Nr indeksu 369721

POSTĘPY FIZYKI

TOM 53 ZESZYT 6 ROK 2002

DWUMIESIĘCZNIK
POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO

NEUTRINA SŁONECZNE

DYSLOKACJE W PÓŁPRZEWODNIKACH

LIBER ABACI

O LEONARDZIE SOSNOWSKIM

POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

ZARZĄD GŁÓWNY

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

REDAKTORZY NACZELNI CZASOPISM PTF

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

PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW PTF

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

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

POSTĘPY FIZYKI

RADA REDAKCYJNA

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

KOMITET REDAKCYJNY

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

KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

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

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

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

Astronomia neutrin słonecznych

Marcin M. Wójcik, Marcin Misiaszek, Grzegorz Zuzel

Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego, Uniwersytet Jagielloński

Solar neutrino astronomy

Abstract: Experimental low energy neutrino astrophysics is the most recent window opened to the Universe. Neutrinos, the first non-electromagnetic probes used for astronomic investigation, can give information coming directly from the stellar interior: how stars burn and explode. The solar neutrino flux carries information on nuclear reactions inside the solar core which produce energy in the Sun. Magnitude of the flux and to some extent its energy spectrum are measured by neutrino detectors: Homestake chlorine detector, Super-Kamiokande water Čerenkov detector, Gallex and SAGE gallium detectors and Sudbury heavy water Čerenkov detector. All of them suggest a deficit of the observed neutrino flux as compared to predictions of the Standard Solar Model. One explanation for the deficit is the transformation of the Sun's electron-type neutrinos into other active flavors. Recently, the Sudbury Neutrino Observatory (SNO) has provided evidence that there is a non-electron flavor active neutrino component in the solar flux. The SNO results make possible the first determination of the total flux of ^{8}B neutrinos generated by the Sun. A new-generation low energy solar neutrino spectrometer Borexino is under construction to test the flux of the monoenergetic ^{7}Be neutrinos to explain the deficit observed in the Gallex experiment.

1. Wstęp

Obraz Wszechświata dociera do nas w postaci fotonów, które mają wiele zalet jako nośniki informacji z kosmosu; są one masowo produkowane, są trwałe i elektrycznie obojętne, ich detekcja jest łatwa w szerokim zakresie długości fal, a ich widmo energetyczne dostarcza precyzyjnej informacji o chemicznych i fizycznych własnościach źródła promieniowania. Niestety, gorące obszary o dużej gęstości, będące miejscami produkcji energii gwiazd, aktywne jądra galaktyk i inne astrofizyczne źródła energii są całkowicie nieprzezroczyste dla fotonów.

Nasze klasyczne teleskopy rejestrują fotony z zewnętrznej atmosfery Słońca, niezależnie od tego, czy detekcja zachodzi przy długościach fal odpowiadających falom radiowym, promieniowaniu rentgenowskiemu czy też zakresowi widzialnemu. Wytworzony w środku Słońca foton potrzebuje około miliona lat, by po wielu aktach absorpcji i emisji z zupełnie inną energią wydostać się na jego powierzchnię i ją opuścić. Stąd bierze się ciepło i światło, które dociera do Ziemi. Moc promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię jednego metra kwadratowego ustawioną prostopadle do kierunku Ziemia–Słońce (poza atmosferą) nazwano stałą słoneczną.

W ostatnim okresie heliosejsmologia dostarcza ważnych informacji o głębszych warstwach Słońca. Oscyłacje powierzchni naszej najbliższej gwiazdy umożliwiają studiowanie jej struktury w taki sam sposób, w jaki sejsmologia pozwala badać strukturę Ziemi. Na przykład grubość warstwy konwekcyjnej (Dodatek 1) czy też rozkład gęstości materii słonecznej wzdłuż promienia otrzymane z pomiarów heliosejsmologicznych są doskonale zgodne z tymi samymi parametrami i zależnościami obliczonymi z modelu Słońca.

Chcąc badać dynamikę wnętrza obiektów astrofizycznych, potrzebujemy nowych nośników

informacji, które powinny być elektrycznie obojętne, tak aby ich tory nie ulegały odchyleniu w polach magnetycznych, trwałe – aby mogły do nas docierać z odległych źródeł, i słabo oddziałujące z materią, dzięki czemu mogłyby przenikać obszary, które są nieprzezroczyste dla fotonów. Jedynym takim znanym obecnie nośnikiem jest neutrino. Neutrina są leptonami, które występują wraz z kwarkami tworzącymi podstawowy budulec świata cząstek. Według Modelu Standardowego cząstek istnieją trzy rodzaje neutrin: elektronowe, mionowe i taonowe. Neutrina są produktem ubocznym reakcji termojądrowych zachodzących we wnętrzu gwiazd, towarzyszą produkcji życiodajnej energii słonecznej. Możliwość detekcji neutrin słonecznych zaczęto rozważać wkrótce po powstaniu hipotezy o produkcji energii w reakcjach termojądrowych.

Istnienie neutrin elektronowych potwierdzono doświadczalnie w 1956 r. Wcześniej przez ponad 20 lat wiarę w ich istnienie zawdzięczano teoretycznemu wybiegowi Pauliego (w celu wyjaśnienia deficytu energii w rozpadzie beta, w którym emitowane są elektrony o ciągłym widmie energetycznym), ocalającemu zasadę zachowania energii. Neutrino taonowe jako ostatnie odkryto dopiero w 2000 roku. Neutrina jako cząstki nie mające masy (lub mające bardzo małą masę, co zakładają pewne teorie wykraczające poza Model Standardowy) muszą się poruszać z prędkością światła (lub niewiele od niej mniejszą).

2. Słońce jako potężne źródło neutrin

Słońce jest gwiazdą ciągu głównego w stadium stabilnego spalania wodoru. Standardowy Model Słońca (SMS) [1] opisuje jego obecny etap ewolucji, przewidując m.in. rozkład temperatury, gęstości czy też zmiany zawartości helu i wodoru wzdłuż promienia słonecznego. Korzysta on ze wszystkich znanych obecnie parametrów, takich jak temperatura powierzchni Słońca, masa Słońca, promień, wiek, stała słoneczna, a także skład materii na powierzchni, który pozostaje praktycznie niezmienny od początku istnienia Słońca. U podstaw SMS leży założenie dotyczące sposobu produkcji energii, który polega na łączeniu się w wysokiej temperaturze i pod dużym ciśnieniem czterech jąder wodoru w jądro helu (w kilku etapach). Masa jądra helu jest mniejsza o ok. 0,7% od sumy mas czterech protonów. Masa równa tej różnicy zamienia się na energię zgodnie ze znanym wyrażeniem $\Delta E = \Delta m c^2$. W takim procesie zachodzącym w jądrze słonecznym wydziela się energia oraz powstają dwa neutrina. W ciągu jednej sekundy spala się tym sposobem 616 mln ton wodoru. Potężny strumień neutrin słonecznych jest przedmiotem badań od ponad 30 lat. Neutrina produkowane we wnętrzu Słońca pozwalają „zajrzeć" do jego centrum, by sprawdzić teorię opisującą strukturę gwiazdy i jej ewolucję.

Siła grawitacji wytwarza w jądrze słonecznym ciśnienie rzędu 10^{16} Pa, ściskając materię do tego stopnia, że w jednym litrze mieści się około 150 kg „gazu słonecznego". W tej najbardziej wewnętrznej części Słońca, i tylko tam, zachodzą reakcje termojądrowe. W temperaturze 15,7 mln kelwinów materia występuje w postaci plazmy. Elektrony nie krążą wokół jąder atomowych, lecz tworzą „gaz", podobnie jak jądra. Mimo gigantycznego ściśnięcia tych cząstek, do tego stopnia, że ich gęstość jest np. 14 razy większa od gęstości ołowiu, mają one swobodę poruszania się podobną do normalnego gazu, ponieważ są znacznie mniejsze od atomów. Średnica jądra atomu jest mniejsza niż stutysięczna część średnicy jego powłok elektronowych.

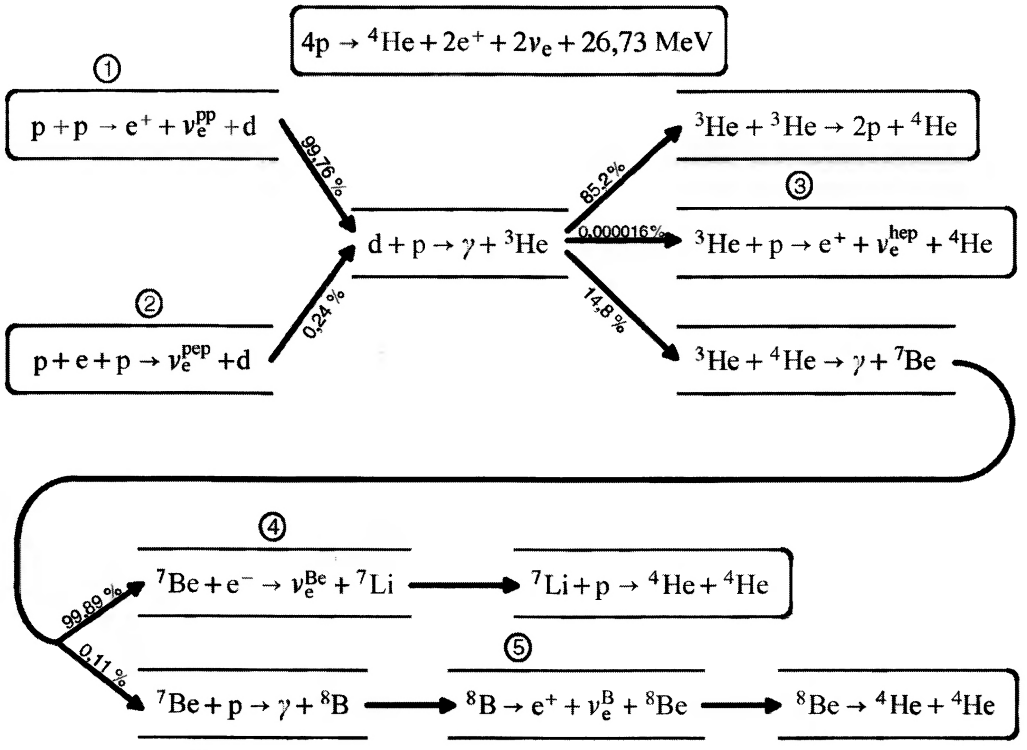
Dlaczego Słońce nie eksploduje jak potężna bomba wodorowa? Co przeszkadza atomom wodoru łączyć się szybko w jądra helu? Przyczyną jest ładunek elektryczny jądra wodoru, które jest dodatnio naładowanym protonem. Ponieważ dwa jądra wodoru odpychają się nawzajem, to nawet w tak wysokich temperaturach zbliżają się one niezwykle rzadko na taką odległość, by się połączyć i utworzyć najpierw jądro deuteru, co jest pierwszym krokiem na drodze do powstania helu.

Jądro ^{2}He, które musi pojawić się natychmiast po połączeniu się dwóch protonów, nie może istnieć. Dlatego w większości przypadków reakcja nie zachodzi, nawet jeżeli dwa protony zbliżą się na odpowiednią odległość. Zajdzie ona jedynie wówczas, gdy równocześnie jeden z protonów zamieni się w neutron i odda swój ładunek emitując pozyton. Zamiast ^{2}He powstaje więc deuter. Dzięki temu, iż tworzenie deuteru w warunkach istniejących wewnątrz Słońca jest tak „trudne" i mało prawdopodobne, Słońce może istnieć i produkować energię przez wiele miliardów lat. Przemiana ^{2}He w deuter związana jest z rozpadem β,

któremu zawsze towarzyszą neutrina nazywane w przypadku tej reakcji neutrinami pp.

Rozpadem β nazywamy każdy z trzech następujących procesów: rozpad neutronu związanego w jądrze lub swobodnego na proton, elektron i antyneutrino, rozpad protonu związanego w jądrze na neutron, pozyton i neutrino, oraz wychwyt elektronu z orbity atomu, w wyniku czego jeden z protonów zamienia się w neutron i wysyłane jest monoenergetyczne neutrino.

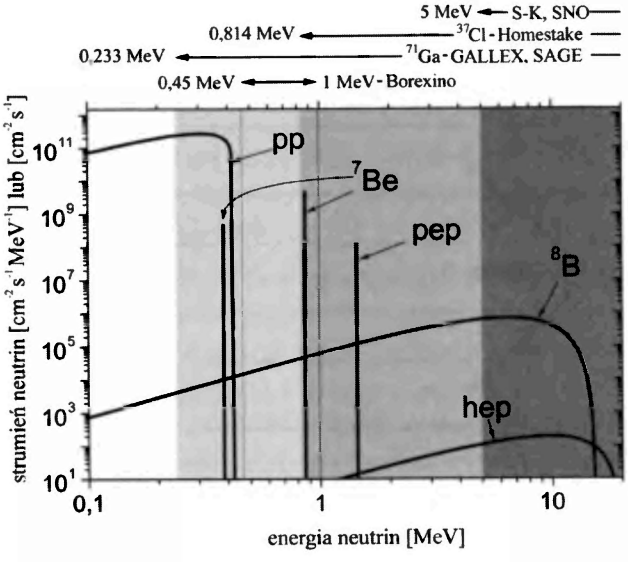
Wysoka temperatura, duże ciśnienie oraz stosunkowo wysokie jeszcze stężenie wodoru (w czasie 4,6 miliarda lat „pracy Słońca" zmalało ono dwukrotnie) we wnętrzu Słońca powodują, iż deuter jest prawie natychmiast spalany. Średni czas życia deuteru w jądrze słonecznym nie przekracza 2 sekund. W reakcji deuteru z protonem powstaje ^{3}He, który może być spalany na kilka różnych sposobów, co przedstawiono na rys. 1. Produktami spalania ^{3}He są jądra ^{4}He lub ^{7}Be.



Rys. 1. Cykl PP – reakcje termojądrowe zachodzące w Słońcu. Sumarycznie reakcję spalania wodoru zapisano w górnej ramce. W wyniku łączenia się czterech jąder wodoru powstaje jądro helu, uwalnia się energia 26,73 MeV i pojawiają się dwa neutrina o średniej energii $\langle E_\nu \rangle \approx 0{,}6$ MeV. Ta energia w czasie kilku sekund jest unoszona przez neutrina ze Słońca w przestrzeń. Powyżej przedstawiono szczegółowe reakcje tworzące tak zwany cykl PP. Produktem wejściowym w tym cyklu jest wodór, natomiast produktem spalania wodoru na kilka różnych sposobów jest zawsze hel – „jądrowy popiół". Według SMS w cyklu PP łącznie w pięciu reakcjach wytwarzane są neutrina o różnych energiach: 1) reakcja spalania wodoru (p+p), w wyniku której powstają neutrina pp; strumień $\Phi_{pp} = 5{,}95 \cdot 10^{14}\ \mathrm{m^{-2} \cdot s^{-1}}$; 2) reakcja trójciałowa spalania wodoru (p+e+p); powstają neutrina pep; $\Phi_{pep} = 1{,}40 \cdot 10^{12}\ \mathrm{m^{-2} \cdot s^{-1}}$; 3) reakcja syntezy wodoru i ^{3}He (^{3}He+p); powstają neutrina hep; $\Phi_{hep} = 9{,}30 \cdot 10^{7}\ \mathrm{m^{-2} \cdot s^{-1}}$; 4) reakcja wychwytu elektronu przez jądro ^{7}Be; powstają monoenergetyczne neutrina Be; $\Phi_{Be} = 4{,}77 \cdot 10^{13}\ \mathrm{m^{-2} \cdot s^{-1}}$; 5) reakcja rozpadu β^+ jądra ^{8}Be; powstają neutrina B; $\Phi_B = 5{,}05 \cdot 10^{10}\ \mathrm{m^{-2} \cdot s^{-1}}$.

Nawet bez dokładnej znajomości wnętrza Słońca można ze stałej słonecznej oszacować strumień neutrin, jaki dociera do Ziemi. Z powstaniem jednego neutrina związana jest produkcja energii 13 MeV, która jest wypromieniowywana w postaci fotonów. Dzieląc stałą słoneczną (1367 $\mathrm{W/m^2} = 8{,}5 \cdot 10^{15}$ MeV/s $\cdot$ m^2) przez 13 MeV znajdujemy, że na powierzchnię jednego metra kwadratowego, ustawioną prostopadle do kierunku Słońce–Ziemia, pada 650 bilionów neutrin w czasie jednej sekundy. Wszystkie generowane w Słońcu neutrina są typu elektronowego.

W Słońcu powstaje około 10000 razy więcej neutrin pp niż neutrin w reakcji rozpadu ^{8}B. Energia neutrin pp nie przekracza jednak 0,42 MeV (widmo energetyczne jest ciągłe), podczas gdy maksymalna energia neutrin ^{8}B osiąga 15 MeV (rys. 2). Prawdopodobieństwo wywołania przez neutrino sygnału w detektorze wzrasta szybko ze wzrostem energii, dlatego neutrina ^{8}B mimo niewielkiego strumienia odgrywają bardzo ważną rolę w eksperymentach.



Rys. 2. Widmo energetyczne neutrin obliczone na podstawie SMS. Strumień neutrin monoenergetycznych wyrażony jest w $cm^{-2} \cdot s^{-1}$, natomiast strumień neutrin mających ciągłe widmo energetyczne w $cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot MeV^{-1}$. Na górnej osi poziomej naniesiono energie progowe, powyżej których są rejestrowane neutrina w poszczególnych eksperymentach. Dla detektora Borexino pokazujemy okno energetyczne, w którym rejestrować będziemy neutrina ^{7}Be.

Neutrina powstające w procesie wychwytu elektronu przez jądro ^{7}Be są monoenergetyczne (dwie linie 0,86 MeV (90%) i 0,38 MeV (10%) na rys. 2), gdyż po wychwyceniu elektronu neutrino unosi praktycznie całą energię, w przeciwieństwie do rozpadu β z emisją elektronu, gdzie energia rozpadu jest dzielona pomiędzy elektron i neutrino.

Tak więc w każdej reakcji syntezy dwóch protonów, wychwytu elektronu przez jądro ^{7}Be czy rozpadu ^{8}B powstają neutrina. Ponieważ Słońce, podobnie jak inne obiekty materialne, jest dla nich bardzo przezroczyste, opuszczają je one bez trudu, niosąc bezcenną informację o procesach i warunkach, w których powstały w jądrze słonecznym. Obserwacja tych neutrin jest jedyną możliwością badania generatora energii we wnętrzu Słońca.

Fizyka neutrin słonecznych jest jedną z najbardziej fascynujących dziedzin współczesnych badań. Astrofizycy i fizycy zajmujący się badaniem cząstek elementarnych zadają sobie dwa wydawałoby się niezależne, fundamentalne pytania. Czy poprawne są nasze obecne wyobrażenia o Słońcu? Czy taka cząstka elementarna jak neutrino może występować w kilku rolach? Spodziewają się uzyskać odpowiedzi, przeprowadzając niezwykłe eksperymenty, w których używają „neutrinowych teleskopów" do obserwacji wnętrza Słońca. Teleskopy te nie są umieszczone na szczytach gór, jak to zazwyczaj bywa, lecz głęboko pod ziemią, aby osłonić je przed zakłócającym ich pracę promieniowaniem kosmicznym. Warstwa skał o grubości tysiąca metrów osłabia promieniowanie kosmiczne około miliona razy. Do teleskopów-detektorów umieszczonych w laboratoriach podziemnych docierają z wnętrza Słońca bez żadnych przeszkód tylko przenikające wszystko neutrina, po około 8 minutach od ich powstania. Trudno sobie nawet wyobrazić, jak słabo oddziałują neutrina z materią. Gdybyśmy zbudowali barierę w postaci równoważnej milionowi Słońc ustawionych jedno za drugim, to nawet połowa strumienia neutrin przechodzącego wzdłuż ich średnic nie byłaby zatrzymana, czyli nie wywołałaby reakcji. Ten milion Słońc jest dla neutrin tak przezroczysty, jak szyba o grubości kilku centymetrów dla światła.

3. Detekcja neutrin słonecznych

Ziemię przenika potężny strumień neutrin o różnej energii, musimy go tylko wykryć i zmierzyć. Lecz to, co pozwoliło neutrinom bez przeszkód wydostać się ze słonecznego „kotła", czyli ich niezwykła przenikliwość, jest dużą przeszkodą w ich rejestracji. Detekcja neutrin słonecznych stała się możliwa dzięki rozwojowi metod pomiarów niezwykle rzadkich zdarzeń (reakcji jądrowych, rozpadów promieniotwórczych), w których wykorzystuje się specjalne materiały oraz stosuje się wyrafinowane techniki elektroniczne, pozwalające znacznie ograniczyć niepożądane zakłócenia (tło).

Jak mało prawdopodobne jest „złapanie" neutrina, świadczy już jednostka oddziaływania strumienia neutrin słonecznych z detektorem, którą się posługujemy. Mianowicie, 1 SNU (Solar Neutrino Unit) odpowiada wychwyceniu jednego neutrina ze strumienia słonecznego w ciągu sekundy przez obiekt na powierzchni Ziemi (detektor) zawierający 10^{36} jąder. Te 10^{36} jąder pierwiastka o średniej gęstości ma masę 100 milionów ton! Prawdopodobieństwo wychwycenia neutrina zależy również od rodzaju materiału. Strumień neutrin słonecznych może generować w jakimś materiale sygnał 1 SNU, natomiast w innym – 100 SNU.

Podstawowy mechanizm „złapania" neutrina jest odwrotny do jego powstania; neutron w jądrze atomu pod wpływem neutrina przekształca się w proton i wysyłany jest elektron. Powstający nowy pierwiastek jest izotopem promieniotwórczym, którego wykryty rozpad będzie świadczył o zajściu reakcji z neutrinem. Prawdopodobieństwo zajścia reakcji neutrina z jądrem atomu potrafimy dokładnie obliczyć, wykorzystując fizykę jądrową i wiedzę o oddziaływaniach słabych.

Innym mechanizmem, który pozwala nam wykryć neutrina, jest ich zderzanie się z elektronami powłok atomowych w materiale detektora i przekazywanie im energii. Wykrywanie tych elektronów jest równoważne rejestracji neutrin. Jest to zasada działania detektorów Czerenkowa i detektorów scyntylacyjnych. Prawdopodobieństwo rozproszenia neutrina na elektronie precyzyjnie obliczamy z teorii oddziaływań elektrosłabych.

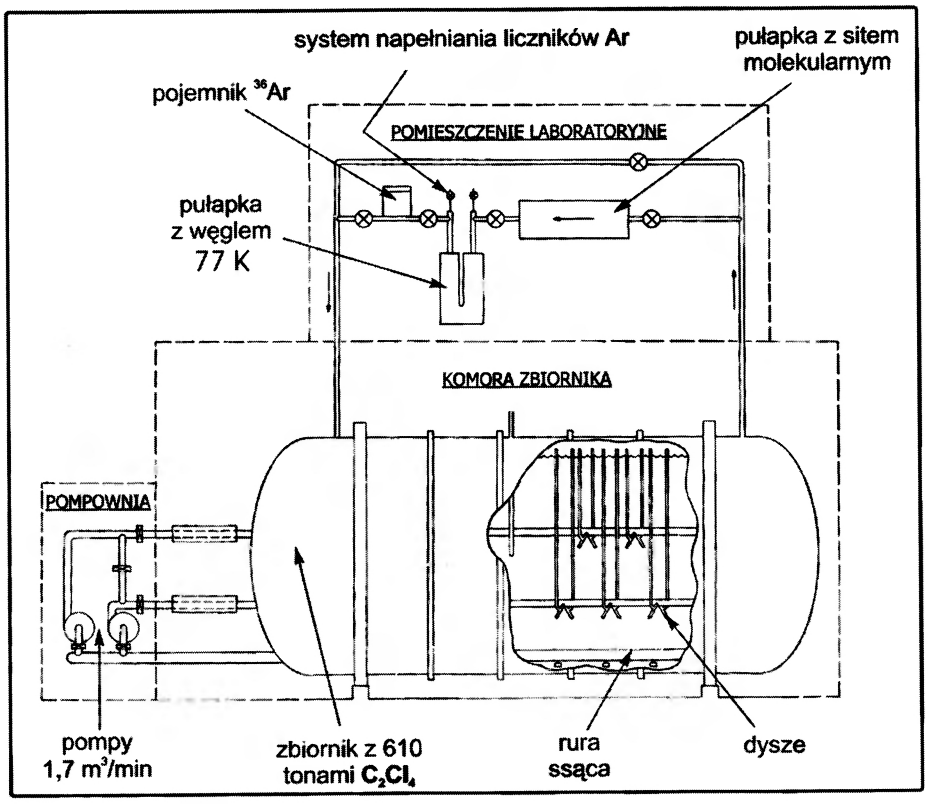
3.1. Chlorowy detektor neutrin słonecznych

Pierwszy eksperyment, którego celem był pomiar strumienia neutrin słonecznych, został uruchomiony przed ponad 30 laty. Neutrina słoneczne po raz pierwszy zarejestrował Raymond Davis, używając detektora radiochemicznego zainstalowanego na głębokości 1480 m w kopalni złota Homestake w Południowej Dakocie. Potężny zbiornik został napełniony 610 tonami C_2Cl_4, cieczy zawierającej w swym składzie dwa razy więcej atomów chloru niż znacznie lżejszego węgla. Neutrina elektronowe reagując z jądrami ^{37}Cl (naturalny chlor zawiera 24% izotopu ^{37}Cl oraz 76% izotopu ^{35}Cl) wytwarzają ^{37}Ar zgodnie z reakcją

$$\nu_e + {}^{37}\mathrm{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\mathrm{Ar}.$$

Reakcję tę mogą wywołać wyłącznie neutrina o energii większej niż 814 keV (rys. 2). Detektor Davisa rejestruje więc głównie neutrina ^{8}B (5,76 SNU) oraz ^{7}Be (1,15 SNU). Powstający ^{37}Ar jako niezwiązany chemicznie gaz szlachetny może być łatwo „wypłukany" ze zbiornika z cieczą przy użyciu strumienia helu, a następnie zaabsorbowany (ze strumienia He) w pułapce chłodzonej ciekłym azotem (rys. 3). ^{37}Ar jest izotopem promieniotwórczym. Liczba rozpadów ^{37}Ar mierzona miniaturowym licznikiem gazowym jest proporcjonalna do badanego strumienia neutrin. Na początku każdej kilkumiesięcznej ekspozycji zawartości detektora na strumień neutrin słonecznych dodaje się do czterochlorku węgla dokładnie znaną ilość (ok. 1 mg) trwałego izotopu ^{36}Ar w celu wyznaczenia skuteczności „wypłukiwania" ^{37}Ar z tak dużej objętości. Zakłada się przy tym, iż ^{36}Ar zachowuje się podobnie jak kilkanaście atomów neutrinogenicznego ^{37}Ar. Szukanie igły w stogu siana jest dziecinną zabawą w porównaniu z pogonią za kilkoma atomami argonu w kilkuset tonach cieczy.

Obliczony według SMS strumień neutrin słonecznych powinien wytwarzać w detektorze Davisa sygnał 7,7 SNU. Natomiast wynik eksperymentu, który jest nadal prowadzony, wynosi po ponad 30 latach 2,56 SNU [2], jest więc około trzy razy mniejszy od sygnału oczekiwanego. Rozbieżność ta została nazwana problemem neutrin słonecznych. Problem ten można rozwiązać na kilka sposobów, zmieniając wielkości użyte do obliczania strumienia neutrin ^{8}B. Obniżenie temperatury jądra słonecznego o zaledwie ok. 5% redukuje trzykrotnie sygnał przewidywany dla detektora chlorowego. Taka modyfikacja temperatury pociąga jednak znaczne zmiany innych parametrów w modelu Słońca, jak np. opalescencji. Opalescencja materii słonecznej nie może być jednak parametrem zupełnie swobodnym w SMS, ponieważ potrafimy ją obliczyć (niestety ze stosunkowo małą dokładnością). Innymi słowy, astrofizycy potrafią z małą precyzją przewidzieć stosunkowo słaby strumień wysokoenergetycznych neutrin ^{8}B. Mówimy wobec tego, iż ten problem może mieć rozwiązanie astrofizyczne.



Rys. 3. Schemat pierwszego detektora neutrin słonecznych.

3.2. Rejestracja neutrin słonecznych detektorem Czerenkowa

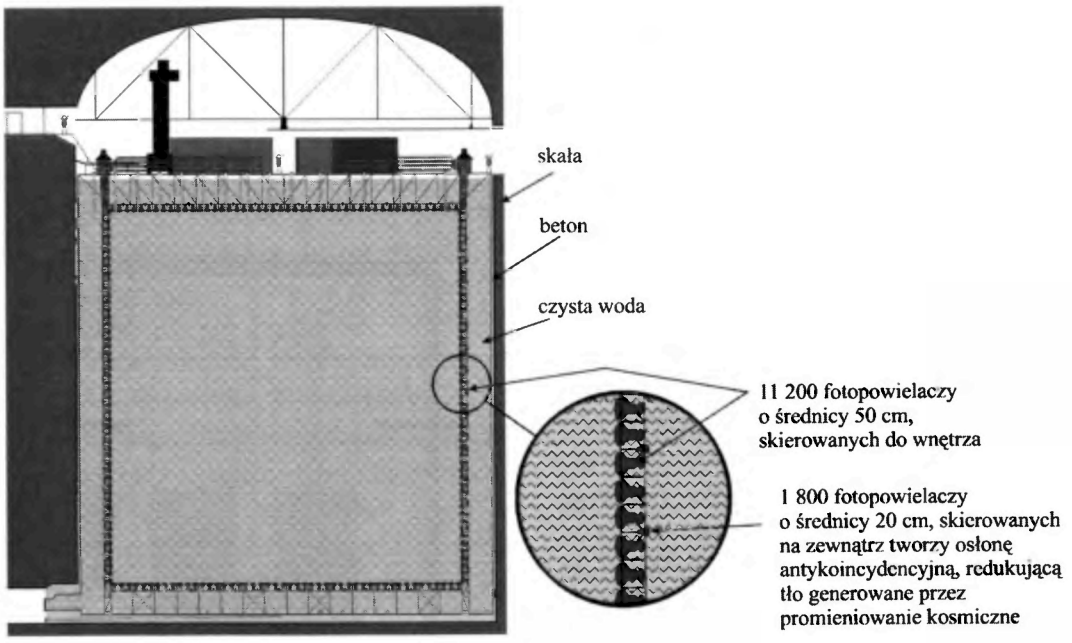
W Japonii, w kopalni cynku Kamioka, na głębokości 1000 m, w roku 1983 uruchomiono drugi eksperyment o nazwie Kamiokande, którego jednym z celów był pomiar strumienia neutrin słonecznych przy użyciu dużego detektora Czerenkowa. W późniejszych latach zbudowano inny, znacznie większy detektor o takiej samej zasadzie działania w postaci walca z 50 000 ton zwykłej wody (rys. 4). Eksperyment nazwany Super-Kamiokande został uruchomiony 1 kwietnia 1996 r.

