czochralskiego znalazło trwałe miejsce w literaturze i jest częściej cytowane w literaturze światowej niż niejedno nazwisko laureata Nagrody Nobla.

Przez wiele lat powojennych mało kto wiedział, kim jest Jan Czochralski. Od końca II wojny światowej do roku 1990 były podejmowane nieliczne próby upowszechnienia osoby i dzieła prof. Jana Czochralskiego; należy tu wymienić opracowanie i wykład prof. Józefa Żmii oraz opracowanie dokonane przez dra Pawła E. Tomaszewskiego, który do dzisiaj intensywnie pracuje nad odkryciem szczegółów z życia Profesora. W roku 1986 odbyła się 10. Europejska Konferencja Krytalograficzna, która z inicjatywy prof. Kazimierza Łukaszewicza była dedykowana rocznicy odkrycia metody Czochralskiego. Dopiero uwarunkowania polityczne, które powstały w latach dwudziestych pozwoliły na intensywną działalność badawczą i popularyzatorską na temat życia i pracy Czochralskiego.

W roku 1991 powstało Polskie Towarzystwo Wzrostu Kryształów (PTWK), które dla uczczenia dorobku Jana Czochralskiego postanowiło nadawać wstępny wykład każdego zjazdu Towarzy-

stwa jego imieniem, a w 1998 r. zmieniło nazwę na PTWK im. Jana Czochralskiego. Jego obecnym prezesem jest prof. Keshra Sangwal z Politechniki Lubelskiej, natomiast prezesem elektem – autorka tego artykułu. Dalsze informacje o działalności PTWK można znaleźć na stronie internetowej: rekt.pol.lublin.pl/~ptwk/. W 1998 r., z okazji 45 rocznicy śmierci Profesora, została zorganizowana staraniem Polskiego Towarzystwa Fizycznego, PTWK oraz innych instytucji związanych z Polską Akademią Nauk i instytutami resortowymi uroczysta sesja naukowa w Pałacu Staszica.

Należy podkreślić działalność władz, nauczycieli, uczniów, wielu organizacji społecznych i samych mieszkańców miasta Kcyni na rzecz upamiętnienia znanego dzisiaj w świecie kcyńianina i uczonego. W wielu miejscach związanych z nim zostały wmurowane tablice pamiątkowe, a szkole podstawowej nadano jego imię. Staraniem tych samych ludzi zorganizowano w Kcyni kilka sesji naukowych z udziałem zaproszonych naukowców. Jedną z sesji była połączona z konkursem wiedzy o Profesorze, a na innej wykład o życiu i dorobku prowadzili uczniowie. Zorganizowano i otwarto poświęconą jego pamięci izbę, która, jak należy sądzić, w przyszłości stanie się muzeum. Na podkreślenie zasługuje wielkie zaangażowanie społeczności miasta Kcyni, doskonała organizacja i wysoki poziom merytoryczny w przygotowaniu i przeprowadzeniu wszystkich uroczystości.

Po zapoznaniu się z dostępnymi materiałami i przeprowadzonymi rozmowami z ludźmi, którzy mieli kontakt z Profesorem i jego otoczeniem, na temat jego życia i kariery zawodowej można stwierdzić, że był to człowiek, który osiągnął bardzo wysoki poziom zawodowy, miał wiele publikacji i patentów, które mu przynosiły sławę i znaczne dochody. Miał również zainteresowania artystyczne. I te sprawy, pieniądze, wysoki poziom zawodowy połączony z zainteresowaniami artystycznymi pozwoliły mu współuczestniczyć w salonach artystycznych, sponsorować artystów, młodych naukowców i organizować różne spotkania intelektualne. Mieszkał w luksusowej willi i bywał w znanych kurortach, a jednocześnie kochał rodzinę i dbał o nią. Był człowiekiem pracy, lecz prowadził otwarte, swobodne życie, które nie było ograniczone sprawami finansowymi. Należy pamiętać, że był wychowany w kulturze niemieckiej,

więc doceniał wartość pracy, dyscyplinę i współpracował z tymi ludźmi, których uważał za odpowiednich. Z drugiej strony nie legitymował się dyplomami renomowanych uczelni, a świadectw ze szkół trudno się doszukać w jego spuściźnie, choć wiadomo, że niektóre z nich kończył. Umiał bronić swoich poglądów i wygrywał procesy sądowe związane z pomówieniami przez kolegów. No cóż, taki człowiek mógł być kontrowersyjny.

Lektura uzupełniająca

- P.E. Tomaszewski, „70 lat metody Czochralskiego hodowli kryształów”, *Postępy Fizyki* **38**, 547 (1987).
- Piotr Cieśliński, „Uczony, którego nie ma”, *Gazeta Wyborcza, Magazyn*, nr 25 (276), 19–20.06.1998.
- P.E. Tomaszewski, „Professor Jan Czochralski (1885–1953) and his contribution to the art and science of crystal growth”, *J. Am. Assoc. Cryst. Growth* **27**, 12 (1998).
- Protokół z zebrania PTWK, *Materiały Elektroniczne* **26**, z. 3/4, 61 (1998); *Biuletyn PTWK*, nr 12.
- P.E. Tomaszewski, „Jan Czochralski (1885–1953)”, wyd. Ośrodek Kultury Regionalnej, Kujawsko-Pomorskie Tow. Kulturalne, Bydgoszcz 1990, s. 22.
- Artykuł na temat prof. J. Czochralskiego, *Fokus*, nr 12 (1999).
- B. Paszkowski, A. Jeleński, „Profesor Jan Czochralski”, *Elektronika* **40**, 3 (1999).
- T. Łukasiewicz, „Podstawy metody Czochralskiego”, *Elektronika* **40**, 6 (1999).
- A. Bukowski, P. Zabierowski, „Monokryształizacja metodą Czochralskiego, stan współczesny”, *Elektronika* **40**, 10 (1999).
- P.E. Tomaszewski, „Jan Czochralski” (w jęz. japońskim), *J. Japan. Assoc. Crystal Growth* **26**, 61 (1999).
- A. Pajączkowska, „Professor Dr Jan Czochralski and his method”, *J. Japan. Assoc. Crystal Growth* **26**, 63 (1999).

Dydaktyczne aspekty stosowania analogii w nauczaniu fizyki

Małgorzata Klisowska

Instytut Fizyki, Wyższa Szkoła Pedagogiczna, Rzeszów

Regina Zawisza

Instytut Fizyki, Uniwersytet im. Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin

The didactic aspects of analogy in physics education

Abstract: Modern cognitive psychology treats analogy inference as a fundamental component of human thinking and a basis for other cognitive methods. Using analogy in teaching physics is, however, rare. Most teachers use this method only occasionally because they do not appreciate the educative function of analogy or are not prepared to use it.

1. Wstęp

Zmiany, jakie przewiduje reforma szkolnictwa w Polsce, wymagają kompleksowego i bardziej twórczego podejścia do procesu nauczania i uczenia się. W założeniach reformy szczególną rolę przypisano integracji treści nauczania różnych przedmiotów, zwłaszcza przyrodniczych, celem wykształcenia umiejętności dostrzegania zjawisk i procesów z wielu perspektyw, ich zrozumienia oraz łączenia elementów różnych dziedzin wiedzy w postrzeganiu i rozumieniu świata. Realizacja zadań stawianych przed szkolnictwem wymaga od nauczycieli stosowania metod sprzyjających rozwojowi intelektualnemu i twórczej inwencji uczniów oraz ułatwiających przenoszenie umiejętności uczenia się na sytuacje pozaszkolne w środowisku fizycznym oraz społecznym. Nowe wymagania edukacyjne zmuszają do weryfikacji stosowanych metod, w tym również zmiany podejścia do zastosowań analogii w dydaktyce fizyki.

2. Stosowane pojęcia

Twórczo rozwijające się poznanie często odwołuje się do podobieństw między przedmiotami, badanymi zjawiskami czy procesami. Wyróżnione podobieństwa, adekwatność lub zgodność relacji występujące między cechami zjawisk czy przedmiotów (elementami układów) określa się pojęciem analogii. Terminowi „analogia” w nauce przypisuje się dwa znaczenia: 1) nazwy pewnego typu rozumowania; 2) struktury myślenia o podobnych do siebie układach.

Rozumowanie przez analogię zachodzi wówczas, gdy na podstawie własności, cech lub stosunków dwu lub więcej układów wnioskuje się o możliwości istnienia podobieństw i ich zbieżności w odniesieniu do innych cech, własności lub stosunków. Innymi słowy, myślenie za pomocą analogii polega na przechodzeniu od jednego układu do innego. Układ, z którego informacja jest przenoszona, to model (wzorec). Układ, na który przenosi się informację o podobieństwach,

to oryginał. Stosunek podobieństw pomiędzy modelem a oryginałem określa typ analogii.

Zasadniczo rozróżnia się następujące analogie: przebiegu (zdarzeń, zjawisk, procesów), zachowań (układów, elementów), funkcyjne (podobieństwo wykonywanych zadań przez elementy, układy), strukturalne (podobieństwo struktur elementów, układów), formalne (podobieństwo opisów matematycznych), materiałowe.

Wnioskowanie przez analogię ma najczęściej charakter nieuświadomiony. Dzieci (podobnie jak naukowcy) spontanicznie posługują się analogią przy rozwiązywaniu prostych zadań i złożonych problemów. Cała trudność polega jednak na przejściu od wnioskowania spontanicznego do heurystycznego, w którym poszukiwanie analogii i wnioskowanie na jej podstawie odbywa się na drodze działań uświadomionych i celowych.

3. Metodyka analogii

Analogii nie należy wykorzystywać jako środka dowodowego. W zależności od typu i rodzaju relacji, na których oparto związek podobieństw lub zgodności, analogia może prowadzić do wniosków o różnych stopniach pewności. Wnioski sformułowane na podstawie analogii jako prawdopodobne muszą podlegać weryfikacji w praktyce.

Posługiwanie się różnymi rodzajami analogii można zapisać w postaci wskazówek heurystycznych, uwzględniających niezbędne do wykonania procesy myślowe. Powinno się w szczególności:

- zauważać i wydobywać to, co nowe, przez analogię z tym, co poznane wcześniej (poznanie przez porównanie, ustalenie związku i relacji przez analogię);

- wykazywać identyczność, podobieństwo, adekwatność oraz różnice i odstępstwa (rozumowanie przez analogię, konstruowanie hipotezy);

- poznawać rzeczy nowe w sposób sprawdzalny w praktyce (weryfikacja hipotezy analogicznej przez doświadczenie).

Nauczyciele wiedzą, że stosowanie analogii w nauczaniu nie jest stereotypowym sposobem organizowania procesów myślowych, lecz oznacza wysoki stopień aktywności ucznia w zakresie przystosowania znanych wzorców, schematów i metod postępowania do rozwiązywania problemów w nowych warunkach. Uświadamia to sformalizowana postać strategii działania przez analogię.

Warunkiem podstawowym jest ustalenie, czy uczeń przyswoił sposób rozwiązania danej sytuacji problemowej S w dany sposób M , a następnie, czy postrzega pewną sytuację problemową S' jako inną: $S' \neq S$, odkrywa warunki W' jako nowe $W' \neq W$ itp. W dalszej kolejności wymagana jest od ucznia umiejętność spostrzegania podobieństw i adekwatności: $S' \sim S$, $W' \sim W$ itp., oraz ustalenie zbioru analogii sytuacji (zdarzeń, zjawisk, procesów) $\text{Anal}(S, S')$, bądź warunków $\text{Anal}(W, W')$ itp. Najwyższym poziomem aktywności ucznia będzie adaptacja myślowa schematu M na M' : $\text{Anal}(M, M')$, czyli przystosowanie schematu rozwiązania M z sytuacji S przy warunkach W na schemat M' , możliwy do zastosowania w sytuacji S' z warunkami W' . Innymi słowy, aby rozumować na podstawie analogii, należy: dostrzec (wykryć) analogię; przyjąć ją na gruncie ustalonych założeń; zastosować ustaloną analogię do wyciągania wniosków (stawiania hipotez); poddać wyniki rozumowania analogicznego weryfikacji; utworzyć strukturę zweryfikowanej analogii na wzór innej struktury analogicznej.

W rezultacie, zamiast mało efektywnej wiedzy encyklopedycznej, w pamięci ucznia powinna być przechowywana i przetwarzana dynamiczna struktura wiedzy zintegrowanej, zorganizowana poprzez analogię. Utworzone schematy, posiadana przez ucznia wiedza uprzednia lub niema oraz jej stopień operacjonalizacji w dużym stopniu wpływać będą na to, czego w przyszłości można będzie nauczyć (tj. przyłączyć do utworzonych „starych” schematów) i co zaktywizować.

Do tej pory sądzono [1,2], że umiejętność wnioskowania z zastosowaniem analogii pojawia się dopiero na poziomie operacji formalnych, dając tym samym możliwość stosowania tej metody dopiero na odpowiednim etapie rozwoju intelektualnego uczniów. Obecnie naturalne wydaje się dążenie do wcześniejszego przygotowania uczniów do posługiwania się analogią [3,4], z uwzględnieniem stymulującej roli myślenia spontanicznego, zastosowanych mechanizmów operacyjnych oraz funkcji analogii w nauczaniu przedmiotowym.

4. Funkcje analogii w nauczaniu fizyki

Z historii fizyki wiadomo, że myślenie przez analogię odegrało decydującą rolę w rozwoju fizyki jako nauki [5]. Dało ono początek nowym koncepcjom, odkryciom i teoriom naukowym:

„Geniusz badań naukowych to w znacznej mierze geniusz wyboru analogii. Genialne odkrycia naukowe polegają bowiem na dostrzeganiu głębszych i nowych związków analogii w strukturze rzeczywistości” [6].

