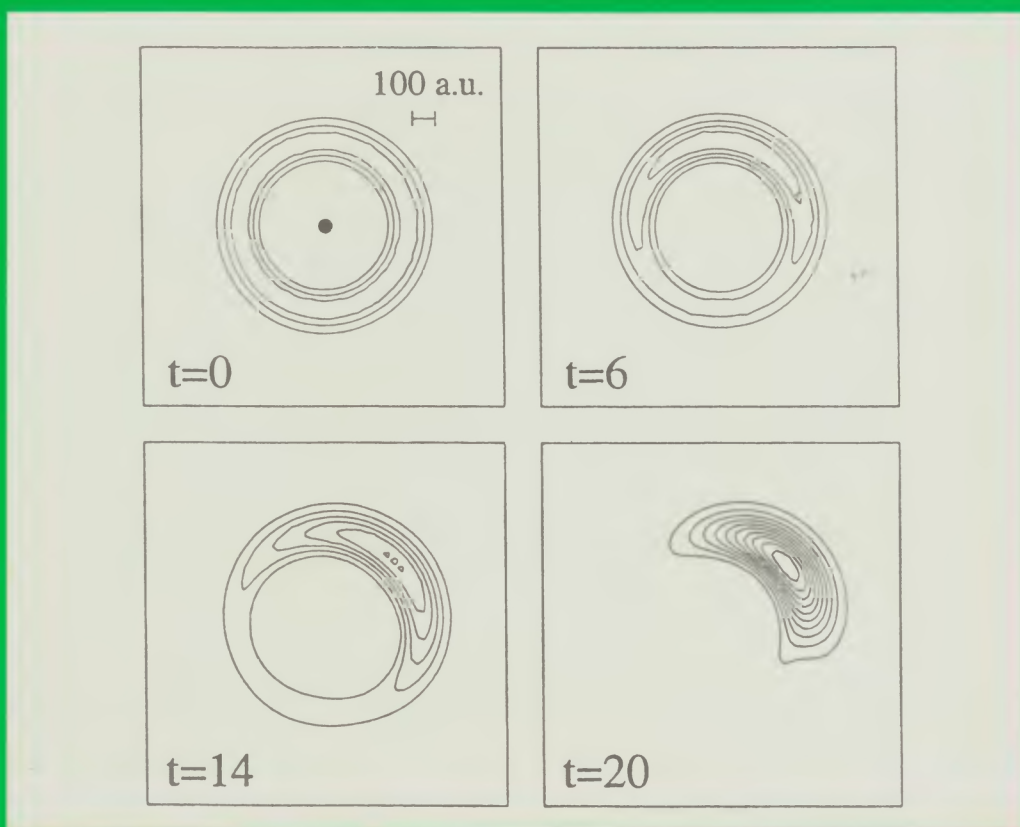


POSTĘPY FIZYKI

TOM 49 ZESZYT 3 ROK 1998



DWUMIESIĘCZNIK
POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO



TROJAŃSKIE PACZKI FALOWE

WZMACNIACZE ENERGII
PLANETY POZA UKŁADEM SŁONECZNYM
LASERY NA KROPKACH KWANTOWYCH

POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

ZARZĄD GŁÓWNY

Prezes: prof. Ireneusz Strzałkowski
Wiceprezesa: prof. Andrzej Budzanowski
prof. Józef Szudy
Sekretarz Generalny: prof. Maciej Kolwas
Skarbnik: mgr Wanda Doborzyńska-Głazek
Członkowie Zarządu: prof. Bogdan Cichocki
prof. Wojciech Gawlik
prof. Stanisław K. Hoffmann
prof. Wojciech Suski
dr Edmund Śniadek
mgr Urszula Woźnikowska-Bezak

REDAKTORZY NACZELNI CZASOPISM PTF

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

PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW PTF

Prof. Andrzej Maziewski (Białystok)
Prof. Bronisław Grzegorzewski (Bydgoszcz)
Prof. Marian Głowacki (Częstochowa)
Prof. Eugeniusz Czuchaj (Gdańsk)
Prof. Zygmunt Kleszczewski (Gliwice)
Prof. Jerzy Warczewski (Katowice)
Dr Marek Pajek (Kielce)
Prof. Wojciech Gawlik (Kraków)
Prof. Stanisław Hałas (Lublin)
Prof. Leszek Wojtczak (Łódź)
Dr Stanisław Chabik (Opole)
Prof. Jerzy Dembczyński (Poznań)
Prof. Marian Kuźma (Rzeszów)
Prof. Henryk Wrembel (Słupsk)
Prof. Tadeusz Rewaj (Szczecin)
Prof. Wacław Bała (Toruń)
Prof. Bronisław Orłowski (Warszawa)
Prof. Władysława Nawrocka (Wrocław)

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

POSTĘPY FIZYKI

RADA REDAKCYJNA

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

KOMITET REDAKCYJNY

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

KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

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

Adres Redakcji: ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa, adres elektroniczny: postepy@fuw.edu.pl,
strona WWW: <http://www.fuw.edu.pl/~postepy>.

Ukazuje się od 1949 r.; wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne
Zeszyt dofinansowany przez Komitet Badań Naukowych
Wydano pod patronatem Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
Skład komputerowy w Redakcji, druk i oprawa: „UNI-DRUK”, Warszawa, Janiszowska 8

Wzmacniacze energii

Andrzej Zastawny

Instytut Fizyki, Politechnika Śląska, Gliwice

Energy amplifiers

Abstract: Short review of a new concept of nuclear energy production, designed by C. Rubbia and his team, is given. An energy amplifier is a hybrid system consisting of a medium current (10 mA), medium energy (1 GeV) proton accelerator feeding a subcritical assembly consisting of thorium or another fertile element. This assembly during operation would burn all unwanted actinides and can incinerate long-lived radioactive fission products. The energy amplifier could produce energy much cheaper than nuclear or conventional power plants and more safely than e.g. coal plants.

1. Wstęp

Chociaż przy obecnym stanie techniki energetyki jądrowa jest najczystsza technologią produkcji energii w dużej skali, znana jest powszechna niechęć opinii publicznej do niej. Jest to fakt społeczny i polityczny, z którym muszą się liczyć kręgi decyzyjne i opiniotwórcze. Fizycy najlepiej zdają sobie sprawę z niedoskonałości energetyki jądrowej i nie ustają w pracach nad opracowaniem lepszych metod.