Neutrina, zderzając się z elektronami drobin wody, przekazują im energię. Jeżeli elektron ma na tyle dużą energię, iż porusza się w wodzie z prędkością większą niż prędkość światła w tym ośrodku, to wytwarza błysk świetlny (zjawisko Czerenkowa – mechanizm powstawania błysków jest podobny do wytwarzania akustycznej fali uderzeniowej przez samolot przekraczający prędkość dźwięku w powietrzu). Już elektrony o energii większej niż 0,2 MeV wywołują w wodzie błyski świetlne. Wystarczy teraz otoczyć zbiornik z wodą bardzo czułymi urządzeniami rejestrującymi te słabe błyski – fotopowielaczami – aby uzyskać informację o strumieniu neutrin słonecznych. Woda, nawet po jej starannym oczyszczeniu, zawiera pewne, bardzo małe ilości naturalnych izotopów promieniotwórczych z szeregu uranu i toru, które częściowo zakłócają pomiar i uniemożliwiają rejestrację neutrin o energii mniejszej niż 5 MeV. Z rysunku 2 wnioskujemy, iż w eksperymencie Super-Kamiokande rejestrowane mogą być tylko neutrina ^{8}B, a więc te same, które generują ok. 75% sygnału w detektorze z chlorem.

Zostaliśmy ponownie zaskoczeni wynikiem eksperymentu, najpierw Kamiokande, a później Super-Kamiokande. Rejestrowany sygnał był tym razem o ok. połowę mniejszy niż sygnał oczekiwany [3]. Strumień neutrin ^{8}B mierzony detektorem wodnym Czerenkowa stanowił zatem jedną drugą strumienia obliczonego, a nie jedną trzecią jak w poprzednim eksperymencie. Mimo że bezwzględna wartość strumienia neutrin ^{8}B nie jest dokładnie znana, to detektory z chlorem i Super-Kamiokande powinny dać taki sam stopień jego ewentualnej redukcji.

Rozbieżność wyników eksperymentu Davisa i Kamiokande oraz później Super-Kamiokande zo-

stała nazwana drugim problemem neutrin słonecznych. Problemu tego nie można rozwiązać przez zmianę parametrów modelu Słońca, a więc nie ma on rozwiązania astrofizycznego. Neutrina elektronowe rozpraszają się na elektronach drobin wody z dobrze znanym, około sześciu razy większym prawdopodobieństwem niż neutrina mionowe i taonowe. Gdyby strumień neutrin słonecznych był zgodny ze SMS, lecz np. dwie trzecie neutrin elektronowych zamieniło się w inne neutrina aktywne, to wówczas rejestrowany sygnał byłby o połowę mniejszy od oczekiwanego. Możliwość konwersji neutrin jest niezwykle atrakcyjnym sposobem rozwiązania problemu neutrin słonecznych. Detektor Super-Kamiokande jest spektrometrem neutrin o energii większej od 5 MeV. Pozwala on wyznaczyć również kierunek rejestrowanych cząstek. Sygnaturą neutrin słonecznych jest zmienne położenie Słońca w ciągu dnia. Jako detektor o ogromnej masie rejestrujący zdarzenia w czasie rzeczywistym będzie on mógł zaobserwować bardzo wyraźny sygnał w chwili eksplozji supernowej, nawet bardziej odległej niż ta w Wielkim Obłoku Magellana obserwowana w 1987 roku. W eksperymencie Super-Kamiokande uczestniczą fizycy z Uniwersytetu Warszawskiego.



Rys. 4. Schemat detektora Super-Kamiokande.

3.3. Galowy detektor niskoenergetycznych neutrin słonecznych

Niezwykle interesujący jest pomiar strumienia neutrin z najczęściej zachodzącej w Słońcu reakcji p+p. Mamy bowiem najmniej wątpliwości do obliczonego strumienia neutrin pp, gdyż jest on bezpośrednio związany z energią emitowaną przez Słońce i nie zależy od szczegółów SMS. Neutrina pp są niskoenergetyczne, co powoduje, że do budowy detektora musimy znaleźć odpowiedni materiał. Materiał ten musi „łapać" odpowiednio dużo neutrin o energii mniejszej niż 0,42 MeV (maksymalna energia, jaką mają interesujące nas neutrina pp). Powstający w reakcji izotop musi być promieniotwórczy, podobnie jak w eksperymencie z chlorem, oraz musi mieć odpowiedni półokres rozpadu. Przeglądając tabelę izotopów, dochodzimy do wniosku, iż właściwie jedynym kandydatem jest gal, a dokładniej ^{71}Ga. Gal topi się w temperaturze ok. 30°C. Jest używany w małych ilościach przez przemysł elektroniczny do produkcji diod świecących. Aby „złapać" jedno neutrino w ciągu dnia, detektor musi zawierać ok. 50 ton tego metalu. Światowa produkcja galu, metalu towarzyszącego aluminium, w 1990 roku wynosiła 37 ton.

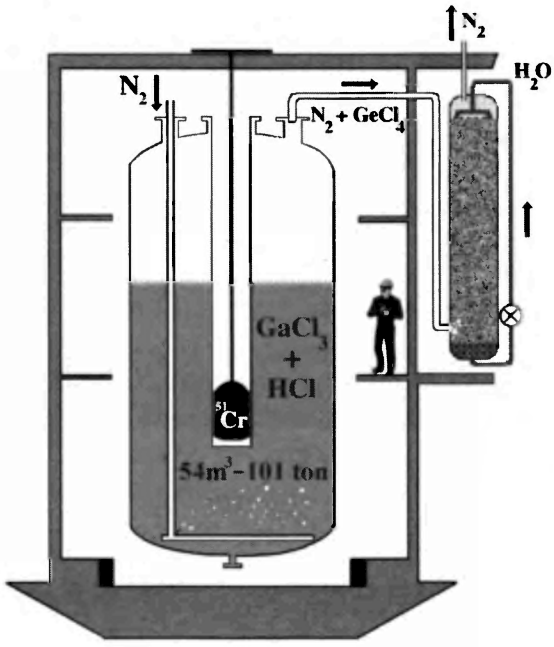
W latach 80. ubiegłego wieku powstał zespół GALLEX z udziałem jednego z autorów

(M.M.W.). Neutrina słoneczne typu pp zarejestrowaliśmy po raz pierwszy radiochemicznym detektorem galowym zainstalowanym w laboratorium podziemnym w Gran Sasso (Włochy) osłanianym przed promieniowaniem kosmicznym warstwą skał wapiennych o grubości 1300 m. Tarczą dla neutrin jest gal o masie 30 ton. Neutrina elektronowe o energii większej niż 233 keV mogą reagować z jądrami ^{71}Ga (naturalny gal zawiera 40% izotopu ^{71}Ga), zamieniając go w ^{71}Ge:

$$\nu_e + {}^{71}\mathrm{Ga} \rightarrow e^- + {}^{71}\mathrm{Ge}.$$

^{71}Ge jest izotopem promieniotwórczym o okresie półrozpadu 11,4 dnia. Dla ułatwienia ekstrakcji ^{71}Ge detektor radiochemiczny (rys. 5) nie został napełniony galem metalicznym, lecz chlorkiem galu, ciężką, przezroczystą cieczą o masie 101 ton. Ekstrakcję ^{71}Ge z cieczy detektora przeprowadzamy średnio co cztery tygodnie. Po takim czasie ekspozycji galu na neutrina słoneczne istnieje stan zbliżony do równowagi między wytwarzaniem ^{71}Ge a jego promieniotwórczym rozpadem. Na początku każdej czterotygodniowej ekspozycji do 101 ton chlorku galu dodajemy 1 miligram ^{72}Ge, ^{74}Ge lub ^{76}Ge – stabilnego „nośnika", aby za każdym razem określić efektywność procesu wypłukiwania ^{71}Ge. Po powstaniu w reakcji z neutrinem ^{71}Ge jako pierwiastek czterowartościowy występuje w postaci związku $^{71}GeCl_4$, który jest gazem. Podobnie, german dodany jako nośnik reaguje z HCl (którego istnieje pewien nadmiar) i jest obecny w detektorze radiochemicznym również jako gaz. Używając 2000 m^3 azotu, „wypłukujemy" ze 101 ton chlorku galu około 3 miligramy nieaktywnego czterochlorku germanu, zawierającego kilka drobin promieniotwórczego $^{71}GeCl_4$. Czterochlorek germanu jest wyłapywany ze strumienia azotu i przeprowadzany w czterowodorek germanu $^{71}GeH_4$ (gaz podobny do metanu), którym często napełnia się liczniki promieniowania jądrowego. Rozpady jąder ^{71}Ge rejestrujemy miniaturowym licznikiem proporcjonalnym, stanowiącym najważniejszy element spektrometru o niezwykle niskim tle. Aktywność ^{71}Ge jest proporcjonalna do badanego strumienia neutrin. Około 30 takich liczników wraz z elektroniką oraz osłonami biernymi z ołowiu i miedzi tworzy spektrometr GALLEX.

Nasz eksperyment z galem (podobnie jak eksperyment Davisa) zakłócają wszystkie procesy, w których w zbiorniku zawierającym chlorek galu z ^{71}Ga powstawałby ^{71}Ge w reakcjach innych niż wywołane przez neutrina. Niebezpieczne dla eksperymentu są również efekty wytwarzające impulsy elektryczne w miniaturowym liczniku proporcjonalnym. Najgroźniejszym wrogiem jest tutaj promieniowanie kosmiczne. Aby się przed nim uchronić, detektory neutrin oraz liczniki proporcjonalne wraz ze skomplikowaną elektroniką umieszcza się głęboko pod ziemią. Drugim ważnym wrogiem są wszechobecne, naturalne izotopy promieniotwórcze, takie jak potas, uran i tor, łącznie z izotopami należącymi do ich szeregów. Producenci chlorku galu dla eksperymentu GALLEX musieli wytworzyć ponad 100 ton tego związku chemicznego, zawierającego niezwykle małe ilości izotopów promieniotwórczych, aby uniknąć produkcji ^{71}Ge w reakcjach wywołanych emitowanymi przez nie cząstkami.



Rys. 5. Schemat radiochemicznego detektora neutrin w eksperymencie GALLEX

Naturalne izotopy promieniotwórcze mogą zakłócać eksperyment również na etapie detekcji ^{71}Ge. Obecne w materiale miniaturowego licznika lub w jego otoczeniu, mogą generować impulsy podobne do rejestrowanych w czasie rozpadu ^{71}Ge. Kilka takich impulsów w ciągu miesiąca może całkowicie zmienić wynik pomiaru. Dlatego układ detekcji wykonaliśmy z materiałów ultraczystych pod względem zanieczyszczeń

promieniotwórczych. Wyposażyliśmy go również w wyrafinowaną elektronikę pozwalającą w dużym stopniu „odfiltrować" impulsy inne niż z rozpadu ^{71}Ge. Jeden z autorów (M.M.W.) wniósł istotny wkład w poznanie i redukcję tła układu detekcji, co umożliwiło poprawne przeprowadzenie eksperymentu.

W maju 1991 roku nasz detektor z galem rozpoczął obserwacje Słońca „w neutrinach". Jako pierwszy w świecie rejestrował on neutrina pp z najważniejszej reakcji zachodzącej we wnętrzu naszej najbliższej gwiazdy, potwierdzając dotychczasową hipotezę o termojądrowym źródle energii Słońca. Sygnał przewidywany przez SMS dla detektora z galem wynosi 129 SNU. Neutrina pp i pep generują 73 SNU, neutrina ^{7}Be są odpowiedzialne za 34 SNU, 12 SNU pochodzi od neutrin ^{8}B, natomiast 10 SNU od neutrin ^{13}N i ^{15}O z cyklu CNO. Tymczasem po dziesięciu latach pomiarów wynik eksperymentu GALLEX wynosi 74,1 SNU [4]. Sygnał mierzony jest niemal równy sygnałowi oczekiwanemu jedynie od neutrin pp i pep. Wydaje się, iż brak jest sygnału od drugiego co do natężenia strumienia neutrin ^{7}Be. Udział neutrin ^{8}B jest nieduży, zaledwie 12 SNU, jednakże ^{8}B powstaje z ^{7}Be (rys. 1), więc redukcja strumienia neutrin ^{7}Be powinna być związana z taką samą redukcją neutrin ^{8}B. Wyraźny deficyt neutrin ^{7}Be lub wręcz ich brak, obserwowany w eksperymencie GALLEX, można nazwać trzecim problemem neutrin słonecznych.

Aby się upewnić, że na poszczególnych etapach eksperymentu GALLEX nie popełniliśmy jakiegoś błędu, postanowiliśmy wytworzyć źródło emitujące znany strumień neutrin i umieścić je wewnątrz detektora z galem, by się przekonać, czy będzie ono produkować odpowiedni, łatwy do obliczenia sygnał. Strumień neutrin emitowany przez nasze źródło musiał być co najmniej dziesięciokrotnie większy od strumienia neutrin słonecznych, gdyż w czasie naszego testu nie mogliśmy „wyłączyć" Słońca. W tym celu w reaktorze jądrowym Siloe w Grenoble wytworzono źródło w postaci ^{51}Cr o aktywności 61,9 PBq (1 PBq = 10^{15} rozpadów w ciągu sekundy). Było to najpotężniejsze źródło neutrin, jakie człowiek kiedykolwiek wytworzył. Źródło to umieściliśmy niemalże w geometrycznym środku detektora, eksponując chlorek galu na znany strumień neutrin. Neutrina te, podobnie jak neutrina słoneczne, wywołują reakcje jądrowe, w których ^{71}Ga przechodzi w ^{71}Ge. Okazało się, że sygnał wytworzony przez neutrina ze źródła ^{51}Cr jest prawie dokładnie równy sygnałowi oczekiwanemu (obliczonemu). Po raz pierwszy wykonaliśmy test radiochemicznego detektora neutrin słonecznych przy użyciu wykalibrowanego źródła neutrin, potwierdzając poprawność metod radiochemicznych używanych do wykrywania bardzo rzadkich reakcji jądrowych wywoływanych przez neutrina oraz do detekcji rozpadów promieniotwórczych na poziomie kilku w ciągu miesiąca. Testy ze źródłem ^{51}Cr były sprawdzianem całego eksperymentu GALLEX, które wykluczyły istnienie nieznanych błędów lub jakiegoś błędu w sztuce. Zespół GALLEX osiągnął zamierzony cel. Aby uniknąć demontażu detektora, został on przemianowany na Gallium Neutrino Observatory (GNO) i będzie mógł dostarczać danych jeszcze przez wiele lat.

Drugi, podobny detektor neutrin słonecznych, w którym używa się 60 ton metalicznego galu jako radiochemicznego detektora neutrin, uruchomiono w laboratorium podziemnym w Baksan (północny Kaukaz). Pierwsze wyniki eksperymentu SAGE (Soviet American Gallium Experiment) sugerowały zerową wartość strumienia neutrin słonecznych. Ostatni opublikowany przez SAGE wynik [5] jest podobny do wyniku eksperymentu GALLEX.

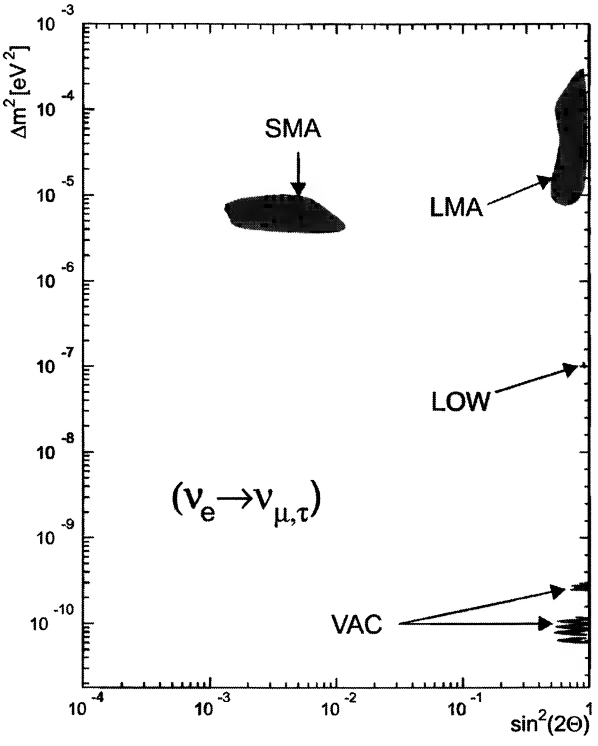
Deficyt neutrin słonecznych jest obserwowany we wszystkich czterech wymienionych eksperymentach. Najłatwiejszy do rozwiązania jest pierwszy problem, czyli deficyt neutrin ^{8}B w eksperymencie z chlorem. Problem ten ma rozwiązanie astrofizyczne polegające na małych, nie przez wszystkich akceptowanych zmianach w SMS. Znacznie poważniejsze są problemy drugi i trzeci. Jeżeli porównujemy dowolne dwie z trzech klas eksperymentów (chlorowy, Super-Kamiokande, galowy (GALLEX lub SAGE)), to dochodzimy do wniosku, że widmo elektronowych neutrin słonecznych musi być zredukowane w obszarze średnich energii. Zredukowany jest strumień neutrin ^{7}Be i niskoenergetyczna część widma neutrin ^{8}B. Takiej modyfikacji widma energetycznego neutrin nie jesteśmy w stanie opisać w ramach fizyki jądrowej czy astrofizyki, zakładając, że żaden z eksperymentów nie daje fałszywych wyników.

4. Próba rozwiązania problemu neutrin słonecznych

Bardzo atrakcyjna jest próba wyjaśnienia różnych wyników dotychczasowych eksperymentów opierając się na efekcie Mikheyeva, Smirnova i Wolfensteina (MSW). Efekt ten wynika z modelu, który zakłada, iż dla pewnej energii neutrin elektronowych oraz dla pewnej gęstości elektronów w materii słonecznej następuje zamiana neutrina elektronowego w neutrino niewidoczne dla naszych detektorów (np. neutrino inne niż elektronowe w przypadku detektorów radiochemicznych) lub oddziałujące z detektorem ze znacznie mniejszym prawdopodobieństwem. Warunkiem koniecznym wystąpienia tego efektu jest różna od zera masa neutrin, tak aby różnica kwadratów mas neutrin, które podlegają przemianie jednych w drugie, była również niezerowa. Możliwe też jest wyjaśnienie rozbieżności wyników omówionych wcześniej eksperymentów przez oscylacje neutrin w próżni na drodze pomiędzy Słońcem i Ziemią, powodujące, iż część neutrin elektronowych z reakcji syntezy przechodzi „niezauważona" przez objętość czynną detektora jako np. neutrina mionowe. Fizycy prowadzą wiele eksperymentów, aby potwierdzić powyższe hipotezy.

Oscylacje neutrin nie oznaczają jakiegoś ruchu wahadłowego tych cząstek. Ten termin opisuje cykliczne zmiany własności neutrin (zapachów). Przemiana jednego rodzaju neutrina w inny jest możliwa tylko wówczas, gdy oscylujące neutrina mają różne masy. Mała różnica mas powoduje, iż częstotliwości fal de Broglie'a tych neutrin są zbliżone, co sprawia, że te fale interferując oscylują synchronicznie i asynchronicznie, podobnie jak fale akustyczne o zbliżonych częstotliwościach wytwarzają dudnienia. Jeżeli maksimum każdego dudnienia odpowiada neutrinu elektronowemu, to minimum każdego cyklu odpowiadać będzie np. neutrinu mionowemu.

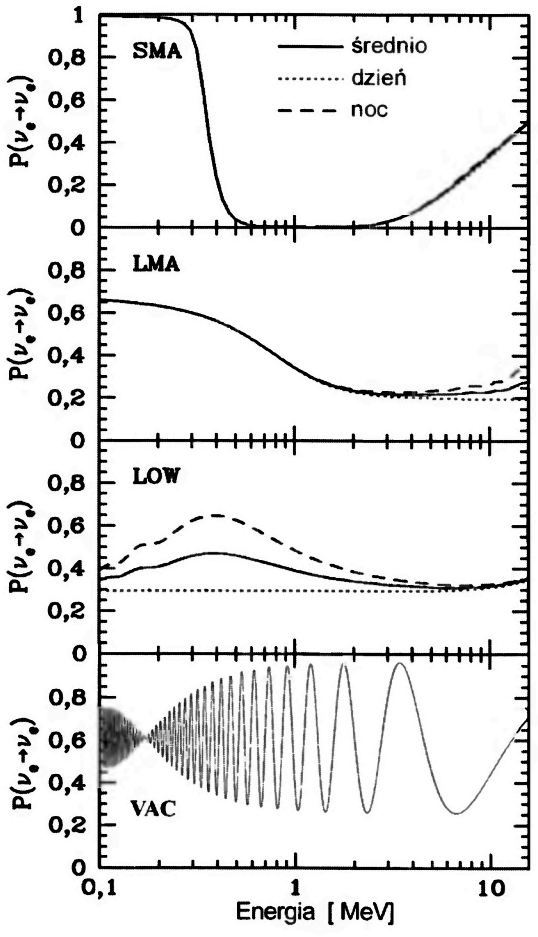
W modelu oscylacji neutrin parametrami swobodnymi są kąty mieszania oraz różnica kwadratów mas (Dodatek 2). Różny stopień redukcji mierzonego strumienia neutrin w wymienionych eksperymentach w stosunku do przewidywań SMS prowadzi, w ramach teorii oscylacji neutrin, do pojawienia się czterech obszarów dozwolonych na płaszczyźnie Δm^2–$\sin^2(2\theta)$ (rys. 6), gdzie Δm^2 jest różnicą kwadratów mas mieszających się neutrin, natomiast θ jest kątem mieszania: obszaru SMA (Small Mixing Angle – mały kąt mieszania), obszaru LMA (Large Mixing Angle – duży kąt mieszania), obszaru LOW (LOW mass – mała masa) i obszaru VAC (VACuum oscillations – oscylacje w próżni). Dla każdego z czterech wymienionych rozwiązań przewidywana jest inna deformacja kształtu widma energetycznego neutrin słonecznych (rys. 7), gdyż prawdopodobieństwo zamiany neutrina elektronowego w inne neutrino zależy od energii w sposób charakterystyczny dla każdego obszaru (parametrów mieszania). Dla obszaru LOW powinien być dodatkowo obserwowany silny efekt dzień–noc, dlatego że neutrina mionowe, które powstały z neutrin elektronowych, przechodząc nocą przez Ziemię do detektora mogą się na powrót zamienić w neutrina elektronowe. Dla neutrin o energii mniejszej niż 1 MeV oraz dla parametrów oscylacji z obszaru LOW gęstość jądra Ziemi jest wystarczająco duża, aby oscylacje były ponownie (podobnie jak w Słońcu) zmodyfikowane przez materię. Wyniki numerycznego rozwiązania równań ewolucji przedstawione są na rys. 7, gdzie pokazana jest oczekiwana modulacja sygnału w dzień i rege-



Rys. 6. Obszary dopuszczalnych rozwiązań dla oscylacji w materii słonecznej (efekt MSW) i oscylacji próżniowych.

neracja neutrin elektronowych w nocy. Podkreślić jednak trzeba, że nie istnieje dotąd spektrometr neutrin o energii mniejszej niż 1 MeV.

Otrzymane po ok. 1300 dniach obserwacji w eksperymencie Super-Kamiokande [3] widmo energetyczne neutrin ^{8}B ma kształt dokładnie zgodny z przewidywaniami teorii rozpadu β. Zasadniczo wyklucza to występowanie efektu MSW (obszar SMA) oraz oscylacji w próżni (VAC), gdyż dla parametrów z tych obszarów przewidujemy poważną deformację kształtu widma (rys. 7). Ponadto w tym eksperymencie nie obserwuje się efektu dzień–noc.



Rys. 7. Prawdopodobieństwo przetrwania elektronowego neutrina słonecznego w zależności od energii. Linią kropkowaną przedstawiono zależność, jaka powinna być obserwowana w ciągu dnia, natomiast linią przerywaną – w ciągu nocy.

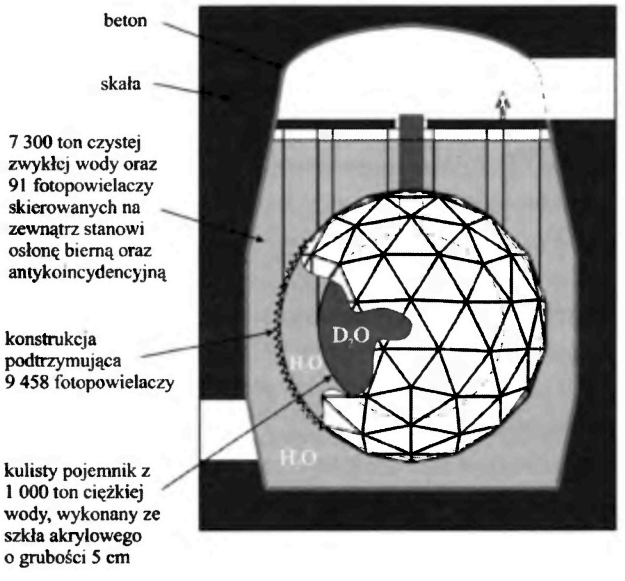
Przyjmując, iż rozwiązanie problemu neutrin słonecznych jest możliwe przy założeniu niestandardowych własności neutrina, a zwłaszcza jego różnej od zera masy, pytamy, jak można się o tym przekonać doświadczalnie? Otóż należy otrzymać precyzyjne widma energetyczne neutrin np. ^{8}B i ^{7}Be, a także rejestrować neutrina niezależnie w ciągu dnia i nocy (testowanie efektu dzień–noc). Także eksperymenty, w których sygnał nie zależy od rodzaju neutrin, dostarczą niezwykle cennych informacji. Wówczas, jeżeli neutrino elektronowe zamieni się w neutrino np. mionowe (efekt MSW lub oscylacje w próżni), to ta konwersja nie wpłynie na wielkość sygnału.

5. Ciężkowodny detektor neutrin w Sudbury

Jeden z eksperymentów nowej generacji, spełniający powyższe wymagania, został uruchomiony w neutrinowym obserwatorium w Sudbury w Kanadzie – Sudbury Neutrino Observatory (SNO). Neutrina rejestruje duży detektor Czerenkowa w postaci 1000 ton bardzo czystej, ciężkiej wody oraz 9458 fotopowielaczy, każdy o średnicy 20 cm (rys. 8). Pracuje on w kopalni miedzi i niklu na głębokości ponad 2000 m. Specyfiką tego detektora jest wykorzystanie reakcji neutrin z jądrami deuteru. Reakcję z prądem naładowanym (charged current – CC)

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-,$$

prowadzącą do rozbicia jądra deuteru z powstaniem dwóch protonów, mogą wywołać wyłącznie neutrina elektronowe. Natomiast reakcję z prądem



Rys. 8. Detektor neutrin w Sudbury.

neutralnym (neutrał current – NC)

$$\nu_x + \mathrm{d} \rightarrow \mathrm{p} + \mathrm{n} + \nu_x,$$

prowadzącą do prostego rozbicia jądra deuteru na proton i neutron, może wywołać dowolne neutrino (z wyjątkiem hipotetycznego neutrina sterylnego, które praktycznie nie oddziałuje z materią). Elastyczne rozpraszanie neutrin na elektronach (podobnie jak w Super-Kamiokande)

$$\nu_x + \mathrm{e}^- \rightarrow \nu_x + \mathrm{e}^-$$

jest trzecią reakcją pozwalającą rejestrować neutrina elektronowe z większą wydajnością niż neutrina mionowe i taonowe. Prawdopodobieństwo rozproszenia neutrina mionowego, ν_μ, i taonowego, ν_τ, ze względu na mniejsze przekroje czynne na tę reakcję (wymiana bozonu Z_0 – reakcja NC) jest około sześciokrotnie mniejsze niż elektronowego (wymiana bozonów W – reakcja CC i Z_0). Każda z tych reakcji ma swoją sygnaturę, co pozwala określić niezależnie strumienie neutrin elektronowych oraz innych neutrin (mionowych i taonowych). Detektor ten jest spektrometrem neutrin o energiach większych od 6,75 MeV. Sygnaturą neutrin słonecznych w niektórych reakcjach jest kierunek, z którego one przychodzą.