Rola, jaką odgrywa analogia w rozwoju fizyki sprawia, że nie wolno pominąć tej metody poznawczej w nauczaniu tej dyscypliny [7]. Odpowiednio zastosowana analogia pełni doniosłą rolę jako metoda heurystyczna – wpływa na dynamizowanie utrwalonych w umyśle ucznia struktur wiedzy (niemej lub potocznej), uelastycznia myślenie, ułatwia przewyższanie stereotypów, inspirowanie do otwartości oraz „inności” myślenia i działań. Kształcąc umysł ucznia, analogia usprawnia proces uczenia się, przyczynia się do większej skuteczności, przewyższając izolacjonizm wynikający z kształcenia przedmiotowego (tj. według specjalizacji naukowych).

W nauczaniu fizyki (lub przyrody na niższym szczeblu kształcenia) opartym na czynnym nabywaniu wiedzy i pracy badawczej ucznia wymagane jest włączenie funkcji poznawczych analogii, jako metody poznania naukowego, do procesu uczenia się fizyki. Zgodnie z postulatami upodobnienia nauczania do procesu badawczego, do funkcji poznawczych analogii zaliczymy: 1) formułowanie zagadnień (problemów), 2) stawianie hipotez,

3) tworzenie (przenoszenie) pojęć, 4) przenoszenie metod i sposobów działania z jednej dziedziny (modelu) do drugiej (oryginału).

Ze względu na inne spełniane funkcje, analogia – jako metoda rozumowania – może być stosowana przy rozwiązywaniu najważniejszych problemów nurtujących współczesną dydaktykę fizyki. Zadania dydaktyczne, jakie można realizować w nauczaniu fizyki z zastosowaniem analogii przedstawiono w tabeli 1.

5. Miejsce analogii w nauczaniu fizyki

Wykorzystanie analogii w nauczaniu fizyki w Polsce jest stosunkowo rzadkie. Świadczy o tym analiza podręczników szkolnych z fizyki oraz obserwacje podczas hospitacji lekcji. Przykładów, w których autorzy odwołują się do metody analogii przy wprowadzaniu i wyjaśnianiu zjawisk, pojęć i praw fizycznych nie jest wiele. Stosowane analogie są na ogół mało pomysłowe i prowadzą do ilustracji zjawisk elektrycznych zjawiskami z mechaniki [8]. Brakuje przykładów analogicznych sytuacji z życia lub innych dziedzin wiedzy. Jednocześnie większość nauczycieli posługuje się tą metodą sporadycznie, nie doceniając walorów kształcących analogii lub nie będąc do jej stosowania odpowiednio przygotowanymi. Często stosowanie tej metody prowadzi do zwrócenia

Tabela 1. Funkcje analogii i realizowane zadania dydaktyczne w nauczaniu fizyki.

Funkcje analogii w nauczaniu fizyki	Zadanie dydaktyczne
funkcja heurystyczna	— doprowadzić do postawienia problemu, — ułatwić powstanie pytania, — stymulować powstawanie nowych pomysłów;
funkcja dydaktyczna	— wyjaśnić nowe zjawisko, — ułatwić zrozumienie i zapamiętanie istotnych treści, — uczynić opis zjawiska bardziej pogładowym, — uatrakcyjnić opis zjawiska;
funkcja kształcąca	— rozbudzić wyobraźnię, — poszerzyć horyzonty myślowe ucznia, — przewyższyć nieefektywne wzory zachowań (stereotypizację), — wyrobić elastyczność w myśleniu,
funkcja integrująca	— umożliwić integrację wiedzy przedmiotowej ucznia, — ukazać wzajemne powiązania i zależności między fizyką a innymi dziedzinami wiedzy.

uwagi na podobieństwo struktury praw [9,10], np. prawa Coulomba i prawa Newtona, na analogię opisu pól grawitacyjnego i elektrostatycznego, opisu ruchu postępowego i ruchu obrotowego bryły sztywnej, analogii modeli funkcyjnych stanów niestabilnych. Bardzo rzadko wyciąga się wnioski z dostrzeżonych analogii. Liczba stosowanych analogii też nie jest duża. Do wymienionych przykładów należy dodać analogię między drganiami mechanicznymi i elektrycznymi, analogię elektryczno-hydrodynamiczną oraz ciepło-elektryczną. Zdarza się, że w praktyce szkolnej uczniowie zapoznawani są z analogiami w ujęciu historycznym. Najczęściej są to następujące analogie: między spadaniem ciał na Ziemię a ruchem planet (Newton); między ruchami elektronów wokół jąder i ruchami planet wokół Słońca (Rutherford); między falowymi właściwościami fotonów i elektronów (de Broglie); między zjawiskami elektrycznymi i hydrodynamicznymi (Ohm); między polem elektrycznym i magnetycznym (Faraday); między siłą grawitacji i siłą elektrostatyczną (Coulomb); między działaniem namagnesowanych kulek na igiełkę i działaniem Ziemi na kompas (Gilbert); między zjawiskami elektrycznymi w laboratorium i zjawiskami zachodzącymi w chmurach burzowych (Franklin); między modelem planetarnym Kopernika i modelem atomu Bohra; między eliptycznymi orbitami w modelu planetarnym Kopernika-Keplera i modelu atomu Bohra-Sommerfelda; między różnymi zjawiskami statystycznymi.

Niestety, w szkole nie stosuje się analogii do ukazania znaczenia i roli wiedzy fizycznej dla rozwoju innych dziedzin wiedzy związanych z zainteresowaniami ucznia (ekonomii, psychologii itp.). Nie ma również praktyki wykorzystywania testów analogii do sprawdzenia poziomu wiedzy i uzdolnień. W rezultacie, jak wykazały badania przeprowadzone w Zakładzie Fizyki Ogólnej i Dydaktyki Fizyki Instytutu Fizyki UMCS w Lublinie [3,4,7,11], większość uczniów nie jest przygotowana do posługiwania się tą metodą rozumowania; często intuicyjnie wyczuwa analogie w pewnych zjawiskach, lecz nie potrafi ich uzasadnić. Taki stan wynika z nieuwzględniania analogii przy konstruowaniu struktury programów nauczania i formułowaniu treści programowych oraz z braku opracowań metodologicznych dla nauczycieli fizyki oraz przyrody.

6. Wskazówki metodyczne stosowania analogii w nauczaniu fizyki

Zapoznanie uczniów z metodą wnioskowania przez analogię wymaga częstszego i różnorodnego jej wykorzystywania w procesie nauczania i uczenia się fizyki. Nauczyciel może to osiągnąć stosując m.in. następujące strategie działania: stymulowanie szukania prostych (funkcjonalnych) analogii, wprowadzanie analogii metaforycznych, stosowanie modelowania, wykorzystywanie analogii formalnych, stosowanie testów analogii.

6.1. Stymulowanie szukania analogii

Ukierunkowanie uczniów na dostrzeganie związków podobieństwa między cechami, elementami zjawisk, obiektów czy zdarzeń jest pierwszym i najważniejszym etapem w rozwijaniu umiejętności dostrzegania analogii. Stymulowanie szukania analogii w otaczającym świecie, w życiu codziennym, odbywa się przez stawianie pytań: do czego jest to podobne; co przypomina; z czym się kojarzy; jak to pokazać; co by było, gdyby; i powinno preferować poszukiwanie podobieństw i przykładów z możliwie odległych dziedzin. Poszukiwanie odpowiedzi pozwala uczniom z jednej strony puścić wodze fantazji i uaktywnić wiedzę niemą (w formie werbalnej, inscenizacyjnej czy graficznej), z drugiej zaś uświadamia, że to samo zjawisko może wywoływać wiele skojarzeń, z których trzeba będzie wybrać najbardziej poprawne. Charakter zabawowy oraz możliwość stosowania języka niefizycznego pozwala nauczycielowi uchwycić błędy związane z wiedzą potoczną ucznia, rozpoznać najchętniej stosowane przez uczniów strategie (mówienie, pisanie, rysowanie, pokazywanie) oraz określić poziom spon-taniczności w zależności od przyjętej formy pracy (indywidualnie, w grupie uczniowskiej, z pomocą nauczyciela lub bez).

Stymulowanie szukania analogii w klasach młodszych (np. na przedmiocie przyroda w szkole podstawowej) ułatwi odwoływanie się na lekcjach fizyki do analogii funkcyjnych, wpływających z fundamentalności i uniwersalności praw fizycznych. Oto kilka przykładów [12]: analogia między rezonansem dwóch kamertonów a rezonansem zachodzącym na włóknach w uchu środkowym, co powoduje wyzwolenie impulsu nerwowego, w rezultacie czego słyszymy dźwięki; analogia między

działaniem aparatu fotograficznego a oka zwierząt i ludzi; analogia między grą na skrzypcach a dźwiękami wydawanymi przez świerszcze; analogia między skupieniem promieni światła przez soczewkę skupiającą i tkanki liści roślin; podobieństwo łączące radar z nietoperzem itp.

Takie wykorzystanie analogii pozwala uczniom spojrzeć na fizykę jako naukę uniwersalną, nie ograniczającą się do natury nieożywionej. Ujawni też integracyjną funkcję analogii w nauczaniu fizyki oraz znaczenie samej fizyki jako przedmiotu nauczania wprowadzającego ucznia w problemy współczesności.

6.2. Analogie metaforyczne

Analogie metaforyczne zajmują centralne miejsce w metodzie twórczego myślenia – synektyce, opracowanej przez W.J.J. Gordona [12,13]. Mogą one być stosowane przy wprowadzaniu pojęć [14], jak też rozwiązywaniu zadań [15]. Łącząc ze sobą zjawiska, zdarzenia i obiekty z różnych dziedzin (również wyobrażeń), pozornie nie związane (np. migawkę aparatu fotograficznego ze źrenicą oka, kąpiel w wannie z prawem Archimedes, model atomu z modelem planetarnym, zachowanie się uczniów w klasie z cząsteczkową budową materii, graczy na giełdzie z cząsteczkami gazu rozrzedzonego, demona Maxwella z II zasadą termodynamiki itp.).

Zastosowanie analogii metaforycznych w nauczaniu nie tylko wzbogaca język ucznia i uatrakcyjni opis zjawiska, ale rozbudza wyobraźnię, wyrabia elastyczność myślenia oraz umiejętność odstępowania od utartych schematów. Aby zapobiec łączeniu na stałe zjawiska fizycznego z analogiem wyobrażeniowym powstałym w umyśle ucznia i pomóc w jego odrzuceniu, gdy już spełnił swoją rolę, należy stymulować ucznia do podawania różnych przykładów analogii nawiązujących do bliskich mu rzeczy lub zdarzeń (z kręgu jego zainteresowań) w różnorodnej formie (werbalnej, graficznej, inscenizacyjnej).

6.3. Modelowanie

Analogia jest głównym czynnikiem budowy modeli, które zajmują jedno z centralnych miejsc w strukturze badania naukowego w fizyce [16]: „Bez modeli nie można by było wykorzystywać teorii do (...) przewidywać dotyczących zjawisk nieznanych” [17].

Przyjęto, że model to dający się pomyśleć lub materialnie zrealizować układ, który – odzwierciedlając lub odtwarzając przedmiot badania – dostarcza nowej informacji o tym przedmiocie [18]. Związek między modelem a rzeczywistością jest relacją analogii, a przeniesienia informacji uzyskanych w procesie badania modelu na odpowiednik w rzeczywistości możemy dokonać dzięki wnioskowi z analogii. Dostrzeżenie analogii stanowi warunek zarówno konstrukcji modelu, jak i wyjaśnienia naukowego, opartego na tym modelu. Modele są zatem narzędziami opracowania nowych hipotez, teorii (modele myślowe), jak też narzędziami i środkami doświadczalnego badania zjawisk i sprawdzania teorii (symulacje numeryczne lub modele materialne).

Zapoznając uczniów z pojęciami, prawami czy teoriami fizycznymi nauczyciel staje przed problemem ich interpretacji. Dotychczas uważano, że interpretacja może odbywać się jedynie za pomocą faktu fizycznego. Obecnie wykorzystuje się w tym celu także modelowanie [19]. Polega ono na budowie (wyborze) i badaniu modelu, który może zastąpić obiekt rzeczywisty i którego badanie dostarcza nowych informacji o tym obiekcie. Innymi słowy, modelowanie umożliwia badanie zjawisk analogicznych, zachodzących w uproszczonej strukturze modelu.

Jako metoda nauczania, modelowanie składa się z następujących ogniw: 1) dostrzeżenie określonych własności badanego oryginału; 2) sformułowanie problemu (celu); 3) zbudowanie określonego modelu (przedmiotu, zjawiska); 4) badanie modelowe; model jest tu przedmiotem rozważań, poddaje się go różnego rodzaju oddziaływaniom (symulacji), rejestruje się jego reakcję i wyciąga wnioski; 5) przeniesienie informacji zdobytej w toku obserwacji modelu na oryginał.

W związku z postulatami świadomego i aktywnego udziału ucznia w procesie nauczania oraz postulatami upodobnienia procesu uczenia się do procesu badawczego [20] wielką wagę w procesie nauczania fizyki nabierają umiejętności z jednej strony budowania modeli, z drugiej zaś zastosowania ich do przewidywania zarówno przebiegu zjawisk oraz procesów fizycznych, jak i właściwości materii. Kształtowanie tych umiejętności jest ściśle związane z umiejętnością wnioskowania przez analogię.

Heurystyczna rola analogii zaznacza się w procesie tworzenia i badania modeli, a następnie przenoszenia rezultatów tych badań na sytuację rzeczywistą oraz wykorzystanie ich do opisu i wyjaśnienia konkretnego fragmentu rzeczywistości. Liczba rzeczywistych i pomyślanych eksperymentów modelowych w procesie nauczania fizyki powinna być duża, aby uczeń miał okazję nie tylko tę metodę badawczą poznać, ale mógł ją zastosować w konkretnych sytuacjach. Pozwoli to rozwijać wyobraźnię i myślenie abstrakcyjne, opanować metodę wnioskowania przez analogię oraz metodę modelową, które są wykorzystywane w wielu innych dziedzinach nauki (np. ekonomii [21]).