Zasadnicze wady aktualnie działającej generacji reaktorów energetycznych wykorzystujących neutrony termiczne, których głównym przedstawicielem jest reaktor wodno-ciśnieniowy (PWR), można ująć w następujących trzech punktach:

1. Konieczność składowania odpadów promieniotwórczych o półokresach rozpadu większych od 100 lat (tab. 1). Ponieważ czasy składowania są porównywalne z czasami procesów geologicznych, składowanie to określa się jako geologiczne. Spośród produktów rozszczepienia nie są kwalifikowane do składowania geologicznego najbardziej promieniotwórcze izotopy rozszczepienia ^{90}Sr i ^{137}Cs , ponieważ ich aktywność promieniotwórcza maleje po 500 latach składowania (i ewentualnym rozcieńczeniu) do poziomu porównywalnego z radioaktywnością litosfery, a taki czas składowania uznaje się do przyjęcia dla przedsięwzięć technicznych. Składowanie w takiej skali czasu jest nazywane wiekowym (sekularnym). Do skła-

dowania geologicznego zaliczane są przede wszystkim transuranowce, powstające w reaktorze w wyniku kolejnych aktów pochłaniania neutronów przez paliwo pierwotne (uran). Teoretycznie jest możliwe „spalanie” tych produktów w reaktorach powielających wykorzystujących neutrony prędkie, nie znalazło to jednak do tej pory praktycznej realizacji na dużą skalę.

2. Jak wynika z samej zasady ich działania, reaktory pracują w pobliżu stanu krytycznego rdzenia i konieczne jest stosowanie wymuszonych (sztucznych) obiegów pierwotnego chłodzenia (wymiany ciepła). Obie okoliczności, niezależnie od liczby zabezpieczeń, są potencjalnymi źródłami awarii; większość dotychczasowych awarii była związana z układami wymuszonego chłodzenia.

3. W reaktorach z paliwem uranowym można produkować paliwo ^{239}Pu do broni jądrowych w sposób nie kontrolowany przez służby międzynarodowe.

W ostatnich dwudziestu latach nastąpił duży postęp w pracach nad nową generacją bezpiecznych reaktorów i powstały projekty reaktorów powielających z wykorzystaniem neutronów prędkich (FB – fast breeder), jednak nie osiągnięto jeszcze gotowości do praktycznej realizacji. W tym stanie rzeczy w bardzo krótkim czasie powstała i osiągnęła stadium bardzo szczegółowych projektów koncepcja wzmacniaczy energii (EA – Energy Amplifiers). W niniejszym artykule jest stresz-

czony projekt opracowany w CERN-ie pod kierunkiem laureata Nagrody Nobla Carla Rubbii. Informacje o projektach wcześniejszych i literaturę z nimi związaną wraz z publikacjami zarysu koncepcji przedstawianego projektu można znaleźć w pracy [1].

Wzmacniacz energii jest [2-7] hybrydą akceleratora protonów o energii 1 – 1.5 GeV i natężeniu prądu ok. 10 – 15 mA oraz reaktora FB. Z założenia układ jest podkrytyczny o współczynniku powielania neutronów $0.95 \leq k \leq 0.98$. Protony z akceleratora w procesie kruszenia ciężkich jąder (spalacji) produkują neutrony, podtrzymujące reakcję rozszczepienia paliwa jądrowego na poziomie zależnym od k . Sumarycznie można mówić o wzmocnieniu energii G rzędu 100, rozumianym jako iloraz wyzwalonej mocy cieplnej i mocy wiązki akceleratora. Zachodzi przybliżony związek [2]

$$G = \frac{E_f \eta_s}{(1 - k)E_n} \approx \frac{2.4}{1 - k}, \quad (1)$$

gdzie E_f jest energią kinetyczną fragmentów rozszczepienia (ok. 190 MeV), η_s – ułamkiem neutronów spalacji, które rozszczepiają jądra paliwa (wynosi on ok. 0.45; pozostałe neutrony wytwarzają paliwo lub są pochłaniane), k – efektywnym współczynnikiem powielania neutronów w rdzeniu, natomiast E_n – energią wytworzenia jednego neutronu spalacji (ok. 35 MeV).

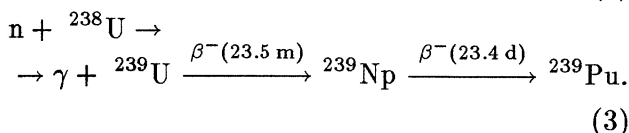
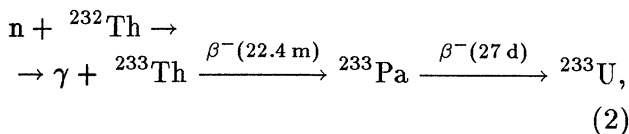
W pierwszych projektach (np. [2,3]) rozważano reaktor wykorzystujący neutrony termiczne (T-EA), a więc z moderatorem. Jednak już w 1995 r. opracowano szczegółowy projekt reaktora wykorzystującego neutrony prędkie (F-EA) z ciekłym ołowiem jako chłodziwem [4]. Parametry zaprojektowanego EA są rewelacyjne; można go nazwać rewolucją w energetyce jądrowej. Korzystną okolicznością jest fakt, że wszystkie istotne elementy koncepcji są znane, sprawdzone i stosowane. Artykuł niniejszy przedstawia streszczenie 164-stronicowego opracowania [4] tego projektu, a ściślej tylko najatrakcyjniejszego jego wariantu z torem jako paliwem pierwotnym.