Możliwe jest zatem porównanie strumienia neutrin ^{8}B mierzonego w różnych reakcjach i potwierdzenie lub odrzucenie hipotezy oscylacji neutrin. Porównanie strumienia neutrin ^{8}B mierzonego w reakcji ES (electron scattering – całkowity przekrój czynny jest sumą przekrojów czynnych na reakcje CC i NC) przy założeniu niewystępowania oscylacji $\Phi^{\mathrm{ES}}(\nu_x)$ ze strumieniem mierzonym w reakcji CC – $\Phi^{\mathrm{CC}}(\nu_\mathrm{e})$ wskaże niezbicie na występowanie lub brak neutrin innych niż elektronowe. Jeżeli neutrina słoneczne podlegają konwersji i stają się innymi neutrinami niż ν_e, wówczas $\Phi^{\mathrm{CC}}(\nu_\mathrm{e}) < \Phi^{\mathrm{ES}}(\nu_x)$. Według pierwszych doniesień zmierzone przez detektor SNO [6] strumienie wynoszą odpowiednio:

$$\Phi^{\mathrm{CC}}_{\mathrm{SNO}}(\nu_\mathrm{e}) = 0{,}35\Phi_{\mathrm{SMS}},$$
$$\Phi^{\mathrm{ES}}_{\mathrm{SNO}}(\nu_x) = 0{,}47\Phi_{\mathrm{SMS}}.$$

Detektor ciężkowodny rejestruje zatem zaledwie 35% przewidywanego przez SMS strumienia neutrin elektronowych w reakcji CC. W reakcjach ES detektor SNO rejestruje 47% strumienia przewidywanego przez SMS, gdyby wszystkie neutrina rozpraszające się na elektronach były typu elektronowego. Elastyczne rozpraszanie na elektronach (ES) jest czułe na wszystkie rodzaje neutrin, chociaż w różnym stopniu. Oznacza to, iż

$$\Phi^{\mathrm{ES}}_{\mathrm{SNO}}(\nu_x) = \Phi^{\mathrm{CC}}_{\mathrm{SNO}}(\nu_\mathrm{e}) + \Phi^{\mathrm{ES}}_{\mathrm{SNO}}(\nu_\mu, \nu_\tau).$$

Strumień mierzony przez SNO dla reakcji elastycznego rozpraszania jest zgodny z o wiele dokładniejszym wynikiem Super-Kamiokande (SK)

$$\Phi^{\mathrm{ES}}_{\mathrm{SK}}(\nu_x) = 0{,}459\Phi_{\mathrm{SMS}},$$

dlatego w dyskusji podaje się wynik SK ze względu na mniejszy błąd. Obserwowana różnica między kanałami CC (SNO) i ES wskazuje na znaczący udział w strumieniu neutrin słonecznych innych typów i może być uznana za dowód istnienia oscylacji. Pamiętając, iż sygnał ES traktowaliśmy tak, jakby pochodził on od neutrin elektronowych, musimy różnicę strumieni ES oraz CC pomnożyć przez stosunek przekrojów czynnych R na reakcje CC oraz NC dla rozpraszania neutrin na elektronach (dla energii neutrin ^{8}B przyjmujemy wartość R zbliżoną do 6). Wówczas otrzymamy

$$R[\Phi^{\mathrm{ES}}_{\mathrm{SK}}(\nu_x) - \Phi^{\mathrm{CC}}_{\mathrm{SNO}}(\nu_\mathrm{e})] = \Phi(\nu_{\mu,\tau}).$$

Strumień neutrin mionowych i taonowych szacowany jest więc na [6]

$$\Phi(\nu_{\mu,\tau}) = 0{,}73\Phi_{\mathrm{SMS}},$$

a całkowity strumień neutrin ^{8}B

$$\Phi(\nu_x) = 1{,}08\Phi_{\mathrm{SMS}}.$$

Wynik ten jest zgodny z przewidywaniami SMS, a oszacowania różnicy kwadratów mas między ν_e a ν_μ lub ν_τ dają $6 \cdot 10^{-5}$ eV^2. Jeżeli powyższe wyniki zostaną potwierdzone, to będzie to pierwszy, bezpośredni pomiar całkowitego strumienia neutrin ^{8}B, a zarazem odkrycie oscylacji neutrin słonecznych i ich niezerowej masy.

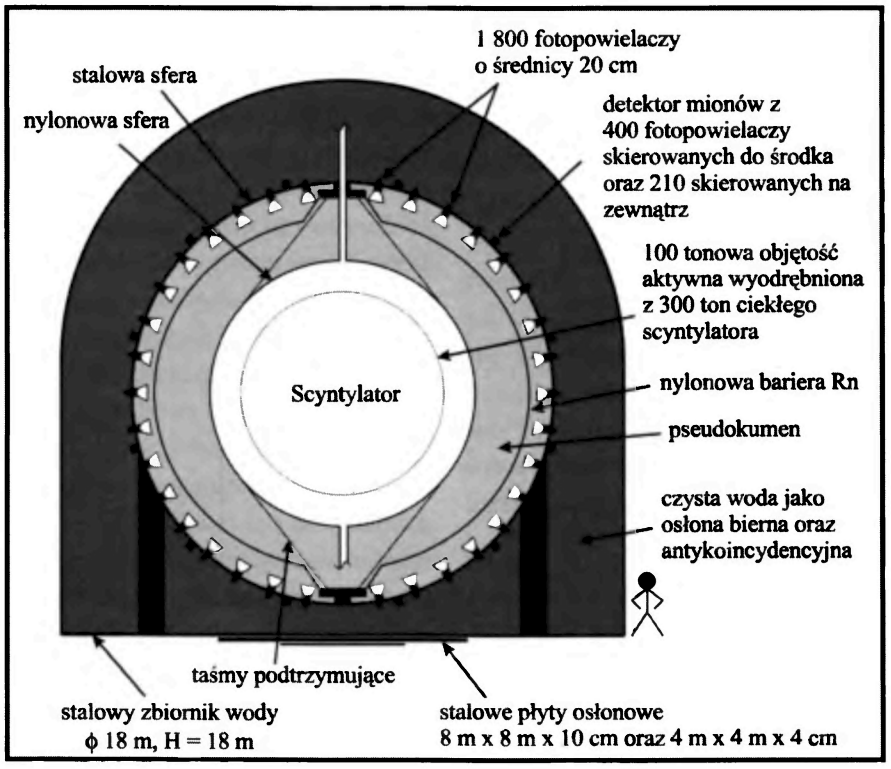
7. Scyntylacyjny detektor neutrin ^{7}Be w eksperymencie Borexino

W świetle wyników uzyskanych w SNO ogromne znaczenie ma eksperyment nowej generacji Borexino, którego głównym celem jest pomiar strumienia monoenergetycznych neutrin ^{7}Be [7].

Możliwe będzie określenie ich udziału w całkowitym strumieniu oraz wyznaczenie parametrów modelu oscylacji – różnicy kwadratów mas neutrin i kąta mieszania. Eksperyment ten jest przygotowywany od wielu lat z udziałem autorów artykułu. Detektor neutrin słonecznych nowej generacji będzie umieszczony w podziemnym laboratorium w Gran Sasso, gdzie strumień mionów kosmicznych jest osłabiony milion razy na skutek absorpcji w skałach o grubości 1300 m.

Detektor Borexino budujemy w hali C, która znajduje się niemalże w połowie jedenastokilometrowego tunelu wydrążonego pod masywem górskim. Detektor ma budowę powłokową, której celem jest redukcja wpływu promieniowania na najbardziej wewnętrzną część objętości aktywnej scyntylatora o masie 100 ton przez warstwy o różnej grubości z materiałów zawierających coraz mniej izotopów promieniotwórczych o czystości wzrastającej w kierunku centrum. Ostatnią warstwą osłony jest 200-tonowa część scyntylatora. Detektor będzie wkrótce uruchomiony.

Najbardziej zewnętrznym elementem detektora jest stalowa obudowa, spełniająca także funkcję zbiornika wody (rys. 9). Ma ona kształt domkniętego kopułą cylindra o średnicy 18 m i wysokości 16,9 m. Wewnątrz niej znajduje się m.in. stalowa sfera o średnicy 13,7 m. Przestrzeń pomiędzy obudową a sferą wypełniona jest ultraczystą wodą. Stanowi ona osłonę bierną, chroniącą wnętrze detektora przed lokalnym promieniowaniem. Chodzi tutaj głównie o promieniowanie γ oraz neutrony. Stalowa sfera pełni funkcję zbiornika pseudokumenu (ciekłego scyntylatora i cieczy buforowych), ponadto na jej wewnętrznej stronie zamontowaliśmy 1800 fotopowielaczy rejestrujących scyntylacje, a na stronie zewnętrznej i wewnętrznej 600 fotopowielaczy detektora Czerenkowa mionów. W centrum stalowej sfery, w zbiorniku wykonanym z folii nylonowej, umieszczony zostanie ciekły scyntylator o masie 300 ton. Zbiornik ciekłego scyntylatora ma mieć kształt sfery o średnicy 8,5 m i grubości 0,125 mm. Folia nylonowa spełnia w detektorze Borexino dwie funkcje: stanowi zbiornik ciekłego scyntylatora oraz jest barierą dla radonu dyfundującego z zewnętrznych, „mniej czystych" regionów detektora do jego aktywnej części. Aby uzyskać lepsze efekty hamowania migracji Rn, użyta zostanie jeszcze jedna bariera w postaci cienkiej folii, umieszczona pomiędzy pojemnikiem ciekłego scyntylatora a stalową sferą.



Rys. 9. Przekrój detektora monoenergetycznych neutrin ^{7}Be w eksperymencie Borexino.

Strumień neutrin ^{7}Be jest ściśle powiązany ze strumieniem neutrin borowych, tak więc wyniki eksperymentu Borexino będą testem wyników SNO. Detekcja neutrin słonecznych w eksperymencie Borexino oparta jest na rozpraszaniu badanych cząstek na elektronach z wykorzystaniem technik spektroskopowych przy użyciu ciekłych scyntylatorów. Wydajność świetlna scyntylacji (ilość światła produkowana na jednostkę energii traconej przez cząstkę w scyntylatorze) jest ok. 50 razy większa niż efektu Czerenkowa. Emisja światła scyntylacyjnego jest izotropowa i nie niesie ono informacji o kierunku neutrina. Rozpraszanie neutrin na elektronach opisuje teoria oddziaływań słabych, która pozwala precyzyjnie obliczyć przekroje czynne na te procesy. W naszym detektorze elektron, któremu neutrino przekazało część energii, pobudza do świecenia drobiny organicznej cieczy. Rejestrować będziemy widmo energetyczne elektronów odrzutu z reakcji elastycznego rozpraszania neutrino–elektron. Przewidywany próg detekcji wynosi 250 keV dla elektronów (co odpowiada minimalnej energii neutrin równej ok. 450 keV). Widmo neutrin ^{7}Be o energii 862 keV rejestrowane detektorem Borexino podobne będzie do widma Comptona z krawędzią odpowiadającą 660 keV. Tak więc kształt widma rozproszonych elektronów oraz energia krawędzi są sygnaturą neutrin ^{7}Be. Dla strumienia neutrin zgodnego z SMS oczekiwany sygnał detektora Borexino to 43 reakcje w ciągu doby. Obserwacja tak rzadkich zdarzeń, którym odpowiadają tak małe energie, nie była dotychczas możliwa w czasie rzeczywistym ze względu na bardzo duże tło. Dzięki ogromnemu i wieloletniemu wysiłkowi zespołu ludzi, w tym dużemu i ważnemu wkładowi fizyków z Uniwersytetu Jagiellońskiego, udało się osiągnąć odpowiednio niskie tło. Zostało to zademonstrowane na prototypach detektora Borexino. W zależności od poziomu tła i czułości, detektor będzie mógł także rejestrować rzadkie, słoneczne neutrina monoenergetyczne pep o energii 1,442 MeV.

Scyntylatorem w detektorze Borexino będzie pseudokumen (1,2,4-trójmetylobenzen). Nie cała objętość scyntylatora będzie brana pod uwagę podczas rejestracji neutrin. Ze względu na tło, którego źródłem są naturalne izotopy promieniotwórcze, uwzględniać będziemy tylko wewnętrzne 100 ton, co przy szacunkach, iż jedna tona scyntylatora pozwala zarejestrować 0,1–0,5 neutrina dziennie, pozwala spodziewać się sygnału na poziomie 9–43 zdarzeń w ciągu dnia (zależnie od parametrów w modelu oscylacji).

Borexino jest detektorem wymagającym skrajnie niskiego tła, a więc poziom zanieczyszczeń jego składników naturalnymi radioizotopami musi być bardzo niski. Autorzy artykułu pracowali nad zbiornikiem ciekłego scyntylatora, badając jego własności oraz symulując rzeczywiste warunki wieloletniej pracy detektora. Jak czyste muszą być materiały używane do budowy detektora, można zobrazować, porównując na przykład mierzone przez nas „skażenia" nylonu radem z zanieczyszczeniami krzemu, półprzewodnika zaliczanego do materiałów o najwyższej, legendarnej wręcz czystości. W jednej z prób nylonu, w czasie poszukiwań odpowiedniego tworzywa na pojemnik ciekłego scyntylatora wykryliśmy zaledwie 1 atom radu na 10^{17} innych atomów. Staramy się znaleźć jeszcze czyściejszy nylon, stosując nową, oryginalną, nieprawdopodobnie czułą metodę pomiarową. Dla porównania, w bardzo czystym półprzewodniku 1 atom domieszek przypada na 10^{10} atomów krzemu! Wyniki tych badań mają kluczowe znaczenie dla powodzenia całego przedsięwzięcia.

Oprócz pomiaru strumienia ^{7}Be neutrin słonecznych, sezonowych zmian tego strumienia oraz pomiaru asymetrii dzień–noc, zaliczanych do programu fizyki neutrin słonecznych, w ramach eksperymentu Borexino będą realizowane następujące projekty: 1) Badanie podwójnego rozpadu β ^{136}Xe przy użyciu 2 ton Xe rozpuszczonego w ciekłym scyntylatorze. Jedynie na podstawie tego rozpadu zachodzącego bez emisji neutrin możemy wyznaczyć bezpośrednio ich masę. 2) Badanie momentu magnetycznego neutrina na poziomie 10^{-11} μ_B przy użyciu ^{51}Cr jako źródła neutrin o aktywności 6 MCi (1 μ_B jest momentem magnetycznym elektronu). Oddziaływanie silnych pól magnetycznych na Słońcu z neutrinami o niezerowym momencie magnetycznym może modyfikować ich strumień zwłaszcza w okresach podwyższonej aktywności naszej gwiazdy. 3) Detekcja $\bar{\nu}_e$ pochodzących z rozpadów promieniotwórczych we wnętrzu Ziemi. 4) „Eksperymenty z długą bazą" polegające na detekcji $\bar{\nu}_e$ z europejskich reaktorów jądrowych. Znając moc i lokalizację reaktorów, możemy przewidzieć stru-

mień $\bar{\nu}_e$ w miejscu, w którym znajduje się detektor. 5) Obserwacja neutrin z wybuchu supernowej. Gigantyczna energia uwalniana w czasie eksplozji supernowej jest prawie w całości unoszona przez neutrina. Dlatego mimo ogromnych odległości możemy zarejestrować kilka neutrin z tego apokaliptycznego dla gwiazd wydarzenia.

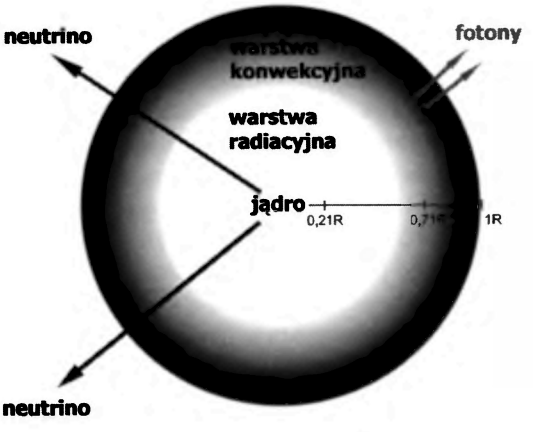
8. Podsumowanie

Celem pierwszego eksperymentu Davisa był pomiar strumienia neutrin słonecznych. Jego zgodność z SMS potwierdziłaby słuszność założeń tego modelu oraz byłaby doświadczalnym dowodem na to, iż źródłem energii gwiazdy są reakcje termojądrowe. Ponieważ SMS ulegał w ostatnich 30 latach pewnym modyfikacjom, przewidywany przez niego początkowo sygnał dla detektora Davisa był większy. Pierwsze wyniki eksperymentu chlorowego wskazywały na strumień obserwowany czterokrotnie mniejszy niż przewidywany przez SMS. Uczeni byli wówczas zgodni, iż jest rzeczą wspaniałą potrafić wyobrazić sobie i stworzyć model takiego obiektu jak gwiazda, chociaż precyzja przewidywanego strumienia neutrin nie była zachwycająca. Gotowi byli wprowadzić pewne zmiany w modelu, aby mógł on poprawnie generować strumienie neutrin. Jednak niezgodność wyników otrzymanych przez Davisa i eksperyment Kamiokande, a później Super-Kamiokande była genezą powstania teorii oscylacji neutrin w próżni, a następnie oscylacji neutrin w materii. Oscylacje neutrin są możliwe jedynie wówczas, jeżeli mają one masę różną od zera, co wykracza poza Model Standardowy cząstek. W kolejnych eksperymentach GALLEX i SAGE po raz pierwszy potwierdziliśmy powszechnie akceptowaną hipotezę o spalaniu wodoru w gwieździe, dokonując pomiaru strumienia neutrin pp z podstawowej reakcji termojądrowej, w której dwa protony łączą się w jądro deuteru. Jednak zgodność naszych wyników ze SMS można było uzyskać jedynie przyjmując model oscylacji neutrin. Ostatecznie istnienie oscylacji neutrin odkryto dokonując pomiaru ich strumienia detektorem ciężkowodnym, gdzie była możliwa rejestracja strumienia słonecznych neutrin elektronowych i strumienia wszystkich innych neutrin tym samym detektorem.

Tak więc neutrinowa astronomia obserwacyjna osiągnęła zupełnie inny od zakładanego cel, którym było potwierdzenie hipotezy o termojądrowym źródle energii słonecznej. Astrofizycy upewnili się, że ich precyzyjne modele Słońca nie zawierają ukrytych błędów oraz nie pomijają jakichś istotnych procesów. Fizykom cząstek wskazała na możliwość wyjścia poza prawdopodobnie niekompletny Model Standardowy cząstek.

Astronomia neutrin słonecznych potwierdziła teorię oscylacji neutrin, wymagającą niezerowej masy neutrin. Neutrina reliktowe, wszechobecne po Wielkim Wybuchu w ilości ok. 100 w każdym centymetrze sześciennym Wszechświata, mogą więc unosić pewną ilość brakującej ciemnej materii.

Dodatek 1
Standardowy Model Słońca (SMS)



Główne założenia SMS:

- równowaga termiczna i hydrostatyczna,
- transport energii przez promieniowanie i konwekcję,
- synteza termojądrowa jako źródło energii.

Wyznaczone i obserwowane parametry Słońca:

- masa $1{,}99 \cdot 10^{30}$ kg;
- jasność $3{,}84 \cdot 10^{26}$ J/s;
- promień $6{,}96 \cdot 10^{8}$ m;
- wiek $4{,}57 \cdot 10^{9}$ lat;
- skład materii na powierzchni: wodór 70,8%, hel 27,3%, pierwiastki o $Z > 2$ 1,9%;
- temperatura powierzchni 5780 K.

Obliczone według SMS parametry jądra słonecznego:

- temperatura $1{,}57 \cdot 10^{7}$ K;
- gęstość $1{,}53 \cdot 10^{5}$ kg/m^3;
- ciśnienie $2{,}34 \cdot 10^{7}$ GPa;

- skład materii: wodór 34,0%, hel 64,0%, pierwiastki o $Z > 2$ 2,0%.

Inne wielkości:

- głębokość warstwy konwekcyjnej – od 0,714 promienia do powierzchni,
- całkowity strumień neutrin na powierzchni Ziemi $650 \cdot 10^{12}\ \mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{s}^{-1}$.

U podstaw tego modelu leżą prawa zachowania oraz transportu energii termojądrowej zastosowane do sferycznie symetrycznego obiektu gazowego o gigantycznej masie. Punktem wyjścia SMS jest skoncentrowana grawitacyjnie z pierwotnego obłoku materia o jednorodnym składzie. Przed 4,57 miliardami lat gęstość i temperatura wewnątrz takiego obłoku była na tyle duża, iż mogły już zachodzić reakcje termojądrowe. SMS jest modelem ewolucyjnym, co oznacza, że opisuje on wszystkie stadia Słońca od początku aż do chwili obecnej. Wszystkie wyznaczone i obserwowane parametry Słońca doskonale zgadzają się z tymi obliczonymi według SMS dla wieku naszej gwiazdy równego 4,57 miliarda lat.

Strukturalne zmiany w budowie wynikają z zachodzących we wnętrzu reakcji jądrowych. Zamiana czterech jąder wodoru w jedno jądro helu zmniejsza gęstość cząstek, co prowadzi do obniżenia się ciśnienia w centrum. Ciśnienie nie zmienia się jednak, gdyż warstwy materii otaczające jądro dążą do utrzymania równowagi hydrostatycznej, opadają niżej i zmieniając położenie wydzielają zmagazynowaną w nich energię grawitacyjną przez podwyższenie temperatury i ciśnienia. Zwiększona temperatura przyśpiesza spalanie się termojądrowego paliwa. Dlatego Słońce, ewoluując od stadium początkowego, powiększa swoją całkowitą jasność oraz temperaturę jądra. Promień Słońca powiększa się, zwiększając powierzchnię potrzebną do wypromieniowania w tym samym czasie wzrastającej ilości energii.

Jesteśmy więc przekonani, że SMS stosunkowo dobrze opisuje budowę Słońca, wyróżniając w nim trzy strefy: 1) Jądro – najbardziej wewnętrzną część Słońca o promieniu 0,21 promienia słonecznego i temperaturze 15 milionów stopni, gdzie spala się wodór i powstaje hel. 2) Strefę radiacyjną – strefę sąsiadującą z jądrem, w której temperatura stopniowo spada do jednego miliona stopni. Reakcje syntezy praktycznie tutaj nie zachodzą. Energia pochodząca z jądra jest transportowana na zasadzie absorpcji i emisji promieniowania. 3) Strefę konwekcyjną – najbardziej zewnętrzną warstwę ze stosunkowo rozrzedzonego gazu, w której występuje turbulentne mieszanie materii słonecznej. Konwekcja jest tu głównym mechanizmem transportu energii (w odróżnieniu od strefy radiacyjnej). Temperatura spada ku powierzchni aż do 5780 K.

Porównując skład materii na powierzchni oraz w jądrze stwierdzamy, iż znaczna część wodoru uległa „spaleniu" w czasie, jaki upłynął od rozpalenia się termojądrowego kotła słonecznego.

Dodatek 2
Zjawisko oscylacji neutrin

Pełne zrozumienie zachowania się neutrin podczas przemieszczania się w przestrzeni osiągamy, stosując do ich opisu mechanikę kwantową. Podstawowym założeniem tej teorii jest falowa natura wszystkich cząstek, w tym też neutrin. Każdej cząstce przypisuje się funkcję falową, tak że prawdopodobieństwo jej znalezienia w określonym miejscu zależy od wartości funkcji falowej.

W Modelu Standardowym cząstek wyróżniamy trzy rodzaje neutrin związanych z trzema rodzinami leptonów (elektron, mion, tau). Zależnie od rodzaju wyprodukowanego leptonu w reakcji typu β (czyli np. reakcja: neutrino + neutron = lepton + proton) mówimy, że neutrino ma dany zapach. Na przykład mając do dyspozycji wiązkę neutrin o zapachu mionowym po skierowaniu jej na tarczę będziemy obserwować powstawanie mionów. Detektory radiochemiczne neutrin słonecznych ze względu na ich energie są czułe jedynie na neutrina o zapachu elektronowym. W reakcji z neutrinem powstaje w nich radioaktywne jądro oraz elektron.

Oscylujące neutrino ma skomplikowaną funkcję falową, która jest złożeniem (superpozycją) dwóch stanów („składników") o różnych masach. Różne masy tych „składników" neutrina powodują wystąpienie zjawiska oscylacji, co wpływa na zmienny skład neutrina w czasie. W bardziej ogólnym opisie uwzględnia się oscylacje pomiędzy wszystkimi trzema zapachami neutrin.

Zakładamy, że na początku mamy do czynienia z czystą wiązką neutrin elektronowych o określonej energii E (znanych z jądrowego rozpadu β). Prawdopodobieństwo, że neutrino po przebyciu drogi L będzie neutrinem elektronowym opisuje wyrażenie (wyprowadzone w opisie kwantowym)

$$P(L) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(\pi L / I_{\mathrm{osc}}), \qquad (1)$$

przy czym

$$I_{\mathrm{osc}} = 4\pi E / \Delta m^2. \qquad (2)$$

Wynika stąd, że początkowy skład wiązki zmienia się – istnieje możliwość zarejestrowania w niej innego neutrina niż elektronowe. W pewnych odległościach możemy otrzymać nawet zerowe prawdopodobieństwo zarejestrowania neutrina elektronowego.

Widzimy, że zmiany składu wiązki mają charakter oscylacyjny. Po przebyciu przez neutrino drogi równej I_{osc} ponownie odtwarza się jej początkowy skład. Wielkość możliwych zmian – amplituda oscylacji – jest związana z parametrem θ, nazywanym kątem mieszania. Im większa wartość $\sin^2 2\theta$, tym bardziej zauważalna jest oscylacja. Drugim ważnym parametrem jest kwadrat różnicy mas „składników" neutrina Δm^2. Od wartości Δm^2 zależy długość oscylacji I_{osc}; duża wartość Δm^2 oznacza małą długość oscylacji I_{osc} (wzór (2)). Zauważamy więc, że neutrina słoneczne

o odpowiedniej długości oscylacji mogą zmieniać swój typ i być niewidzialne dla detektora na Ziemi.

Sytuacja komplikuje się bardziej, gdy rozważamy dodatkowe zmiany składu neutrina przez wzmocniony mechanizm oscylacji w materii. Mówimy wtedy o modelu oscylacji MSW w odróżnieniu od opisanych tu oscylacji w próżni.

Literatura

[1] J.N. Bahcall, M.H. Pinsonneault, S. Basu, *Astrophys. J.* **555**, 990 (2001).

[2] B.T. Cleveland i in., *Astrophys. J.* **496**, 505 (1998).

[3] I. Fukunda i in. (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5651 (2001).

[4] M. Altmann i in. (GNO Collaboration), *Phys. Lett.* **B490**, 16 (2000).

[5] J.N. Abdurashitov i in. (SAGE Collaboration), *Phys. Rev. C* **60**, 055801 (1999).

[6] Q.R. Ahmad i in. (SNO Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **87**, 071301 (2001).

[7] G. Alimonti i in. (BOREXINO Collaboration), *Astroparticle Phys.* **16**, 205 (2002).

Dyslokacje jako centra elektrycznie aktywne w półprzewodnikach: pół wieku od odkrycia*

Tadeusz Figielski

Instytut Fizyki PAN, Warszawa

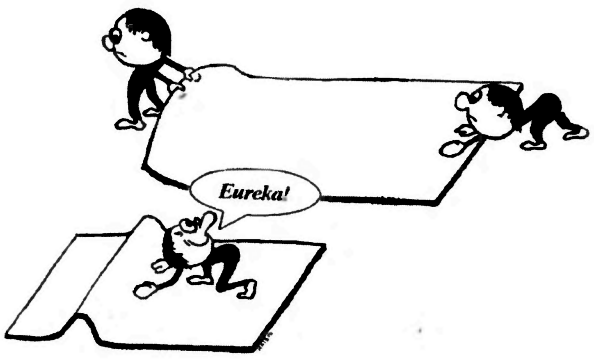
Dislocations as electrically active centres in semiconductors: half a century from the finding

Abstract: In the paper, I remind the fascinating story, which began in the early fifties of the last century, when the nascent semiconductor revolution became entangled with deep exploration of dislocations in semiconductor crystals.

1. Sam początek

W roku 1934 trzej uczeni: G.I. Taylor, E. Orowan i M. Polanyi wprowadzili – niezależnie od siebie – pojęcie dyslokacji w kryształach [1–3]. Pozwoliło ono wyjaśnić plastyczność metali (rys. 1). Czternaście lat później został wynaleziony tranzystor, co zapoczątkowało nową erę w rozwoju naszej cywilizacji technologicznej. W tym czasie dyslokacje stanowiły bardziej koncepcję teoretyczną niż rzeczywistość fizyczną. Bardzo wcześnie zorientowano się jednak, że półprzewodniki pozwalają na proste uwidacznianie dyslokacji w kryształach i, co więcej, że dyslokacje odgrywają szczególną rolę w kryształach półprzewodnikowych mających zastosowanie w elektronice.

*Opracowano na podstawie referatu wygłoszonego na zaproszenie na konferencji „Extended Defects in Semiconductors", Bolonia 5–6 lipca 2002 r.



Rys. 1. Pojęcie dyslokacji tłumaczy łatwość ruchu poślizgowego.

Początkowo najbardziej zainteresowane dyslokacjami w półprzewodnikach były przede wszystkim duże laboratoria przemysłowe, takie jak Bell Telephone Laboratories i General Research Laboratory w Stanach Zjednoczonych, wprowadzające nowe technologie tranzystorowe. Jest rzeczą znamienną, że William Shockley – jeden z odkrywców tranzystora w Bell Telephone – istotnie przyczynił się do rozwoju fizyki dyslokacji w kryształach. To on pierwszy zauważył w 1953 r., że niewysycone wiązania chemiczne występujące wzdłuż dyslokacji krawędziowej w kryształach kowalencyjnych mogą tworzyć jednowymiarowe pasmo energetyczne częściowo zapełnione elektronami [4] (rys. 2).

Rys. 2. William Shockley i A.F. Joffe dyskutujący podczas Konferencji Fizyki Półprzewodników w Pradze w 1960 r.