6.4. Analogie formalne

Analogia formalna, odkryta przez J.C. Maxwella, w dydaktyce fizyki jest użyteczna zarówno przy wprowadzaniu nowego materiału, jak i rozwiązywaniu zadań. Występujące między różnymi zjawiskami fizycznymi analogie formalne powodują, że rozwiązując jedno zagadnienie mamy możliwość uzyskania dokładnych informacji o rozwiązaniach opisujących inny, analogiczny problem. Rozumowanie przez analogię pozwala przenieść prawidłowości poznane przy badaniu pewnych procesów na procesy o innej naturze, lecz mające podobny przebieg. Przyczynia się ono do łatwiejszego i efektywniejszego przyswajania opisów matematycznych poszczególnych zjawisk oraz ich interpretacji fizycznej bez dodatkowego obciążenia pamięci [10,22]; umożliwia szybsze zgłębienie zagadnień z różnych działów, dając możliwość syntetycznego spojrzenia na całą klasę zjawisk, co ułatwia ich opanowanie przez ucznia w stosunkowo krótkim czasie [23].

Ukazanie, jak wiele w otaczającym nas świecie jest zjawisk analogicznych, opisanych takim samym modelem matematycznym, przyczynia się do integracji wiedzy fizycznej ucznia o przyrodzie. Analogia formalna łączy np. takie zjawiska, jak rozładowanie kondensatora przez opór, rozpad promieniotwórczy izotopów czy emisję spontaniczną atomów. Zjawiska te są opisywane funkcją wykładniczą typu $A = A_0 e^{-kt}$ [10].

6.5. Testy analogii

Wykorzystanie testu analogii w procesie kontroli umożliwia określenie stopnia opanowania

wiedzy fizycznej i jej operatywności z uwzględnieniem pomiaru uzdolnień i poziomu sprawności intelektualnych ucznia („zdolność rozumowania przez analogię jest jednym z głównych czynników inteligencji” [1]).

Testy analogii oparte są na proporcji analogicznej typu: $(A:B)::(C:X)$, czyli: A ma się tak do B , jak C do X , gdzie A, B, C, X to człony analogii (przedmioty, zjawiska, procesy), zaś znak $:$ oznacza relację analogii (np. cecha wspólna, część-całość, nadrzędność, tożsamość, przeciwieństwo, przyczynowość). Badania wykazały [2], że w zależności od typu relacji zdolność rozumowania przez analogię formuje się u ucznia w różnym wieku, np. przedmiot-cecha: 7 lat, tożsamość: 7–8, nadrzędność oraz część-całość: 10–11, przeciwieństwo: 11; przyczynowość: 12–13 lat. W podobnej kolejności wzrasta stopień trudności uwzględnianych relacji.

Konstruując testy analogii należy uwzględnić, że rozumowanie przez analogię w stadium operacji konkretnych jest silnie uzależnione od treści zadania i występującej w nim relacji oraz że w stadium operacji formalnych takie uzależnienie nie występuje. Nie wolno zapominać, że przebieg czynności wnioskowania przez analogię nie tylko zależy od wieku uczniów i relacji, na której oparto związek analogii. Ważnymi czynnikami są też: zdolności ucznia, zakres nabytej wiedzy potocznej i doświadczenie, poziom wiedzy ogólnej i stopień werbalizacji, indywidualne nastawienie na stosowaną strategię, trening w zakresie spontanicznego stosowania analogii nieformalnych (który można realizować nawet z 6-letnimi dziećmi).

Dobór zadań testów analogii nie należy do najłatwiejszych. Musi uwzględniać zarówno ogólnie ustalone możliwości intelektualne i percepcyjne uczniów, jak też formalne ograniczenia indywidualnego systemu przetwarzania informacji. Z tego względu w praktyce szkolnej najczęściej stosowanymi typami zadań w testach analogii są zadania o następującym charakterze: inwencyjnym (znając trzy elementy proporcji analogicznej należy podać czwarty); selektywnym (wymagają selekcji danych układów ze względu na relację pomiędzy elementami i dokonania wyboru rozwiązania spośród podanych alternatyw) oraz kategoryzacyjnym (wymagają integracji wiedzy).

Przykłady najprostszych zadań zawarto w tabelach 2 i 3. Należy zwrócić uwagę, że uczniowie

mogą w różny sposób dążyć do rozwiązania zadania (nie ma tu ścisłych algorytmów działania, a tylko reguły heurystyczne). Warto poznać sposób wykonania zadania, który nie jest obojętny dla końcowego wyniku. Znając strategię zastosowaną przez ucznia, łatwiej odnieść się do udzielonej odpowiedzi w formie oceny opisowej.

Wprowadzenie zadań tego typu do procesu nauczania fizyki przyczyni się do większej sprawności umysłowej w dostrzeganiu analogii i zintegruje wiedzę fizyczną ucznia tylko wtedy, gdy zostaną spełnione dwa podstawowe warunki: prawidłowe stosowanie analogii wg reguł metodycz-

nych [3] oraz podmiotowe traktowanie ucznia (od którego nie należy wymagać stosowania analogii, jeżeli ze względów psychiczno-charakterologicznych [24] niechętnie posługuje się tą metodą rozumowania). Ponieważ jednak nieformalne posługiwanie się analogią staje się powszechne i spełnia podstawowe funkcje poznawcze [25] w szybko zmieniającym się świecie, w którym liczba sytuacji nowych gwałtownie narasta, należy zintensyfikować badania dydaktyczne nad warunkami i skutecznością stosowania analogii w nauczaniu fizyki i przyrody oraz podjąć prace nad efektywnymi opracowaniami dla nauczycieli.

Tabela 2. Przykłady zadań o charakterze inwencyjnym i selekcyjnym.

Zadanie testu inwencyjnego	Zadanie testu selekcyjnego
Badanie osiągnięć ucznia	
W miejsce kropek wpisz najwłaściwsze, według ciebie, słowo.	Która z par odpowiada podanej parze ze względu na związek między ich elementami?
..... topnienie ⇔ krzepnięcie	 dyfuzja ⇔ zjawisko
..... parowanie ⇔	 ⇔
a) wrzenie	a) linijka ⇔ drewno
b) skraplanie	b) tlen ⇔ gaz
c) ciecz	c) wskazówka ⇔ sekundomierz
d) gaz	d) waga ⇔ masa
Badanie sposobu wykonania zadania	
Napisz, jakim słowem lub zdaniem zastępujesz znak ⇔	Napisz, jakim słowem lub zdaniem zastępujesz znak ⇔

Tabela 3. Przykłady zadań o charakterze kategoryzacyjnym.

Zadania wykorzystujące kategoryzacyjny charakter analogii	
Napisz nazwę (zasadę), która jest wspólna i łączy podane zjawiska:	
— załamanie fali płaskiej,	— dwie kulki z ładunkami elektrycznymi,
— ugięcie fali na szczelinie,	— dwa przewodniki z prądem w polu magnetycznym,
— rozchodzenie się fali w próżni,	— ruch Księżyca wokół Ziemi,
— interferencja fal na wodzie,	— dwa magnesy zawieszone na nitce.
— polaryzacja przez odbicie.	
(ZJAWISKA FALOWE)	(ODDZIAŁYWANIE)

Literatura

- [1] A. Biela, *Psychologiczne podstawy wnioskowania przez analogię* (PWN, Warszawa 1981).
- [2] A. Jurkowski, *Rozumowanie przez analogię u dzieci w wieku szkolnym* (PWN, Warszawa 1967).
- [3] B. Gładyszewska, „Czy należy stosować analogię w nauczaniu fizyki?”, w: *Z teorii i praktyki nauczania i uczenia się fizyki* (WSP, Rzeszów 1989), s. 147.
- [4] R. Zawisza, „Some Remarks About Analogy in Teaching Physics”, *IF UMCS Annual Report 1998* (UMCS, Lublin 1999), s. 117.
- [5] A. Biela, *Analogia w nauce* (PAX, Warszawa 1989).
- [6] A. Arber, „Analogy in History of Science”, w: *Studies and essays in the history of science and learning offered* (Jraus Reprint Co., New York 1969), s. 219.
- [7] B. Gładyszewska, „Model and Analogy in Science and Teaching Physics”, *Annales UMCS, Sectio AAA* (UMCS, Lublin 1983), s. 57.
- [8] J. Morawiec, „Analogie. Wybrane propozycje ich wykorzystania w dydaktyce fizyki”, *Rocznik Naukowo-Dydaktyczny. Fizyka*, z. 5/39 (WSP, Rzeszów 1978), s. 49.
- [9] J. Salach, *Dydaktyka fizyki. Wybrane zagadnienia* (WN WSP, Kraków 1989).
- [10] M. Klisowska, „Wykorzystanie komputera do formułowania problemów »analogowych«”, *Materiały z XIV Konferencji Informatyka w Szkole* (Lublin 1998), s. 317.
- [11] R. Zawisza, „Zastosowanie analogii w nauczaniu fizyki. Wyniki wstępnych badań”, *Konferencja Dydaktyków Fizyki „Wiedza fizyczna i jej przekaz”*, Kraków 1999.
- [12] W.J.J. Gordon, *Synectics: The Development of Creative Capacity* (Harper and Row, New York 1961).
- [13] W.J.J. Gordon, *The Metaphorical Way* (Harper and Row, New York 1971).
- [14] A. Galska-Krajewska, K.M. Pazdro, *Dydaktyka chemii* (PWN, Warszawa 1990).
- [15] S. Magierska, „Synektyka jako metoda rozwiązywania zadań”, w: *Zadanie, metoda, rozwiązanie – techniki twórczego myślenia. Zbiór 1*, red. A. Góralski (WNT, Warszawa 1977).
- [16] M. Hesse, *Models and Analogies in Science* (Sheed and Ward, London 1963).
- [17] M. Hesse, „Models in Physics”, *Brit. J. Phil. Sci.* **15** (4), 15 (1953).
- [18] W. Sztoff, *Modelowanie i filozofia* (PWN, Warszawa 1971).
- [19] M. Klisowska, „Komputerowe modelowanie i symulacja eksperymentu fizycznego”, *Materiały z XV Konferencji Informatyka w Szkole* (Katowice 1999), s. 298.
- [20] M. Klisowska, A. Puch, „Propozycja realizacji postulatów upodobnienia procesu uczenia się do procesu badawczego”, *Fizyka w Szkole*, z. 2/1989, s. 87.
- [21] A. Palczewski, „Dynamiczne modelowanie rynku finansowego; symulacje numeryczne”, *Instrumenty pochodne. Materiały z Sympozjum Matematyki Finansowej* (Kraków 1997), s. 227.
- [22] M. Klisowska, „Integracja funkcji modeli matematycznych w nauczaniu upodobnionym do procesu badawczego”, w: *Materiały Konferencyjne VI Środowiskowej Konferencji Matematycznej* (Rzeszów-Lublin-Krynica 1999), s. 30.
- [23] M. Kargol, „O wykorzystaniu analogii w intensyfikacji nauczania fizyki”, *Problemy Kształcenia Nauczycieli Fizyki. Materiały i sprawozdania COMSN*, z. 25, red. W. Błasiak (WN WSP, Kraków 1993), s. 208.
- [24] E. Nęcka, *Inteligencja i procesy poznawcze* (OW IMPULS, Kraków 1994).
- [25] E. Nęcka, „Poznawcze funkcje analogii”, *Studia Filozoficzne* **6**, 169 (1984).

Semiconductor Surface Passivation '99

W dniach 19–22 września 1999 r. odbyło się w hotelu „Narcyz” w Ustroniu, pod auspicjami Sekcji Nauki o Powierzchni Polskiego Towarzystwa Próżniowego, międzynarodowe seminarium naukowe „I International Seminar on Semiconductor Surface Passivation – SSP '99”.

Pomysłodawcą Seminarium oraz przewodniczącym Komitetu Naukowego i Organizacyjnego był prof. Jacek Szuber, a głównym organizatorem – Zakład Fizyki Powierzchni Półprzewodników Instytutu Fizyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Przewodniczącym Międzynarodowego Komitetu Doradczego był prof. Hans Hartnagel z Politechniki w Darmstadt (Niemcy).

Było to pierwsze spotkanie naukowe specjalistów, głównie europejskich, zajmujących się badaniami z zakresu pasywacji powierzchni półprzewodników w aspekcie zastosowań w mikroelektronice. Ogółem w Seminarium udział wzięło ponad 40 uczestników, w tym blisko 30 osób z zagranicy, m.in. z Anglii, Chin, Francji, Irlandii, Niemiec, Ukrainy, Włoch i Rosji.

W ramach kilku sesji tematycznych wygłoszono łącznie 18 referatów na zaproszenie, w większości przeglądowych, na temat aktualnie prowadzonych badań doświadczalnych i teoretycznych w ośrodkach zagranicznych i krajowych.

Przedmiotem dwóch pierwszych sesji tematycznych pierwszego dnia Seminarium były główne kierunki w badaniach doświadczalnych i teoretycznych półprzewodnikowych granic fazowych. Referaty przeglądowe przedstawili profesorowie: Hans Hartnagel (Politechnika w Darmstadt, Niemcy), Andrzej Jeleński (Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, Warszawa), G.P. Srivastava (Uniwersytet w Exeter, Anglia) oraz Mykola Berchenko (Uniwersytet Państwowy we Lwowie, Ukraina).