Tabela 1. Dłużej żyjące odpady promieniotwórcze, powstałe po 1 roku pracy reaktora PWR o mocy elektrycznej 1 GW [1].

| Izotop | Okres półrozpadu $T_{1/2}$ [lata] | Masa [kg] | Aktywność promieniotwórcza [TBq] |
|--------------------------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|
| Produkty rozszczepienia | | | |
| ^{90}Sr | 29 | 13.4 | 7×10^4 |
| ^{93}Zr | 1500 | 23 | 2.2 |
| ^{99}Tc | 210 | 25 | 16 |
| ^{107}Pd | 6500 | 7.3 | 0.14 |
| ^{129}I | 17 000 | 5.8 | 0.041 |
| ^{126}Sn | 100 | 1.0 | 1.1 |
| ^{137}Cs | 30 | 32 | 10^5 |
| Transuranowce | | | |
| ^{238}Pu | 88 | 4.5 | 2.8×10^3 |
| ^{239}Pu | 24 | 170 | 380 |
| ^{240}Pu | 6600 | 77 | 650 |
| ^{242}Pu | 3800 | 15.5 | 2.2 |
| ^{247}Pu | 2100 | 14.5 | 0.38 |
| ^{238}Pu | 0.088 | 4.5 | 2800 |
| ^{241}Am | 0.432 | 17 | 2.1 |
| ^{243}Am | 7400 | 3.0 | 2.2 |

2. Elementy kinetyki reaktora

Paliwem pierwotnym ma być dla EA tor lub uran. Reakcja ma przebiegać według znanych schematów



Dalsze rozważania będą dotyczyły wariantu z torem. W reaktorze EA tempo reakcji jest ograniczone przez szybkość rozpadów β jądra ${}^{233}\text{Pa}$ i w tym sensie mówi się o pracy reaktora EA w reżimie rozpadu, w przeciwieństwie do reaktorów PWR, działających w reżimie spalania.

Dla reżimu rozpadu w równowadze, według (2), szybkości produkcji ${}^{233}\text{Th}$, rozpadu beta jąder ${}^{233}\text{Pa}$ i pochłaniania neutronów przez ${}^{233}\text{U}$ (z rozszczepieniem lub nie) są jednakowe. Oznaczając symbolem izotopu w nawiasach klamrowych gęstość odpowiednich jąder, Φ – gęstość strumienia neutronów, $\sigma_p(J)$ – przekrój czynny jądra J na oddziaływanie z neutronem w procesie p , τ – średni czas rozpadu beta ${}^{233}\text{Pa}$, otrzymuje się

$$[{}^{232}\text{Th}]\sigma_\gamma({}^{232}\text{Th})\Phi = [{}^{233}\text{Pa}]/\tau = \sigma_{f+\gamma}({}^{233}\text{U})\Phi. \quad (4)$$

Wskaźnikami γ oraz f oznaczono procesy aktywacji neutronowej i rozszczepienia. Przekroje czynne

dla odpowiednich reakcji są podane w tab. 2. Według (4), w równowadze iloraz $[{}^{233}\text{U}]/[{}^{232}\text{Th}]$ nie zależy od Φ i jest równy $\sigma_\gamma({}^{232}\text{Th})/\sigma_{f+\gamma}({}^{233}\text{U})$, co odpowiada wartości 0.126 dla neutronów prędkich (F-EA) lub 0.0135 dla neutronów termicznych T-EA. Natomiast gęstość $[{}^{233}\text{Pa}]$ jest wprost proporcjonalna do Φ . Szybkość aktywacji protaktynu musi być mała w porównaniu z szybkością jego rozpadu, czyli

$$\sigma_\gamma({}^{233}\text{Pa})\Phi\tau \ll 1. \quad (5)$$

Dla lewej strony nierówności (5) równej 0.088 w przypadku F-EA otrzymuje się $\Phi = 2.33 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Wówczas moc cieplna właściwa rozszczepień wynosi 60 W/g. Dla T-EA wyniki są znacznie gorsze.

Oznaczając przez η efektywną liczbę neutronów powstających podczas jednego rozszczepienia (tzn. uśrednioną względem energii neutronu i uwzględniającą poza rozszczepieniami inne procesy, np. $(n,2n)$), oraz przez p_1 prawdopodobieństwo straty neutronu na skutek pochłonięcia lub ucieczki, mamy

$$k = \frac{1}{2}(1 - p_1)\eta. \quad (6)$$

Czynnik 1/2 wynika z okoliczności, że na każdy neutron wywołujący rozszczepienie jeden neutron aktywuje jądro toru. Praktycznie uzyskuje się dla F-EA $\eta = 2.5$, a dla T-EA $\eta = 2.2$.

Tabela 2. Przekroje czynne dla neutronów prędkich w barnach i krotność ν neutronów w rozszczepieniu [3,28].

| Izotop | Wychwył | Rozszczepienie | Rozpraszanie sprężyste | $n \rightarrow 2n$ | $n \rightarrow n'$ | Całkowity przekrój czynny | ν |
|---------------------|---------|----------------|------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|-------|
| ${}^{232}\text{Th}$ | 0.387 | 0.006 | 10.9 | 0.00056 | 0.699 | 12.0 | |
| ${}^{233}\text{Pa}$ | 1.12 | 0.039 | 8.09 | 0.00016 | 1.760 | 11.0 | |
| ${}^{233}\text{U}$ | 0.289 | 2.784 | 8.92 | 0.00020 | 0.280 | 12.3 | 2.52 |
| ${}^{235}\text{U}$ | 0.574 | 1.970 | 8.86 | 0.00046 | 0.641 | 12.0 | 2.47 |
| ${}^{238}\text{U}$ | 0.428 | 0.025 | 11.3 | 0.00053 | 0.830 | 12.5 | |
| ${}^{239}\text{Np}$ | 2.08 | 0.354 | 9.18 | 0.00014 | 0.866 | 12.5 | |
| ${}^{239}\text{Pu}$ | 0.557 | 1.780 | 9.16 | 0.00024 | 0.770 | 12.3 | 2.91 |
| Pb nat. | 0.0034 | | 9 | | | | |

Ołów jest świetną tarczą do produkcji neutronów w procesie kruszenia wysokoenergetycznymi protonami. Przenoszenie (transport) neutronów w ołowiu ma charakter zdecydowanie dyfuzyjny z powodu dużego przekroju czynnego na rozpraszanie i niewielkiego pochłaniania. Celowym jest przytoczyć dwa elementarne zapisy odnoszące się do transportu neutronów w ołowiu, z uśrednionymi wartościami liczbowymi, aby zwrócić uwagę czytelnika na charakterystyczne cechy tego procesu. Równanie transportu można zapisać w postaci¹

$$D\nabla^2\Phi - \Sigma_{\text{abs}}\Phi = -S. \quad (7)$$

Tutaj $D = 1/(3\Sigma_{\text{sc}})$ jest stałą dyfuzji neutronów (w tym przypadku ołowiu), równą 1.12 cm; $\Sigma_x = N\sigma_x$; N – gęstość jąder (w tym przypadku też ołowiu), σ_x – przekrój czynny na proces x (wskaźniki $x = \text{abs}$ oraz $x = \text{sc}$ odnoszą się odpowiednio do pochłaniania i rozpraszania), a S – gęstość natężenia źródła neutronów (wymiar $\text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$).