Z drugiej strony wiele laboratoriów uniwersyteckich, które nominalnie zajmowały się fizyką metali, zaczęło coraz bardziej interesować się półprzewodnikami. Sztandarowym przykładem był tu Instytut Fizyki Metali Uniwersytetu w Getyndze, kierowany przez Petera Haasena. Później, gdy jego uczeń Helmut Alexander objął kierownictwo Oddziału Fizyki Metali Uniwersytetu w Kolonii, powstał drugi silny ośrodek badania dyslokacji w półprzewodnikach. Ale wróćmy do początku historii, będącej przedmiotem tego artykułu, która zaczęła się dokładnie 50 lat temu.

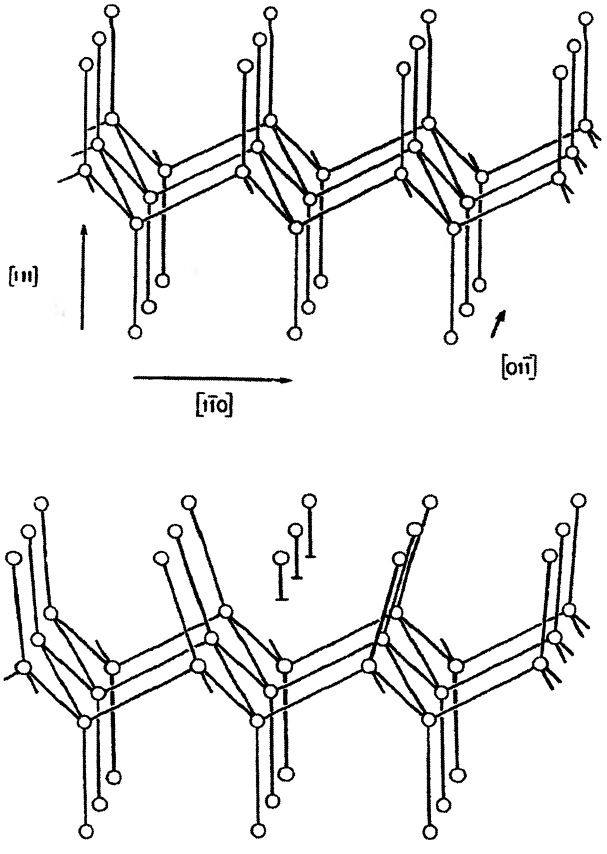
W roku 1952 w listopadowym numerze *Physical Review* ukazał się półtorastronicowy komunikat napisany przez C.J. Gallaghera z General Electric i zatytułowany „Plastyczna deformacja germanu i krzemu" [5]. W komunikacie tym autor donosił, że udało mu się przeprowadzić w podwyższonej temperaturze plastyczną deformację kryształów germanu i krzemu. Ponadto zauważył, że opór właściwy germanu wzrastał po deformacji, a czas życia wzbudzonych światłem nośników prądu dramatycznie się zmniejszał. Temu artykułowi towarzyszył inny [6], którego autor, Frederick Seitz, komentował wyniki Gallaghera, podkreślając, że dają one istotny wgląd w plastyczność materiałów w ogóle, a kryształów kowalencyjnych w szczególności.

W następnych latach wielu badaczy w Stanach Zjednoczonych donosiło o podobnych obserwacjach [7–10]. Byli to tacy uczeni, jak G.L. Pearson, R.A. Logan, W. Bardsley i in., których nazwiska były dobrze znane w owym pionierskim okresie rozwoju elektroniki półprzewodnikowej. Ich wyniki pokazywały jednoznacznie, że w procesie plastycznej deformacji germanu są wprowadzane do kryształu zlokalizowane stany elektronowe, działające jak akceptory oraz centra rekombinacji, związane najprawdopodobniej z niewysyconymi wiązaniami w rdzeniach generowanych dyslokacji.

W 1954 r. ukazały się pierwsze prace teoretyczne dotyczące elektronowych właściwości dyslokacji w półprzewodnikach; ich autorem był W.T. Read Jr. z Bell Telephone [11]. Read opracował statystykę obsadzenia stanów elektronowych dyslokacji uwzględniającą kulombowskie oddziaływanie między elektronami, które powoduje, że stany te nie są nigdy całkowicie zapełnione elektronami (rys. 3).

Najbardziej dramatyczny był wpływ dyslokacji na rekombinację nadmiarowych nośników ładunku [12–17]. Doświadczenia pokazywały, że w różnych półprzewodnikach czas życia nośni-

ków jest odwrotnie proporcjonalny do gęstości dyslokacji. Czas życia był krytycznym parametrem decydującym o funkcjonowaniu ówczesnych tranzystorów bipolarnych. Toteż przez długi czas problem rekombinacji na dyslokacjach przyciągał szczególną uwagę wielu badaczy w różnych laboratoriach.



Rys. 3. Oryginalne rysunki z pracy Reada [11] przedstawiające idealną strukturę diamentu (góra) oraz strukturę zawierającą dyslokację 60-stopniową (dół).

2. Podstawowe wyniki

W połowie lat sześćdziesiątych ubiegłego stulecia kilka grup badawczych w Europie podjęło eksperymenty z plastycznie deformowanym germanem. W szczególności pomiary przewodnictwa i efektu Halla prowadzili A.F.W. Willoughby w Londynie [18], van Weeren i współpr. w Amsterdamie [19], J. Kryłow i J. Auleytner w Warszawie [20,21], P. Gondi i A. Cavallini w Bolonii [22]. Znacznie bardziej wyczerpujące badania zostały przeprowadzone przez W. Schrötera i R. Labuscha w Getyndze [23,24], którzy interpretowali swoje wyniki w modelu jednowymiarowego pasma energetycznego dyslokacji. Było to uzasadnione przekonaniem, że prostoliniowe odcinki idealnej dyslokacji winny mieć symetrię translacyjną.

Później wchodzące szybko do praktyki naukowej komputery umożliwiły przeprowadzenie bezpośrednich obliczeń struktury pasmowej rdzenia dyslokacji w przybliżeniu ciasnego wiązania. Takie obliczenia zostały zapoczątkowane przez R. Jonesa w Exeter [25] i S. Marklunda w Umea (Szwecja) [26]. Znacznie wcześniej W.L. Boncz-Brujewicz w Moskwie [27] oraz W. Güth [28] i H. Teichler [29] w Stuttgarcie opracowali przybliżone teorie stanów pasmowych dyslokacji w półprzewodnikach.

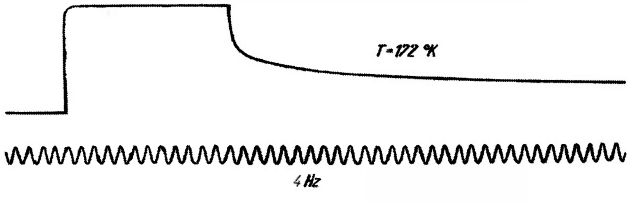
Eksperymenty pokazywały także, że dyslokacje rozpraszają efektywnie nośniki ładunku w półprzewodnikach. Jest to spowodowane zarówno działaniem potencjału deformacyjnego, wywołanego długozasięgową dystorsją sieci wokół dyslokacji, jak też potencjałem elektrostatycznym naładowanej dyslokacji. B. Pödőr w Budapeszcie wyprowadził wyrażenie na ruchliwość nośników prądu ograniczoną ładunkiem dyslokacji, które później weszło do podręczników fizyki półprzewodników [30]. K. Kawamura w Kolonii pierwszy zwrócił uwagę na jeszcze inną możliwą przyczynę rozpraszania nośników, jaką jest zmiana topologii sieci w obecności dyslokacji [31].

Bardzo wcześnie zaczęto się też interesować elektrycznymi właściwościami dyslokacji w związkach półprzewodnikowych. Jeszcze w roku 1957 P. Haasen zwrócił uwagę na to, że w zależności od kierunku plastycznego wyginania kryształów InSb generowane są w nich dwa różne rodzaje dyslokacji 60-stopniowych [32]. Istotnie, dodatkowa półpłaszczyzna atomowa związana z dyslokacją o składowej krawędziowej w związkach $A^{II}B^{VI}$ lub $A^{III}B^{V}$ może kończyć się rzędem atomów A lub B.

W roku 1963 podjąłem, początkowo wspólnie z A.D. Bielajewem w Kijowie, a później z Mirką Jastrzębską w Warszawie, badania fotoprzewodnictwa plastycznie deformowanego germanu. Mierzyliśmy wówczas m.in. zależność fotoprzewodnictwa próbek od natężenia padającego światła w temperaturze ciekłego azotu. Do osłabiania natężenia światła używaliśmy zestawu siatek metalowych o drobnych oczkach. Zupełnie nieoczekiwanie, gdy już zostały wykorzystane wszystkie

siatki dostępne w laboratorium, okazało się, że fotoprzewodnictwo pozostawało wciąż na mierzalnym poziomie. Chcąc dalej zredukować natężenie światła, ażeby dokończyć eksperyment, użyliśmy naprędce – zamiast brakujących siatek – damskich nylonowych pończoch dostarczonych bezzwłocznie przez żeńską część personelu laboratorium. Dzięki temu udało się nam ustalić, że stacjonarna koncentracja wzbudzonych światłem nośników ładunku rośnie liniowo z logarytmem natężenia światła w szerokim zakresie oświetleń. Ten fakt jest dzisiaj wykorzystywany w metodzie DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) dla odróżnienia rozciągłych pułapek elektronowych w półprzewodnikach od pułapek punktowych.

Osobliwe zachowanie się dyslokacji jako centrów rekombinacji wynika z ich wieloelektronowej natury. Prędkość wychwytu elektronu na dyslokacji zależy – na skutek oddziaływania kulombowskiego – od liczby już wychwyconych elektronów [33–35]. Prowadzi to do szczególnej kinetyki rekombinacji, w wyniku której fotoprzewodnictwo zanika logarytmicznie z czasem (rys. 4).



Rys. 4. Logarytmiczny zanik fotoprzewodnictwa w plastycznie deformowanym germanie [35].

Fotoprzewodnictwo, rządzone procesami generacji-rekombinacji nośników ładunku, jest znacznie bardziej selektywną metodą badania dyslokacji niż zjawiska galwanomagnetyczne. Wielu badaczy wykorzystało je zatem do badania struktury stanów elektronowych dyslokacji. Z. Gołacki w Warszawie był pierwszym, który ujawnił złożone widmo fotoprzewodnictwa w plastycznie deformowanym germanie [36]. Było ono następnie szczegółowo badane przez E. Kamienieckiego w Warszawie [37], E. Kamienieckiego i K. Elsässera w Stuttgarcie [38], H.R. Webera w Getyndze [39] oraz D. Mergela i R. Labuscha w Clausthal [40].

3. Ładunek dyslokacji i plastyczność półprzewodników

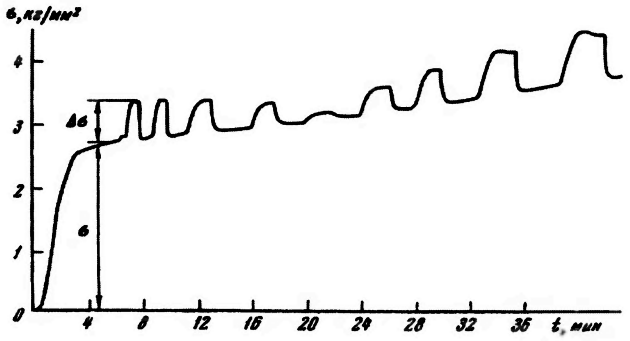
Ponieważ oświetlenie półprzewodnika zmienia ładunek niesiony przez dyslokacje, podejrzewano, że plastyczność półprzewodników powinna także zależeć od oświetlenia.

W 1957 r. badaczy ciała stałego zafascynowało odkrycie, nazywane początkowo efektem Kuczynskiego, a później efektem fotomechanicznym. G.C. Kuczynski i R.F. Hochman [41] z Notre Dame University (Indiana) badali mianowicie mikrotwardość germanu i innych kryształów, wciskając romboidalną piramidę diamentową, tzw. indentor Knoopa. Zauważyli oni, że oświetlenie kryształu podczas wciskania (indentacji) zmienia dłuższą przekątną wytworzonego odcisku. Oznaczało to, że mikrotwardość germanu zmniejsza się podczas oświetlenia. Przez ponad dekadę po tym odkryciu pojawiały się w literaturze liczne prace, których autorzy donosili o występowaniu efektu fotomechanicznego w różnych półprzewodnikach i półmetalach oraz opisywali jego osobliwe właściwości.

W końcu, podczas 9. Miedzynarodowej Konferencji nt. Fizyki Półprzewodników, która odbywała się w 1968 r. w Moskwie, odkrycie to zostało „zakryte"! R.N. Hall z General Electric, który przeprowadził podobne doświadczenia jak Kuczynski, przedstawił swoje zaskakujące wyniki [42]. Otóż efekt fotomechaniczny był obserwowany, ale tylko wtedy, gdy obserwator wiedział, czy światło jest włączone podczas indentacji. W przeciwnym przypadku korelacja między oświetleniem i przekątną odcisku była całkowicie przypadkowa. Ale na tym nie koniec tej historii.

Kolejnym mówcą na tej konferencji był Jurij Ossipian z Czernogołowki k. Moskwy. Przedstawił on krzywe zależności naprężenia od odkształcenia dla kryształów CdS, zarejestrowane bez ingerencji obserwatora [43] (rys. 5). Krzywe te wskazywały na wyraźny efekt utwardzania kryształu podczas jego oświetlenia. W ten sposób występowanie zjawiska, zwanego teraz fotoplastycznością, zostało udowodnione, ale nie dla jednoskładnikowych półprzewodników, takich jak Ge i Si, i o przeciwnym znaku niż „efekt Kuczynskiego". Wiele prac zostało następnie wykonanych w Instytucie Fizyki Ciała Stałego w Czernogołowce, kierowanym przez Ossipiana; pozwoliły one szcze-

gółowo poznać i zrozumieć to zjawisko występujące powszechnie w związkach półprzewodnikowych II–VI i III–V.

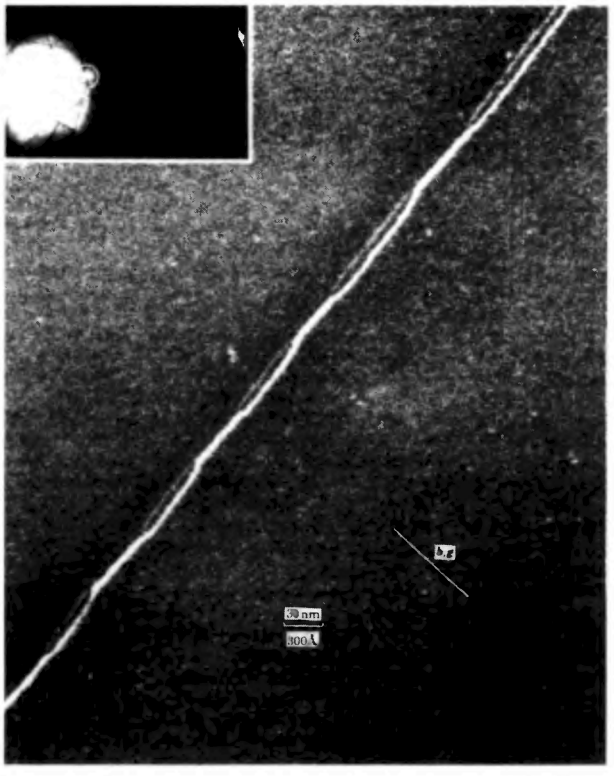


Rys. 5. Fotoplastyczność kryształu CdS w 75°C odkryta przez Ossipiana i Sawczenkę [43]. Wykres przedstawia naprężenie w kg/mm^2 niezbędne dla zachowania stałej prędkości ściskania próbki, równej 10^{-5} cm/s, w funkcji czasu odkształcenia w minutach. Widoczne obszary zwiększonego naprężenia podczas oświetlenia kryształu.

4. Sprawy się komplikują

Niewysycone wiązania w rdzeniu dyslokacji są źródłem niesparowanych spinów elektronowych, co implikuje paramagnetyczne właściwości dyslokacji w półprzewodnikach. Złożone widmo elektronowego rezonansu spinowego (ESR) pojawiające się w wyniku plastycznej deformacji krzemu zaobserwowali po raz pierwszy H. Alexander i współpr. w Kolonii [44] oraz W.A. Grażulis i współpr. w Czernogołowce [45]. Widmo to było następnie szczegółowo badane przez E. Webera i współpr. w Kolonii [46], którzy doszli do wniosku, że jedynie mała część wszystkich topologicznie możliwych zerwanych wiązań w rdzeniu dyslokacji ujawnia się w rezonansie spinowym. Obserwowane centra paramagnetyczne muszą być zlokalizowane w jakichś szczególnych miejscach dyslokacji. Natomiast dominująca część rdzenia dyslokacji ulega rekonstrukcji, w wyniku której niewysycone wiązania ulegają wysyceniu.

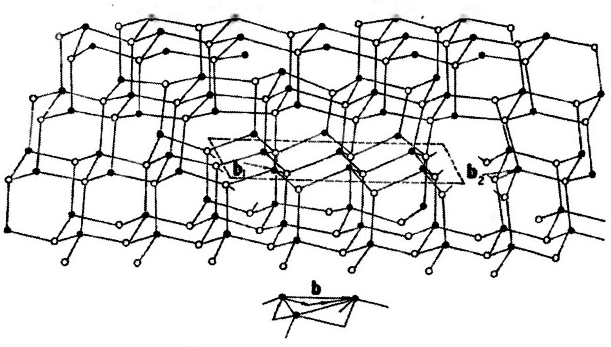
Na podstawie tych i innych badań zaczęła ujawniać się zaskakująca złożoność rdzenia dyslokacji w krzemie i w innych półprzewodnikach. Było to zgodne z kluczowym dla problemu dyslokacji w półprzewodnikach odkryciem dokonanym przez I.L.F. Raya i D.J.H. Cockayne'a w Oksfordzie w 1971 r. [47]. Stosując metodę słabej wiązki w mikroskopii elektronowej zaobserwowali oni, że dyslokacje w kryształach półprzewodnikowych z tetraedryczną koordynacją (do których należą struktury diamentu, sfalerytu i wurcytu) są rozszczepione na tzw. częściowe dyslokacje Shockleya i rozdzielone „wstęgą" błędu ułożenia. Rozszczepienie to nie jest jednorodne wzdłuż całej długości dyslokacji, ale jest przerywane krótkimi odcinkami przewężeń (rys. 6). Dyslokacja 60-stopniowa rozszczepia się na dyslokację 30- i 90-stopniową, podczas gdy dyslokacja śrubowa rozszczepia się na dwie dyslokacje 30-stopniowe.



Rys. 6. Rozszczepione i przewężone odcinki dyslokacji 60-stopniowej w krzemie, uwidocznione metodą słabej wiązki w mikroskopii elektronowej [47].

Odkrycie to wywołało małą rewolucję w naszej wiedzy o dyslokacjach w półprzewodnikach i miało poważne konsekwencje dla zrozumienia elektrycznej aktywności dyslokacji. Oznaczało ono, że dominująca część dyslokacji w półprzewodnikach należy do tzw. układu poślizgu (ang. glide set) a nie, jak uważano poprzednio, do układu przetasowania (ang. shuffle set). W przypadku dyslokacji układu poślizgu wzajemne przemieszczanie się dwóch części kryształu podczas odkształcenia plastycznego zachodzi pomiędzy bliskimi płaszczyznami atomowymi typu {111}.

Wówczas zrywanych jest trzykrotnie więcej wiązań chemicznych niż w przypadku, gdyby poślizg zachodził pomiędzy oddalonymi płaszczyznami atomowymi {111}. Zatem struktura mikroskopowa 60-stopniowej dyslokacji w typowych półprzewodnikach ma postać przedstawioną na rys. 7, a nie taką, jak na rys. 3.



Rys. 7. Dyslokacja 60-stopniowa w strukturze diamentu rozszczepiona na dyslokacje częściowe Shockleya: 30-stopniową (b_1) i 90-stopniową (b_2), rozdzielone błędem ułożenia. U dołu: rozłożenie wektora Burgersa pełnej dyslokacji na wektory Burgersa dyslokacji częściowych [46].

Złożoność rdzenia dyslokacji, i związanych z nim stanów elektronowych, ujawniła się także w fotoluminescencji zachodzącej na dyslokacjach w krzemie, która była zaobserwowana po raz pierwszy przez N.A. Drozdowa i współpr. w Mińsku [48]. W większości półprzewodników dyslokacje wygaszają rekombinację promienistą. Jedynie kilka półprzewodników, a wśród nich krzem i german [49], wykazuje emisję promieniowania zachodzącą na dyslokacjach. Takie widmo emisji w krzemie składa się z pewnej liczby ostrych linii. Linie te próbowano skorelować z różnymi odległościami między rozszczepionymi dyslokacjami.

Przez połączenie metody ESR z fotoprzewodnictwem udało się T. Wosińskiemu w Warszawie [50] i W.A. Grażulisowi w Czernogołowce [51] zaobserwować intrygujące zjawisko rekombinacji zależnej od orientacji spinów w plastycznie deformowanym krzemie. Grażulis i współpr. wykazali również przy użyciu techniki mikrofalowej występowanie zmiennoprądowego przewodnictwa wzdłuż krótkich regularnych odcinków dyslokacji [52]. Zostało to z powodzeniem wykorzystane w Czernogołowce jako metoda badania dyslokacji w krzemie.

5. Uwagi końcowe

Na tym chciałbym zakończyć tę opowieść, gdyż zamierzyłem ograniczyć ten krótki przegląd do lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia. Myślę, że dobrym znakiem granicznym jest tu Sympozjum nt. Dyslokacji w Półprzewodnikach z Tetraedryczną Koordynacją, które odbyło się w 1978 r. w Hünfeld. Jak podkreślali organizatorzy tego Sympozjum, było ono kontynuacją Międzynarodowych Szkół nt. Defektów w Kryształach, organizowanych w Polsce przez prof. J. Auleytnera. Postęp w badaniach elektronowych właściwości dyslokacji w półprzewodnikach, jaki nastąpił w latach późniejszych, wymaga oddzielnego omówienia.

Na samym końcu chciałbym dodać parę uwag o charakterze ogólnym. Dyslokacje są na ogół niepożądanymi defektami materiałów i przyrządów półprzewodnikowych. Z drugiej jednak strony dyslokacje stanowią fascynujące obiekty, które przyciągały uwagę wielu uczonych z różnych działów fizyki. Są tacy optymistycznie nastawieni badacze, jak S. Mil'stein, którzy propagują ideę wykorzystania specyficznych właściwości elektronowych dyslokacji bezpośrednio w urządzeniach półprzewodnikowych [53].

Należy podkreślić, że uczeni bardzo wcześnie zwrócili uwagę na to, iż dyslokacje w półprzewodnikach stanowią interesujące układy jednowymiarowe, które mogą wykazywać niezwykłe właściwości elektryczne (było to na długo przed powstaniem fizyki układów jednowymiarowych!). Wielu badaczy poszukiwało jednowymiarowego przewodnictwa stałoprądowego lub, co było bardziej pociągające, nadprzewodnictwa wzdłuż linii dyslokacyjnych. Przejście do stanu nadprzewodzącego mogłoby być wywołane niestabilnością Peierlsa rdzenia dyslokacji. Nie stwierdzono jednak dotychczas jednoznacznego występowania długozasięgowego przewodnictwa elektrycznego, a tym bardziej nadprzewodnictwa dyslokacji.

Ja także zajmowałem się swego czasu poszukiwaniem tego typu egzotycznych zjawisk. Przewidywałem, że prąd elektryczny indukowany w małych pętlach dyslokacji pryzmatycznych w dostatecznie niskiej temperaturze będzie płynął nie zanikając. Przeprowadziłem eksperymenty, w których próbka specjalnie spreparowanego germanu była zawieszona na delikatnej nici kwarcowej,

tworząc wahadło torsyjne zanurzone w nadciekłym helu [54]. Niestety, szczątkowe namagnesowanie badanych próbek, nieokreślonego pochodzenia, uniemożliwiło zweryfikowanie tej hipotezy.

Obecnie rozumiemy, dlaczego dyslokacje stanowią raczej kiepskie układy jednowymiarowe. Będąc liniowymi defektami sieci krystalicznej, same zawierają wiele nieodłącznych defektów, takich jak progi, przegięcia i przewężenia rozszczepionych odcinków; ponadto mogą im towarzyszyć (dekorować je) domieszki gromadzące się wokół dyslokacji. To wszystko zakłóca idealną okresowość wzdłuż linii dyslokacji, niezbędną dla wystąpienia efektów jednowymiarowych.

Literatura

[1] G.I. Taylor, *Proc. Roy. Soc. A* **145**, 362 (1934).
[2] E. Orowan, *Zeit. Phys.* **89**, 605, 614, 634 (1934).
[3] M. Polanyi, *Zeit. Phys.* **89**, 660 (1934).
[4] W. Shockley, *Phys. Rev.* **91**, 228 (1953).
[5] C.J. Gallagher, *Phys. Rev.* **88**, 721 (1952).
[6] F. Seitz, *Phys. Rev.* **88**, 722 (1952).
[7] G.L. Pearson, G.L. Read, E.J. Morin, *Phys. Rev.* **93**, 666 (1954).
[8] A.G. Tweet, *Phys. Rev.* **99**, 1182 (1955).
[9] R.A. Logan, G.L. Pearson, D.A. Kleinman, *J. Appl. Phys.* **30**, 885 (1959).
[10] W. Bardsley, *Progr. Semicond.* **4**, 155 (1960).
[11] W.T. Read, *Philos. Mag.* **45**, 775, 1119 (1954).
[12] S.S. Kulin, A.D. Kurtz, *Acta Metall.* **2**, 354 (1954).
[13] J. Okada, *J. Phys. Soc. Japan* **10**, 1110 (1955).
[14] A.D. Kurtz, S.A. Kulin, B.L. Averbach, *Phys. Rev.* **101**, 1285 (1956).
[15] G.K. Wertheim, G.L. Pearson, *Phys. Rev.* **107**, 694 (1957).
[16] Yu.V. Gulyaev, *Fiz. Tverd. Tela* **3**, 1094 (1961).
[17] L.I. Kolesnik, *Fiz. Tverd. Tela* 4, 1449 (1962).
[18] A.F.W. Willoughby, Ph.D. Thesis, London 1966.
[19] J.H.P. van Weeren, G. Koopmans, J. Block, *Phys. Stat. Sol.* **27**, 219 (1968).
[20] J. Kryłow, J. Auleytner, *Phys. Stat. Sol.* **32**, 581 (1969).
[21] J. Kryłow, *Phys. Stat. Sol.* **32**, 589 (1969).
[22] A. Cavallini, P. Gondi, *Lett. Nuovo Cimento* **10**, 115 (1974), **14**, 222 (1975).
[23] W. Schröter, *Phys. Stat. Sol.* **21**, 211 (1967).
[24] W. Schröter, R. Labush, *Phys. Stat. Sol. (b)* **36**, 539 (1969).
[25] R. Jones, *Philos. Mag.* **36**, 677 (1977), *J. Phys. Colloq.* **40**, C6-33 (1979).
[26] S. Marklund, *Phys. Stat. Sol. (b)* **85**, 673 (1978), *Phys. Stat. Sol. (b)* **92**, 83 (1979).
[27] V.L. Bonch-Bruevich, V.B. Glasko, *Fiz. Tverd. Tela* **3**, 36 (1961).
[28] W. Güth, W. Haist, *Phys. Stat. Sol.* **17**, 691 (1966).
[29] H. Teichler, *Verh. DPG* **3**, 115 (1968).
[30] B. Pödör, *Phys. Stat. Sol.* **16**, K167 (1966), *Acta Phys. Hungarica* **23**, 393 (1967).
[31] K. Kawamura, *Z. Phys. B* **29**, 101 (1978).
[32] P. Haasen, *Acta Metall.* **5**, 598 (1957).
[33] S.R. Morrison, *Phys. Rev.* **104**, 619 (1956).
[34] T. Figielski, *Phys. Stat. Sol.* **6**, 429 (1964), **9**, 555 (1965), *Solid State Electron.* **21**, 1403 (1978).
[35] M. Jastrzębska, T. Figielski, *Phys. Stat. Sol.* **7**, K101 (1964), **14**, 381 (1966).
[36] Z. Gołacki, T. Figielski, *Phys. Stat. Sol.* **20**, K1 (1967).
[37] E. Kamieniecki, *Phys. Stat. Sol. (a)* **4**, 257 (1971).
[38] E. Kamieniecki, K. Elsässer, *Phys. Stat. Sol. (b)* **56**, K37 (1973).
[39] H.R. Weber, *Phys. Stat. Sol. (a)* **25**, 445 (1974).
[40] D. Mergel, R. Labusch, *Phys. Stat. Sol. (a)* **41**, 431 (1977), **42**, 165 (1977).
[41] G.C. Kuczynski, R.F. Hochman, *Phys. Rev.* **108**, 946 (1957).
[42] R.N. Hall, *IX International Conference on the Physics of Semiconductors, Moscow, July 23–29, 1968, Proceedings* (Nauka, 1968), s. 481.
[43] Yu.A. Ossipyan, L.B. Savchenko, *IX International Conference on the Physics of Semiconductors, Moscow, July 23–29, 1968, Proceedings* (Nauka, 1968), s. 486; *Zh. Eksp. Teor. Fiz. Pisma* **7**, 130 (1968).
[44] H. Alexander, R. Labusch, W. Sander, *Solid State Commun.* **3**, 357 (1965).
[45] V.A. Grazhulis, Yu.A. Ossipyan, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **58**, 1259 (1970); **60**, 1150 (1971).
[46] H. Alexander, M. Kenn, B. Nordhofen, E. Weber, W. Sander, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, nr 23 (1975), s. 433.
[47] I.L.F. Ray, D.J.H. Cockayne, *Proc. Roy. Soc. A* **325**, 543 (1971).
[48] N.A. Drozdov, A.A. Patrin, V.D. Tkachev, *Zh. Eksp. Teor. Fiz. Pisma* **23**, 651 (1976).
[49] A.A. Gippius, V.S. Vavilov, *Fiz. Tverd. Tela* 4, 2426 (1962).
[50] T. Wosiński, T. Figielski, *Phys. Stat. Sol. (b)* **71**, K73 (1975).
[51] V.A. Grazhulis, V.V Kveder, Yu.A. Ossipyan, *Zh. Eksp. Teor. Fiz. Pisma* **21**, 708 (1975).
[52] V.A. Grazhulis, V.V. Kveder, V.Yu. Mukhina, *Zh. Eksp. Teor. Fiz. Pisma* **24**, 164 (1976); *Phys. Stat. Sol. (a)* **43**, 407 (1977); 44, 107 (1977).
[53] S. Mil'shtein, *J. Phys. Colloq.* **40**, C6-207 (1979).
[54] T. Figielski, *V Intern. Summer School on Defects, Krynica, 8–18 May 1976, Proceedings* (PWN, Warszawa), s. 237.