W trakcie kolejnej sesji tematycznej pierwszego dnia Seminarium w godzinach popołudniowych, poświęconej pasywacji plazmowej powierzchni półprzewodników grupy III-V, referaty przedstawili dr Marie Paule Besland (Ecole Centrale de Lyon, Francja) oraz dr Giovanni Bruno (Centrum Badawcze Chemii Plazmy w Bari, Włochy). Na zakończenie tej sesji odbyła się prezentacja aparatury naukowej do badań powierzchni materiałów, przygotowana przez krajowych producentów i dystrybutorów – sponsorów Seminarium. W godzinach wieczornych odbyła się natomiast sesja plakatowa, w trakcie której przedstawiono ponad 20 komunikatów z prac własnych.

Drugi dzień Seminarium zdominowała tematyka pasywacji siarkowej powierzchni półprzewodników grupy III-V, głównie GaAs oraz InP. Referaty dotyczące tej tematyki wygłoszili: prof. Xiaoyuan Hou (Uniwersytet Fudan w Szanghaju, Chiny), dr Thorsten Kampen (Uniwersytet w Chemnitz, Niemcy), prof. Xinyi Zhang (Chiński Uniwer-

sytet Nauk Ścisłych i Techniki w Hefei, Chiny), dr Vladimir Berkovits (Instytut Fizyki Technicznej im. Joffego w St. Petersburgu, Rosja), dr Thomas Chasse (Uniwersytet w Lipsku, Niemcy) oraz dr Greg Hughes (Uniwersytet Miasta Dublin, Irlandia).

W trakcie popołudniowych obrad drugiego dnia odbyła się również tzw. sesja okrągłego stołu „Current status and perspectives of semiconductor surface passivation” (moderatorem był prof. Hans Hartnagel – przewodniczący Międzynarodowego Komitetu Doradczego) z udziałem wielu uczestniczących w Seminarium wybitnych specjalistów z zakresu pasywacji powierzchni półprzewodników.

W trzecim dniu obrad odbyła się dwuczęściowa sesja poświęcona nowym kierunkom w pasywacji powierzchni półprzewodników i granic fazowych, w trakcie której referaty wygłoszili: prof. Bernard Gruzza (Uniwersytet Blaise’a Pascala w Clermont-Ferrand, Francja), dr Bogusława Adamowicz (Politechnika Śląska w Gliwicach), dr Piotr Mazurek (UMCS, Lublin), oraz dr Franciszek Krok (Uniwersytet Jagielloński).

Podsumowania bardzo interesujących obrad Seminarium, którym towarzyszyły długie dyskusje po każdym wygłoszonym referacie, dokonał dr Thomas Chasse.

Organizatorzy wydali specjalny zeszyc z programem i streszczeniami przedstawionych referatów i komunikatów. Pełna treść wybranych referatów plenarnych oraz komunikatów plakatowych zaakceptowanych do druku zostanie natomiast opublikowana w specjalnym numerze *Vacuum*, recenzowanego czasopisma o zasięgu światowym z tzw. listy filadelfijskiej, wydawanego przez Elsevier Science Ltd, UK.

Na zakończenie pierwszego dnia zorganizowano w ramach programu socjalnego ognisko połączone z pieczeniem kiełbasek i słuchaniem dobrej muzyki, głównie rockowej, natomiast w godzinach wieczornych drugiego dnia odbyła się tradycyjna, uroczysta kolacja, połączona z występem zespołu kameralnego.

Seminarium stało się okazją do wymiany informacji, doświadczeń i pomysłów, forum do szerokiej dyskusji na temat aktualnie prowadzonych badań pasywacji powierzchni półprzewodników w aspekcie zastosowań w mikroelektronice nie tylko w Europie. Umożliwiło także przedstawienie swoich osiągnięć naukowych młodym uczestnikom. Ponadto stało się ono okazją do nawiązywania i zacieśnienia kontaktów osobistych, m.in. w trakcie dyskusji w przerwach obrad na tarasie hotelu „Narcyz”, przy pięknej słonecznej pogodzie.

W powszechnej opinii uczestników, w tym wybitnych specjalistów powierzchni półprzewodników – m.in. członków komitetów redakcyjnych światowych czasopism naukowych, Seminarium dobrze wypełniło lukę w systemie organizowanych w świecie konferencji naukowych nt. po-

wierzchni półprzewodników i zgodnie ze wstępnymi ustaleniami będzie organizowane cyklicznie co 2 lata, z udziałem specjalistów ze wszystkich ważniejszych ośrodków światowych prowadzących prace w tej dziedzinie.

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

Jacek Szuber
Instytut Fizyki PŚI
Gliwice

XIV Sympozjum Maksa Borna

Dwa razy w roku odbywa się organizowane przez Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Wrocławskiego sympozjum, którego patronem jest Max Born – fizyk niemiecki urodzony we Wrocławiu. Ubiegłoroczne, czternaste już spotkanie o tytule „Nowe symetrie i układy całkowalne” zainteresowało przede wszystkim fizyków matematycznych.

Odbyło się ono w Karpaczu w dniach 20–24 września 1999 r. W ciągu tych kilku dni uczestnicy wysłuchali prawie trzydziestu wykładów poświęconych skończeniu i nieskończeniu wymiarowym algebr i superalgebr; grupom kwantowym i kwantowym deformacjom modeli fizycznych, symetriom i ich dynamicznym konsekwencjom w nowej teorii strun; klasycznym i kwantowym układom całkowalnym z supersymetrias lub bez nich;

formalizmowi i zastosowaniom nieskończonych hierarchii całkowalnych oraz analitycznym i numerycznym metodom w teorii modeli całkowalnych. Wśród zaproszonych 29 wykładowców znaleźli się fizycy z Francji, Holandii, Niemiec, Polski, Rosji, Stanów Zjednoczonych, Ukrainy i Wielkiej Brytanii. Między innymi Henryk Aratyn z University of Illinois w Chicago (USA) przedstawił wykład pod tytułem „Solitony toroidalne w (3+1)-wymiarowych układach całkowalnych”, Igor Bandos z Instytutu Fizyki Ukraińskiej Akademii Nauk w Charkowie – „O supersymetrycznych funkcjonalach działania dla bran całkowalnych”, Eric Berghoff z Uniwersytetu w Gronigen (Holandia) – „Solitony i obiekty rozciągłe”, Ryszard Kerner z Uniwersytetu Piotra i Marii Curie w Paryżu – „Algebra macierzy stochastycznych i jej zastosowania do opisu procesów wzrostu i zlepiania”, Wojciech Zakrzewski z Uniwersytetu w Durham (Wielka Brytania) – „Skyrmiony i odwzorowania harmoniczne”. Pełną listę wykładowców wraz z tytułami wykładów można znaleźć na stronie Internetu: www.ift.uni.wroc.pl/~poff/symposia/max14.html.

Materiały sympozjum będą wydane w formie książkowej przez wydawnictwo World Scientific w Singapurze. Sponsorami XIV Sympozjum Maksa Borna były: Uniwersytet Wrocławski, Ministerstwo Edukacji Narodowej i Kasa im. Mianowskiego. Ustalono, że jesienią roku 2000 sympozjum o podobnej tematyce zostanie zorganizowane przez Instytut Fizyki Uniwersytetu Łódzkiego.

Dobromiła Nowak-Szczepaniak
Instytut Fizyki Teoretycznej UWr
Wrocław

RECENZJE

Na ramionach olbrzymów

Richard P. Brennan: *Na ramionach olbrzymów – życie i dzieło twórców współczesnej fizyki*, z jęz. angielskiego przełożył Jerzy Gronkowski, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999, s. 340.

Wydana niedawno przez WNT książka Brennana w tłumaczeniu Gronkowskiego stanowi udaną popularyzację fizyki adresowaną do ambitnego czytelnika nie mającego wiedzy wykraczającej poza szkołę średnią. Autor przedstawia rozwój fizyki od czasów najdawniejszych do najnowszych, kładąc nacisk na kształtowanie się najważniejszych idei. Mowa jest więc o keplerowskich prawach ruchu planet, mechanice i teorii grawitacji Newtona, szczególnej i ogólnej teorii Einsteina, koncepcji kwantów Plancka, dualizmie korpuskularno-falowym, mechanice

kwantowej, cząstkach wirtualnych, budowie materii według Modelu Standardowego, a nawet o kosmologicznej zasadzie antropicznej. Opis doświadczeń laboratoryjnych i ważnych odkryć służy temu nadrzędemu celowi jako źródło inspiracji i metoda weryfikacji koncepcji. Okazuje się, że można poglądowo przedstawić istotę teorii fizycznych bez odwoływania się do aparatu matematycznego. W przypadku teorii względności zadanie to zostało ułatwione przez samego Einsteina, który do swoich teorii dochodził przez stawianie sobie prostych pytań. Istotę teorii kwantowej natomiast nie jest łatwo przedstawić poglądowo; uważam, że Autorowi udało się to w dużej mierze.

Zrozumienie tych, niełatwych przecież, rozważań utrudniają jednak błędy i niejasności – na szczęście niezbyt liczne. Za najbardziej dotkliwie uważam rozumienie bezwładności jako stanu spoczynku w kontekście jej rów-

noważności z grawitacją (s. 97), nazwanie grawitacji „zakrzywionym polem w kontinuum czasoprzestrzennym” (s. 94) i pomylenie bozonów W z bozonami Z (w słowniczku). Poza tym zagadkowe wydaje się zdanie „Newton wynalazł ... rachunek różniczkowy, mający zastąpić płaską geometrię euklidesową” (s. 214) lub wzmianka o wysiłkach Einsteina „by pogodzić fizykę cząstek z fizyką przestrzeni” (s. 66). Razi też fakt, że fermiony i bozony pojawiają się w książce kilka razy tylko w kontekście ich roli w Modelu Standardowym (fermiony jako składniki materii, bozony jako nośniki oddziaływań), a nigdzie nie wspomniano o ich pierwotnej definicji, związanej ze spinem i statystyką. Szkoda, że Tłumacz, który skorygował wiele błędów Autora – głównie w pisowni imion i nazwisk (chwala mu za to!), nie pokusił się o korektę tych błędów (i innych drobnych, o których nie wspominam). Tłumaczenie jest na ogół dobre; książkę czyta się łatwo, nie czując tego, że jest to tłumaczenie z angielskiego. Tłumacz nie ustrzegł się, niestety, od wprowadzenia dodatkowych błędów. I tak, pisząc o doświadczeniu myślowym Einsteina z błyskawicami obserwowanymi z jadącego pociągu (s. 84) z niezrozumiałych powodów tłumaczy „at different times” jako „w tej samej chwili”, przez co cały ustęp staje się zupełnie niezrozumiały. Stała kosmologiczna nazwana jest w oryginale „monumental fudge”, czyli monumentalnym buble, a tłumacz zrobił z niej „ogromny czynnik”. Nie wiadomo też, czemu zastąpił

piłkę bejsbolową przez piłkę lekarską pod rysunkiem na s. 98. Tytuł książki „Calculus made easy” należałoby rozumieć jako „Rachunek różniczkowy w przystępnym ujęciu”, a nie „Rachunek różniczkowy nie jest trudny”. Są też stylistyczne niezręczności, jak „porzuciła swe dziecko od strony uczuciowej” czy „nazywającego się Pauli”. Tytuł oryginału „Heisenberg *probably* slept here” zawiera podwójny dowcip. Jest kpina z amerykańskiej skłonności do upamiętniania miejsc, które odwiedzili, choćby w przełocie, wybitni ludzie, a słowo „probably” nawiązuje do probabilistycznej interpretacji mechaniki kwantowej. Tłumacz zamordował dowcip, przekładając tytuł (w przedmowie) jako „Heisenberg w zasadzie tu przebywał”.

Mimo tych paru krytycznych uwag uważam, że książka jest znakomicie napisana i starannie przetłumaczona. Opis idei fizycznych przeplata się z historią wielkich twórców tych idei; ta kombinacja tworzy interesującą fabułę i powoduje, że książkę czyta się dosłownie jednym tchem. Śmiało można ją polecić wszystkim, od uczniów do profesjonalistów. Istnienie rozsypanych gdzieś błędów i nieścisłości zmusza jednak do starannego i krytycznego czytania.

Zofia Białynicka-Birula
Instytut Fizyki PAN
oraz Szkoła Nauk Ścisłych
Warszawa

LISTY DO REDAKCJI

Pulsacja czy częstość kołowa

Powszechnie wiadomo, że nie ma ujednoliconej terminologii dotyczącej częstości ruchu harmonicznego. W różnych dziedzinach fizyki i techniki stosuje się wymiennie terminy „częstość” i „częstotliwość” na oznaczenie liczby cykli na sekundę (f , ν , jednostka Hz). Wielkość $\omega = 2\pi\nu$ nazywana jest częstością lub częstotliwością kołową lub kątową. Mechanicy nazywają tę wielkość pulsacją (jednostka: radian na sekundę). W obowiązującej normie PN-88/E-01100 „Oznaczenie wielkości i jednostek miar używanych w elektrotechnice. Wielkości podstawowe. Postanowienia ogólne”, występuje termin „częstotliwość” w hercach (Hz), oznaczenie główne f oraz re-

zerwowe ν . Następnie występuje termin „pulsacja”, „częstotliwość kołowa” (ω), jednostka: radian na sekundę, oraz „prędkość kołowa” (ω , oznaczenie rezerwowe Ω), jednostka: radian na sekundę. Jest to zgodne z tym, co stosują autorzy podręczników do nauki fizyki.

W celu ujednolicenia terminologii proponuję używanie terminu „częstość” lub „częstotliwość” dla oznaczenia ν (lub f) oraz terminu „pulsacja” do opisu ω .

W przemyśle obowiązują normy PN, dlatego do nich nawiązałem.

Adam Jarema
Warszawa

Andrzej Hryniewicz doktorem h.c. AGH

W dniu 20 października 1999 r. Senat Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie nadał Andrzejowi Hryniewiczowi, profesorowi Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz Instytutu Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego w Krakowie, tytuł doktora honoris causa.