Przybliżając źródło małą kulą o wydajności S_0 (wymiar s^{-1}) otrzymuje się na zewnątrz źródła gęstość strumienia w odległości r od środka źródła równą

$$\Phi(r) = S_0 \frac{\exp(-\kappa r)}{4\pi D r}, \quad (8)$$

gdzie $\kappa = \sqrt{\Sigma_{\text{abs}}/D}$. Stała dyfuzji D jest mała, natomiast $1/\kappa$ jest rzędu metra. Dla $\kappa r < 1$ mamy $\Phi(r) \approx S_0/4\pi D r$, podczas gdy w ośrodku bezdyfuzyjnym byłoby $\Phi_0(r) \approx S_0/4\pi r^2$. Występuje więc zwielokrotnienie gęstości neutronów w stosunku do ośrodka bezdyfuzyjnego o czynnik

$F = \Phi/\Phi_0 = r/D$. Na przykład, gdy $r = 50$ cm, $F = 45$, a po uwzględnieniu czynnika wykładniczego otrzymuje się $F = 27$. Jeżeli nawet wymiary rdzenia (paliwa) są duże, ta właściwość w innej proporcji ilościowej jest nadal aktualna. Neutron w dyfuzyjnym ruchu w ołowiu po 1800 zderzeniach termalizuje się, przebywając w tym czasie drogę około 62 m. Jeśli chodzi o tę właściwość, ołów jest bezkonkurencyjny. Neutron zmniejszając powoli swoją energię przebiega zakres przekrojów czynnych aktywacji wszelkich materiałów w rdzeniu reaktora i wykorzystuje ewentualne rezonanse.

Te właściwości pozwalają realizować w EA dopalanie transuranowców, które z trudem usiłuje się osiągnąć w projektowanych FB. We wzmacniaczu energii w wariacie standardowym do produkcji energii cieplnej „dopala się” aktynowce. Ale można część neutronów w rdzeniu przeznaczyć do przekształcania długożyciowych promieniotwórczych produktów rozszczepienia w nuklidy krótko żyjące lub trwałe, tj. do neutralizowania długo żyjących produktów rozszczepień.

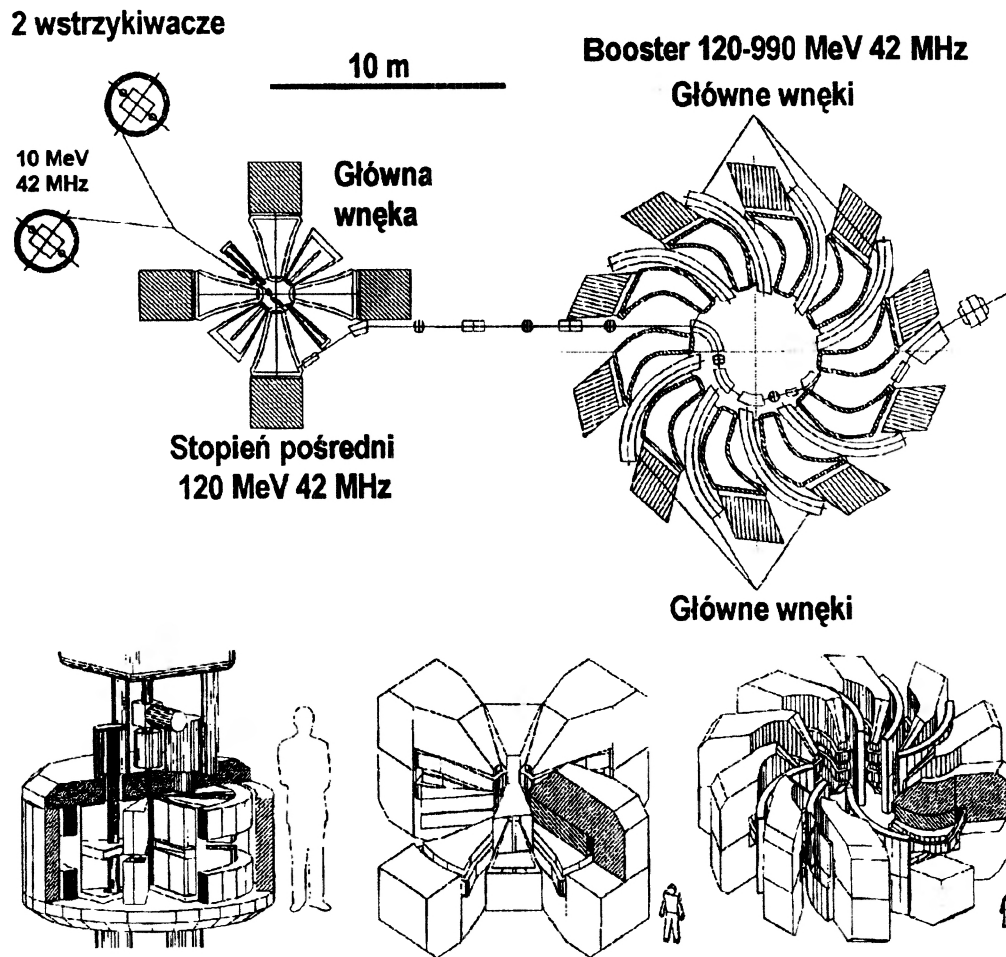
3. Akcelerator

Powodzenie koncepcji EA stało się realne dzięki postępowi w technice akceleratorów, zilustrowanemu w tab. 3. Akcelerator protonów w Instytucie Paula Scherrera (PSI) w Villigen k. Zurychu (tab. 3) jest pierwowzorem [4] trójstopniowego kompleksu zaprojektowanego dla EA, do produkcji 1.5 GW energii cieplnej (por. rys. 1).

Tabela 3. Rozwój techniki akceleratorów protonowych [7].

| Akcelerator | Energia [GeV] | Moc zasilania [MW] | Moc wiązki [kW] | Wydajność |
|-------------|---------------|--------------------|-----------------|----------------------|
| CERN SC | 0.5 | 1 | 0.62 | 6.5×10^{-4} |
| CERN PS | 24 | 12 | 40 | 3×10^{-3} |
| CERN SPS | 400 | 52 | 360 | 6.9×10^{-3} |
| PSI | 0.6 | 2.7 | 900 | 0.3 |
| Projekt | 1.0 | 13 | 6000 | 0.46 |

¹ W literaturze kinetyki neutronów, w równaniu transportu, jest rzeczą przyjętą używać gęstości strumienia neutronów $\Phi = Nv$, w miejsce gęstości cząstek N (v jest prędkością ruchu chaotycznego; w tym przypadku neutronów), za to stała dyfuzji $D = \lambda/3$ zamiast $\lambda v/3$ i odpowiednio zmieniają się inne składniki równania bez zmiany ich wymiaru [$\text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$].