Liber abaci

Maciej Suffczyński

Instytut Fizyki PAN, Warszawa

1. Wczesne układy liczbowe w Azji

Już we wczesnym średniowieczu w Indiach zapisywano liczby za pomocą cyfr układu dziesiątkowego. Uczony Aryabhata I, urodzony w 476 r. w Kusumapura, „mieście kwiatów" leżącym u ujścia rzeki Jumma do Gangesu nieopodal miasta Pataliputra, wydał traktat *Aryabhatiya*, w którym opisał rachunki arytmetyczne. Liczby oznaczał „sylabami". Podał regułę wyciągania pierwiastków kwadratowych, sumowania szeregów arytmetycznych, rozwiązywania równań liniowych i kwadratowych oraz wiadomości z astronomii. Bhaskara I, uczeń Aryabhaty, ok. 522 r. opracował komentarze do traktatu swego mistrza, wprowadził zapis zera osobną „sylabą" i nadał systemowi charakter dziesiętnego układu pozycyjnego: wartość oznaczona była cyfrą i jej położeniem w zapisie, liczonym od prawego końca. Bhaskara II (1114 – ok. 1185), „Bhaskaracarya" (uczony Bhaskara), w swoim słynnym dziele *Lilavati* opisał pojęcie zera i reguły posługiwania się nim: „$a + 0 = a$, $a \cdot 0 = 0$, dodatnia potęga zera jest zerem". Unikamy tu wzmianek o poprzednikach hinduskich matematyków, nie wspominamy też o wątpliwościach, jakie budzi skąpe piśmiennictwo na temat życia uczonych w Indiach.

W Bagdadzie, ok. 820 r., matematyk Mohamad ibn Musa al-Chuwarizmi, Abu Abdallah, nazywany też al-Hwarazmim, w traktacie *Ilm al-jabr wa'l muqabalah* (Nauka o redukcji i skracaniu) podał zarys „algebry" oraz przedstawił hinduski system pozycyjny zapisu liczb i liczenia. Pisma al-Hwarazmiego zostały przełożone na łacinę w XII w.

2. Dzieje układów liczbowych w Europie

Cyfry układu dziesiętnego wraz z zerem przejęli od uczonych indyjskich po swych podbojach Arabowie. Na zachodnich rubieżach ich panowania najbardziej rozpowszechniony był zapis cyfr zwany „Gobar" (proch, pył) i taki zapis poprzez kontakty handlowe zaczął przenikać do zachodniej Europy. Od czasów Imperium Romanum ludzie oświeceni w Europie używali w pismach łaciny i liczby zapisywali tak jak starożytni Rzymianie za pomocą dużych liter alfabetu łacińskiego: I (= 1), V (= 5), X (= 10), L (= 50), C (= 100), D (= 500), M (= 1000). Rzymski zapis czytelnie przedstawiał liczby na płaskorzeźbach. Jako nieoparty na prostej zasadzie systemu pozycyjnego, nie nadawał się do rachunków. Wykonywano je za pomocą deski posypanej piaskiem lub pyłem albo powleczonej woskiem, na której zaostrzonym rylcem zapisywano liczby. Taka deska do liczenia nazywana była z greckiego abakion ($\alpha\beta\alpha\kappa\iota o\nu$), abak lub z łaciny „abacus": „Abacus vocatur mensa geometricalis que et in numeris et formis numerorum diuisa..." (abakusem zwana jest stolnica geometryczna używana do liczenia i zapisywania liczb...). Na desce czasem rachmistrze rysowali kwadratową kratę 9×9 pól, na jej polach ustawiali kamyki i odpowiednio je przesuwali przy wykonywaniu dodawania oraz innych działań arytmetycznych. Kamyki z piaskowca albo wapienia zwane w późnej łacinie *calx* były pierwowzorem słowa *calculus*.

Cyfry Gobar były znane m.in. w klasztorze Santa Maria de Ripoll k. Barcelony. Gerbert, ur. ok. 938 r. w Owernii, jako mnich w benedyktyń-

skim klasztorze św. Géraudа w Aurillac studiował pod kierunkiem Raymonda de Lavaur i znawcy astronomii, opata klasztoru, Fleury (ok. 945 – 1003), a następnie – wysłany w 967 r. do Hiszpanii – zapoznał się tam z cyframi Hindusów i Arabów. W celu ułatwienia rachunków arytmetycznych Gerbert rysował na desce abakusa pionowe proste, między którymi stawiał kostki oznaczone cyframi arabskimi i zaznaczał łukiem po trzy kolumny. Zamiast zer zostawiał puste miejsca. Napisał podręczniki *Regulae de numerorum abaci rationibus* oraz *Scholium ad Boethii arithmeticam* i zredagował podręcznik *Gerberti Isagoge Geometriae*. W 999 r. Gerbert został papieżem i przyjął imię Sylwester II (999–1003). Pisał o nim m.in. ks. dr Jerzy Witczak w *Postępach Fizyki* **52**, 177 (2001).

3. *Liber abaci* Fibonacciego

W XIII w. kwitł handel między Wenecją, Genuą i Pizą a krajami basenu Morza Śródziemnego. Konsul republiki Pizy, Guglielmo Bonacci, wiele podróżował, odwiedzając miasta i porty tego basenu. Jego syn, Leonardo Fibonacci (ok. 1170 – ok. 1250), zwiedził z nim Egipt, Syrię, Bosfor, Sycylię i wybrzeże Algierii. W algierskim mieście portowym Bugia poznał Maura, który go wprowadził w matematykę Arabów – nauczył posługiwania się cyframi Gobar i systemem pozycyjnym zapisu liczb. Powróciwszy do Pizy, Leonardo wydał w 1202 r. książkę *Liber abaci* złożoną z 15 rozdziałów: 1) Zapis i odczytywanie liczb w systemie hindusko-arabskim; 2) Mnożenie liczb całkowitych; 3) Dodawanie liczb całkowitych; 4) Odejmowanie liczb całkowitych; 5) Dzielenie liczb całkowitych; 6) Mnożenie liczb całkowitych przez ułamki; 7) Działania na ułamkach; 8) Ceny towarów; 9) Wymiana towarów; 10) Partnerstwo; 11) Wymiana monet; 12) Rozwiązywanie zadań; 13) Rachunki przybliżone; 14) Pierwiastki kwadratowe i sześcienne; 15) Geometria i algebra. Zachowały się egzemplarze tej książki. Leonardo pisze na s. 2: „Novem figure indorum he sunt 9 8 7 6 5 4 3 2 1. Cum his itaque novem figuris, et cum hoc signo 0, quod arabice zephirum appellatur, scribitur quilibet numerus" (Cyfry indyjskie są 9 8 7 6 5 4 3 2 1. Przy użyciu tych dziewięciu cyfr i znaku 0, który Arabowie nazywają *zephirum*, zapisuje się każdą liczbę). Wyraz „zephirum, zephyr" pochodzący z arabskiego *as-sifr*, i z sanskrytu *sunya* (pusty), dał początek angielskim *zero* oraz *cipher*. To tłumaczenie: albo „zero", albo „cyfra", pokazuje wagę, jaką zero miało w zrozumieniu i przyjmowaniu systemu pozycyjnego w zachodniej Europie.

Drugie wydanie *Liber abaci* (1228) Leonardo dedykował matematykowi znanemu jako Michael Scott (ok. 1175 – ok. 1253), „summe philosophe" (filozofowi nad filozofami), któremu zawdzięczał wiele nauk. Leonardo napisał też podręczniki *Practica geometriae* (1220) i *Liber quadratorum* (1225). Dawały one przepisy obliczeń użyteczne dla mierniczych.

W początku XIII w. powstawały uniwersytety: w Paryżu (1200), Oksfordzie (1214), Cambridge (1231), Padwie (1222), Neapolu (1224). Ich profesorowie, którzy nie wykonywali praktycznych rachunków, zachowywali rzymski system zapisu liczb. Odczuwali pewną niechęć do Fibonacciego, którego książki, przepisywane ręcznie, znajdowały coraz liczniejszych czytelników. Pracownicy banków, kantorów, urzędów podatkowych, kupcy, mierniczy, ci, którzy na co dzień musieli wykonywać rachunki na coraz większych liczbach, chętnie korzystali z pozycyjnego systemu zapisu liczb.

Leonardo wykazywał wybitny talent matematyczny. Zagadnienia, które go zajmowały, pochodziły z problemów napotykanych w praktyce. Pytanie o liczbę potomstwa po n miesiącach jednej pary królików doprowadziło go do rozważania ciągu liczbowego, w którym wyraz następujący po dwóch poprzedzających jest ich sumą: $F_{n+1} = F_n + F_{n-1}$ dla $n \geqslant 2$. Jeśli ponadto $F_1 = F_2 = 1$, to mamy słynny ciąg Fibonacciego. Wyrazy tego ciągu można zapisać za pomocą potęg pierwiastków $x_\pm = (1 \pm \sqrt{5})/2$ równania kwadratowego $x^2 - x - 1 = 0$ w następujący sposób: $F_n = (x_+^n - x_-^n)/\sqrt{5}$. Ponadto $F_n/F_{n+1} \to (\sqrt{5} - 1)/2$ – ta granica jest więc stosunkiem złotego podziału.

Liczby ciągu Fibonacciego napotyka się w przeróżnych dziedzinach matematyki: w teorii liczb, równaniach różniczkowych, rachunku prawdopodobieństwa, statystyce, analizie numerycznej, algebrze liniowej, teorii grup, teorii węzłów. Pojawiają się też w biologii czy w taksonomii, np. jako liczby gałęzi drzew, w chemii organicz-

nej, elektrotechnice (w obliczeniach dla okresowych sieci elektrycznych).

Od 1963 r. na kalifornijskim University of Santa Clara działa The Fibonacci Society. Wydaje ono *The Fibonacci Quarterly*, kwartalnik poświęcony „liczbom całkowitym o ciekawych własnościach". Obecnie jego redaktorem jest prof. Curtis Cooper (Department of Mathematics and Computer Science, Central Missouri State University, Warrensburg, MU 64013-5045, USA).

4. Cyfry arabskie

Alexandre de Villedieu pisał w początkowych wierszach *Carmen de Algorismo* (ok. 1240 r.): „Haec algorismus ars praesens dicitur; in qua Talibus Indorum fruimur bis quinque figuris" (Ów obecny sposób zwie się *algorismus*; używamy w nim dwakroć po pięć cyfr indyjskich). Wpatrzenie się w kształt cyfr systemu dziesiętnego pozwala zauważyć pozostałości systemu piątkowego w podobieństwie kształtu cyfr: 2 i 7, 3 i 8, 4 i 9. Do ustalenia kształtu cyfr przyczyniło się wynalezienie druku za pomocą czcionek Johanna Gutenberga (ok. 1400 – ok. 1468). Estetyczne kształty cyfr arabskich rysował utalentowany grafik w Norymberdze Albrecht Dürer (1471–1528), który interesował się poważnie geometrią oraz napisał pracę na temat fortyfikacji i wykład *Die Proportionslehre* o proporcjach ciała człowieka.

Do rozpowszechnienia systemu pozycyjnego przyczynił się pracowity rachmistrz Adam Riese (ok. 1489 – 1559), księgowy kopalni w górniczym mieście Annaberg. Jego nazwisko pisano także Ries lub Rhys. Propagował on dawny sposób pisania liczby: jednostek w najniższej linii, dziesiątek w wyższej, setek w następnej wyższej, a liczbę piątek, pięćdziesiątek itd. – między liniami. Liczbę na jednym poziomie zapisywał kropkami, których wystarczyły co najwyżej cztery w linii. Taki zapis wydawać się może dziwaczny, lecz podręcznik Riesa *Rechnen auff der Linihen* (sic!), który ukazał się w 1518 r., do 1650 r. miał 37 wydań, a do 1700 r. – co najmniej 108.

W Polsce podręcznik arytmetyki, trzeci z kolei, ale pierwszy w języku polskim, *Algoritmus, to jest nauka liczby, polską rzeczą wydana*, opublikował w 1538 r. Tomasz Kłos. Opisał tam m.in. abakus najczęściej używany w Polsce.

5. System binarny

Zasadniczy przełom w zapisie liczb został zaproponowany w 1697 r., gdy Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) w pracy *Dyadik* opublikował swoją ideę systemu binarnego, czyli dwójkowego. Leibniz zauważył, że każda liczba naturalna może być przedstawiona za pomocą tylko dwóch cyfr: 0 oraz 1. W systemie dwójkowym zapis 10 oznacza 2, zapis 100 – 4, zapis 1000 – 8 itd. Dwójkowy system pozycyjny wymaga ok. trzykrotnego (o czynnik $\log_2 10$) – w porównaniu ze zwykłym dziesiątkowym – zwiększenia liczby pozycji, ale bezcenną jego zaletą jest to, że dwie cyfry można w prosty sposób realizować fizycznie, mechanicznie albo elektronicznie w maszynach cyfrowych. Jeszcze jednak Herman Hollerith (1860–1929) do mechanicznego sterowania rachunkami w swoich maszynach stosował dziurkowane karty z dziesięcioma miejscami w kolumnie dla 10 cyfr systemu dziesiętnego.

Pierwsza elektronowa maszyna cyfrowa Johna von Neumanna (1903–57) wykonująca od 1946 r. zaprogramowane rachunki, Electronic Numerical Integrator and Calculator (ENIAC), miała arytmometry konstruowane na dekatronach (lampach z dziesięcioma katodami głównymi). Dopiero po wynalezieniu tranzystora zaczęto budować komputery oparte na zapisie binarnym liczb. Tak zwany bit (od ang. binary digit) realizowany jest za pomocą klucza elektronicznego: 0, gdy klucz jest otwarty i napięcie nie przekracza pewnej przepisanej wartości, natomiast 1, gdy klucz jest zamknięty i napięcie osiąga tę wartość. Na dysku magnetycznym warstwa magnetyka grubości ok. 20 nm dzieli się na domeny o rozmiarach liniowych ok. 500 nm; przeciwnie skierowane momenty magnetyczne domen pozwalają reprezentować cyfry 0 oraz 1 pamięci. Na ciąg zapisanych danych nakładany jest przebieg prostokątnych sygnałów zegara, którego okres pokrywa jeden bit informacji na obracającym się dysku. Zmiana namagnesowania domeny magnetycznej dysku generuje w cewce głowicy impuls i przenosi informację.

Ciąg 8 bitów, zwany bajtem (B, ang. byte), może reprezentować którykolwiek z 256 symboli kodu używanego w komputerze. Stosowane są wielokrotności: kilobajt (KB, przedrostek K pisany wielką literą) – 1 KB = 2^{10} = 1024 bajtów; me-

gabajt (MB) – 1 MB = 2^{20} = 1 048 576 bajtów, gigabajt (GB) – 1 GB = 2^{30} = 1 073 741 824 bajtów. Natomiast w układzie miar SI przedrostek kilo (k, pisany małą literą) oznacza mnożnik 10^3, mega (M) – 10^6, giga (G) – 10^9, tera (T) – 10^{12}. Warto o tym pamiętać, gdy w opisie komputera podaje się obok siebie pamięć dysku komputera w gigabajtach, np. 20 GB, a częstotliwość sygnału taktującego – w gigahercach, np. 1 GHz.

W celu przechodzenia od systemu binarnego do dziesiętnego bywa w komputerach używany system heksadecymalny, czyli szesnastkowy: po cyfrze 9 następuje pierwsze sześć dużych liter alfabetu łacińskiego; wobec tego w systemie heksadecymalnym zapis 10 oznacza liczbę 16, zapis 100 oznacza liczbę 256 itd. Zapis szesnastkowy liczb zużywa ok. 1,5 razy mniej pozycji niż zapis dziesiętny. Jeśli zapis binarny liczby podzielić poczynając od prawego końca na ciągi po cztery pozycje każdy, to każda czwórka jest zapisem binarnym jednej cyfry heksadecymalnego zapisu tej liczby.

Prof. dr Adam Empacher i dr Paweł Janiszewski przyczynili się do ulepszenia tekstu rozdz. 5 niniejszego artykułu, za co im dziękuję.

WSPOMNIENIA – ROCZNICE

Leonard Sosnowski: twórca warszawskiej szkoły fizyki półprzewodników

Marian Grynberg

Instytut Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Warszawski

Leonard Sosnowski: the founder of the Warsaw school of semiconductor physics

1. Wstęp

Minęło ponad 15 lat od śmierci prof. Leonarda Sosnowskiego. Był to niewątpliwie jeden z najznakomitszych fizyków polskich swojego pokolenia. Żył i działał w niezwykle trudnych czasach i aby go lepiej zrozumieć, potrzebny był pewien dystans czasowy, który pewnie już mamy za sobą. Dystans ten pomaga mi lepiej zrozumieć pewne jego decyzje. Nie potrafię jednak odpowiedzieć na pytanie, jaki był prof. Leonard Sosnowski. Spróbuję odpowiedzieć na pytanie inne: jakim go postrzegałem. Był osobą niezwykle złożoną i mimo najszczerszych chęci nie wiem, czy nie jest to zadanie przekraczające moje możliwości. W tekście tym nie będę pisał o jego osiągnięciach naukowych i jego wkładzie do różnych działów fizyki. Dorobek ten jest bardzo duży i wymaga oddzielnego opracowania. Chciałbym tu zawrzeć pewne swoje osobiste uwagi i przemyślenia dotyczące osoby Leonarda Sosnowskiego. Uważam, że wnioski z tych przemyśleń mogą być dla kogoś przydatne i dlatego tylko zdecydowałem się ten krótki tekst napisać.

2. Lata przedwojenne

Leonard Sosnowski urodził się w 1911 r. w Twerze (Rosja) w rodzinie nauczyciela gimnazjum, Napoleona Sosnowskiego. Jak sam o sobie pisał, już w wieku 8 lat zamieszkał w Warszawie i całe późniejsze życie związał z tym miastem. Ukończył znane warszawskie gimnazjum im. Czackiego i w 1928 r. rozpoczął studia na Uniwersytecie Warszawskim. Studia fizyki ukończył w 1933 r., ale już w roku 1932 (czyli na rok przed ich ukończeniem) został zatrudniony przez prof. Stefana Pieńkowskiego jako asystent na Hożej. Fizyka na Hożej w tym okresie była na bardzo dobrym, europejskim poziomie. Tematyka naukowa uprawiana przez Pieńkowskiego i młodych fizyków grupujących się wokół niego dotyczyła spektroskopii atomowej i cząsteczkowej. Był to okres, kiedy powstawała mechanika kwantowa, pozwalająca opisać świat atomów i cząsteczek. Badania spektroskopowe to niezwykle ważny i burzliwie rozwijający się w tym okresie dział fizyki.

Stefan Pieńkowski był doświadczalnikiem i swoich współpracowników kształcił w tej dziedzinie na bardzo dobrym poziomie. Sosnowski był jego niezwykle cenionym uczniem i bardzo szanowanym współpracownikiem. Jako asystent prof. Pieńkowskiego, Sosnowski pracował przez 4 lata (do 1936 r.). Poziom prac naukowych zespołu Pieńkowskiego był naprawdę bardzo wysoki i ośrodek warszawski w tym okresie był bardzo ceniony w Europie. Kiedyś, pod koniec życia Leonarda Sosnowskiego zadałem mu pytanie, dlaczego w Warszawie w końcu lat 30. nie został zbudowany laser gazowy. Po zapoznaniu się z pracami warszawskimi z tego okresu wydawało mi się, że wszystko, czego potrzeba do zbudowania takiego lasera było już wówczas w Warszawie znane. Pytanie to bardzo zaskoczyło Sosnowskiego i prosił o kilka dni, żeby mógł się nad tym zastanowić. Widziałem, że jest to dla niego trudny i ważki problem. Odpowiedź, którą dostałem po kilku dniach, była niestandardowa i zmuszająca do myślenia. Sosnowski stwierdził, że w grupie prof. Pieńkowskiego pracowali praktycznie tylko doświadczalnicy. Opinia o roli teoretyków była dość chłodna i prof. Pieńkowski niezbyt promował ten rodzaj uprawiania fizyki. Sosnowski zaś niezwykle cenił wkład teoretyków i możliwość wymiany z nimi poglądów. W braku teoretyków, a często ich „zwariowanych pomysłów" dopatrzył się przyczyny tego, że laser wówczas w Warszawie nie powstał.

W drugiej połowie lat 30. intensywnie rozwijana była w dobrych ośrodkach fizyka jądra atomowego. Pieńkowski uznał, że Leonard Sosnowski powinien nią właśnie się zająć. W 1936 r. Sosnowski wyjeżdża więc na 2 lata do Cavendish Laboratory w Cambridge, aby prowadzić prace z dziedziny fizyki jądrowej. Stypendium na pobyt w Anglii uzyskał od Funduszu Kultury Narodowej, zatem był to wyjazd za polskie pieniądze. Może przy tej okazji warto przypomnieć, jak działał Fundusz Kultury Narodowej. Pieniądze były w dyspozycji człowieka cieszącego się zaufaniem władz; był nim Stanisław Michalski, który miał w ośrodkach akademickich swoich plenipotentów. Wskazywali mu oni najzdolniejszych i najbardziej obiecujących młodych naukowców, którym warto było pomóc. Piszę o tym, by podkreślić, że w tym okresie Leonard Sosnowski był uczonym, któremu starsi koledzy z różnych dziedzin nauki chcieli pomóc, bo uważali, że na tę pomoc w pełni zasługuje.

Praca naukowa w Cambridge była niezwykle owocna i Sosnowski wrócił do kraju jako ekspert w dziedzinie badań fizycznych jądra atomowego. Rozpoczął przygotowywanie rozprawy doktorskiej, której obrona zaplanowana była na jesień 1939 r. Wybuch II wojny światowej pokrzyżował te plany. Obrona doktoratu odbyła się dopiero w 1944 r., na tajnym Uniwersytecie Warszawskim, a zatwierdzona została przez władze uczelni w roku 1947.

Na podstawie fragmentów rozmów z Leonardem Sosnowskim o okresie, kiedy zajmował się fizyką jądra atomowego, wydaje mi się, że bywał on zapraszany przez kierownictwo resortu obrony narodowej w przedwojennym rządzie polskim do wygłaszania seminariów na temat fizyki jądrowej i nowych źródeł energii. Nie wiem, czy mówiono tam też o nowych broniach.

3. Lata wojny i tuż po wojnie

Wybuch wojny w 1939 r. przerwał pracę naukową Sosnowskiego. Zakład Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego na Hożej został zamknięty. Sosnowski poświęcił się całkowicie tajnemu nauczaniu na poziomie uniwersyteckim. Prowadził wykłady i w pewnym okresie stał się odpowie-

dzialny za cały proces dydaktyczny w dziedzinie fizyki. Podobnie jak większość jego pokolenia wychowanego w Polsce międzywojennej, związał się z ruchem oporu. Kiedy wybuchło Powstanie Warszawskie, jako żołnierz oddziału im. Kilińskiego uczestniczył w zdobywaniu budynku PAST-y w Warszawie (na rogu Marszałkowskiej i Zielnej), w którym przed wojną mieściła się centrala telefoniczna. Po upadku Powstania znalazł się w obozie jenieckim w Niemczech. Został wyzwolony przez wojska alianckie i dostał się do Anglii, gdzie przebywał do 1947 r. Opowiadając mi o swoim pobycie w Anglii wspominał dość zabawną historię, która w jego ocenie charakteryzuje ówczesną Wielką Brytanię. Prosto z obozu jenieckiego, nosząc jeszcze mundur wojskowy z naszywką POLAND na ramieniu, dotarł do Cambridge, w którym krótko przed wojną pracował jako młody fizyk z Warszawy. Wstąpił do sklepu, w którym za czasów swojej przedwojennej bytności kupował papierosy. Sprzedawca, ciągle ten sam, kiedy tylko go zobaczył w uniformie polskich wojsk, o nic nie wypytując rzucił, jakby nic się nie zmieniło od poprzedniego pobytu: — „Navy cut", as always. — „Navy cut" to marka papierosów, które kupował tam przed 7 czy 8 laty.

W czasie tego powojennego pobytu w Anglii Sosnowski pracował w Laboratorium Admiralicji. Zajmował się tam zupełnie innymi problemami fizycznymi, które bardzo luźno wiązały się z jego poprzednimi specjalnościami – fizyką atomową i fizyką jądrową. Zainteresował się fizyką półprzewodników, której pozostał wierny do końca życia. W Laboratorium Admiralicji zajmowano się m.in. detektorami promieniowania bliskiej podczerwieni, opartymi na warstwach PbS. Jest to półprzewodnik, który w okresie przedwojennym zrobił ogromną karierę. Radia kryształkowe, których w 1939 r. było w Polsce kilka milionów, wykorzystywały własności prostownicze styku PbS z metalowym ostrzem. Prace nad detekcją bliskiej podczerwieni przez warstwy PbS prawdopodobnie zainspirowane były możliwością łączności między okrętami floty bez użycia radia i sygnalizacji optycznej, które narażone są na podsłuchy. Prace wykonane wspólnie z Jerzym Starkiewiczem wprowadziły Sosnowskiego w fizykę ciała stałego, a zwłaszcza fizykę półprzewodników. Z tego okresu pochodzi jego bardzo ważna krótka publikacja, dotycząca mechanizmów fizycznych występujących w złączu p–n. Praca ta zawiera wszystkie podstawowe elementy, przypisywane Schottky'emu jako temu, który podał interpretację fizyczną zjawisk zachodzących w złączu p–n. Już wówczas nie ulegało dla fizyków wątpliwości, że ich zrozumienie jest fundamentalne dla dalszych prac. Krótko potem został skonstruowany tranzystor, który nie jest niczym innym jak układem dwóch złącz p–n. Jego własności nie sposób zrozumieć bez właściwego zrozumienia działania pojedynczego złącza.

W roku 1947 Sosnowski powrócił do kraju. Rozpoczął pracę w Zakładzie Fizyki na Hożej. Zatwierdzono mu rozprawę doktorską obronioną w czasie wojny. Na Hożej kierował zespołem, który kontynuował prace rozpoczęte w Laboratorium Admiralicji. Zespół ten skupiony był w Katedrze Radiologii i Elektroniki (KRiE). Wydaje mi się, że był to punkt zwrotny w działalności Leonarda Sosnowskiego jako polskiego fizyka. Próbuję sobie wyobrazić, co myślał, kiedy w 1947 r. wrócił z bardzo dobrego, wspaniale wyposażonego Laboratorium Admiralicji w Anglii i rozpoczął pracę w Warszawie. Niezbyt liczne środowisko fizyków polskich było po wojnie zdziesiątkowane. Laboratoria nie istniały, kraj był zniszczony i trudno sobie było wówczas wyobrazić, kiedy sytuacja wróci do normy. Trzeba było ogromnej wyobraźni i siły woli, aby po powrocie z tego wspaniałego laboratorium powiedzieć sobie: „Tu zostaję i tu będę tworzyć laboratorium". Wydaje mi się, że pewne późniejsze poczynania Sosnowskiego, abstrahując od jego cech charakteru, łatwiej zrozumieć, jeśli się sobie wyobrazi jego „zderzenie" z krajem w roku 1947. Mam wrażenie, że 15-letni okres po jego śmierci pomógł mi lepiej pojąć, co mógł on wtedy czuć. Pozwala to z większym zrozumieniem spojrzeć na pewne jego poczynania, które nie do końca były dla mnie wcześniej jasne.

4. Początki fizyki półprzewodników w Warszawie

Na Hożej Sosnowski rozpoczął w KRiE tworzenie grupy naukowej, która zajęła się tematyką przeniesioną z Anglii. Pojawili się pierwsi magistranci i doktoranci. Mimo bardzo trudnych warunków fizyka na Hożej rozwijała się. Nieco później, w roku 1953, powstał Instytut Fizyki Polskiej

Akademii Nauk. Instytut ten tworzony był jeszcze przez prof. Pieńkowskiego, ale choroba uniemożliwiła mu kierowanie nim. Tematyka naukowa uprawiana w IF PAN po jego skrystalizowaniu się i okrzepnięciu obejmowała fizykę materii skondensowanej i optykę atomową. Fizyka jądrowa i fizyka wysokich energii znalazła się w nowo utworzonym Instytucie Badań Jądrowych.