Promotorem był prof. Karol Krop z Wydziału Fizyki i Techniki Jądrowej AGH, który w swojej laudacji przedstawił osiągnięcia naukowe Hryniewicza, podkreślając szczególnie wprowadzenie przez niego w Polsce badań z dziedziny spektroskopii Mössbaurowskiej (które z jego inicjatywy rozwinęły się również w AGH) oraz jego działalność organizacyjną i popularyzatorską.

Andrzej Hryniewicz jest członkiem czynnym PAU i członkiem rzeczywistym PAN, doktorem h.c. Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, laureatem Medalu Smoluchowskiego, nadanego mu w 1988 r. przez Polskie Towarzystwo Fizyczne, otrzymał również tytuł doktora honorowego Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych w Dubnej.

B. W.

Nagroda Aleksandra Jabłońskiego

Dla uczczenia wybitnych osiągnięć profesora Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu Aleksandra Jabłońskiego (1898–1980) w dziedzinie teorii i zastosowań spektroskopii fluorescencyjnej i fotofizyki, amerykańska firma Spectronic Instruments Inc. ustanowiła w 1997 r. Nagrodę im. Aleksandra Jabłońskiego. Nagroda, w postaci pamiątkowego medalu oraz 2500 dolarów, jest przyznawana corocznie przez zespół Biological Fluorescence Subgroup of Biophysical Society w USA (patrz Kronika 3/96). Poprzednimi laureatami byli: Gregorio Weber (University of Illinois at Urbana-Champaign, USA), Michael Kasha (Florida State University, Tallahassee, USA) i Ludwig Brand (Johns Hopkins University, Baltimore, USA).

W obecnym, 2000 r. Nagrodę otrzymał Watt W. Webb (Cornell University, Ithaca, USA) za wybitne osiągnięcia w zakresie badań dynamiki procesów molekularnych w żywych komórkach i tkankach.

Webb tytuł doktora uzyskał w 1955 r. w MIT. W 1961 r. przeniósł się na Uniwersytet Cornell, gdzie objął funkcję dyrektora Health-National Science Foundation Development Resource for Biophysical Imaging and Opto-electronics. W latach 1983–89 był dyrektorem School of Applied and Engineering Physics na tym Uniwersytecie. Obecnie jest członkiem komitetu Cornell Research Foundation, National Academy of Engineering, National Academy of Sciences oraz wielu innych towarzystw naukowych (m.in. American Physical Society oraz American Institute of Medical and Biological Engineers).

W 1990 r. został laureatem nagrody American Physical Society z zakresu fizyki biologicznej.

W latach siedemdziesiątych zaproponował wykorzystanie metody fluorescencyjnej spektroskopii korelacyjnej do wykrywania pojedynczych cząsteczek i badania tych procesów biochemicznych, które mają wpływ na sygnał fluorescencyjny. W latach dziewięćdziesiątych opracował doświadczalną metodę tzw. mikroskopii wielofotonowej, wykorzystującą wzbudzenie wielofotonowe w mikroskopii fluorescencyjnej. Metoda ta ma następujące zalety: 1) ogranicza, dzięki obniżeniu energii fotonów, fotodestrukcję obiektu badań; 2) znacznie poprawia jakość uzyskiwanego obrazu przez zmniejszenie rozproszenia światła wzbudzającego i ograniczenie niepożądanego fluorescencji; 3) umożliwia uzyskanie rozdzielczości w trzech wymiarach, ponieważ wzbudzenie następuje tylko w obszarze, w którym wiązka wzbudzająca jest maksymalnie skupiona.

Józefina Turło

Stypendia krajowe FNP dla najlepszych młodych fizyków

Fundacja na Rzecz Nauki Polskiej przyznaje co roku stypendia najlepszym młodym (do 30 lat) pracownikom nauki i doktorantom, posiadającym dorobek naukowy udokumentowany publikacjami w uznanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Stypendia te, tak jak inne subwencje FNP, przyznawane są na drodze konkursu. W 2000 r. wpłynęło 449 wniosków; laureatami zostały 104 osoby, wśród nich 10 fizyków. W tym roku stypendium wynosi 18 tys. zł i jest wolne od podatku dochodowego.

Oto wyróżnieni młodzi fizycy: Dagomir Kaszlikowski (UG), Agnieszka Korgul (UW), Marcin Kostur (UŚI), Paweł Machnikowski (PWR), Michał Mierzwa (UŚI), Jakub Jan Rysz (UJ), Jacek Szcztyko (UW), Piotr Szymczak (UW), Michał Wierzbicki (PW) i Maciej Zwierzycki (IFM PAN).

B. W.

Nagroda Hugona Steinhausa

Nagrody im. Hugona Steinhausa za wybitne osiągnięcia w popularyzacji nauki w prasie, radiu i telewizji przyznaje Polska Fundacja Upowszechniania Nauki oraz Towarzystwo Popierania i Krzewienia Nauki. W roku 2000 Nagrodę otrzymał Andrzej Gorzym, który w 1971 r. ukończył studia fizyki na Uniwersytecie Warszawskim, a potem zajął się dziennikarstwem. Pracował w dodatku „Życie i Nowoczesność” *Życia Warszawy*, później w *Problemach*. W 1988 r. udało mu się reaktywować miesięcznik *Wiedza i Życie*, którego jest redaktorem naczelnym.

B. W.

Nagroda za tłumaczenie

Stowarzyszenie Tłumaczy Polskich, jak co roku, przyznało w grudniu 1999 r. nagrody za przekłady książek wydanych w roku 1998.

W dziedzinie nauk ścisłych nagrodę otrzymała Małgorzata Pawlicka-Yamazaki za przekład z języka angielskiego książki Richarda Dawkinsa *Wspinaczka na szczyt nieprawdopodobieństwa* (Prószyński i S-ka).

Tłumacz, nr 1 (2000)

B. W.

Jubileusz Kazimierza Grotowskiego

„Fazy Materii Jądrowej” to tytuł międzynarodowego sympozjum, które odbyło się w dniach 27–28 stycznia 2000 r. w Instytucie Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego Uniwersytetu Jagiellońskiego. Bodźcem do zorganizowania tego spotkania fizyków był przypadający w tym czasie jubileusz 70-lecia urodzin Profesora Kazimierza Grotowskiego.



Prof. Kazimierz Grotowski przyjmujący gratulacje podczas uroczystego posiedzenia Rady Wydziału Matematyki i Fizyki UJ w Collegium Maius w dniu 28 stycznia 2000 r. Na pierwszym planie od lewej: J.M. Rektor UJ prof. Franciszek Ziejka i Dziekan Wydz. Matematyki i Fizyki prof. Karol Musiał.

Kazimierz Grotowski należy do grona krakowskich fizyków, którzy organizowali od podstaw badania w dziedzinie fizyki jądrowej zarówno w Uniwersytecie Jagiel-

ońskim, jak i w Instytucie Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego w Krakowie. W minionym półwieczu Jubilat przeszedł drogę od stanowiska asystenta, które objął będąc jeszcze studentem, do stanowiska profesora i kierownika Zakładu Fizyki Gorącej Materii w Instytucie Fizyki UJ.

Pierwsze prace naukowe Kazimierza Grotowskiego dotyczyły pomiarów jądrowych czasów życia i prowadzone były w Fizyczno-Technicznym Instytucie w Leningradzie. Po powrocie do Krakowa zajął się pomiarami polaryzacji w reakcjach zderzenia (strippingu). Prace te kontynuował również podczas dwuletniego pobytu w Birmingham. Sprężyste rozpraszanie cząstek alfa badał zarówno w Krakowie, jak i w Katolickim Uniwersytecie w Louvain-la-Neuve, gdzie pracował jako wizytujący profesor. Proces syntezy w zderzeniach lekkich układów był następnym zagadnieniem, którym się zajmował we współpracy z Centrum Badań w Karlsruhe, gdzie pracował również jako wizytujący profesor. Badania reakcji jądrowych, wywołanych zderzeniami ciężkich jonów, rozpoczął na początku lat osiemdziesiątych pracami doświadczalnymi przeprowadzonymi w Lawrence Berkeley Laboratory. Badania te prowadzi do chwili obecnej we współpracy z takimi ośrodkami, jak KVI Groningen (Holandia), SARA w Grenoble (Francja) i uniwersytety w Rochester i East Lansing (USA). Inny nurt jego działalności naukowej dotyczy pomiarów słabych aktywności. Podjęcie tej tematyki związane jest z zainteresowaniami prof. Grotowskiego astrofizyką. Ta imponująca aktywność naukowa Kazimierza Grotowskiego została udokumentowana w ponad 100 pracach naukowych, z których pierwsza ukazała się w roku 1953. Profesor Kazimierz Grotowski jest czynnym członkiem Polskiej Akademii Umiejętności, gdzie przewodniczy Komisji Astrofizyki.

Wśród prelegentów, zaproszonych do wygłoszenia referatów na Sympozjum, znaleźli się zarówno przedstawiciele ośrodków, z którymi współpracował prof. Grotowski, jak również jego uczniowie.

Pierwszy referat, wygłoszony przez J.B. Natowitza z Uniwersytetu Texas A&M, dotyczył termodynamiki jąder atomowych i związanej z tym zagadnieniem tzw. jądrowej krzywej kalorycznej. Tematyka ta była kontynuowana w referatach J. Brzychczyka i R. Płanety, którzy są uczniami i współpracownikami Jubilata. R. Płaneta przedstawił problemy produkcji i rozpadu gorących jąder atomowych, natomiast J. Brzychczyk omówił problematykę zjawisk krytycznych w jądrowej multifragmentacji. L.G. Sobotka z Uniwersytetu Washingtona w St. Louis zreferował swoje najnowsze rezultaty dotyczące klasteryzacji występującej w rejonie pośrednim zderzających się ciężkich jonów. Wyniki analizy, dotyczące poszukiwanej wyspy jąder superciężkich, przedstawił w swoim referacie W.J. Świątecki z Lawrence Berkeley National Laboratory. Nowe perspektywy badawcze, jakie pojawią się z chwilą ukończenia budowy wieloelementowego układu detekcyjnego CHIMERA, omówił F. Porto z Katanii, jeden z konstruktorów tego urządzenia. Sympozjum zakończył referat H. Rebeli z FK Karlsruhe, który mówił o obserwa-

cjach promieniowania kosmicznego jako źródle informacji dla badania oddziaływania hadronów przy najwyższych energiach.

Uczestnicy Sympozjum wzięli również udział w Otwartym Posiedzeniu Rady Wydziału Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego, zorganizowanym dla uhonorowania jubileuszu Profesora Kazimierz Grotowskiego. Laudację wygłosił R.H. Siemssen z KVI Groningen.

Zbigniew Majka

Trzynasty wykład im. Aleksandra Jabłońskiego

Ryszard Tadeusiewicz, profesor nauk technicznych i rektor AGH oraz członek korespondent PAU, wygłosił w dniu 24 lutego 2000 r. w Instytucie Fizyki UMK referat pt. „Modelowanie cybernetyczne systemów biologicznych”. Był to już trzynasty z serii wykładów im. Aleksandra Jabłońskiego, wygłaszanych w rocznicę urodzin (obecnie 102.) prof. Aleksandra Jabłońskiego, twórcy to-ruńskiej szkoły fizyki.

Poprzednie wykłady wygłosili profesorowie: Andrzej Trautman (1988), Andrzej Hryniewicz (1989), Łukasz A. Turski (1990), Roman S. Ingarden (1991), Janusz Zakrzewski (1992), Andrzej Białas (1993), Włodzimierz Kołos (1994), Kacper Zalewski (1995), Józef Smak (1996), Kazimierz Grotowski (1997), Andrzej K. Wróblewski (1998) i Andrzej Staruszkiewicz (1999).

Tegoroczny wykładowca na konkretnych przykładach (fizjologia słyszenia i widzenia, system ruchowy człowieka) podkreślał szczególną przydatność wiedzy fizycznej i biologicznej do cybernetycznego modelowania procesów rzeczywistych, których gruntowne zrozumienie pozwala na rozwój m.in. takich dyscyplin naukowych, jak automatyka, robotyka, biocybernetyka i inżynieria biomedyczna.

Józefina Turko

25 lat współpracy polsko-francuskiej w dziedzinie fizyki jądrowej

Jak bardzo wiele spraw w krakowskiej fizyce jądrowej, wszystko zaczęło się od wizyty we Francji prof. Henryka Niewodniczańskiego z młodym wówczas prof. Andrzejem Hryniewiczem, już w 1963 r. Potem, w 1966 r., przyjechał na stypendium do Strasburga prof. Eugeniusz Bożek, a z Warszawy kolejni fizycy.

Początkowo spontaniczne kontakty zostały wkrótce sformalizowane. Dnia 7 marca 1974 r. podpisano oficjalną umowę o współpracy między Institut National de Physique Nucléaire et Physique de Particules – nazywanym IN2P3, gdyż ma 2 N i 3 P w nazwie – a instytucjami polskimi. (IN2P3 jest częścią francuskiego Narodowego Ośrodka Badań Naukowych, CNRS, oraz Uniwersytetu Pasteura w Strasburgu; w 1997 r. dołączył do niego strasburski Instytut Badań Subatomowych, IReS, który powstał z istniejącego od 1956 r. Centrum Badań Jądrowych, CRN).

Polskie instytucje uczestniczące w umowie to, oprócz Instytutu Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego: Instytut Fizyki UJ, Instytut Fizyki Doświadczalnej UW i Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów UW. Konwencję podpisali: ze strony polskiej prof. Jerzy Pniewski, a ze strony francuskiej prof. Jean Teillac – ówczesny dyrektor IN2P3.