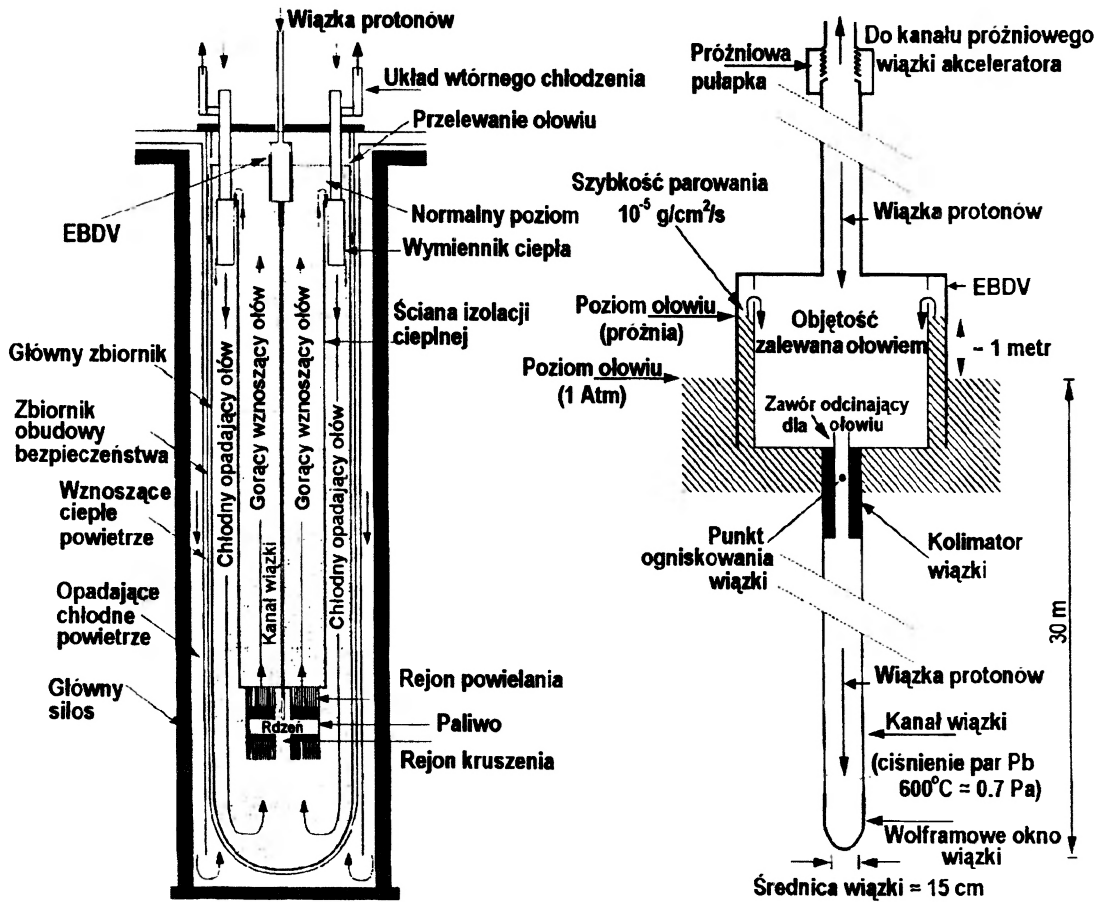
Rys. 1. Kompleks akceleratorowy dla wzmacniacza energii [4]. Niżej szkic gabarytów kolejnych akceleratorów. Ich nazwy: CIC – Compact Isochronous Cyclotron, ISSC – Intermediate Separated Sectors Cyclotron, BSSC – Booster Separated Sectors Cyclotron.

Dwa akceleratory wstrzykujące są czterosektorowymi cyklotronami izochronicznymi. Cyklotron pośredni składa się z czterech, a ostatni stopień z dziesięciu separowanych sektorów. Niektóre pa-

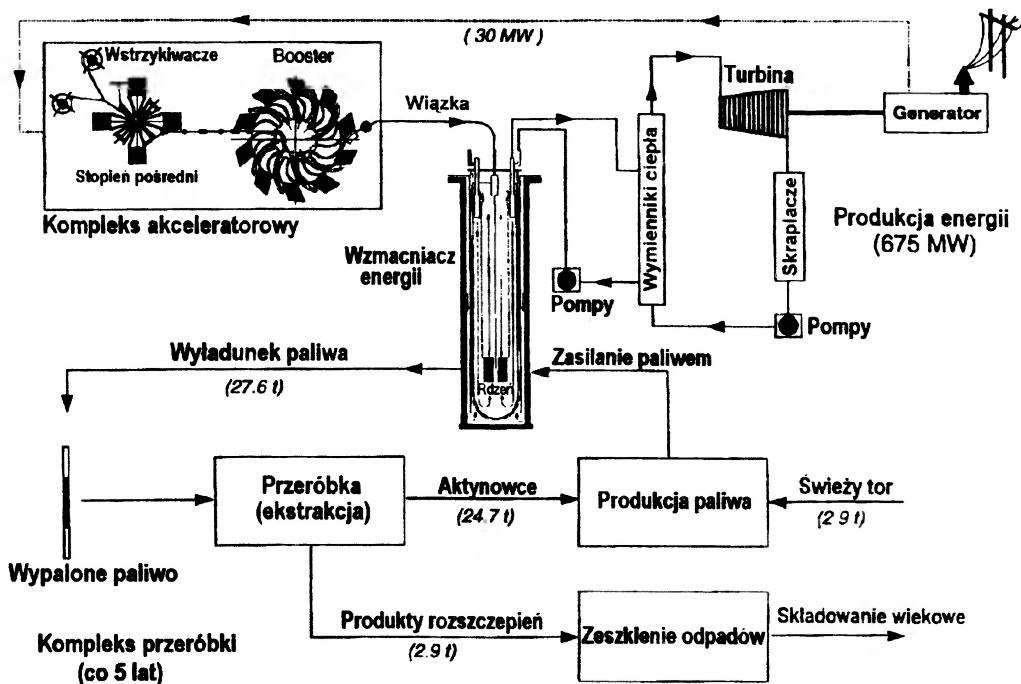
rametry akceleratorów są podane w tab. 4. Całkowita moc zasilania kompleksu ma wynosić około 30 MW, co przy natężeniu prądu wiązki 12.5 mA daje sprawność energetyczną około 44%.