Po śmierci Pieńkowskiego w 1953 r. Leonard Sosnowski początkowo pełni obowiązki dyrektora, a następnie zostaje dyrektorem IF PAN i przez wiele lat tworzy jego strukturę oraz kształci dlań kadrę; tworzący się Instytut nie miał własnej kadry naukowej. Od samego początku oparł się Sosnowski na kadrze z Uczelni. Część osób pracowała i na Uniwersytecie, i w IF PAN na Hożej, część przeszła całkowicie do IF PAN. Pojawili się również fizycy spoza Hożej. Laboratoria IF PAN mieściły się początkowo na Hożej i w części budynku PAST-y na rogu Zielnej i Marszałkowskiej. Wydaje się, że wybór PAST-y nie był przypadkowy – to ten budynek w czasie Powstania Warszawskiego zdobywał oddział, w którym służył Sosnowski.

W okresie tworzenia Instytutu Fizyki prof. Sosnowski bardzo aktywnie uczestniczył w życiu politycznym PAN-u. Zaangażował się bez reszty w tworzenie w Polsce podwalin fizyki półprzewodników. Zdawał sobie doskonale sprawę, że nie można prowadzić poważnych badań, nie posiadając zaplecza technologicznego, które wytwarzałoby materiały będące obiektem badań fizycznych. Wówczas to powstały ważne laboratoria wytwarzające kryształy krzemu, a potem kryształy boru, i laboratorium wytwarzające półprzewodnikowe związki intermetaliczne, początkowo III i V, a następnie II i VI grupy układu okresowego. Sosnowski bez reszty poświęcił się tworzeniu grup badawczych. Ci, którzy znali go bliżej, nawet jeśli – tak jak ja – poznali go znacznie później, wiedzą, że był on niebywałym erudytą fizycznym. Rozumiał co znaczącego dzieje się w fizyce atomowej, w fizyce jądrowej i oczywiście w fizyce materii skondensowanej. Mogliśmy się o tym stale przekonywać, uczestnicząc razem z nim w seminariach czy konwersatoriach z fizyki.

Wydaje mi się, że rok 1954 był również bardzo istotnym okresem w życiu Sosnowskiego. Już uprzednio, jak mówili mi starsi koledzy, ubiegał się o przyjęcie do PZPR. W związku z, jak to wówczas określano, „AK-owską przeszłością", odmówiono mu go. Możliwe, że podano inne powody, ale o ile pamiętam ten okres, „argument" przynależności do AK był wystarczający, aby dostać odmowę. Przed objęciem funkcji p.o. dyrektora Instytutu Fizyki PAN został jednak do partii przyjęty. Z perspektywy półwiecza wydaje mi się, że krok ten był głównie motywowany zwiększeniem szans rozwoju fizyki, której był całkowicie poświęcony, bardziej niż motywacjami politycznymi, a w szczególności ambicjami osobistymi.

Czas po nominacji na dyrektora IF PAN to czas tworzenia nowego Instytutu, który powstawał praktycznie od zera. Ogromny wysiłek włożony wówczas procentuje do dziś. IF PAN jest jednym z najlepszych ośrodków fizyki w Polsce. Przez cały czas pracy w nim Leonard Sosnowski nie opuszczał Wydziału Fizyki UW. Utworzona została Katedra Fizyki Ciała Stałego (która powstała z KEiR). Ważny szczególnie dla środowiska inteligenckiego rok 1968 zastał prof. Sosnowskiego jako dziekana Wydz. Fizyki UW. Pozwoliło to nam przetrwać z godnością ten okres nagonki antyinteligenckiej i antysemickiej. Sosnowski niezwykle pomagał poszkodowanym i dbał, aby Wydział z tego trudnego okresu wyszedł jak najmniej pokiereszowany.

Od końca lat 40. aż do śmierci Sosnowski prowadził środowiskowe seminarium fizyki półprzewodników na Hożej. Bez przesady można chyba stwierdzić, że wokół tego seminarium stworzył on warszawską szkołę fizyki półprzewodników. Seminarium to działa do dnia dzisiejszego i skupia co tydzień ok. 70 uczestników z Uniwersytetu, IF PAN, Centrum Wysokich Ciśnień PAN i Politechniki Warszawskiej. Na seminariach widać było jego erudycję fizyka i niezwykłe wyczucie tego, co jest naprawdę ważne, i tego, co można zmierzyć. Niejednokrotnie byliśmy świadkami, jak szybko i trafnie docierał do tego, co stanowiło sedno wystąpienia. Dbał, aby przedstawiane koncepcje były należycie udokumentowane. Nigdy nie dopuszczał, aby wnioski były formułowane bez dostatecznych argumentów doświadczalnych. Szybkość, z jaką potrafił „oddzielać ziarno od plew", była zdumiewająca. Ten sposób komunikowania się między fizykami bardzo silnie odcisnął się na naszej umysłowości i myślę, że również na charakterze seminarium, który ciągle jest podobny.

5. Lata rozwoju kontaktów z zagranicą

Od 1960 r. Sosnowski był członkiem Polskiej Akademii Nauk, a w latach 1981–83 jej wiceprezesem. Przez ponad 20 lat był aktywnym członkiem PAN i jej władz, podejmując w niej rozliczne obowiązki i funkcje. Wraz ze wzrostem wagi naukowej szkoły tworzonej przez Sosnowskiego rósł jego autorytet naukowy w środowisku fizyków i ludzi nauki w Polsce. Wpoił nam zasadę, że każdy młody doktor fizyki, który ma w przyszłości pracować naukowo, powinien odbyć roczny albo dwuletni staż podoktorski w bardzo dobrym ośrodku zagranicznym. Pierwsi koledzy wyjeżdżali do ośrodków brytyjskich, co pewnie było związane z kontaktami naukowymi Sosnowskiego jeszcze z okresu jego pracy przed wojną i tuż po wojnie w Anglii. Później duża grupa wyjeżdżała do bardzo dobrych ośrodków w Stanach Zjednoczonych, a w początku lat 70. rozpoczęły się wyjazdy do ośrodków francuskich. Współpraca z zagranicą była jak na ówczesne czasy bardzo ożywiona i owocna. Sporo wybitnych fizyków ze świata zachodniego odwiedzało Warszawę, wygłaszało seminaria i prowadziło dyskusje naukowe ze współpracownikami Sosnowskiego. Jego pozycja naukowa w świecie fizyki rosła głównie ze względu na walory osobiste, ale także na znaczenie grupy naukowej, którą kierował. W 1972 r. Międzynarodowa Unia Fizyki Czystej i Stosowanej (IUPAP) zaproponowała zorganizowanie w Warszawie wielkiej międzynarodowej konferencji poświęconej fizyce półprzewodników ICPS (na ok. 1000 osób). Leonard Sosnowski przewodniczył komitetowi organizacyjnemu tej konferencji, która okazała się sukcesem.

W latach 1978–81 Sosnowski pełnił funkcję prezesa IUPAP, co jest najwyższą godnością w światowym środowisku fizyków. W 1979 r. został zaproszony do Izraela, gdzie organizowano jedno ze spotkań uświetniających obchody 100-lecia urodzin Alberta Einsteina. Powiedział mi wtedy, że zdecydował się nie jechać, ponieważ organizatorzy planują spędzenie szabasu (piątek wieczór) w rodzinach tubylców. Nie zamierza jechać, bo nie chciałby się znaleźć przypadkowo w rodzinie „polakożerców". Przekonywałem go, że jest to niczym nieuzasadniona obawa i że powinien pojechać. Zapraszających nie powinniśmy przecież traktować jak ludzi nierozsądnych. Po kilku godzinach zadzwonił: — Chyba ma pan rację, pojadę. — Wrócił zachwycony przyjęciem, jakie mu tam zgotowano, i otoczeniem, w którym się znalazł. Piszę o tym po to, żeby wskazać na ważną cechę Leonarda Sosnowskiego. Umiał słuchać i nigdy nie miał przeświadczenia, że ma absolutną rację. Organizacja jednej z kolejnych konferencji ICPS, w roku 1988, została przyznana przez IUPAP Warszawie. Sosnowski podjął się tej pracy, ale śmierć uniemożliwiła mu jej dokończenie. Konferencja z powodzeniem odbyła się w Warszawie, zorganizowana przez jego uczniów i w cieniu jego odejścia.

Na początku lat 80. odbywały się wybory przewodniczącego Rady Naukowej IF PAN. Sosnowski od wielu lat, a może i od początku istnienia Instytutu, był członkiem tej Rady, a w latach siedemdziesiątych – jej przewodniczącym. Tym razem w wyborach został wyłoniony inny przewodniczący. Sosnowski odczuł tę porażkę niezwykle boleśnie. Znacznie rzadziej bywał już odtąd w Instytucie i wyraźnie robił to niezbyt chętnie. Gorycz ta pozostała mu do końca życia.

6. Uwagi końcowe

Patrząc z perspektywy lat na dorobek publikacyjny Profesora nie mam wątpliwości, że jest to dorobek znaczący, choć liczbowo znacznie mniejszy niż innych uczonych, którzy kierowali podobnymi albo nawet mniejszymi zespołami naukowymi. Wydaje mi się, że związane jest to z dwoma elementami jego zasad publikowania. Pierwsza, najważniejsza, to niedopisywanie swojego nazwiska do prac, w których powstaniu nie uczestniczył bardzo aktywnie. Jest to niezwykle istotna zasada, która przez uczniów Profesora jest nadal realizowana. Druga to stawianie pytania, czy osiągnięty rezultat wart jest opublikowania. Postawienie takiego pytania i udzielenie krytycznej odpowiedzi chroni przez zalewem mało znaczących, często przyczynkarskich prac. Duch Leonarda Sosnowskiego żyje w warszawskim (a pewnie nie tylko) środowisku fizyki półprzewodników. Oprócz jego prac i wyników naukowych przetrwał jego sposób patrzenia na fizykę: bardzo głęboki, krytyczny i – dzięki jego wielkiej erudycji fizycznej – całościowy. Wpoił nam spojrzenie ogólniejsze niż tylko przez pryzmat półprzewodników. Pokazał, na czym polega szkoła naukowa, jak w niej

ważna jest młodzież i troska o nią, jak istotne są otwarte dyskusje. Przekonał nas, że nie ma polskiej fizyki, a jest tylko fizyka w Polsce, i współzawodniczyć musimy z tym, co się dzieje w całej fizyce, a nie w sąsiednich laboratoriach. Część naszych młodych współpracowników, którzy nie mieli przyjemności znać osobiście Leonarda Sosnowskiego, tylko o nim słyszała. Część nigdy się z tym nazwiskiem nie zetknęła. Głównie z myślą o nich napisałem to, co pozostało mi z długoletnich z nim kontaktów. Piszę nie o tym, jakim był, ale jakim go postrzegałem. Był niewątpliwie wybitnym fizykiem, a dziedzictwo, które po sobie pozostawił, najlepiej o tym świadczy.

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

Planck '02

W dniach 25–29 maja 2002 r. w Kazimierzu Dolnym odbyła się V Europejska Konferencja „Od skali Plancka do skali elektrosłabej" pod tytułem „Supersymetria i światy bran". Konferencje z tego cyklu są organizowane wspólnie przez grupy teorii cząstek elementarnych z Bonn, CERN-u, Ecole Polytechnique, ICTP, Madrytu, Oksfordu, Padwy, Pizy, SISSA i Warszawy i stanowią obecnie ważną część działalności europejskich sieci naukowych HPRN-CT-2000-00148 (Fizyka poza obecnie dostępnymi energiami: badanie pochodzenia masy) i 00152 (Supersymetria i wczesny Wszechświat). Poprzednie konferencje odbyły się w Kazimierzu Dolnym (1998), Bad Honnef (1999), Castelvecchio Pascoli (2000) i La Londe les Maures (2001). W obecnej konferencji, zorganizowanej przez Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego i Polską Akademię Umiejętności, wzięło udział 93 fizyków, w tym 63 osoby z zagranicy (z Austrii, Belgii, CERN-u, Francji, Grecji, Hiszpanii, Indii, Izraela, Japonii, Niemiec, Słowenii, Szwajcarii, USA, W. Brytanii i Włoch). Przedstawiono 49 referatów na sesjach plenarnych i 18 na sesjach równoległych, w tym 10 referatów wygłosili uczestnicy polscy. W czasie konferencji jeden dzień był dedykowany prof. Stefanowi Pokorskiemu z okazji 60. rocznicy jego urodzin. Referaty przedstawione w tym dniu zostaną opublikowane we wrześniowym numerze *Acta Physica Polonica B*, dedykowanym Jubilatowi.

Program naukowy konferencji poświęcony był przede wszystkim fizyce poza Modelem Standardowym i zawierał przegląd najnowszych wyników i postępu w poszukiwaniu teorii głębszej od Modelu Standardowego. Tematyka ta dominuje w badaniach prowadzonych w ramach V Programu Ramowego Unii Europejskiej. Dominuje ona również w badaniach grupy warszawskiej. Podstawowe wątki konferencji to przede wszystkim fizyka zapachu jako laboratorium poszukiwania rozszerzenia Modelu Standardowego i koncepcja istnienia dodatkowych wymiarów lub ich dekonstrukcji.

Nowe wyniki związane z fizyką zapachu to przede wszystkim fizyka mezonów B (w szczególności niezachowanie CP) oraz problemy masy i mieszania neutrin. Referaty plenarne i równoległe dały szczegółowy przegląd obecnej sytuacji doświadczalnej i nowych wyników teoretycznych. Rzadkie procesy z udziałem mezonów B (np. oscylacje B–$\bar{B}$, rozpady z niezachowaniem CP) dostarczają bardzo silnych ograniczeń na modele supersymetryczne i, co ciekawsze, mogą przy zwiększonej czułości doświadczalnej dać pierwszy sygnał o istnieniu supersymetrii w przyrodzie. Wszystko wskazuje na to, że istnienie niezerowych mas i mieszania neutrin jest pierwszą wyraźną wskazówką doświadczalną przemawiającą za istnieniem nowej fizyki. Faktem bardzo interesującym jest to, że masy i mieszanie w sektorze neutrin są wyraźnie inne niż w sektorze kwarków. Nowe wyniki z SNO (Obserwatorium Neutrinowego w Sudbury, Kanada) dają kolejną wskazówkę, że istniejące dane można wyjaśnić przez mieszanie trzech znanych neutrin (bez potrzeby wprowadzania neutrin sterylnych). Sprawdzenia wymaga jednak wynik z LSND (detektora neutrinowego z ciekłym scyntylatorem w Los Alamos), który jako jedyny nie pasuje do tego schematu (wkrótce powinny pojawić się wyniki z nowego eksperymentu MiniBooNE, przeprowadzonego w Laboratorium Fermiego w Batavii). Struktura mas i mieszania neutrin daje się wyjaśnić za pomocą mechanizmu huśtawki i warto podkreślić, że tylko niewielka liczba zaproponowanych modeli jest w pełni spójna i stabilna po uwzględnieniu poprawek kwantowych.

Istnienie więcej niż trzech wymiarów przestrzennych jest koncepcją fizyczną, której początki sięgają prac T. Kaluzy i O. Kleina poświęconych próbie unifikacji grawitacji i elektromagnetyzmu. Opiera się na niej także współczesna teoria strun, choć trzeba podkreślić, że w swej oryginalnej wersji teoria ta korzystała z „bardzo małych" dodatkowych wymiarów (rzędu długości Plancka). Od paru lat prowadzone są jednak intensywne badania nad możliwością istnienia „dużych" dodatkowych wymiarów (nawet rzędu setnych części milimetra), które dawałyby efekty wykrywalne w doświadczeniach grawitacyjnych sprawdzających prawo Newtona lub w doświadczeniach akceleratorowych, w których produkowałyby się nowe cząstki odpowiadające wzbudzeniom Kaluzy–Kleina. Koncepcja „dużych" dodatkowych

wymiarów jest bardzo intrygująca (żadne obecne dane doświadczalne jej nie wykluczają) i daje kilka istotnych korzyści przy rozwiązywaniu takich problemów teoretycznych, jak naruszenie supersymetrii czy sformułowanie teorii Wielkiej Unifikacji zgodnej z faktem, że wciąż nie zaobserwowano rozpadu protonu. Wiele referatów na konferencji poświęconych było tym zagadnieniom, zarówno w ramach teorii strun jak i na poziomie efektywnej teorii pola w czasoprzestrzeni o $4+n$ wymiarach. Istotnie nowym elementem teorii z „dużymi" wymiarami jest możliwość istnienia podprzestrzeni, tzw. bran, na których mogłaby być zlokalizowana część widzialna Wszechświata.

Duża część referatów poświęcona była idei dekonstrukcji dodatkowych wymiarów. Niedawno zauważono, że te same korzyści teoretyczne, które płyną z istnienia pól cechowania w dodatkowych wymiarach, można mieć w teoriach 4-wymiarowych, ale z rozbudowaną symetrią cechowania. Unika się w ten sposób dość zasadniczych trudności pojawiających się przy próbach sformułowania spójnej kwantowej teorii pola w więcej niż czterech wymiarach. Idea dekonstrukcji pozwala na nowe podejście do wielu zagadnień związanych z próbą rozszerzenia Modelu Standardowego.

Istotnym uzupełnieniem konferencji była problematyka kosmologiczna. Nowe pomiary wskazują na istnienie niezerowej, dodatniej stałej kosmologicznej Λ. Jest to jeszcze większe wyzwanie dla teorii niż przypadek $\Lambda = 0$ i warto podkreślić, że wynik ten nie był przez nikogo przewidywany. Druga istotna sprawa dotyczy istnienia ciemnej materii – nowe analizy wskazują, że jest jej nieco mniej, co prowadzi do nowych ograniczeń na modele supersymetryczne.

Zygmunt Ajduk
Instytut Fizyki Teoretycznej UW
Warszawa

RECENZJE

Chemia fizyczna

Peter W. Atkins: *Chemia fizyczna*, z jęz. angielskiego tłumaczyli D. Jamróz, A. Kotarba, Z. Sojka, J. Kowal i J. Najbar, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001, s. 937.

Peter W. Atkins, C.A. Trapp, M.P. Cady i C. Giunta: *Chemia fizyczna. Zbiór zadań z rozwiązaniami*, z jęz. angielskiego tłumaczyli K. Pigoń, D. Jamróz, A. Kotarba, J. Kowal, J. Najbar i Z. Sojka, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001, s. 790.

Chemia fizyczna często wyzwala wśród studentów skrajne emocje. Niektórzy widzą w niej ekscytujące pole styku tradycyjnych dziedzin nauki, miejsce magiczne, podobnie jak obszar spotkania chemii z biologią lub astronomii z fizyką, inni zaś – wyłącznie monumentalnie rozdętą „piłę", tyleż nudną co trudną do zaliczenia. Jedni i drudzy zawsze jednak mieli coś wspólnego – łączyła ich potrzeba korzystania z książki dającej holistyczne wprowadzenie do przedmiotu. Alternatywnym rozwiązaniem mogło być korzystanie z oddzielnych, hermetycznych traktatów o chemicznej termodynamice lub kinetyce, teorii kwantów, spektroskopii, fotochemii, elektrochemii, krystalografii...

Lukę na polskim rynku księgarskim wypełnił kiedyś podręcznik *Chemia fizyczna* (praca zbiorowa, PWN, 1963), znany licznym rzeszom chemików pod wdzięczną nazwą „Cegła" . Niektórzy jeszcze dziś cenią sobie „Cegłę", podobnie jak późniejsze *Chemie fizyczne*, spośród których, zdaniem autora tej recenzji, wymienić warto zwłaszcza dzieło wrocławskich profesorów K. Pigonia i Z. Ruziewicza oraz tłumaczenia książek G.M. Barrowa i R. Brdički.

A jednak już od kilkunastu lat co ambitniejsi polscy studenci pospołu z doktorantami i „zawodowcami" za najważniejszy podręcznik fizykochemiczny uznają książkę obcojęzyczną – *Chemię fizyczną* napisaną przez Petera W. Atkinsa (I wydanie w 1978 r.), profesora Uniwersytetu w Oksfordzie, specjalizującego się dawniej w magnetycznych właściwościach cząsteczek. Niektórzy rujnowali się, by mieć ją na własność, a w bibliotekach „Atkinsy" szybko zaczęły przewyższać stopniem zużycia wysłużone „Cegły". Pod koniec lat 90. ukazały się tłumaczenia dwóch innych książek tego autora: poradnik encyklopedyczny *Przewodnik po chemii fizycznej* (PWN, 1997) oraz zwięzły wykład *Podstawy chemii fizycznej* (PWN, 1999), adresowany zwłaszcza do przyrodników. Pozycje te zaostrzyły jedynie apetyt na polską wersję głównego dzieła Atkinsa, którego popularność przekroczyła granice państw anglojęzycznych (tam stało się ono na studiach chemicznych nieformalnym kanonem) i już w latach 80. zaowocowała licznymi przekładami.

Układ treści podręcznika nie odbiega od tradycyjnego schematu. Uwagę przykuwa wyróżnienie trzech głównych części i ich eleganckie tytuły: *Równowaga*, *Struktura*, *Przemiana*. Pierwsza traktuje o termodynamice chemicznej i dotyczy makroskopowych właściwości materii. Część druga, moim zdaniem napisana najlepiej, zajmuje się atomami i cząsteczkami widzianymi z perspektywy mikroskopowej, obejmuje więc m.in. wprowadzenie do chemii kwantowej, spektroskopii i krystalografii. Jest tu też termodynamika statystyczna, a więc przejście od mikro- do makroświata. Wreszcie ostatnia część, poświęcona kinetyce chemicznej, zawiera również opis problemów specyficznych dla powierzchni międzyfazowych, zwłaszcza katalizy i procesów elektrodowych.

Atkins, którego kompetencje w nauczaniu chemii fizycznej trudno kwestionować – wykładał nie tylko w Oksfordzie, lecz także w USA, Izraelu, Francji, Japonii, Chinach i Nowej Zelandii – uzyskał w swym dziele stan bliski równowagi między wymogami obszerności i zwięzłości. Książka ogarnia znakomitą większość zagadnień zwyczajowo należących do chemii fizycznej i wnika w nie zazwyczaj wystarczająco głęboko, aby stanowić wprowadzenie do lektur specjalistycznych, choćby tych, które sugerowane są pod koniec każdego rozdziału. Z powodzeniem może więc spełniać rolę leksykonu, po który sięgamy, aby odświeżyć niegdyś nabytą wiedzę (funkcję tę wspomagają dość obszerne tablice danych fizykochemicznych i dobrze przygotowany skorowidz). Przede wszystkim jest to jednak podręcznik akademicki, w którym przedstawiono przystępny, a zarazem spójny i konsekwentny wykład chemii fizycznej. Szerokie marginesy posłużyły do zamieszczenia ok. tysiąca przejrzystych, dwukolorowych ilustracji. Uzasadnienia twierdzeń i wzorów umieszczono w wyróżnionych fragmentach tekstu. Wiele rozdziałów zawiera przykłady rozwiązywania problemów fizykochemicznych (natomiast prawie wszystkie ćwiczenia i zadania polski wydawca przeniósł do oddzielnego zbioru, o czym dalej). Każdą z trzech części zamykają stosunkowo obszerne zagadnienia do samodzielnej analizy lub rozwiązania, tzw. Mikroprojekty, autorstwa M. Cady'ego i C.A. Trappa.

Chemia fizyczna to dyscyplina obfitująca w powstające lub dynamicznie rozwijające się działy, choćby takie jak ultraszybka (femtosekundowa) spektroskopia, skaningowa mikroskopia tunelowa bądź kinetyka reakcji złożonych. Sukces podręcznika Atkinsa wynika w znacznej mierze z częstej aktualizacji – Autor co kilka lat opracowuje nowe wersje, w których doskonali również przejrzystość wykładu. Niniejsza recenzja dotyczy tłumaczenia wydania szóstego z 1998 r. Książka nadąża zresztą za upływem czasu również od strony technicznej – dołączona płyta CD-ROM zawiera, w kilku formatach graficznych, wielobarwne cyfrowe wersje większości ilustracji (niestety, nie wszystkich), które mogą pomagać w prowadzeniu zajęć akademickich.

Przekład, dokonany przez pracowników Wydziału Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego pod redakcją naukową prof. Jana Najbara, wiernie oddaje jasny język oryginału i dobrze sobie radzi z problemami polskiego słownictwa chemicznego. W przetłumaczonym tekście pojawiają się także przypisy wzbogacające i uściślające tekst oryginalny. Wydawnictwo zadbało o uważną korektę; dostrzeżone przeze mnie potknięcia językowe oraz literówki nie są liczne i nie utrudniają w zauważalny sposób lektury. Twarda oprawa czyni z tej starannie wydanej książki podręcznik na lata. Szkoda tylko, że redaktorzy Wydawnictwa PWN nie zadbali, aby – wzorem wydawnictw zachodnich – zaproponować czytelnikom również wersję w miękkich okładkach. Wysoka cena może wielu potencjalnych nabywców skierować z powrotem do bibliotek.

Równolegle z tym tłumaczeniem ukazała się książka *Chemia fizyczna. Zbiór zadań z rozwiązaniami* Atkinsa i trzech współautorów. Angielski oryginał (*Student's Solutions Manual for Physical Chemistry, 6th edition*) zawiera rozwiązania i odpowiedzi do licznych zadań umieszczonych na końcu poszczególnych rozdziałów podręcznika *Physical Chemistry*. Wydawnictwo PWN zgrupowało zadania i rozwiązania razem, dając studentom wartościowy zbiór, z którego można korzystać niezależnie od głównego podręcznika. Zadania mają bardzo zróżnicowany poziom, od najprostszych *Ćwiczeń* polegających z reguły na prostym podstawianiu danych do standardowego wzoru, po ciekawe *Problemy dodatkowe*, ubarwione odnośnikami literaturowymi, których rozwikłanie daje posmak prawdziwej pracy naukowej. Polski student będzie ponadto korzystać ze skrupulatności prof. Krzysztofa Pigonia, który przed przetłumaczeniem rozwiązań dokonał ich sprawdzenia i skorygował liczne błędy.

Pozostaje mi gorąco polecić obie recenzowane książki. Inna sprawa, że w przypadku dzieł „klasycznych", których sława o długie lata wyprzedza pojawienie się polskiego przekładu, rekomendacja jest właściwie zbędna. Oczywiście, świat – również świat wydawniczy – nie stoi w miejscu. Atkins napisał już siódmą wersję *Physical Chemistry* (Oxford University Press, 2001), a ponadto, co nawet ważniejsze, pojawiają się inicjatywy, które z czasem mogą zagrozić prymatowi tego podręcznika. Myślę zwłaszcza o autorach *Physical Chemistry. A Molecular Approach* (Donald A. McQuarrie i John D. Simon, University Science Books, Sausalito 1998), którzy pokazali, że możliwa i dydaktycznie uzasadniona jest zupełnie odmienna organizacja wykładu chemii fizycznej. Ale to już temat na inną recenzję.

Robert Kołos
Instytut Chemii Fizycznej PAN
Warszawa

Teoria pól kwantowych – Supersymetria

Steven Weinberg: *Teoria pól kwantowych – Supersymetria*, z jęz. angielskiego tłum. Piotr Chankowski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001, s. 458.

Supersymetrie zostały wprowadzone z dużym impetem do fizyki teoretycznej w połowie lat siedemdziesiątych XX w. (znaczny udział w tym wprowadzeniu miał polski fizyk z Wrocławia, Jan Łopuszański). Zakładając, że podstawy teorii oddziaływań fundamentalnych można opisać geometrycznie, supersymetrie wypełniły lukę, wprowadzając interpretację geometryczną fermionowych stopni swobody. W supersymetrii obok standardowych przemiennych liczb na równoważnym poziomie wprowadza się tzw. liczby antyprzemienne opisane algebrą Grassmanna.

Formalizm supersymetrii jest opisywany na dwa różne sposoby – przez wprowadzenie multipletów supersymetrycznych pól w przestrzeni Minkowskiego oraz przez zapis teorii za pomocą superpól. Superpola to pola zadane na superprzestrzeni, ze standardowymi współrzędnymi czasoprzestrzeni rozszerzonymi o współrzędne an-

typrzemienne. Nieraz opis za pomocą multipletów supersymetrycznych nazywamy konwencjonalnym, natomiast geometryczna struktura teorii supersymetrycznych jest przedstawiana w zapisie superpolowym. W szczególności uogólnienie koncepcji geometrycznych Einsteina, które prowadzą do teorii supergrawitacji, zostały podane przez uogólnienie formalizmu geometrii różniczkowej na zakrzywione superprzestrzenie. Należy tutaj dodać, że na język polski dotychczas nie zostały przetłumaczone książki opisujące formalizm supergrawitacji w języku superprzestrzeni (najważniejsze to: J. Bagger i J. Wess, *Supersymmetry and Supergravity*, Princeton Univ. Press, 1983, oraz S.J. Gates, M. Grisaru, M. Rocek i W. Siegel, *Superspace – One Thousand and One Lesson in Supersymmetry*, Benjamin/Lummings, 1983).

W recenzowanej monografii Steven Weinberg korzysta tak z podejścia konwencjonalnego (opartego na polach w przestrzeni Minkowskiego) jak i formalizmu superpolowego, z tym że opis superpolowy jest w zasadzie ograniczony do supersymetrii globalnych. Celem książki jest jak najpełniejsze przedstawienie zagadnień supersymetrii w kontekście podstawowego fizycznego problemu teorii cząstek elementarnych: jak opisać bardzo szeroki obszar energii pomiędzy 300 GeV (elektrosłaba skala energetyczna) oraz 10^{19} GeV (skala Plancka, charakteryzująca kwantową grawitację). W tym obszernym przedziale energii są ukryte mechanizmy unifikacji fundamentalnych oddziaływań. Supersymetria jako w zasadzie jedyny uniwersalny sposób unifikowania symetrii czasoprzestrzennych i tzw. symetrii wewnętrznych jest najbardziej prawdopodobnym kandydatem do opisu zunifikowanej teorii.