Do kierowania współpracą powstała Komisja Mieszana składająca się z czterech profesorów ze strony francuskiej (H. Flocard, B. Haas, G. Fontaine, Y. Rapplin) i czterech ze strony polskiej (J. Jastrzębski, K. Rybicki, J. Żylicz, J. Styczeń). Jej zadaniem była ocena współpracy, przyznawanie czasu na eksperymenty, akceptacja nowych projektów. W kilkusobowych grupach badawczych zrealizowano ok. 100 projektów. Opracowano 9 trzyletnich programów współpracy międzynarodowej.

Pięć lat temu, 5 grudnia 1994 r., Konwencja została wzmocniona przez umowę o „zblizniaczeniu” (*jumelage*) pomiędzy Instytutem Fizyki Jądrowej oraz Instytutem Badań Subatomowych (IReS) w Strasburgu i czterema instytucjami francuskimi. Podpisali ją: dyrektor IFJ prof. Andrzej Budzanowski ze strony polskiej i dyrektor IN2P3 prof. Claude Detraz ze strony francuskiej. Polskim koordynatorem całej współpracy polsko-francuskiej zarówno w sprawach Konwencji, jak i *jumelage'u* jest prof. Jan Styczeń, dyrektor ds. nauki IFJ.

Dzięki Konwencji polscy fizycy mają, bez specjalnych opłat, dostęp do laboratoriów i ich urządzeń pomiarowych najwyższej klasy, jak: GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) – wielki narodowy akcelerator ciężkich jonów pracujący w Caen w Normandii, czy VIVITRON i EUROBALL w Strasburgu. Polacy korzystają tam z tych samych praw, co Francuzi, czyli są zatrudniani jak w macierzystym instytucie. Również poprzez Konwencję z IN2P3 Polacy zajmują się fizyką cząstek uprawianą głównie w CERN-ie, którego jesteśmy członkami. Pobytu naukowe Polaków we Francji niejednokrotnie się przedłużają; bywają oni zatrudniani na stałe w IN2P3 i już reprezentując stronę francuską, nadal współpracują z rodakami, jak np. dr Marek Lewitowicz (GANIL), prof. Jerzy Dudek (ULP Strasburg) i inni.

VIVITRON – strasburski akcelerator typu Van de Graaffa jest jednym z najlepszych w Europie akceleratorów działających w zakresie tzw. niskich energii; przyspiesza prostoliniowo wiązkę jonów polem elektrostatycznym. Został zbudowany w 1993 r. i oddany do eksploatacji w 1994 r. Uzyskane prędkości końcowe jonów stanowią od 1/3 do 1/13 prędkości światła dla wiązek jonów od wodoru do srebra. Z VIVITRON-em współpracuje detektor promieniowania γ – EUROBALL, złożony z wielu detektorów germanowych z licznikami ustawionymi sferycznie względem punktu zderzenia, czyli tworzącymi ogromnego, kulistego jeża. Sygnały z detektorów są zbierane przez liczniki, przekazywane do zespołu komputerów i analizowane.

Aby uzyskać jak najbardziej wysublimowane parametry, trzeba ciągle ulepszać urządzenia badawcze. Jednym z bardzo istotnych dokonania aparaturowych jest zbudowanie

wany przez Polaków z IFJ detektor jąder odrzutu. Urządzenie działa w połączeniu z detektorem EUROBALL. Przy jego użyciu zdolność rozdzielcza układu jest wielokrotnie lepsza i umożliwia wyznaczenie energii produktów odrzutu oraz ich rozkładu kąтового, a także masy.

Spodziewane są ciekawe wyniki badań spektroskopowych jąder egzotycznych w sąsiedztwie podwójnie magicznego jądra $^{100}_{50}\text{Sn}$, a także jąder superciężkich.

Uroczystości jubileuszu współpracy polsko-francuskiej odbyły się 13 grudnia 1999 r. w Instytucie Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego w Krakowie. Zorganizował je polski koordynator całej współpracy, prof. Jan Styczeń, zastępca Dyrektora IFJ. Na sesji naukowej oprócz przemówień okolicznościowych zostały wygłoszone trzy referaty. Przedstawili je: prof. Jean-Pierre Vivien („Some physics cases from 25 years of collaboration”), dr Grażyna Nowak z IFJ („Triggering in modern particle experiments”) i dr Marek Lewitowicz („Study of nuclei far from stability at intermediate energies”).

W sesji wzięli udział dostojni goście – przedstawiciele IN2P3, profesorowie: Bernard Haas, Daniel Huss, Hubert Flocard i Guy Wormser oraz konsul generalny Francji – Roland Blatmann. Ze strony polskiej – dyrektorzy instytutów należących do Konwencji, a więc profesorowie: Andrzej Budzanowski (IFJ), Krzysztof Tomala (Instytut Fizyki UJ), Jan Żylicz (Instytut Fizyki Doświadczalnej UW), Jan Kownacki (Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów UW) oraz szereg osobistości z Polski i Francji.

Małgorzata Nowina-Konopka

Femtosekundowe impulsy promieniowania synchrotronowego

Grupa fizyków z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley i Narodowego Laboratorium im. E.O. Lawrence'a uzyskała impulsy promieniowania synchrotronowego o czasie trwania rzędu 100 fs. Impulsy były wytwarzane bezpośrednio w pierścieniu akumulacyjnym elektronów. Ultrakrótki impuls promieniowania lasera posłużył do modulowania energii elektronów, które wytwarzały impulsy promieniowania synchrotronowego o częstotliwości 10 kHz i czasie trwania 300 fs. Udało się uzyskać promieniowanie w zakresie od podczerwieni do częstotliwości rentgenowskich.

Świetlność tego urządzenia nie jest wprawdzie duża (10^5 fotonów na sekundę), ale zupełnie wystarcza, aby przy tak krótkich impulsach prowadzić badania ultraszybkich procesów zachodzących w ciałach stałych, ruchów atomów wynikających z przemian fazowych oraz tworzenia i rozrywania wiązań chemicznych.

Science 287, nr 5461 (2000)

B. W.

Neutrony w pułapce

Atomy, mimo że są cząstkami neutralnymi, umiemy już zatrzymywać w pułapce magnetycznej; mają one moment magnetyczny, mogą więc oddziaływać z silnym,

zewnątrznym polem magnetycznym. Schwytywanie neutronów w pułapkę jest zadaniem znacznie trudniejszym ze względu na ich moment magnetyczny o wiele słabszy niż atomów. Ostatnio jednak zespołowi fizyków z amerykańskich ośrodków: Uniwersytetu Harvarda, Narodowego Instytutu Wzorców i Techniki (NIST) i Narodowego Laboratorium w Los Alamos oraz z niemieckiego Instytutu Hahna i Meitner w Berlinie udało się ograniczyć ruch neutronów w 3 wymiarach za pomocą pułapki magnetycznej.

Wiązka zimnych neutronów (11 K) z reaktora została skierowana do pułapki otoczonej cewkami magnetycznymi i wypełnionej ciekłym helem o temperaturze poniżej 250 mK. Hel działa tu jako chłodziwo, spowalniając neutrony jeszcze bardziej oraz jako scyntylator, pozwalający na rejestrowanie produktów rozpadu – protonów, pozytonów i antyneutrino. Zmierzony w tym doświadczeniu czas życia neutronów wynosił 750^{+300}_{-200} s. Autorzy twierdzą, że wkrótce będą mogli znacznie poprawić dokładność pomiaru. Dotychczas przyjmuje się, na podstawie innych badań, że czas życia neutronów wynosi $(886,7 \pm 1,9)$ s.

AIP Update, nr 466 (2000)

B. W.

Zamiast setek autorów

Publikacje z dziedziny doświadczalnej fizyki wysokich energii mają bardzo dużą liczbę autorów – niektóre już ponad 100. Gdy zacznie działać Wielki Zderzacz Hadronów (LHC) w CERN-ie, liczba osób uczestniczących w doświadczeniach na pewno jeszcze wzrośnie. Trudno jest ocenić udział poszczególnych autorów w publikowanych pracach.

Szukając drogi zaradzenia temu CERN proponuje, aby wprowadzić nowy rodzaj publikacji – zapiski naukowe (scientific notes) i w tej sprawie prowadzi już rozmowy z redakcjami odpowiednich czasopism naukowych. Zapisy miałyby zawierać wyniki prac związanych z rozwojem i ulepszaniem detektorów, symulacji, oprogramowania, algorytmów itp. Wyniki te będą częścią danego projektu badawczego i powinny być cytowane w oficjalnych sprawozdaniach i publikacjach całej współpracy. Zapisy będą podlegały procedurze recenzji, zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych, i będą podpisane nazwiskami autorów.

Natomiast publikacje całej współpracy będą zawierały wykaz instytucji biorących w niej udział, zaś pełna lista autorów będzie ukazywała się w czasopiśmie i w Internecie tylko co pewien czas. Dzięki temu drukowane prace nie będą musiały zawierać wielu stron z wykazem autorów, natomiast powinny podawać odnośniki do „zapisów naukowych”.

CERN Courier 39, nr 9 (1999)

B. W.

Henry W. Kendall (1926 – 1999)

Dnia 15 lutego 1999 r. zmarł Henry Way Kendall, laureat Nagrody Nobla w 1990 r.

Kendall urodził się 9 grudnia 1926 r. w Bostonie (USA). Doktoryzował się w MIT w 1954 r., wykonując trudne doświadczalne badania pozytonium, odkrytego nieco wcześniej przez Martina Deutscha. Później na Uniwersytecie Stanforda współpracował z Jerodem Friedmanem i Richardem Taylorem przy budowie trzech wielkich spektrometrów przeznaczonych do detekcji i pomiaru energii elektronów w zakresie od kilku do kilkunastu GeV. Za pomocą tych urządzeń prowadzili oni pionierskie badania w dziedzinie głęboko niesprężystego rozpraszania elektronów na protonach i neutronach. Wyniki tych badań miały podstawowe znaczenie dla rozwoju modelu kwarkowo-partonowego w fizyce cząstek elementarnych. W 1990 r. wszyscy trzej zostali uhonorowani Nagrodą Nobla z fizyki.

Niebezpieczeństwa, jakie może stwarzać dla ludzkości gwałtowny rozwój pewnych dziedzin techniki, głęboko niepokoiły Kendalla. Działał w Zrzeszeniu Zatrważonych Naukowców (Union of Concerned Scientists – UCS), które było głównym przeciwnikiem „wojen gwiazdnych”. Jego krytyka stanu bezpieczeństwa siłowni jądrowych doprowadziła do stworzenia w USA specjalnej komisji regulującej te sprawy.

Był zapalonym wspinaczem, brał udział w kilku wyprawach wysokogórskich w Andy. Uprawiał także nurkowanie, letnie i zimowe, u wybrzeży Nowej Anglii i Wysp Falklandzkich. Zginął w czasie nurkowania na Florydzie.

Phys. Today 53, nr 2 (2000)

B. W.

Arthur Schawlow (1921 – 1999)

W dniu 28 kwietnia 1999 r. zmarł Arthur Schawlow, jeden z twórców lasera, przez wiele lat czołowa postać spektroskopii laserowej (Nobel 1981), pionier chłodzenia laserowego.

Urodził się 5 maja 1921 r. w Mount Vernon (stan Nowy Jork, USA). Jego ojciec był emigrantem z Łotwy, a matka Kanadyjką. Wkrótce po jego urodzeniu rodzina przeniosła się do Toronto w Kanadzie. Schawlow studiował fizykę na Uniwersytecie w Toronto, gdzie uzyskał doktorat w 1949 r. za pracę z dziedziny badania właściwości jąder atomowych metodą spektroskopii o wysokiej zdolności rozdzielczej w wiązce atomowej.

Staż podoktorski odbył na Uniwersytecie Columbia w Nowym Jorku, gdzie był współpracownikiem Charlesa Townesa i zajmował się spektroskopią mikrofalową. W 1951 r. zaczął pracę w Laboratoriach Bella, gdzie pracował w dziedzinie nadprzewodnictwa i spektroskopii, ale przez kilka lat nadal współpracował z Townesem. Wspólnie napisali klasyczną już monografię *Microwave Spectroscopy*, opublikowaną w 1955 r. przez wydawnictwo McGraw-Hill.

Po zbudowaniu przez Townesa pierwszego masera (1954 r.) obaj zaczęli myśleć o możliwości zbudowania podobnego urządzenia działającego w zakresie częstotliwości optycznych. To właśnie Schawlow wpadł na pomysł, że jako rezonator można wykorzystać po prostu dwa zwier-

ciadła, jak w interferometrze Fabry'ego-Pérot. Praca na ten temat, opublikowana przez Townesa i Schawlowa w 1958 r., dała początek lawinie prac, które doprowadziły do zbudowania pierwszego lasera w 1960 r. (nazwę „laser” wymyślili studenci Uniwersytetu Columbia jako odpowiednik terminu „maser”).

W 1961 r. Schawlow został profesorem fizyki na Uniwersytecie Stanforda w Kalifornii, gdzie pracował aż do emerytury. Prowadził badania w zakresie spektroskopii laserowej – rozwijał nowe metody spektroskopowe o najwyższej zdolności rozdzielczej, jak spektroskopia nasyceniowa, wielofotonowa i polaryzacyjna, oraz stosował je do pomiarów spektroskopowych o najwyższej dokładności. Wielkie uznanie uzyskały wykonane przez niego z Theodorem Hänschem, jego głównym współpracownikiem w tym okresie, pomiary optyczne przesunięcia Lamba w wodorze. Jego dokonania w dziedzinie spektroskopii laserowej zostały uhonorowane Nagrodą Nobla w 1981 r.

Wraz z Hänschem opublikował w 1975 r. jeden z pierwszych pomysłów chłodzenia gazów atomowych za pomocą światła laserowego.