Tabela 4. Niektóre parametry kompleksu akceleratorów.

| Akcelerator: | wstrzykujący | pośredni | główny |
|-------------------------|--------------|----------|------------------------|
| Średnica zewnętrzna [m] | – | 10 | 16 |
| Masa magnesów [t] | – | 1000 | 3170 |
| Moc magnesów [MW] | – | 0.6 | 2.7 |
| Moc RF [MW] | – | 1.54 | 12.5 |
| Harmoniczna pracy | 4 | 6 | 6 |
| Liczba sektorów | 4 | 4 | 10 |
| Liczba/typ wnęk RF | 2/delta | 2/delta | 6/pojedynczą szczelinę |



Rys. 2. Szkic reaktora oraz układu wprowadzenia wiązki protonów [4].



Rys. 3. Ogólny schemat działania projektowanego wzmacniacza energii [4].

4. Reaktor

Szkic głównej części reaktora o projektowanej mocy cieplnej 1.5 GW ($G = 120$) i elektrycznej 675 MW oraz systemu wprowadzenia wiązki protonów pokazuje rys. 2. Główny zbiornik, umieszczony w antysejsmicznym silosie, ma wysokość 30 m, średnicę 6 m, grubość ścian 7 cm i masę 2000 ton. Niektóre rozwiązania są wzorowane lub wręcz kopiowane z projektu reaktora prędkiego ALMR (American Liquid Metal Reactor).

Chłodziwem jest ciekły ołów, krążący tylko dzięki siłom konwekcji w kolumnie o wysokości 25 m. Temperatura ołowiu na wejściu i wyjściu z rdzenia wynosi odpowiednio 400 i 600°C, strumień ołowiu w rdzeniu jest równy 53.6 ton/s, a szybkość przepływu 1.5 m/s. Masa chłodziwa wynosi 10^4 ton, co daje pojemność cieplną 1.5 GJ/K, a to oznacza, że w przypadku całkowitego odcięcia odpływu ciepła temperatura chłodziwa zwiększałaby się zaledwie o 1 K/s. Zewnętrzna ściana pojemnika jest chłodzona powietrzem, również krążącym konwekcyjnie. Cztery wymienniki, o mocy 375 MW każdy, przekazują ciepło do obiegu wtórnego.

Moc reaktora jest kontrolowana przez pomiar temperatury ołowiu w wymiennikach ciepła i regulowana prądem wiązki protonów. Reaktor ma kilka zabezpieczeń. Temperaturowy współczynnik reaktywności wynosi $-1.37 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Dzięki dużej rozszerzalności temperaturowej poziom ołowiu w reaktorze zmienia się o 27 cm/100 K. W pierwszym etapie wzrostu temperatury włącza się układ bezpieczeństwa EBDV (emergency beam dump volume), w którym ołów wlewa się na zasadzie syfonu do kanału wiązki protonów i odcina wiązkę protonów od rdzenia (rys. 2). W drugim etapie wlewa się do przestrzeni między zbiornikiem głównym i obudową bezpieczeństwa, która normalnie jest wypełniona helem pod ciśnieniem atmosferycznym. Wtedy przewodność cieplna rośnie od wartości 0.03 do $16 \text{ W m}^{-1} \text{ K}$ i ciepło jest skuteczniej odprowadzane do atmosfery. Trzecim zabezpieczeniem jest wprowadzanie do rdzenia węgla boru CB_4 metodami opracowanymi dla ALMR; umieszczenie 20 kg CB_4 w rdzeniu zmniejsza jego reaktywność o 0.04.

Rdzeń składa się z trzech koncentrycznych stref – strefy kruszenia jąder o średnicy 40 cm, strefy paliwowej i strefy powielania (paliwa) wy-

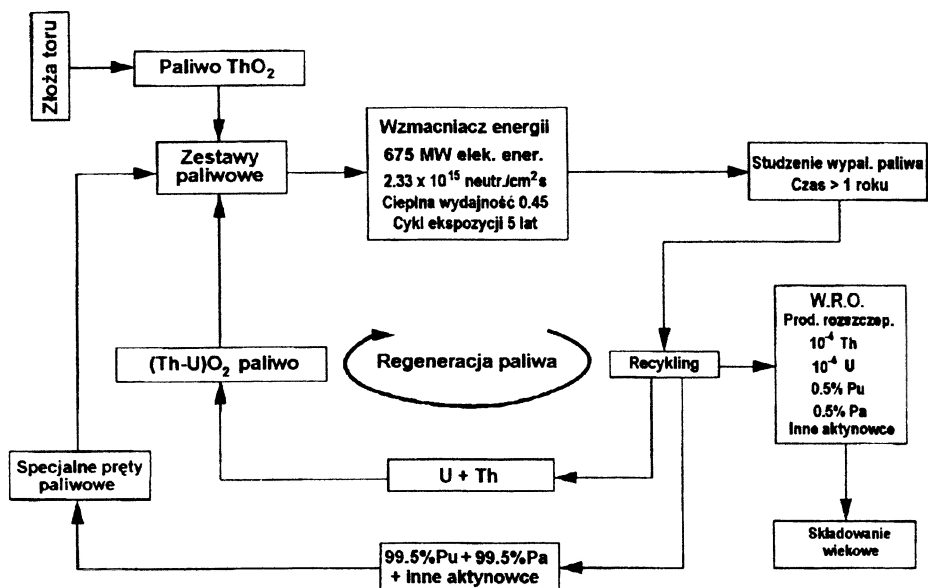
pełnionej czystym ThO_2 i odpadami przeznaczonymi do „wypalenia”. Pręty paliwowe zawierają paliwo na długości 1.5 m w części środkowej prętów, mającej długość 1.8 m i średnicę (zewnętrzzną) 8.2 mm. Końce prętów mają średnicę 5 mm i długość 0.9 m. Puste przestrzenie są przeznaczone na wzrost objętości paliwa w procesie „spalania” i na lotne produkty rozszczepień. Prętów jest 331 w części wewnętrznej rdzenia i 397 w części zewnętrznej, w geometrii heksagonalnej, w odstępach odpowiednio 12.4 oraz 11.4 mm. Średnica rdzenia wynosi około 3 m.