Wykład Weinberga o supersymetrii jest napisany w stylu charakterystycznym dla Autora – laureata Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki – w którym wprowadzenie pojęć matematycznych jest umotywowane fizycznie, analiza formalna uproszczona, lecz zawsze w ramach ścisłości matematycznej, z podaniem odnośników do literatury naukowej z najnowszymi wynikami badań (książka ukazała się w USA w 2000 r., a wiele cytowań w spisie literatury pochodzi z roku 1999). Pragmatyczny cel supersymetrii – zastosowanie do nowych scenariuszy opisu teorii oddziaływań fundamentalnych rozszerzających model standardowy – jest specjalnie uwzględniony w książce w 70-stronicowym rozdziale „Supersymetryczna wersja modelu standardowego". Ostatnio badane fundamentalne teorie supersymetryczne w wymiarach D różnych od czterech (w szczególności $D = 11$) są natomiast reprezentowane dość skromnie – dotyczy ich jedynie ostatni rozdział książki i dodatek, razem 25 stron. Należy jednak podkreślić, że wszelkie zastosowania supersymetrii do fizyki są związane z opisem mierzalnych efektów w czterech wymiarach. „Czterowymiarowy" charakter wykładu Weinberga w mniejszym stopniu jest adresowany do fizyków teoretyków badających nowe koncepcje w teorii oddziaływań fundamentalnych (M-teoria, teorie supersymetryczne typu Kaluzy–Kleina lub Randalla–Sundrum dla $D > 4$, teoria super-p-bran itd.), jest to natomiast konieczna lektura dla studentów kursu magisterskiego oraz doktorantów zajmujących się współczesną teorią cząstek elementarnych i problemami unifikacji oddziaływań w teorii cząstek elementarnych.

Należy podkreślić, że chociaż technika supersymetrii stanowi już dobrze ugruntowaną metodę badań w teorii oddziaływań fundamentalnych, do której spory wkład wnieśli także fizycy polscy (np. grupa Stefana Pokorskiego z Warszawy), występowanie supersymetrii w fizyce cząstek elementarnych nie zostało do chwili obecnej potwierdzone jednoznacznie przez doświadczenie. Co więcej – istnieje grupa poważnych fizyków teoretyków negujących ich znaczenie w fizyce teoretycznej (mam np. w swoich papierach kartkę z podpisem jednego z członków rzeczywistych PAN-u na której stwierdził: „Supersymmetry is a trash", co w wolnym tłumaczeniu oznacza „supersymetrie nadają się na śmietnik"). W tym kontekście zacytowałbym jednak tutaj zdanie niedawno zmarłego wybitnego fizyka teoretyka moskiewskiego, E.S. Fradkina, że „matematyka jest mądrzejsza od człowieka". Moim zdaniem naturalność matematycznego rozszerzenia algebr symetrii Liego do algebr supersymetrii oraz powszechne występowanie fermionów w przyrodzie pozwala przypuszczać, że potwierdzenie supersymetrii przez doświadczenie jako symetrii być może bardziej fundamentalnej niżeli dotychczas obserwowane to tylko kwestia niezbyt odległego czasu.

Jerzy Lukierski
Instytut Fizyki Teoretycznej UWr
Wrocław

Piękno Wszechświata

Brian Greene: *Piękno Wszechświata: Superstruny, ukryte wymiary i poszukiwania teorii ostatecznej*, tłumaczenie Ewa L. Łokas i Bogumił Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001, s. 432.

Brian Greene jest wybitnym przedstawicielem „średniego" pokolenia teoretyków strun. Po obronie doktoratu w Oxfordzie w 1987 r. pracował na Uniwersytecie Harvarda i na Uniwersytecie Cornella. W chwili obecnej jest profesorem fizyki i matematyki na Uniwersytecie Columbia w Nowym Jorku. Jest znany nie tylko z prac z zakresu teorii strun, ale także z wykładów na szkołach i konferencjach. Jest chyba jedynym wykładowcą, który używa wielowarstwowych przezroczy pokazywanych jednocześnie na dwóch rzutnikach. To jednak, czym fascynuje słuchaczy najbardziej, to niespotykane poczucie struktury wywodu i jego precyzja osiągana bez pomocy skomplikowanego aparatu matematycznego. Każde przezrocze trafia idealnie na swoje miejsce, wykład kończy się w zaplanowanym czasie z dokładnością co do minuty, a słuchacze mają nieodparte, choć ulotne wrażenie pełnego zrozumienia zawikłanych i trudnych technicznie zagadnień.

Napisanie książki popularnonaukowej o teorii strun jest przedsięwzięciem karkołomnym nawet dla tak znakomitego wykładowcy. Z jednej strony, teoria ta korzysta z zaawansowanego aparatu wielu trudnych działów

współczesnej matematyki. Poruszanie się w takim obszarze bez pomocy formalizmu wymaga ogromnej dyscypliny myślowej i grozi w każdej chwili albo utratą kontaktu z czytelnikiem, albo zbyt daleko idącymi uproszczeniami. Z drugiej strony racją bytu teorii strun jest unifikacja mechaniki kwantowej z ogólną teorią względności. Bez zrozumienia tego problemu trudno docenić propozycję rozwiązania oferowaną przez tę teorię. Trudno też jasno przedstawić rozwiązanie w trakcie jego tworzenia, ciągle jeszcze odległe od ostatecznej postaci. W książce *Piękno Wszechświata* wszystkie te trudności Brian Greene pokonuje po mistrzowsku.

Teoria strun jest przedstawiona jako próba rozwiązania ostatniej z trzech wielkich sprzeczności fizyki XX w. Opowieść Greene'a zaczyna się od opisu pierwszej z nich – sprzeczności między elektrodynamiką Maxwella a mechaniką Newtona. Została ona rozwiązana przez Einsteina w 1905 r. za pomocą szczególnej teorii względności. Jednak rozwiązanie jednej sprzeczności doprowadziło do powstania kolejnej – między szczególną teorią względności a grawitacją Newtona. I tę sprzeczność udało się pokonać Einsteinowi – w dziesięć lat później – w ogólnej teorii względności. Na pełne zrozumienie trzeciego, najistotniejszego dla współczesnej fizyki konfliktu trzeba było czekać dużo dłużej. Przez pierwsze 25 lat XX w. rozwijała się nowa teoria tłumacząca zjawiska w skali mikroskopowej – mechanika kwantowa. W 1925 r. przybrała spójną postać zgodną z mechaniką Newtona. Uzgodnienie jej ze szczególną teorią względności zajęło następne kilkadziesiąt lat i doprowadziło do powstania kwantowej teorii pola i jej szczytowego osiągnięcia – Modelu Standardowego. W latach osiemdziesiątych mechanika kwantowa (rozumiana jako kwantowa teoria pola) osiągnęła dojrzałość ogólnej teorii względności i problem rozwiązania sprzeczności pomiędzy tymi teoriami, często nazywany problemem kwantowej grawitacji, stał się fundamentalnym problemem fizyki teoretycznej.

Wydawać by się mogło, że w literaturze popularnonaukowej wyczerpano już wszystkie pomysły w tak oklepanych tematach jak teoria względności czy mechanika kwantowa. A jednak lektura pierwszych 140 stron książki Greene'a przekonuje, że udało się Autorowi znaleźć nowy sposób na ich przedstawienie. Pod powierzchnią swobodnej i dowcipnej narracji kryje się naukowa precyzja wywodu i wyjątkowa umiejętność oddzielania istoty rzeczy od przesłaniających ją szczegółów. Ten styl utrzymany jest konsekwentnie w dalszych częściach poświęconych kolejnym etapom rozwoju teorii strun.

W ciągu ostatnich 30 lat teoria strun przeżywała swoje wzloty i upadki. Niektóre wzloty były tak wielkie, że zasłużyły sobie na miano „rewolucji strunowych". Jak dotychczas, po każdym okresie spowolnienia badań wywołanym narastającymi trudnościami technicznymi i pojęciowymi, pojawiają się nowe idee otwierające zaskakujące możliwości dalszego rozwoju. Opowieść Briana Greene'a kończy się w 1998 r. Rok wcześniej pojawił się nowy, nie objęty już planem książki, pomysł – hipoteza Maldaceny łącząca supersymetryczne konforemne teorie pola w 4 wymiarach z teorią superstrun w 10 wymiarach. O intensywności badań nad tym kolejnym etapem rozwoju teorii strun świadczy liczba cytowań oryginalnej pracy Maldaceny, która w chwili pisania tej recenzji wynosiła 2146 (!). Według oceny Greene'a, w 1998 r. nad teorią strun pracowało aktywnie ponad tysiąc teoretyków na całym świecie. Wśród nich były i są nadal największe autorytety naukowe o imponującym dorobku w wielu działach fizyki teoretycznej. Teoria ta przyciąga również utalentowanych fizyków młodego pokolenia. W chwili obecnej, trzy lata po angielskim wydaniu książki Greene'a, teoria strun i M-teoria są nadal rozwijane z niesłabnącym entuzjazmem.

W to, że warto zrozumieć teorię względności czy mechanikę kwantową, nie jest być może trudno uwierzyć. Fantastyczna zgodność teorii względności z doświadczeniem i obserwacjami astronomicznymi oraz oszałamiające zastosowania mechaniki kwantowej mówią same za siebie. Czy jednak warto zajmować się trudną i abstrakcyjną teorią, o której sami jej zwolennicy mówią, że jak dotąd nie jest i nieprędko będzie sprawdzalna doświadczalnie? Książka Greene'a mądrze i z entuzjazmem przekonuje czytelnika, że warto. Nie jest to już jednak przesadny i z dzisiejszej perspektywy dość naiwny entuzjazm drugiej połowy lat osiemdziesiątych, kiedy teoretycy strun głosili, że wkrótce odpowiedzą na wszystkie fundamentalne pytania fizyki. Rozwój, który dokonał się w latach dziewięćdziesiątych, przyniósł nowe argumenty na rzecz teorii strun, ale przede wszystkim odsłonił niespotykany dotąd w fizyce poziom złożoności teorii i jej wewnętrznej spójności. Dotychczas poznano zaledwie część tej zdumiewającej struktury. Zrozumienie całości jest wyzwaniem dla fizyki teoretycznej, któremu trudno się oprzeć. Nie tylko dlatego, że problem doświadczalnej weryfikacji teorii strun ciągle czeka na rozwiązanie. Również dlatego, że teoria strun jest nowoczesnym, świetnie wyposażonym laboratorium fizyki teoretycznej. Bez wieloletniej praktyki w tym laboratorium trudno będzie zrozumieć przyszły postęp.

Nie sposób, szczególnie na łamach *Postępów Fizyki*, powstrzymać się przed refleksją nad badaniami nad teorią strun w Polsce. W tematyce tej lub na jej peryferiach pracuje w kraju zaledwie kilka osób. To nie wystarcza, żeby skutecznie przekazywać osiągnięcia tak trudnej i rozległej dziedziny nowym pokoleniom studentów. W konsekwencji nasz dystans do światowej czołówki w jednym z najbardziej ambitnych przedsięwzięć intelektualnych XXI w. nieuchronnie się powiększa. Książka Briana Greene'a, mimo wszystkich swoich niezaprzeczalnych zalet, jest książką popularnonaukową i jej polskie tłumaczenie nie może tego dystansu zmniejszyć. Jako wyważona i kompetentna relacja jednego z czołowych teoretyków strun może jednak pomóc w uświadomieniu sobie rozmiaru tego dystansu i tempa jego narastania.

Piękno Wszechświata Briana Greene'a jest książką wyjątkową w literaturze popularnonaukowej. Można ją śmiało polecić wszystkim czytelnikom – i tym, którzy zajmując się na co dzień fizyką teoretyczną rzadko sięgają po literaturę tego typu, i tym, którzy nie mają fi-

zycznego i matematycznego przygotowania (książka nie zawiera ani jednego wzoru!). Wśród innych książek popularnonaukowych wydanych w Polsce w ostatnich latach i poruszających podobną tematykę warto wymienić następujące pozycje: Steven Weinberg: *Sen o teorii ostatecznej*, Wydawnictwo ALKAZAR, Warszawa 1994; Michio Kaku: *Hiperprzestrzeń (wszechświaty równoległe, pętle czasowe i dziesiąty wymiar)*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1995; A. Guth: *Wszechświat inflacyjny*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000; Lee Smolin: *Trzy drogi do kwantowej grawitacji*, Wydawnictwo CIS, Warszawa 2001.

Na koniec kilka słów o polskim wydaniu książki. Dzięki starannemu i kompetentnemu tłumaczeniu Ewy L. Łokas i Bogumiła Bienioka *Piękno Wszechświata* czyta się bardzo dobrze. Przyjemność lektury psują jedynie nieczytelne reprodukcje oryginalnych ilustracji. W niektórych przypadkach ich niska jakość całkowicie uniemożliwia poprawne odczytanie rysunku.

Zbigniew Jaskólski
Instytut Fizyki UZ
Zielona Góra

Ultradźwięki i ich zastosowania: wyjaśnienie autora

Po przeczytaniu recenzji mojej książki, napisanej przez p. dra Andrzeja Leszczyńskiego (*Postępy Fizyki* **53**, z. 2, 105 (2002)), czuję się w obowiązku zarówno w stosunku do Recenzenta, jak i wielu Czytelników, do których książka już trafiła, aby tą drogą wyrazić ubolewanie, że w książce znalazły się błędy merytoryczne.

Jestem wdzięczny Recenzentowi za ich zauważenie i wyszczególnienie. Większość tych błędów została niestety automatycznie przeniesiona z pierwszego wydania książki (WNT, Warszawa 1993, seria „Fizyka dla przemysłu") do jej nowej, rozszerzonej wersji. Sprawa jest dla mnie jako autora szczególnie przykra, gdyż już w 1994 r. dr A. Leszczyński w swej recenzji pierwszego wydania książki (*Postępy Fizyki* **45**, z. 3, 299 (1994)) błędy te zauważył; w pełni się wtedy zgodziłem z jego uwagami i dokonałem korekty w egzemplarzu osobistym książki. Trudno mi usprawiedliwić oczywiste niedopatrzenie, jakie nastąpiło w fazie przygotowania drugiego wydania książki, kiedy ta korekta powinna być dokonana.

Sporządzenie erraty przez wydawcę obecnie (1,5 roku po wydaniu książki) nie jest już możliwe, ani nie odegrałoby swej roli po rozpowszechnieniu książki. Sądzę, że jedyną możliwością zwrócenia uwagi Czytelników książki, a zarazem czytelników *Postępów Fizyki* jest to wyjaśnienie, w którym chciałbym podkreślić słuszność większości uwag Recenzenta i serdecznie mu za nie podziękować, a Czytelników prosić o dokonanie korekty według wyszczególnienia podanego w jego recenzji.

Będę również wdzięczny Czytelnikom książki za wszelkie inne krytyczne uwagi, jakie zechcieliby mi przekazać.

Antoni Śliwiński
Instytut Fizyki Doświadczalnej UG
Gdańsk

KRONIKA

PTF

Nagrody PTF za rok 2002

Przyznane zostały nagrody PTF za wyróżniające się prace magisterskie. Otrzymali je:

Nagrodę I stopnia im. Arkadiusza Piekary – mgr Agnieszka Płachta za pracę „Medyczne zastosowania promieniowania laserowego w niskoenergetycznej terapii laserowej" wykonaną pod kierunkiem prof. Wojciecha Gawlika (IF UJ);

Nagrodę II stopnia – mgr inż. Michał Zieliński za pracę „Metoda silnego wiązania: wizualizacja nanostruktur i rozkładów gęstości" wykonaną pod kierunkiem prof. Włodzimierza Jaskólskiego (Wydz. Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK);

Nagrodę III stopnia – mgr Justyna Krzaczkowska za pracę „Badanie własności fizycznych kinetyny" wykonaną pod kierunkiem dr hab. Genowefy Ślósarek (Zakł. Biofizyki Molekularnej UAM).

Nagrodę za popularyzację fizyki otrzymał profesor Krzysztof Ernst (IFD UW).

Laureatami nagród dla wyróżniających się nauczycieli zostali:

Nagroda im. Grzegorza Białkowskiego – mgr Stanisław Lipiński (XVI LO w Warszawie) za wieloletnią, twórczą pracę z uzdolnioną młodzieżą odnoszącą sukcesy na forum międzynarodowym;

Nagroda II stopnia – mgr Maria Rut-Marcinkowska (Zespół Szkół Zawodowych nr 5 w Poznaniu) za oryginalne formy pracy pozalekcyjnej i ich popularyzację;

Nagroda III stopnia – mgr Barbara Orchel (XXXI LO im. Romana Ingardena w Krakowie) za niestandardowe metody pracy z uczniami klas humanistycznych.

Wyróżnienia dla nauczycieli otrzymały: mgr Maria Dobkowska (Zespół Szkół nr 101 w Warszawie) oraz

mgr Krystyna Raczkowska-Tomczak (Publiczne Gimnazjum nr 2 im. Władysława Reymonta w Opolu).

Liczba członków PTF i prenumeratorów *PF*

Podajemy stan członkostwa PTF i prenumeraty *Postępów Fizyki* w poszczególnych oddziałach w listopadzie 2002 r. Kolejne trzy pozycje to: liczba członków, liczba prenumeratorów i odsetek prenumeratorów.

Oddział	L. czł.	L. pren.	%
Białystok	35	3	9
Bydgoszcz	24	9	38
Częstochowa	66	14	21
Gdańsk	116	24	21
Gliwice	54	15	28
Katowice	70	17	24
Kielce	87	8	9
Kraków	235	93	40
Lublin	120	36	30
Łódź	100	6	6
Opole	46	23	50
Poznań	136	42	30
Rzeszów	99	20	20
Słupsk	27	4	15
Szczecin	58	21	36
Toruń	103	135	131
Warszawa	439	59	13
Wrocław	177	62	35
Zielona Góra	62	23	37
Razem	2054	612	30

Jeśli któraś z liczb nie jest już aktualna, prosimy odpowiedni Oddział o szybkie poinformowanie Biura Zarządu Głównego PTF i Redakcji *PF*.

Tytuły profesorskie

Tytuł naukowy profesora nauk fizycznych, nadany przez Prezydenta Rzeczpospolitej Polskiej, otrzymała w dniu 30 października 2002 r. Elżbieta Maria Richter-Wąs (UJ); w dniu 20 listopada 2002 r. tytuł otrzymali: Marta Krystyna Kicińska-Habior (UW), Jerzy Kowalski-Glikman (UWr), Wacław Wojciech Urbańczyk (PWr) i Tomasz Ryszard Woliński (PW).

www.prezydent.pl

Nagroda Diraca

Nagrodę Diraca za rok 2002 przyznawaną przez Międzynarodowe Centrum Fizyki Teoretycznej (ICTP) w Trieście otrzymali Alan Guth (MIT), Andrei Linde (Stanford) i Paul Steinhardt (Princeton) za rozwijanie modelu inflacji Wszechświata.

Guth pierwszy zwrócił uwagę, że założenie wykładniczego rozszerzania się Wszechświata może rozwiązać pewne problemy związane z wyjaśnieniem Wielkiego Wybuchu. Trudności modelu inflacyjnego udało się przełamać dzięki wprowadzeniu przez Lindego, Steinhardta i jego studenta Andreasa Albrechta innego ujęcia inflacji. Dalszy rozwój model ten zawdzięcza zwłaszcza Lindemu, który zaproponował inną wersję teorii, uwzględniającą inflację chaotyczną. Guth i Steinhardt wykazali, że prowadziłaby ona do perturbacji gęstości, co mogło wywołać tworzenie się galaktyk i wyjaśniałoby fluktuacje natężenia reliktowego promieniowania kosmicznego.

CERN Courier **42**, nr 8 (2002) *B. W.*

Nagroda Lisy Meitner

W 2002 r. Nagrodę im. Lisy Meitner, przyznawaną przez Europejskie Towarzystwo Fizyczne, otrzymali James Philip Elliot, profesor University of Sussex (Wlk. Brytania), i Francesco Iachello, profesor Yale University (USA), za zastosowania metod teorii grup w fizyce jądra atomowego.

Rozważania symetrii sił jądrowych doprowadziły Elliota m.in. do wyjaśnienia widm lekkich jąder o symetrii SU(3). Dzięki pracom Elliota można było później połączyć w jedną teorię dwa zupełnie odmienne modele struktury jądra: model powłokowy Marii Goeppert-Mayer i Hansa Jensena (Nagroda Nobla 1963) oraz model kolektywny (kropli cieczy), którego twórcami byli Aage Bohr i Ben Mottelson (Nagroda Nobla 1975).

Iachello (wspólnie z A. Arimą z Uniwersytetu Tokijskiego) wprowadził w 1975 r. model oddziałujących bozonów, w którym pary fermionów w jądrach parzysto-parzystych traktuje się jak bozony. Do opisu jąder nieparzystych Iachello wprowadził dodatkowo fermionowy stopień swobody i postulował supersymetrię jąder, co oznacza wspólny opis jąder o różnej parzystości liczb nukleonów.

Europhys. News **33**, nr 5 (2002) *B. W.*

Nagroda Jana Popielawskiego i Piotra Modraka

W roku 2002 już po raz drugi została przyznana przez Instytut Chemii Fizycznej PAN Nagroda im. Jana Popielawskiego i Piotra Modraka, przedwcześnie zmarłych wybitnych fizykochemików. Laureatem został Andrzej Lech Kawczyński w uznaniu wybitnych osiągnięć naukowych w zakresie nieliniowej dynamiki w układach chemicznych.

Dr hab. Andrzej Lech Kawczyński (ur. 1943 r.) jest docentem w IChF PAN. Studiował na Wydziale Chemii UW. Pracę doktorską „Zagadnienie stabilności w układach z polaryzacją stężeniową i w metodzie elektrotermodyfuzyjnej" obronił w 1972 r. w IChF PAN. Zagadnieniom stabilności i szerzej – nieliniowej dynamice w układach chemicznych – pozostał wierny do dziś.

Po doktoracie odbywał staż w Instytucie Fizyki Biologicznej w Puszczinie pod Moskwą – w owym czasie jednym z najważniejszych na świecie ośrodków zajmujących się chemią zjawisk dalekich od równowagi. Rozsze-

rzył wówczas swoje zainteresowanie nieliniową dynamiką na układy reakcja–dyfuzja.

Do najważniejszych osiągnięć Laureata należą wyniki badań nad strukturami czasowo-przestrzennymi powstającymi samorzutnie w układach chemicznych dalekich od równowagi, m.in. dotyczące zastosowania układów reakcja–dyfuzja do zapisu informacji. Jego prace odegrały również pionierską rolę w badaniach nad zjawiskami nieliniowymi w układach elektrochemicznych. Wiele jego prac jest poświęconych roli fluktuacji w układach chemicznych dalekich od równowagi. Jest autorem pierwszej monografii w języku polskim *Reakcje chemiczne – od równowagi przez struktury dyssypatywne do chaosu* (WNT, Warszawa 1990), przedstawiającej problemy chemii zjawisk nieliniowych.

Janusz Lipkowski

Polscy „fellows" brytyjskiego Instytutu Fizyki

Brytyjski Instytut Fizyki (Institute of Physics – IOP) wybrał w tym roku na swoich „fellows" czterech fizyków polskich. Są to: Rajmund Bacewicz (PW), Stanisław Dubiel (AGH), Stanisław Łęgowski (UMK) i Marian Miczek (UŚl).

IOP ma ponad 30 tys. członków, w tym ok. 3 tys. „fellows".

Phys. World **15**, nr 8 (2002) *B. W.*

Kondensat B–E cezu

Cez jest już siódmym pierwiastkiem, który udało się otrzymać w postaci kondensatu Bosego–Einsteina. W 1995 r. uzyskano kondensat B–E rubidu, następne pierwiastki to lit, sód, wodór, hel i potas.

Kondensat cezu wytworzyli fizycy na Uniwersytecie w Innsbrucku, chłodząc gazowy cez do temperatury 45 nK.

Phys. World **15**, nr 11 (2002) *B. W.*

200-lecie urodzin Ignacego Domeyki

Rodzina Domeyków gospodarująca we wsi Kontrym znana była w okolicach Nowogródka od XVII wieku. Kazimierz Onufry Domeyko, ur. w 1725 r., z żoną Bogumiłą z domu Odachowską miał trzech synów: Antoniego Hipolita (1764–1809), Ignacego i Józefa (który został przez Komisję Edukacji Narodowej wysłany na studia mineralogii i górnictwa do Freibergu w Saksonii). Antoni Hipolit ożeniony był z Karoliną z Ancutów. Ich syn Ignacy urodził się 31 lipca 1802 r. we wsi Niedźwiadka nad Uszą, położonej ok. 44 km na płd. wschód od Nowogródka. W latach 1812–16 uczył się w szkole pijarów w Szczuczynie Litewskim. W 1816 r. wstąpił na Oddział Nauk Fizycznych i Matematycznych Cesarskiego Uniwersytetu Wileńskiego; tak oficjalnie była nazwana od 1803 r. Akademia założona w 1578 r. przez Stefana Batorego. Fizykę wykładał uczony ks. Józef Mickiewicz, później młody Feliks Drzewiński, mechanikę – Walerian Górski, architekturę – Karol Podczaszyński, chemię – Jędrzej Śniadecki, mineralogię – Ignacy Horodecki, algebrę i potem astronomię – Antoni Wyrwicz, a matematykę – Michał Pełka Poliński, pod którego opieką Ignacy napisał pracę magisterską „O teorii rachunku różniczkowego i całkowego, czyli Metafizyka rachunku różniczkowego: Jak dotąd tłumaczono zasady rachunku różniczkowego i jak w dzisiejszym stanie należy je tłumaczyć", do Oddziału Nauk Fizycznych i Matematycznych podaną 30 maja 1822 r. Dnia 25 czerwca 1822 r. otrzymał stopień magistra filozofii. Rozprawę wydał drukiem w Warszawie w 1921 r. Samuel Dickstein. Pisze on w przedmowie, że rozprawa ujawnia „znajomość literatury przedmiotu, sumienność opracowania i zmysł krytyczny autora w części historyczno-sprawozdawczej oraz samodzielność w badaniu porównawczym i stawianiu wniosków ogólnych w części drugiej".

Ceniony przez kolegów, nazywany pseudonimem „Żegota", Ignacy był czynny w Towarzystwie Filomatów i Zgromadzeniu Filaretów. Aresztowany w procesie Filomatów w 1823 r., był więziony w starym klasztorze bazylianów w Wilnie. Adam Mickiewicz w III cz. *Dziadów* przypomniał słowa wchodzącego do celi Żegoty: „Dziś mnie porwali z domu, ze stodoły". Ignacy został oswobodzony w pierwszych miesiącach 1824 r. W kwietniu 1831 r. brał udział w marszu powstańców na Wilno. Internowany następnie przez władze pruskie w Ascheken k. Kłajpedy, przebywał w obozach w Fischhausen i w Pilawie. Poznał plaże Bałtyku, szukał na nich bursztynu. W styczniu 1832 r. otrzymał w Królewcu paszport emigracyjny i wyjechał do Drezna. Stąd zrobił wycieczkę w góry Harcu. Pisał później: „Zwiedziłem w tym czasie na początku wiosny Freiberg, znajdujące się tam kopalnie srebra i starą akademię, w której niegdyś za Stanisława Augusta sposobił się na inżyniera górnictwa kosztem Rzeczpospolitej mój stryj, Józef Domeyko". Swoje przygody żołnierskie opisał Ignacy w szkicu pt. „Pierwsze dni kwietnia 1831 r. w Litwie", wydrukowanym anonimowo w *Kurierze Poznańskim* w 1880 r.

Domeyko dostał się do Francji. Wstąpił na studia do École des Mines de Paris. Tu otrzymał dyplom inżyniera górnika w 1837 r. Opracował mapę fizjograficzną Polski. Bywał na wykładach w Sorbonie. Na posiedzeniach Akademii Francuskiej widywał fizyków: „Ze wzruszeniem tedy patrzyłem, jak wchodzili Gay-Lussac, Arago, Biot, Poisson, Geoffroy St. Hilaire, Ampère".

W 1838 r. Ignacy wyemigrował do Chile. Po trzech miesiącach wykładał w języku hiszpańskim mineralogię w kolegium górniczym w Coquimbo. Energiczny, pracowity i ciekawy otaczającego go świata, dokonał kilku trudnych wejść na szczyty Andów. Ze znawstwem prowadził poszukiwania geologiczne. Zbierał próbki minerałów i prowadził ich analizy. Badał zwłaszcza rudy metali: szkarłatny minerał złożony z rtęci i antymonu ammiolit, ankeryty $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$ i inne. Minerał domeykit Cu_3As został nazwany jego nazwiskiem przez wiedeńskiego mineraloga Wilhelma Karla Haidingera (1795–1871), autora podręcznika *Handbuch der bestimmenden Mineralogie* (1845). Domeykit α krystalizuje

w układzie regularnym ze stałą sieci $a = 9{,}611 \cdot 10^{-10}$ m; domeykit β i domeykit γ krystalizują w układzie heksagonalnym. Skład chemiczny kryształów domeykitu podawany jest jako: Cu 71,79%, As 28,21%, gęstość 7,2–7,75 g/cm^3 zależnie od domieszek. Kryształy domeykitu dobywane bywają w okolicach Coquimbo, Copiapo, także w Meksyku i w stanie Michigan w USA. Nazwiskiem Domeyki nazwane są: amonit chilijski *Amonites domeykanus*, małż *Nautilius domeykus*, pasmo górskie Cordillera Domeyko, miasto Domeyko w prowincji Atakama, u stóp Gór Domeyki.

Domeyko publikował m.in. w *Annales de mines* oraz w *Neues Jahrbuch für Mineralogie*. Wydał m.in. wykłady *Elementos de mineralogia* (1848, 1879). Opracował *Essayes sobre los depósitos metaliferos de Chile* (1876) oraz szczegółową monografię *Mineralogia, 3 edicion que comprende principalmente los especies minerales de Chili, Bolivia, Peru, Arjentina, con appendice* (1879–84). Prowadził badania nad klimatem Santiago, stolicy republiki Chile, i nad zaopatrzeniem miasta w wodę pitną.