Był znakomitym wykładowcą i popularyzatorem fizyki. Jego wykłady były bardzo efektowne także dzięki doskonałym pokazom jego autorstwa. Słynnym przykładem jest demonstracja selektywności światła laserowego: Schawlow nadmuchiwał dwa balony, jeden wewnątrz drugiego, a następnie oświetlał je wiązką lasera rubinowego. Niebieski balon wewnętrzny pękał, a przezroczysty balon zewnętrzny pozostawał nie naruszony. Stąd był już tylko krok do wyjaśnienia zastosowań laserów do chirurgii oka.

Oprócz Nagrody Nobla otrzymał wiele innych nagród i odznaczeń. Był prezesem Amerykańskiego Towarzystwa Optycznego i Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego.

Jego prywatną pasją był jazz. Zgromadził olbrzymią kolekcję płyt, sam grał na klarnecie, z zamiłowaniem nagrywał też koncerty, używając do tego najnowocześniejszych urządzeń.

Nature 399, nr 6735 (1999)
Phys. Today 52, nr 12 (1999)

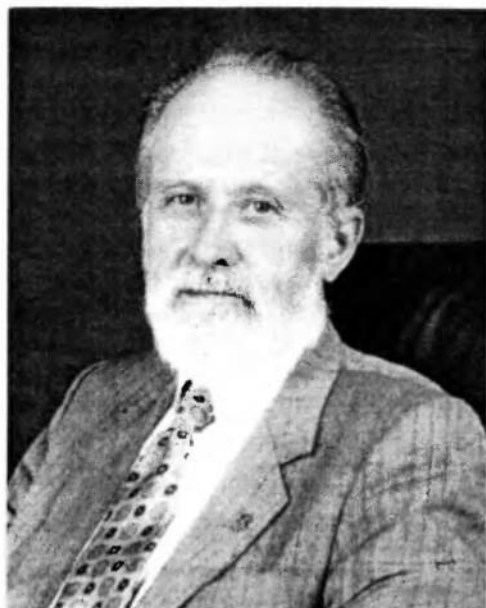
M. Ł.

August J. Chełkowski (1927 – 1999)

August Jan Chełkowski urodził się 27 lutego 1927 r. w Telkovicach na Warmii. W latach 1948–52 studiował fizykę na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Stopień doktora nauk fizycznych uzyskał w 1959 r., również na UAM, gdzie następnie w 1963 r. pomyślnie zakończył przewód habilitacyjny. W swojej karierze naukowej przeszedł kolejno wszystkie etapy, począwszy od stanowiska asystenta, poprzez stanowiska adiunkta i docenta w Katedrze Fizyki Doświadczalnej UAM. W 1966 r. przeniósł się do Katowic, gdzie w 1967 r. objął stanowisko docenta w Katedrze Fizyki Ciała Stałego Filii Uniwersytetu Jagiellońskiego w Katowicach, która następnie została przekształcona w Zakład Fizyki Ciała Stałego nowo powstałego Uniwersytetu Śląskiego. Był jego kie-

rownikiem aż do śmierci. Tytuł profesora nauk fizycznych otrzymał w 1973 r.

W Uniwersytecie Śląskim prof. Chełkowski piastował wszystkie funkcje administracyjne. Był dziekanem Wydz. Matematyki, Fizyki i Chemii, dyrektorem Instytutu Fizyki, prorektorem, a w okresie 1981–82 rektorem Uniwersytetu Śląskiego. Niektóre z tych funkcji kończyła nie mijająca kadencja, lecz decyzje polityczne. Z funkcji dyrektora Instytutu został odwołany z dnia na dzień – w naszym odczuciu za skorzystanie przez niego z prawa tajności głosowania i pójścia za kotarę podczas wyborów do Sejmu, które odbywały się kilka dni wcześniej (marzec 1976 r.). Kadencja rektora zakończyła się jeszcze dramatyczniej. Jako jedyny rektor polskiej uczelni został internowany w dniu wprowadzenia stanu wojennego, a po wypuszczeniu – odwołany z funkcji rektora przez urzędującego ministra w połowie stycznia 1982 r.



August Chełkowski

Działalność naukową Augusta Chełkowskiego można podzielić na dwa okresy. Pierwszy, poznański, podczas którego przedmiotem jego zainteresowań badawczych była fizyka dielektryków, a dokładniej zjawiska nieliniowe w cieczach dielektrycznych. Prowadzone wtedy prace były związane z tematyką rozwijaną przez grupę prof. Arkadiusza Piekary i mają do dzisiaj wysoką rangę naukową. Najważniejszym osiągnięciem Augusta Chełkowskiego z tego okresu było zastosowanie nieliniowego efektu dielektrycznego do badania oddziaływań wewnątrzcząsteczkowych w izomerach rotacyjnych. Wspólnie z Piekarą i Stanisławem Kielichem opracowali model teoretyczny opisujący ten typ oddziaływań. Podsumowaniem tego okresu działalności jest podręcznik *Fizyka dielektryków*, który doczekał się trzech wydań w języku polskim (1972, 1979, 1993) i tłumaczenia na język angielski (*Dielectric physics*, 1980). Podręcznik ten, mimo upływu lat, cieszy się dużą popularnością i częstymi cytowaniami.

Drugi okres, katowicki, wiąże się z pracą w filii Uniwersytetu Jagiellońskiego, później Uniwersytecie Śląskim. Początkowo prof. Chełkowski kontynuuje prace w dziedzinie fizyki dielektryków, które do tej pory prowadzone są w Zakładzie Fizyki Molekularnej, kierowanym przez ucznia i kontynuatora dzieła Profesora w zakresie stosowania nieliniowego zjawiska dielektrycznego do badania przemian fazowych w cieczach. W tym okresie rozpoczyna się aktywność prof. Chełkowskiego w dziedzinie fizyki ciała stałego. Dzięki niemu powstał Zakład Fizyki Ciała Stałego, w którym od chwili jego powołania do dziś prowadzi się w czterech zespołach badania nad otrzymywaniem, strukturą krystaliczną, własnościami magnetycznymi i przewodnictwem elektrycznym kryształów o strukturze perowskitu, tio- i selenospinelu, metali i ich stopów, w szczególności ziem rzadkich z metalami przejściowymi. Badania związków o strukturze spineli są obecnie kontynuowane w Zakładzie Fizyki Magnetyków (który został wydzielony z Zakładu Fizyki Ciała Stałego) i w Zakładzie Krystalografii Instytutu Chemii. Na szczególne podkreślenie zasługuje zorganizowanie pracowni technologicznych, w których metodą Bridgmana otrzymywane są monokryształy o strukturze typu perowskitu oraz monokryształy związków międzymetalicznych o bardzo dużej czystości wyciągane metodą Czochralskiego z lewitującej próbki. Są to duże osiągnięcia Profesora i jego zespołu zarówno w skali krajowej, jak i międzynarodowej. Innym osiągnięciem było uruchomienie już w latach 70. stanowisk do prowadzenia badań w niskich temperaturach (do 4,2 K). Podsumowaniem jego dorobku w tej dziedzinie fizyki ciała stałego są dwa przeglądowe opracowania „Compounds of rare earth elements and 4d or 5d elements” (Landolt–Börnstein, 1995, subvol. J2, s. 1–258, 282–31 i 321–26). Kolejny tom z tej serii został zamówiony przez wydawcę, jednak śmierć przerwała rozpoczęte prace. Szczególnie te ostatnie pozycje, wydrukowane w wydawnictwie Landolta–Börnsteina, najlepiej świadczą o międzynarodowym uznaniu dla osiągnięć Augusta Chełkowskiego w dziedzinie fizyki ciała stałego. Oprócz tego był on autorem i współautorem około pięćdziesięciu publikacji, wydrukowanych głównie w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym, oraz licznych referatów i komunikatów przedstawionych podczas konferencji naukowych krajowych i zagranicznych. W latach 70. i 80. był koordynatorem badań stopów metali i magnetyków jonowych, finansowanych przez PAN w ramach tzw. badań węzłowych.

Prace zapoczątkowane przez Profesora są kontynuowane przez jego wychowanków, a tematyka badawcza w wyżej wymienionych dziedzinach fizyki ciała stałego jest systematycznie rozszerzana. Patrząc z takiej perspektywy na jego osiągnięcia należy podkreślić, że stał się on twórcą szkół naukowych na Śląsku – fizyki molekularnej i fizyki ciała stałego.

Działalność naukowa Augusta Chełkowskiego znalazła uznanie zarówno w kraju, jak i za granicą. Jej wynikiem była współpraca naukowa z takimi ośrodkami jak: Uniwersytet Paryski, Laboratorium A. Cot-

tona CNRS w Bellevue, Uniwersytet Kalifornijski czy do tej pory realizowana z Uniwersytetem w Osnabrück, Instytutem Lauego–Langevina w Grenoble, Uniwersytetem w Le Mans oraz krajowymi ośrodkami: INTiBS we Wrocławiu, Instytutem Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu, Instytutem Fizyki PAN w Warszawie czy zespołami fizyków z UJ i AGH w Krakowie.

Na szczególne podkreślenie zasługuje dbałość prof. Chełkowskiego o rozwój kadry naukowej oraz zaplecza aparaturowego. Profesor wypromował ponad dwudziestu doktorów; ośmiu z nich uzyskało stopień doktora habilitowanego, a trzech tytuł profesora. Dzięki jego staraniom Zakład Fizyki Ciała Stałego Instytutu Fizyki UŚI jest wyposażony w nowoczesną aparaturę pomiarową, umożliwiającą prowadzenie prac badawczych na wysokim poziomie. Na szczególne podkreślenie zasługuje wielofunkcyjny spektrometr fotoelektronowy zakupiony ostatnio dzięki dotacjom uzyskanym z Komitetu Badań Naukowych, Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej i Fundacji Współpracy Polsko-Niemieckiej. Jest to jeden z najnowocześniejszych przyrządów tego typu na świecie.

Od 1952 r. August Chełkowski był aktywnym członkiem Polskiego Towarzystwa Fizycznego. W latach 50. otrzymał nagrodę Zarządu Głównego PTF, w 1975 r. zorganizował Zjazd Fizyków Polskich w Katowicach, w latach 1977–81 był członkiem i skarbnikiem Zarządu Głównego PTF.

Od dziesięciu lat, tj. od czasu uzyskania niepodległości, był senatorem Rzeczypospolitej Polskiej (rekomendowanym przez „Solidarność”), a w czasie drugiej kadencji był marszałkiem Senatu. Swoją pracę tam traktował zawsze jako służbę Ojczyźnie, której oddawał swą wiedzę i doświadczenie. I przez cały czas tej służby w Senacie ani na moment nie zaniechał ani pracy naukowej, ani kierowania Zakładem. Do końca prowadził dla studentów wykłady kursowe z fizyki. Pomimo wielu zajęć znajdował zawsze czas tak dla nich, jak i dla swoich współpracowników.

Jego działalność naukową i polityczną przerwała śmierć – odszedł od nas po krótkiej chorobie 31 października 1999 r.

Alicja Ratuszna, Jerzy Ziolo

Dennis W. Sciama (1926 – 1999)

W dniu 18 grudnia 1999 r. zmarł w Oksfordzie Dennis W. Sciama, wybitny astrofizyk brytyjski.

Sciama urodził się 18 listopada 1926 r. w Manchesterze. Studia wyższe i doktoranckie odbył na Uniwersytecie w Cambridge. Promotorem jego rozprawy doktorskiej był sam wielki P.A.M. Dirac. Sciama był jedynym wypromowanym przez niego doktorem. Praca doktorska Sciama była poświęcona zasadzie Macha. W tym czasie w Anglii powstał i uzyskał powszechne uznanie nowy model ewolucji Wszechświata, zwany modelem stanu stacjonarnego. Model ten wprowadził fakt rozszerzania

się Wszechświata, ale zakładał ciągłą kreację materii i to zachodzącą w taki sposób, aby średnia gęstość materii i geometria nie zmieniała się z upływem czasu. Zasada Macha stwierdzająca, że własności bezwładności są wynikiem oddziaływania danego ciała z wszystkimi obiektami we Wszechświecie, była naturalnym uzupełnieniem wyobrażenia o wiecznie trwającym Wszechświecie. Do roku 1970 Sciama był związany z Uniwersytetem w Cambridge, gdzie stworzył jedną z najznakomitszych szkół teorii grawitacji i kosmologii. Wielu jego byłych studentów szybko zyskało międzynarodowy rozgłos i sławę. Do tego grona należą Roger Penrose, Martin Rees, Brandon Carter, Stephen Hawking, George Ellis i wielu innych. Gdy odkryto kwazary, dane obserwacyjne o ich ewolucji i rozmieszczeniu nie zgadzały się z przewidywaniami modelu stanu stacjonarnego. Sciama bez wahania zaczął się zajmować modelem Wielkiego Wybuchu. Po odkryciu promieniowania reliktowego wspólnie z Reesem wykazał, że temperatura tego promieniowania nie może być dokładnie izotropowa, gdyż zmienne w czasie pole grawitacyjne wytwarzane przez galaktyki i gromady galaktyk powinno zmieniać energię fotonów.

W roku 1970 Sciama przenosi się do Oksfordu, gdzie w All Souls College obejmuje stanowisko Senior Research Fellow. W tym czasie zajmuje się strukturą kwazarów i źródeł promieniowania radiowego, ewolucją ośrodka międzygalaktycznego, astrofizyką źródeł promieniowania rentgenowskiego, termodynamiką czarnych dziur i własnościami kwantowej próżni. W końcu lat 70. dzieli swój czas między Oksford i Uniwersytet Stanu Teksas w Austin. W roku 1983 zostaje kierownikiem grupy astrofizyki i kosmologii w Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati w Triście. SISSA, bo tak wkrótce zaczęto nazywać ten ośrodek, bardzo szybko stała się ważnym ośrodkiem badań w wielu różnych dyscyplinach naukowych. Charyzmat Sciama, jego rozległa wiedza i wsparcie, jakiego udzielał swoim studentom sprawiły, że do ośrodka SISSA przyjeżdżali studenci z całej Europy, również z Polski. Przez ośrodek ten przepływał też stały strumień znakomitych naukowców.