5. Cykl paliwowy, odpady

Średnie wypalenie paliwa po 5-letnim cyklu paliwowym (kampanii) wynosiłoby 2400 GWh/t, lub inaczej $8.64 \times 10^{12} \text{ J/kg}$, czyli 2.5 razy więcej od reaktorów PWR, w których wykorzystuje się wzbogacony uran. Średnia moc właściwa paliwa byłaby równa 55 W/g. W środku stosu parametry te byłyby dwukrotnie większe od podanych wartości, a na brzegach dwa razy mniejsze. Jeden cykl paliwowy trwałby 5 lat bez żadnej ingerencji w rozkład paliwa w rdzeniu.

W pierwszej kampanii, w części paliwowej rdzenia byłoby 28.4 ton paliwa o składzie: ThO_2 (90%) oraz $^{233}\text{UO}_2$ (10%), a w części powielania 5.6 ton ThO_2 . Na końcu pierwszej kampanii w paliwie byłoby 2460 kg ^{233}U , 260 kg ^{234}U oraz 86.5 kg innych aktynowców. W stanie ustalonym po kampanii (rys. 3) z rdzenia wydobywałoby się około 27.6 ton paliwa. Z tego po przeróbce 2.9 ton produktów rozszczepień odprowadzałoby się do składowania sekularnego, a reszta byłaby podstawowym paliwem w następnej kampanii. Jako materiał do powielania dodawano by 2.9 ton świeżego ThO_2 . W procesie przeróbki paliwa pierwiastki transuranowe Np, Pu, Am i Pa byłyby wyodrębniane i ładowane do oddzielnych prętów, w których byłyby „dopalane” prędkimi neutronami do postaci nietoksycznej w przeciągu dwu i więcej kampanii (bez przeladowywania). Niektóre szczegóły cyklu przeróbki paliwa są pokazane na rys. 4.

Wzmacniacz energii nie produkowałby odpadów transuranowych. W konsekwencji aktywność promieniotwórcza produkowanych odpadów po czasie 500 lat byłaby 2×10^4 razy mniejsza aniżeli w reaktorze PWR. Kosztem zmniejszenia sprawności energetycznej można będzie do-



Rys. 4. Schemat przeróbki wypalonego paliwa [4]. W.P.O. – wysoko promieniotwórcze odpady.

pałac też występujące w małych ilościach długoożywiowe produkty rozszczepień (^{129}I , ^{99}Tc , ^{126}Sn , ^{135}Cs , ^{93}Zr , ^{79}Se). Wtedy po następnych 500 latach radioaktywność odpadów byłaby dodatkowo 100 razy niższa (rys. 5).

6. Porównanie z innymi źródłami energii

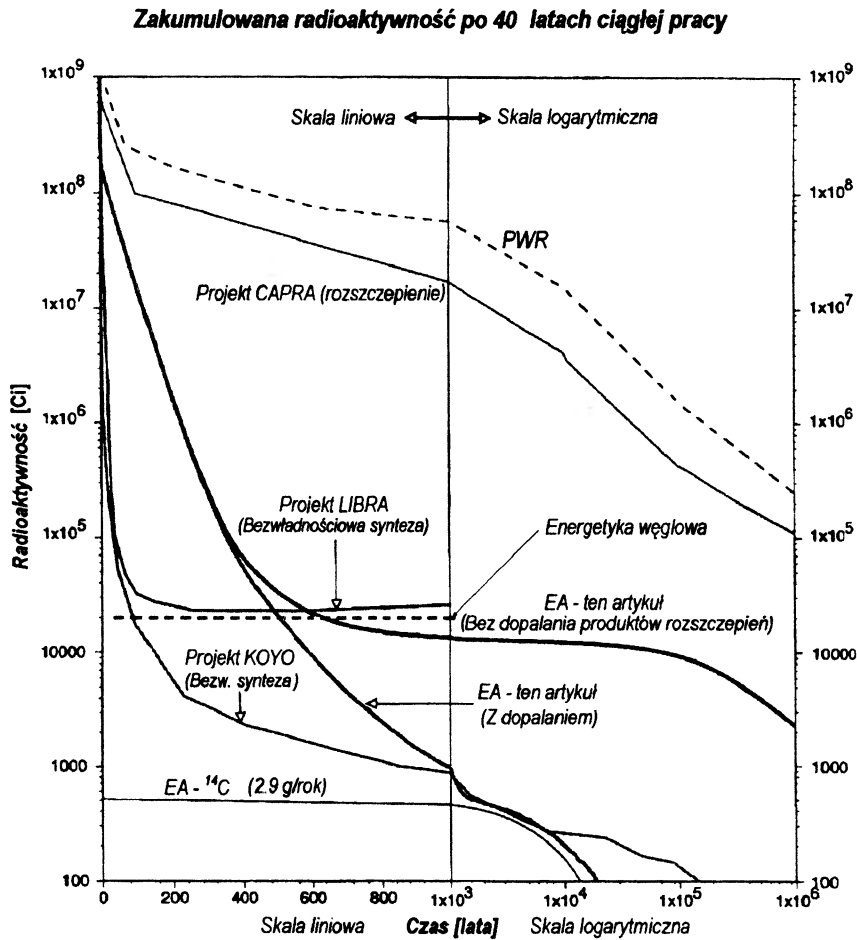
Wzmacniacz energii cechuje duża wydajność paliwa. Jeden kilogram toru spalony w EA jest równoważny 256 kg uranu naturalnego w PWR lub przeszło 1400 baryłek ropy. Biorąc pod uwagę cały proces produkcji paliwa (kopalnictwo, transport, przeróbka), ale bez składowania odpadów, całkowita toksyczność promieniotwórczości EA jest 7 razy mniejsza od toksyczności energetyki węglowej i 45 razy od PWR. Uwzględniając tylko bogatsze złoża, szacuje się zasoby toru na 6 Mt. Przy obecnej konsumpcji energii elektrycznej w świecie daje to zapas na ponad 12 stuleci. Jest to 100 razy więcej od zapasów oleju lub gazu i 10 razy więcej od zapasów węgla, gdyby miały one być używane zamiast wszystkich innych źródeł energii. Jeśli uwzględnić ponadto uboższe złoża toru, to paliwa starczy na 100 razy dłużej [4].