W 1841 r. został profesorem na wydziale nauk matematycznych i fizycznych uniwersytetu w Santiago, a w latach 1867–83 był rektorem tej uczelni. Od 1842 r. czynny był w pracach nad reorganizowaniem uniwersytetu w Santiago. W 1848 r. parlament nadał Domeyce honorowe obywatelstwo republiki. Zwłaszcza od 1852 r. Domeyko działał energicznie, i zarazem taktownie, w pracach nad organizacją oświaty w młodej republice, szczególnie nad reformą systemu uniwersyteckiego; korzystał tu ze wzorów znanego mu z własnego doświadczenia Wileńskiego Okręgu Szkolnego prowadzonego w latach 1802–24 przez kuratora Adama Jerzego ks. Czartoryskiego (1770–1861). Domeyko koncentrował się na pracy naukowej i oświatowej, zarabiał mało, z honorariów rezygnował albo przeznaczał je na pomaganie potrzebującym. Popierał sprowadzanie imigrantów do Chile z Europy, z Niemiec, zwłaszcza katolików. Profesorowie uniwersytetów w Chile podkreślają, jak ogromne, trwałe zasługi położył Domeyko w kształceniu nauczycieli i geologów, co miało specjalne znaczenie w kraju o nadzwyczajnie bogatych złożach rud metali i przyczyniło się w istotnym stopniu do rozwoju w Chile kopalni rud i przemysłu wydobywczego, stanowiącego także w czasach obecnych główną podstawę dochodów państwa.

Ignacy Domeyko ożenił się w 1850 r. z panną Enriquetą Sotomayor N. Guzmen de los Montes. Ich syn Jan Kazimierz, ur. w 1863 r., ożenił się z panną Alamos. Ich potomkowie mieszkają w Chile.

Ignacy Domeyko interesował się zagadnieniami tubylczej ludności Chile. Po zwiedzeniu w 1844 r. prowincji Araukanya opracował monografię *Araukanya i jej mieszkańcy* (1845). Utalentowany pisarz i rysownik, publikował artykuły w czasopismach przyrodniczych, m.in. także wychodzących w Królestwie Polskim: „Opisy podróży po Ameryce Południowej" w piśmie *Kronika Rodzinna* (1876, 1889), „Opisy podróży przez Kordyliery" w *Bibliotece Warszawskiej*, „Chili" w tygodniku geograficzno-krajoznawczym *Wędrowiec*. Wybrany na członka honorowego wielu towarzystw naukowych w kilku państwach, od 1875 r. był członkiem Akademii Umiejętności w Krakowie, od 1887 r. doktorem honoris causa Uniwersytetu Jagiellońskiego.

W 1884 r. Ignacy Domeyko, zaopatrzony w paszport republiki Chile, zdołał odwiedzić Polskę. Korzystał z kolei parowej, a nie tylko koni. Był w Krakowie, Warszawie, Wilnie, Nowogródku. Dotarł w ojczyste strony i odwiedził kilka wsi swego dzieciństwa. Zmarł w Santiago 23 stycznia 1889 r.

Opublikowane są wspomnienia i zbiory listów Ignacego Domeyki: *Moje podróże. Pamiętnik wygnańca* (Ossolineum, 1962–63) i *Listy do Władysława Laskowicza* (Instytut Wydawniczy PAX, 1976). Materiały dotyczące Domeyki przechowuje Biblioteka Litewskiej Akademii Nauk w Wilnie dziedzicząca zbiory Biblioteki im. Wróblewskich, Biblioteka Uniwersytetu Wileńskiego, Biblioteka Jagiellońska w Krakowie i Biblioteka Narodowa w Warszawie.

UNESCO ogłosiło rok 2002 Rokiem Ignacego Domeyki. 22 maja 2002 r. stałe przedstawicielstwa Białorusi, Chile, Francji, Litwy i Polski w UNESCO otwarły w siedzibie UNESCO w Paryżu wystawę materiałów informacyjnych o Domeyce. Profesor dr med. Zdzisław J. Ryn, były ambasador RP w Chile, w swej książce *Ignacy Domeyko. Obywatel świata* (Kraków 2002) podał cenne wiadomości o znaczeniu Domeyki dla rozwoju oświaty w republice Chile. Podstawowa biografia *Ignacy Domeyko: Litwa, Francja, Chile* (Polskie Towarzystwo Ludoznawcze, Wrocław–Warszawa 1995), pióra prof. Zbigniewa Wójcika, wicedyrektora Muzeum Ziemi PAN, podaje wiele wiadomości zebranych ze źródeł, m.in. archiwalnych, i najpełniej przedstawia życie i dzieło zasłużonego dla nauk przyrodniczych Polaka.

Maciej Suffczyński

Terapia hadronowa we Włoszech

Stosowanie przyspieszonych cząstek do niszczenia tkanki rakowej jest wprawdzie bardzo kosztowne, lecz o tyle lepsze niż użycie promieniowania rentgenowskiego lub γ, że oddawanie energii cząstek zachodzi głównie na końcu toru, mniej zatem uszkadza zdrową tkankę. Zasięgi cząstek w zależności od ich rodzaju i energii są już dobrze znane w przypadku różnych materiałów tarczy. Terapia hadronowa raka jest od pewnego czasu stosowana w kilku laboratoriach europejskich i amerykańskich.

W kwietniu 2002 r. we włoskim Państwowym Laboratorium Południowym w Katanii rozpoczęto stosowanie wiązki protonów przyspieszonych do energii 62 MeV w cyklotronie nadprzewodnikowym do leczenia czerniaka oka. Przy tej energii zasięg protonów w tkance ludzkiej wynosi ok. 3 cm. Osiągnięto już pomyślne wyniki u kilku pacjentów. Odpowiednie stosowanie tej terapii wymaga oczywiście ścisłej współpracy fizyków z lekarzami – okulistami i radiologami (dobieranie natężenia wiązki, energii, dawki).

Nucl. Phys. News **12**, nr 3 (2002) *B. W.*

Kwarki w Dubnej

Letnia Szkoła Fizyki grupy twórczej Quark odbyła się w dniach 15–24 lipca 2002 r. w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej. Stało się to możliwe dzięki edukacyjnej części Programu Bogolubowa–Infelda, której kierownikiem w Polsce jest prof. Wojciech Nawrocik (UAM, Poznań). Kierownikiem części Programu dotyczącej szkół średnich jest mgr Ewa Chmielowska, która znakomicie się nami opiekowała.

Wyjazd do Dubnej traktowany był przede wszystkim jako pewnego rodzaju nagroda dla uczniów za wysiłek włożony w pierwsze próby poznania przyrody i poparcie dla nauczycielskiego trudu owocującego wybitnymi osiągnięciami (choć ciągle mizernie wynagradzanego). W wyjeździe wzięła udział 9-osobowa grupa laureatów konkursów wojewódzkich, krajowych i międzynarodowych, uczestników grupy Quark.

Program zaproponowany przez organizatorów obejmował zwiedzanie m.in. Laboratorium Fizyki Neutronowej im. Franka, impulsowego reaktora jądrowego, generatora Van de Graaffa, cyklotronu i synchrofazotronu. Część młodzieży wzięła udział w warsztatach prowadzonych przez dra Mirosława Kulika z UMCS, dotyczących analizy kryształów z wykorzystaniem metody kanałowania rutherfordowskiego rozproszenia wstecznego cząstek.

Odbywały się także nasze tradycyjne wykłady (tym razem z fizyki jądrowej, prowadzone przez dra Joachima Gmyrka) oraz seminaria i sesja plakatowa, będące osobistym wkładem uczestników Szkoły (przygotowane pod okiem autorki tej notatki). Wszyscy przygotowali prezentację multimedialną z wybranego przez siebie problemu, związanego z Programem Bogolubowa–Infelda (w języku angielskim, czego skrupulatnie doglądała mgr Beata Ryl).

Mieliśmy również bardzo urozmaicony program turystyczny. Duże zainteresowanie wywołały wycieczki do Moskwy i Siergiejew Posadu, gdzie uczniowie zwiedzali muzea, cerkwie, oglądali zabytki architektury. Wyjazd na Letnią Szkołę do Dubnej dał również okazję do nawiązania kontaktów z rówieśnikami – my poznaliśmy uczestników rosyjskiej letniej Szkoły Komputerowej.

Na podsumowanie Letniej Szkoły Fizyki Dubna 2002 zaprosiliśmy wielu gości: organizatorów, państwa Ewę i Władysława Chmielowskich, uczestników rosyjskiej letniej Szkoły Komputerowej oraz studentów i pracowników naukowych z Polski. Byli również obecni reporterka i fotograf miejscowej gazety. Przedstawiliśmy program naszej Szkoły, tematy seminariów i wykładów, omówiliśmy naszą tradycję „pasowania na Kwarka".

Wizyta uczniów w ZIBJ pokazała im atrakcyjność fizyki współczesnej. Wizyty takie sprzyjają też poznawaniu kultury innego narodu oraz nawiązywaniu kontaktu z rówieśnikami. Może się to istotnie przyczynić do wzrostu zainteresowania fizyką. Może niektórzy uczestnicy wrócą tam jako studenci, doktoranci, pracownicy nauki.

Najważniejsze jest zaś to, że wszyscy doskonale się tam czuli, wspaniale odpoczęli, jednocześnie się ucząc.

Urszula Woźnikowska-Bezak

Szkolne warsztaty ochrony środowiska w Lublinie

Uczniowie IX Liceum im. Mikołaja Kopernika w Lublinie zorganizowali 11 maja 2002 r. w centrum miasta prezentację swoich prac z zakresu ochrony środowiska. Impreza spotkała się z dużym zainteresowaniem przechodniów. Uczniowie wykonywali pomiary hałasu i natężenia fal elektromagnetycznych. Badaniami objęto walkmany i telefony komórkowe zainteresowanych przechodniów. Lublinianie mogli sprawdzić, czy posiadany przez nich sprzęt jest bezpieczny, oraz dowiedzieć się, jakie są dopuszczalne normy. Ponadto mieli możliwość zapoznania się z pracami prowadzonymi przez uczniów w ramach projektu Socrates–Comenius.

W ramach tego projektu, finansowanego przez Unię Europejską, młodzież naszej szkoły wraz z rówieśnikami z Austrii i Hiszpanii już trzeci rok bada zanieczyszczenia i ich wpływ na środowisko. Warsztaty miały również na celu rozwinięcie motywacji do pracy nad ochroną środowiska, a także umiejętności identyfikacji źródeł zanieczyszczeń w otaczającym nas świecie.

Małgorzata Kaczorowska-Litak

NOWE KSIĄŻKI

- Henryk Szydłowski, *Niepewność w pomiarach. Międzynarodowe standardy w praktyce*, Wyd. Naukowe UAM, Poznań 2002, s. 88.
- H. Gurgul, *Encyklopedyczny słownik fizyków od starożytności do XVII wieku*, skrypt, Wyd. Naukowe Uniw. Szczecińskiego, Szczecin 2002, s. 78.
- Joanna Kośmider, Barbara Mazur-Chrzanowska, Bartosz Wyszyński, *Odory*, PWN, Warszawa 2002, s. 299.
- *Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki, część II*, red. B. Oleś, M. Duraj; Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2001, s. 84, cena 15 zł.
- Roman Nowak, *Statystyka dla fizyków*, PWN, Warszawa 2002, s. 663.
- Roman Nowak, *Statystyka dla fizyków – Ćwiczenia*, PWN, Warszawa 2002, s. 127.

POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE z POLSKIM TOWARZYSTWEM CHEMICZNYM

ogłaszają konkurs pod nazwą

KOMPUTEROWO WSPOMAGANY EKSPERYMENT SZKOLNY W PRZEDMIOTACH PRZYRODNICZYCH

UCZESTNICY. W Konkursie może uczestniczyć każdy, kto przedstawi propozycję doświadczenia, w którym będzie zastosowany komputer jako przyrząd pomiarowy oraz jako maszyna matematyczna do przetwarzania wyników tego doświadczenia. Doświadczenie może być przeznaczone dla dowolnego poziomu nauczania. Można stosować dowolne ogólnodostępne oprogramowanie oraz sprzęt. Oczekujemy ciekawych komputerowo wspomaganych doświadczeń przygotowywanych w pracowniach akademickich, szkolnych czy w domu przy użyciu sprzętu szkolnego oraz urządzeń typu: karta dźwiękowa, mikrofon, głośnik, kamera wideo itp. Uczniowie, którzy mają własne pomysły i chcieliby uczestniczyć w konkursie, a nie mają możliwości technicznych, mogą skontaktować się z wyszczególnionymi poniżej konsultantami w celu uzyskania możliwości skorzystania z pracowni akademickich.

WARUNKI. Minimalne wymagania dla uczniów: krótkie omówienie pisemne wykonanego doświadczenia, stosowanych materiałów, bez wskazania sposobu praktycznej realizacji pomysłu w szkole, oraz zobowiązanie do prezentacji doświadczenia.

Nauczycieli i studentów prosimy dodatkowo o wskazanie miejsca doświadczenia w programie nauczania (scenariusz lekcji). W przypadku wdrożonych pomysłów mile widziane będą wypowiedzi uczniów lub studentów na temat korzyści ze stosowania komputera do realizacji danego tematu lekcji, wykładu lub ćwiczenia.

TERMINY. Zgłoszenia: jak najszybciej; nie później niż 1 maja 2003 r.

Pisemne omówienia: 31 maja 2003 r.

Prosimy o przesłanie opisu pocztą, na dyskietce lub pocztą elektroniczną pod adresem przewodniczącego Konkursu.

WYRÓŻNIENIA. Najlepsze prace pragniemy wyróżnić prezentacją na imprezach towarzyszących XXXVII Zjazdowi Fizyków Polskich w Gdańsku we wrześniu 2003 r. oraz nagrodami pieniężnymi. O formie prezentacji prac zadecyduje jury po dokonaniu wstępnej selekcji. Uczestników prosimy z góry o wyrażenie zgody na zamieszczenie informacji w Internecie, materiałach drukowanych lub publikacji w postaci zredagowanej przez Komisję w oparciu o nadesłane materiały.

Informacje szczegółowe: http://ifnt.fizyka.amu.edu.pl/dydaktyka/konkurs2.html.

Za Komisję Konkursową
Henryk Szydłowski

KOMISJA KONKURSOWA I KONSULTANCI:

POZNAŃ: Wydział Fizyki UAM, ul. Umultowska 85, 61-614 Poznań, fax (061) 829 5155, przewodniczący: prof. dr hab. Henryk Szydłowski, tel. (061) 829 5020, e-mail: henryksz@amu.edu.pl, dr Krzysztof Gębura, tel. (061) 829 5038, e-mail: gebura@amu.edu.pl; Wydział Chemii UAM, ul. Grunwaldzka 6, 60-780 Poznań, prof. dr hab. Andrzej Burewicz, e-mail: zdch@amu.edu.pl.

BIAŁYSTOK: Uniwersytet w Białymstoku, Instytut Fizyki, ul. Lipowa 41, 15-424 Białystok, prof. dr hab. Andrzej Maziewski, e-mail: magnet@uwb.edu.pl, mgr Wojciech Dobrogowski, e-mail: dobrog@alpha.uwb.edu.pl.

TORUŃ: Instytut Fizyki UMK, ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń, dr Józefina Turło, e-mail: jturlo@alass1.phys.uni.torun.pl.

KRAKÓW: Instytut Fizyki i Informatyki Akademii Pedagogicznej, ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków, prof. dr hab. Władysław Błasiak, e-mail: sfblasia@cyf-kr.edu.pl.

RZESZÓW: Instytut Fizyki Uniwersytetu Rzeszowskiego, ul. T. Rejtana 16a, 35-310 Rzeszów, dr Małgorzata Klisowska, e-mail: goskli@atena.univ.rzeszow.pl, mgr Robert Chlanda, mgr Małgorzata Mrozowska.

WROCŁAW: Instytut Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego, plac Maksa Borna 9, 50-204 Wrocław, dr Stanisław Jakubowicz, e-mail: sjakub@proton.ift.uni.wroc.pl.

SZCZECIN: Katedra Fizyki Uniwersytetu Szczecińskiego, al. Wielkopolska 14, 70-451 Szczecin, prof. dr hab. Adam Bechler, e-mail: adamb@sus.univ.szczecin.pl, mgr Hanna Bartnik.

SŁUPSK: Instytut Fizyki Pomorskiej Akademii Pedagogicznej, ul Arciszewskiego 22B, 76-200 Słupsk, prof. dr hab. G. Karwasz, e-mail: karwasz@wsp.slupsk.pl.

SPIS TREŚCI TOMU 53 (2002)

Zeszyt 1

H. Kroemer – Pola quasi-elektryczne i przesunięcia pasmowe, czyli jak nauczyć elektrony nowych sztuczek (tłum. J. Gronkowski) 1

RÓŻNE

M. Suffczyński, P. Janiszewski – Stałe fizyczne ... 16

J. Spałek – Czy fizyka ma szansę w XXI wieku? ... 19

WSPOMNIENIA – ROCZNICE

J.J. Wysłocki – 50 lat fizyki na Politechnice Częstochowskiej 26

NAUCZANIE FIZYKI

S. Bednarek – Podstawowe doświadczenia pokazowe z reologii i magnetoreologii 33

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

M. Łukaszewski – XXXVI Zjazd Fizyków Polskich 41

I. Olejniczak – Niskowymiarowe i nanostrukturalne materiały molekularne 44

RECENZJE

Duch w atomie, oprac. P.C.W. Davies, J.R. Brown (rec. J. Kamiński) 45

LISTY DO REDAKCJI

S. Bednarek – W sprawie uwag na temat nauczania fizyki 47

NAGRODA NOBLA 2001

K. Rzążewski – Nobel z fizyki za kondensację Bosego–Einsteina 49

KRONIKA 51

Zeszyt 2

M.J. Sadowski – Stan i perspektywy fizyki plazmy oraz badań nad kontrolowanymi reakcjami syntezy jądrowej 57

Z. Lalak – W kierunku unifikacji oddziaływań: teorie z dodatkowymi wymiarami 68

RÓŻNE

W.I. Arnold – Matematyka i fizyka: matka i córka czy siostry? (tłum. M. Hamera) 71

WSPOMNIENIA – ROCZNICE

J. Mostowski – 50 lat Olimpiad Fizycznych 89

NAUCZANIE FIZYKI

F. Bader – Mechanika kwantowa wkracza do szkoły (tłum. K. Życzkowski, J. Gronkowski) 93

NOWE URZĄDZENIA I METODY DOŚWIADCZALNE

F. Kaczmarek – Lasery światłowodowe wzbudzane podczerwienią 98

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

A. Szmyrka-Grzebyk – Pomiary Temperatury i Ciepła w Przemyśle i Nauce 102

K. Sangwal – 13. Międzynarodowa Konferencja Wzrostu Kryształów (ICCG-13) 103

RECENZJE

A. Śliwiński: Ultradźwięki i ich zastosowania (rec. A. Leszczyński) 105

KRONIKA 107

Zeszyt 3

Ż.I. Ałfiorow – Podwójne heterostruktury oraz ich zastosowanie w fizyce, elektronice i technice (tłum. E. Janik) 113

RÓŻNE

Granty KBN z fizyki: XX i XXI konkurs 131

M.R. Schroeder – Rozwój i przyszłość fizyki (tłum. B. Wojtowicz) 137

ROZMOWY

Rozmowa o fotonice 149

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

W. Gawlik, K. Chałasińska-Macukow – Od optyki kwantowej do fotoniki 155

J. Szuber – Pasywacja powierzchni półprzewodników 156

J. Gronkowski – Fizyka i Technika 157

RECENZJE

W. Przygodzki, A. Włochowicz: Fizyka polimerów. Wybrane zagadnienia (rec. J. Sanetra) 159

KRONIKA 162

Zeszyt 4

D. Bauman – Wykorzystanie metod spektroskopowych do badania ciekłych kryształów 169

RÓŻNE

M.W. Gutowski – Prosta dostatecznie gruba 181

J. Klamut – Gdzie fizyka ma szukać szans w XXI wieku? 193

WSPOMNIENIA – ROCZNICE

R. Torge – Otto Lummer, Fritz Reiche i Mieczysław Wolfke: szkice biograficzne (tłum. J. Gronkowski) 201

NOWOŚCI NAUKOWE

J. Mostowski – Efekt Kapicy–Diraca zaobserwowany 211

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

P. Garbaczewski, R. Olkiewicz – Półgrupy Dynamiczne: Dyssypacja, Chaos, Kwanty 213

RECENZJE

I. Białynicki-Birula, M. Cieplak, J. Kamiński: Teoria kwantów. Mechanika falowa (rec. J. Sobczyk) .. 214

KRONIKA 215

Zeszyt 5

E.A. Cornell, C.E. Wieman – Kondensacja Bosego–Einsteina w rozrzedzonym gazie: pierwszych 70 lat i kilka najnowszych doświadczeń (tłum. K. Góral) 221

NAUCZANIE FIZYKI
W. Niedzicki – Jak przełamać lęk przed fizyką? ... 245

NOWOŚCI NAUKOWE
J. Żylicz – Odkrycie promieniotwórczości dwuprotonowej 249

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI
A. Szytuła – Europejskie Źródło Spalacyjne 250

RECENZJE
F. Selleri: Wielkie spory w fizyce kwantowej (rec. W. Łużny) 251
Człowiek i promieniowanie jonizujące, red. A.Z. Hrynkiewicz (rec. Z. Pietrzak-Flis) 253

KRONIKA 255

Zeszyt 6

M.M. Wójcik, M. Misiaszek, G. Zuzel – Astronomia neutrin słonecznych 261
T. Figielski – Dyslokacje jako centra elektrycznie aktywne w półprzewodnikach: pół wieku od odkrycia 277

RÓŻNE
M. Suffczyński – Liber abaci 284

WSPOMNIENIA – ROCZNICE
M. Grynberg – Leonard Sosnowski: twórca warszawskiej szkoły fizyki półprzewodników 287

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI
Z. Ajduk – Planck '02 292

RECENZJE
P.W. Atkins: Chemia fizyczna; P.W. Atkins, C.A. Trapp, M.P. Cady i C. Giunta: Chemia fizyczna. Zbiór zadań z rozwiązaniami (rec. R. Kołos) ... 293
S. Weinberg: Teoria pól kwantowych – Supersymetria (rec. J. Lukierski) 294
B. Greene: Piękno Wszechświata: Superstruny, ukryte wymiary i poszukiwania teorii ostatecznej (rec. Z. Jaskólski) 295
A. Śliwiński: Ultradźwięki i ich zastosowania: wyjaśnienie autora 297

KRONIKA 297

ROCZNY SPIS TREŚCI 303

SPIS TREŚCI WEDŁUG AUTORÓW

Z. Ajduk – Planck '02 ..... *6*, 292
Ż.I. Ałfiorow – Podwójne heterostruktury oraz ich zastosowanie w fizyce, elektronice i technice *3*, 113
W.I. Arnold – Matematyka i fizyka: matka i córka czy siostry? *2*, 71
F. Bader – Mechanika kwantowa wkracza do szkoły *2*, 93
D. Bauman – Wykorzystanie metod spektroskopowych do badania ciekłych kryształów *4*, 169
S. Bednarek – Podstawowe doświadczenia pokazowe z reologii i magnetoreologii *1*, 33
S. Bednarek – W sprawie uwag na temat nauczania fizyki *1*, 47
K. Chałasińska-Macukow – patrz W. Gawlik, K. Chałasińska-Macukow *3*, 155
E.A. Cornell, C.E. Wieman – Kondensacja Bosego–Einsteina w rozrzedzonym gazie: pierwszych 70 lat i kilka najnowszych doświadczeń *5*, 221
T. Figielski – Dyslokacje jako centra elektrycznie aktywne w półprzewodnikach: pół wieku od odkrycia *6*, 277
P. Garbaczewski, R. Olkiewicz – Półgrupy Dynamiczne: Dyssypacja, Chaos, Kwanty *4*, 213
W. Gawlik, K. Chałasińska-Macukow – Od optyki kwantowej do fotoniki *3*, 155
J. Gronkowski – Fizyka i Technika *3*, 157
M. Grynberg – Leonard Sosnowski: twórca warszawskiej szkoły fizyki półprzewodników *6*, 287
M.W. Gutowski – Prosta dostatecznie gruba *4*, 181
P. Janiszewski – patrz M. Suffczyński, P. Janiszewski *1*, 16
F. Kaczmarek – Lasery światłowodowe wzbudzane podczerwienią *2*, 98
J. Klamut – Gdzie fizyka ma szukać szans w XXI wieku? *4*, 193
H. Kroemer – Pola quasi-elektryczne i przesunięcia pasmowe, czyli jak nauczyć elektrony nowych sztuczek *1*, 1
Z. Lalak – W kierunku unifikacji oddziaływań: teorie z dodatkowymi wymiarami *2*, 68
M. Łukaszewski – XXXVI Zjazd Fizyków Polskich *1*, 41
M. Misiaszek – patrz M.M. Wójcik, M. Misiaszek, G. Zuzel *6*, 261
J. Mostowski – 50 lat Olimpiad Fizycznych *2*, 89
J. Mostowski – Efekt Kapicy–Diraca zaobserwowany *4*, 211
W. Niedzicki – Jak przełamać lęk przed fizyką? ... *5*, 245
I. Olejniczak – Niskowymiarowe i nanostrukturalne materiały molekularne *1*, 44
R. Olkiewicz – patrz P. Garbaczewski, R. Olkiewicz *4*, 213
K. Rzążewski – Nobel z fizyki za kondensację Bosego–Einsteina *1*, 49
M.J. Sadowski – Stan i perspektywy fizyki plazmy oraz badań nad kontrolowanymi reakcjami syntezy jądrowej *2*, 57
K. Sangwal – 13. Międzynarodowa Konferencja Wzrostu Kryształów (ICCG-13) *2*, 103
M.R. Schroeder – Rozwój i przyszłość fizyki *3*, 137
J. Spałek – Czy fizyka ma szansę w XXI wieku? .. *1*, 19
M. Suffczyński – Liber abaci *6*, 284
M. Suffczyński, P. Janiszewski – Stałe fizyczne ... *1*, 16
A. Szmyrka-Grzebyk – Pomiary Temperatury i Ciepła w Przemyśle i Nauce *2*, 102
J. Szuber – Pasywacja powierzchni półprzewodników *3*, 156
A. Szytuła – Europejskie Źródło Spalacyjne *5*, 250
R. Torge – Otto Lummer, Fritz Reiche i Mieczysław Wolfke: szkice biograficzne *4*, 201
C.E. Wieman – patrz E.A. Cornell, C.E. Wieman . *5*, 221
M.M. Wójcik, M. Misiaszek, G. Zuzel – Astronomia neutrin słonecznych *6*, 261
J.J. Wysłocki – 50 lat fizyki na Politechnice Częstochowskiej *1*, 26
G. Zuzel – patrz M.M. Wójcik, M. Misiaszek, G. Zuzel *6*, 261
J. Żylicz – Odkrycie promieniotwórczości dwuprotonowej *5*, 249

WARUNKI PRENUMERATY

Cena prenumeraty krajowej w 2003 r. wynosi 36,00 zł za pół roku, 72,00 zł za rok. Prenumeratę można zamówić za pośrednictwem:

I. RUCH-u

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

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

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

II. ZARZĄDU GŁÓWNEGO PTF

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

III. ODDZIAŁÓW PTF

Prenumeratę można zamówić również w oddziale PTF. Opłata dla członków PTF oraz studentów, jeśli wniesiona do 31 stycznia 2003 r. za cały rok, wynosi 48,00 zł. Dostawa *Postępów Fizyki* odbywa się za pośrednictwem oddziału PTF.

INFORMACJE DLA AUTORÓW I TŁUMACZY

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

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

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

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

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

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

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

7. Autorów obowiązuje szybkie wykonanie korekty autorskiej.

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

INFORMATION FOR SUBSCRIBERS

A subscription order can be sent through the local press distributor or directly to „RUCH" S.A. Oddział Krajowej Dystrybucji Prasy, ul. Jana Kazimierza 31/33, skrytka pocztowa 12, 00-958 Warszawa, Poland.

PL ISSN 0032-5430

Cena 10,00 zł

SPIS TREŚCI

M.M. Wójcik, M. Misiaszek, G. Zuzel – Astronomia neutrin słonecznych 261
T. Figielski – Dyslokacje jako centra elektrycznie aktywne w półprzewodnikach: pół wieku od odkrycia 277

RÓŻNE
M. Suffczyński – Liber abaci 284

WSPOMNIENIA – ROCZNICE
M. Grynberg – Leonard Sosnowski: twórca warszawskiej szkoły fizyki półprzewodników 287

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI 292
RECENZJE 293
KRONIKA 297
ROCZNY SPIS TREŚCI 303

CONTENTS

M.M. Wójcik, M. Misiaszek, G. Zuzel – Solar neutrino astronomy 261
T. Figielski – Dislocations as electrically active centres in semiconductors: half a century from the finding 277

MISCELLANEA
M. Suffczyński – Liber abaci 284

RECOLLECTIONS – ANNIVERSARIES
M. Grynberg – Leonard Sosnowski: the founder of the Warsaw school of semiconductor physics 287

MEETINGS AND CONFERENCES 292
REVIEWS 293
CHRONICLE 297
ANNUAL TABLE OF CONTENTS 303

WKRÓTCE

- *Wolfgang Ketterle o tym, kiedy atomy zachowują się jak fale (wykład noblowski 2001)*
- *Valentine L. Telegdi – Enrico Fermi w Ameryce*
- *Andrzej Krasiński o tym, jak powstawała teoria względności*
- *Janusz Zakrzewski o 50-leciu odkrycia hiperjąder*

POSTĘPY FIZYKI TOM 53 ZESZYT 6 ROK 2002