Atmosfera Włoch wyraźnie „współgrała” z szerokimi zainteresowaniami Sciama: sztuką, muzyką, architekturą i dobrą kuchnią. Choć Sciama nigdy nie zerwał całkowicie więzów z Oksfordem, ostatnie 17 lat swojego życia spędził głównie we Włoszech, w Triście i Wenecji.

W Polsce Dennis Sciama był w 1962 r. na Międzynarodowej Konferencji Teorii Grawitacji w Jabłonie. W 1962 r. PWN wydał książkę *Recent Developments in General Relativity* zadedykowaną Leopoldowi Infeldowi. Sciama zamieścił w niej swoją pracę o teorii grawitacji ze skrzyżowaniem. Wpłynęła ona poważnie na badania w tej dziedzinie; wielu autorów nazywa ją teorią Einsteina, Cartana, Sciama i Kibble’a. Niżej podpisani mieli wielokrotnie i w różnych miejscach okazję ulegać wpływowi osobowości Dennisa i uczyć się od niego. Żegnamy go z głębokim żalem.

Marek Abramowicz, Marek Demiański, 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).

2000

2 – 9 czerwca 2000, Jaszowiec

XXIX Int. School on Physics of Semiconducting Compounds

Inst. Fizyki PAN, Wydział Fizyki UW, Centrum Badań Wysokociśnieniowych PAN; prof. J. Kossut, IF PAN, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, fax: (22) 8430926, adr.el.: jasz2000@ifpan.edu.pl.

3 – 4 czerwca 2000, Jaszowiec

Przedszkole Fizyki Półprzewodników

Fundacja Pro Physica i Inst. Fizyki PAN; dr hab. B. Kowalski, IF PAN, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, adr.el.: kowab@ifpan.edu.pl.

3 – 11 czerwca 2000, Zakopane

XL Jubileuszowa Szkoła Fizyki Teoretycznej: Quantum Phase Transitions in High Energy and Condensed Matter Physics

Inst. Fizyki UJ; Krzysztof Rościszewski, IF UJ, Reymonta 4, 30-059 Kraków, adr.el.: roscis@jetta.if.uj.edu.pl lub Józef Spałek: ufspalek@jetta.if.uj.edu.pl, Internet: www.if.uj.edu.pl.
U: 60, ang.

5 – 9 czerwca 2000, Warszawa

Int. Conf. Measurements of Light, L-metry

Sekcja Polska SPIE i Inst. Optyki Stosowanej; mgr Mariusz Szyjer, IOS, Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa, tel.: (22) 8132051, fax: (22) 8133265, adr.el.: iosto@atos.warman.com.pl
P, ang., ros., pol.

12 – 15 czerwca 2000, Kazimierz Dolny

III Int. Symposium Ion implantation and other application of ion and electrons – ION 2000

Inst. Fizyki UMCS, Pol. Lubelska, Pol. Wrocławska; dr Janusz Zinkiewicz, IF UMCS, pl. M. Curie-Skłodowskiej 1, 20-031 Lublin, tel.: (81) 5376257, (81) 5376154, fax: (81) 5376191, adr.el.: jzinkiew@tytan.umcs.lublin.pl.
P, U: 100, O: 800 zł (220 USD), ang.

12 – 17 czerwca 2000, Jaszowiec

V Int. School and Symp. on Synchrotron Radiation in Natural Science

Inst. Fizyki Jądrowej; Wojciech Kwiatek, IFJ, Zakład Spektroskopii Jądrowej, Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków, tel.: (12) 6370222 w. 235, fax: (12) 6371881, adr.el.: synchrotron@castor.if.uj.edu.pl.

13 – 16 czerwca 2000, Gliwice

VI Konferencja: Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne, COE 2000

Politechnika Śląska i Centrum Elektryfikacji i Automatykacji Górniczo-energetycznej; dr inż. Stanisław Waluś, Inst. Automatyki PŚI, Akademicka 16, 44-100 Gliwice, fax: (32) 2372127, adr.el.: swalus@polsl.gliwice.pl
P.

26 – 28 czerwca 2000, Wrocław

XIII Konferencja „Nauczanie fizyki w wyższych szkołach technicznych”

Inst. Fizyki Pol. Wrocławskiej i Polskie Towarzystwo Fizyczne; prof. Ewa Dobierzewska-Mozrzyńska, IF PWr, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, tel.: (71) 3202395, fax: (71) 3283696, adr.el.: kon2000@if.pwr.wroc.pl, Internet: www.if.pwr.wroc.pl/kon2000.
O: 350 zł.

5 – 9 września 2000, Zakopane

33rd Solid Mechanics Conference – SolMech 2000

IPPT PAN i Komitet Mechaniki PAN; SolMech 2000, Centrum Mechaniki i Informatyki, IPPT PAN, Świętokrzyska 21, 00-049 Warszawa, tel.: (22) 8268802, fax: (22) 8269815, adr.el.: solmech@ippt.gov.pl.
ang.

11 – 15 września 2000, Wrocław

VII Konferencja Technologia Elektronowa – ELTE 2000

Instytut Techniki Mikrosystemów PWr; ELTE 2000, Inst. Techniki Mikrosystemów PWr, Janiszewskiego 11/17, 50-372 Wrocław, tel.: (71) 3203259, fax: (71) 3283504, adr.el.: elte2000@wtmite.pwr.wroc.pl.

13 – 15 września 2000, Jaszowiec

5th Biennial Conference on High Resolution X-Ray Diffraction and Topography XTOP-2000

Inst. Fizyki Doświadczalnej UW i Inst. Fizyki PAN; Jerzy Gronkowski, IFD UW i Halina Granat, IF PAN, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, tel.: (22) 8437001 w. 2301, fax: (22) 8430926, adr.el.: synchro@ifpan.edu.pl, Internet: info.ifpan.edu.pl/XTOP2000.html.
P, U: 150, O: 350 euro, ang.

18 – 22 września 2000, Jarnołtówek

32nd Seminar on Positron Annihilation

Inst. Fizyki Doświadczalnej UW i Inst. Fizyki Uniw. Opolskiego; Barbara Konieczna, IFD UW, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław, tel.: (71) 3201315, fax: (71) 3287365, adr.el.: konn@ifd.uni.wroc.pl, Internet: www.ifd.uni.wroc.pl/32SPA/home.htm.
ang.

25 – 28 września 2000, Ustroń

II Int. Seminar on Semiconductor Gas Sensors – SGS 2000

Inst. Fiz. Pol. Śląskiej; prof. Jacek Szuber, IF PŚl., Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, tel.: (32) 2372057, fax: (32) 2372216, adr.el.: szuber@zeus.polsl.gliwice.pl.

A: 31.5.00, P, U: 80, O: 300 USD, ang.

9 – 13 października 2000, Zakopane

Int. Conf. Solid State Crystals – ICSSC 2000

Inst. Fizyki Technicznej WAT; ICSSC 2000, IFT WAT, Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, tel.: (22) 6859558, fax: (22) 6859109, adr.el.: zielj@wat.waw.pl lub zakopane@glob.wic.wat.waw.pl.

P, ang.

18 – 20 października 2000, Jachranka

XIX Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego

Inst. Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej PW, Polskie Tow. Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej; dr inż. Paweł Pyrzanowski, ITLiMS PW, Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa, tel./fax: (22) 6215463, adr.el.: symp@meil.pw.edu.pl.

25 – 27 października 2000, Warszawa

Int. Conf. Systems of Optical Security

Sekcja Polska SPIE i Inst. Optyki Stosowanej; mgr Mariusz Szyjer, IOS, Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa, tel.: (22) 8132051, fax: (22) 8133265, adr.el.: iosto@atos.warman.com.pl.

Z: 15.9.00, P, ang.

7 – 9 listopada 2000, Stare Jabłonki

XIV Szkoła Optoelektroniki: Photonics in Information Processing

Inst. Elektronicznych Systemów PW i Wydział Fizyki UW; dr Ryszard Romaniuk, IES PW, Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, adr.el.: ise@ISE.pw.edu.pl.

P.

2001

6 – 15 lutego 2001, Karpacz

37. Zimowa Szkoła Fizyki Teoretycznej: New Developments in the Theory of Fundamental Interactions

Inst. Fizyki Teoretycznej UW; prof. Jerzy Lukierski, prof. Ziemowit Popowicz, prof. Jakub Rembieliński (UŁ), IFT UW, pl. Maksa Borna 9, 50-204 Wrocław, tel.: (71) 3201353, 3201411, 3201408, adr.el.: ziemek@ift.uni.wroc.pl, lukier@ift.uni.wroc.pl.

P, U: 80, O: 1300 zł (330 euro), ang.

NOWE KSIĄŻKI

- Piotr Greiner, *Nobliści z Górnego Śląska*, Wyd. „Rzeka”, Wrocław 1999, s. 170, cena 18,50 zł.
- Paweł Kowalczyk, *Fizyka cząsteczek*, PWN, Warszawa 2000, s. 206, cena 28 zł.
- Robert Gilmore, *Współczesna opowieść wigilijna – Energia, czas i natura kwantów*, z jęz. angielskiego tłum. Ewa Maydell; Prószyński i S-ka, Warszawa 2000, s. 217, cena 39,50 zł.
- Rudolf Kippenhahn, *Tajemne przekazy – szyfry, enigma i karty chipowe*, z jęz. niemieckiego tłum. Adam Sumera; Prószyński i S-ka, Warszawa 2000, s. 336, cena 29,50 zł.
- Freeman Dyson, *Światy wyobraźni*, z jęz. angielskiego tłum. Michał Tempczyk; Prószyński i S-ka, Warszawa 2000, s. 140, cena 26 zł.
- Steven Shapin, *Rewolucja naukowa*, z jęz. angielskiego tłum. Stefan Amsterdamski; Prószyński i S-ka, Warszawa 2000, s. 182, cena 24 zł.
- Nayla Farouki, *Teoria względności*, z jęz. francuskiego tłum. Małgorzata Jarosiewicz; Książnica, Katowice 2000, s. 124, cena 12 zł.
- Jean Brun, *Pascal*, z jęz. francuskiego tłum. Agnieszka Chodorowska-Kłosińska; Prószyński i S-ka, Warszawa 2000, s. 125, cena 19,50 zł.

WARUNKI PRENUMERATY

Cena prenumeraty krajowej w 2000 r. wynosi 30,00 zł za pół roku, 60,00 zł za rok. Prenumeratę można zamówić za pośrednictwem:

I. RUCH-u

1. Wpłaty na prenumeratę przyjmują jednostki kolportażowe „RUCH” S.A. właściwe dla miejsca zamieszkania lub siedziby prenumeratora. 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 zamieszkających 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 zamieszkających za granicą, realizowane są od dowolnego numeru w danym roku kalendarzowym.

II. ZARZĄDU GŁÓWNEGO PTF

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

III. ODDZIAŁÓW PTF

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

INFORMACJE DLA AUTORÓW

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 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. 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. Aby skrócić cykl wydawniczy, prosimy autorów przygotowujących swe artykuły na komputerach o nadsyłanie, wraz z maszynopisami, **plików**, zawierających **teksty artykułów** oraz **rysunki**, pocztą elektroniczną (nasz adres: postepy@fuw.edu.pl) lub na dyskietkach.
7. Autora obowiązuje wykonanie korekty autorskiej.
8. Maszynopisów prac nie zamówionych i nie zakwalifikowanych do druku Redakcja nie zwraca.

POSTĘPY FIZYKI (ADVANCES IN PHYSICS), founded in 1949, is published bimonthly in Polish with abstracts in English by the Polish Physical Society with a support of the Polish State Research Committee (KBN) and the Physics Faculty of the Warsaw University.

INFORMATION FOR SUBSCRIBERS

A subscription order can be sent through the local press distributor or directly to „RUCH” S.A. Oddział Krajowej Dystrybucji Prasy, ul. Towarowa 28, 00-958 Warszawa, Poland.

SPIS TREŚCI

H.L. Stormer – Ułamkowy kwantowy efekt Halla	113
RÓŻNE	
Granty KBN z fizyki: XVI i XVII konkurs	134
W.I. Arnold – O nauczaniu matematyki	140
WSPOMNIENIA – ROCZNICE	
A. Pajczkowska – W 115 rocznicę urodzin Jana Czochońskiego	146
DYDAKTYKA FIZYKI	
M. Klisowska, R. Zawisza – Dydaktyczne aspekty stosowania analogii w nauczaniu fizyki	149
ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI	157
RECENZJE	158
LISTY DO REDAKCJI	159
KRONIKA	160

CONTENTS

H.L. Stormer – The fractional quantum Hall effect	113
MISCELLANEA	
Grants in physics of the State Research Committee	134
W.I. Arnold – On teaching mathematics	140
RECOLLECTIONS – ANNIVERSARIES	
A. Pajczkowska – 115th anniversary of birth of Jan Czochoński	146
PHYSICS TEACHING	
M. Klisowska, R. Zawisza – The didactic aspects of analogy in physics education	149
MEETINGS AND CONFERENCES	157
REVIEWS	158
LETTERS TO THE EDITOR	159
CHRONICLE	160

WKRÓTCE

- *Stefan Taczanowski o transmutacjach, układach podkrytycznych i energii*
- *Zygmunt Ajduk i Stefan Pokorski o fizyce oddziaływań elementarnych po powstaniu Teorii Standardowej*
- *Georg Hähner i Nicholas Spencer o pocieraniu i ścieraniu*
- *Oskar Chomicki o międzynarodowych organizacjach fizyki medycznej i inżynierii biomedycznej*
- *Albert Ghiorso, Darleane C. Hoffman i Adam Sobiczewski o Glennie T. Seaborgu*