W porównaniu do konstrukcji konwencjonalnych reaktorów EA wyróżnia się prostotą, odpornością na wstrząsy tektoniczne i bezpieczniejszą pracą. O ile w konwencjonalnych reaktorach typowy czas kampanii wynosi 3 lata z dodat-

kowymi trzykrotnymi przemieszczeniami paliwa w roku, to w EA wymiana paliwa mogłaby następować co pięć lat. Corocznej wymianie podlegałyby rura wiązki protonów z uwagi na uszkodzenia radiacyjne końcówki. W przypadku, gdy surowcem pierwotnym miałyby być tor, ^{239}Pu byłby produkowany w znikomych ilościach i nie mógłby mieć żadnego znaczenia militarnego.

Według [5] koszty budowy prototypu prezentowanego projektu szacuje się na 500 mln USD. Przy budowie seryjnej co najmniej dziesięciu jednostek koszty szacuje się na niższe o 45%. Koszty produkowanej energii szacowano dla zestawu trzech jednostek produkujących 2 GW mocy elektrycznej, wspomaganych jednym dodatkowym (awaryjnym) zespołem akceleratorowym. Wynoszą one wtedy 2 centy za kWh (1993 r.), w tym koszty paliwa (toru) stanowią 10%. Takie koszty potwierdziło inne oszacowanie [6]. Jest to (w zależności od technologii i kraju) od 2 do 4 razy taniej od innych technologii produkcji energii elektrycznej. Koszt wytwarzania ciepła szacuje się na 77 centów za GJ, co prowadzi do opłacalności produkcji syntetycznego wodoru.

Możliwości EA są nie do przecenienia. Dla Hiszpanii opracowano [7] projekt pięciu jednostek EA o wyżej podanych parametrach, które w okresie do końca życia energetyki PWR w Hiszpanii, tj. do roku 2029, spalą wszystkie dotychczasowe i przyszłe odpady transuranowe oraz produkty rozszczepień ^{99}Tc oraz ^{128}I , produkując równo-



Rys. 5. Szacowana aktywność promieniotwórcza odpadów reaktorów w funkcji czasu [4,8]. CAPRA – projekt FB z dopalaniem plutonu.

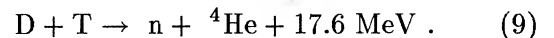
cznie 3.125 GW mocy tj. 15% obecnej produkcji (20.8 GW, w tym 7.1 GW z PWR). Koszty inwestycji tego zespołu szacuje się na 4.7 mld USD, gdy koszty składowania owych odpadów na 7.7 mld USD. A otrzymuje się jeszcze wyprodukowaną energię, która licząc po aktualnej cenie 5 centów za kWh ma wartość prawie 50 mld USD.

7. Wzmacniacz energii a synteza termojądrowa

W pracy [8] podjęto studium porównawcze wzmacniacza energii i syntezy termojądrowej metodą wyładowania ograniczanego magnetycznie (MF), przedstawioną w dwu różnych, fragmentarycznych opracowaniach [9-10]. Metoda MF wydaje się najbardziej realistyczna technicznie. W obu opracowaniach rozważa się jednostkę o mocy cieplnej 3 GW. W toroidalnych uzwojeniach indukcja pola ma wynosić 12.8 T. Moc zasilania reaktora byłaby równa 75 MW, co da-

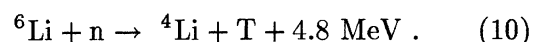
łoby wzmocnienie energii o czynnik 40. Natężenie prądu ciepła przez główny płaszcz osłony wyładowania wynosiłoby 5 MW/m².

Synteza termojądrowa przebiegałaby zgodnie z reakcją



O ile w EA powstałe neutrony mają energię 2 MeV i przenoszą tylko 2.5% wyzwolonej energii, w MF mają energię 14 MeV i przenoszą jej aż 80%. Na tę samą ilość wyzwolonej energii w MF przypada 4.5 razy więcej neutronów. W konsekwencji aktywacja neutronowa i uszkodzenia radiacyjne materiałów konstrukcyjnych reaktora w metodzie MF są co najmniej 10 razy większe.

Reaktor typu MF jest, podobnie jak EA, reaktorem powielającym; w tym przypadku tryt jest powielany z paliwa pierwotnego Li w reakcji



Neutrony z wyładowania plazmowego przepuszcza się przez ołów lub beryl, aby w reakcji $(n,2n)$ zwiększyć nieco ich liczbę i zmniejszyć energię, ponieważ reakcja (10) ma szeroki rezonans w okolicy 300 keV. Warstwa litu musi być stosunkowo gruba (100 g/cm^2), a powierzchnia płaszczka plazmy musi sięgać 1400 m^2 . W konsekwencji masa litu musi wynosić 1400 ton. Szybkość produkcji trytu wynosi 20 g/h. Całkowitą ilość trytu w reaktorze szacuje się na 2 kg. Odpowiada to aktywności $7 \times 10^{17} \text{ Bq}$, czyli 10^3 razy więcej niż radioaktywność ^{233}U w EA. W modelu pierwszym lit jest w postaci Li_2O , wzbogaconego w ^6Li do 30%, w drugim – ciekłego stopu $\text{Li}_{0.17}\text{Pb}_{0.83}$, w którym ołów spowalnia i powiela neutrony. Tryt musi być w sposób ciągły separowany z litu, oczyszczany i wprowadzany do komory wyładowania. Ta procedura jest zupełnie nie zbadana od strony technicznej. Tryt jest gazem aktywnym chemicznie, łatwo migrującym i pochłanianym. Wynikające stąd problemy bezpieczeństwa radiologicznego też nie są zbadane. Kampanie przewiduje się również pięcioletnie, ale wymieniane muszą być także pierwsze płaszczki komory plazmy, a tzw. divertor (fragment komory, którym odprowadzane jest ciepło) ma być wymieniany co 20 miesięcy. Łącznie wymieniana masa w przypadku modelu pierwszego ma być 120, a w modelu drugim 330 razy większa aniżeli w EA. Według [5] będzie potrzeba 30 lat na przygotowanie technicznych projektów MF.

Energetyczna wydajność toru wynosi $8.3 \times 10^{13} \text{ J/kg}$ a w MF $2 \times 10^{13} \text{ J/kg}$ naturalnego litu (o zawartości 7.5% ^6Li). Uwzględniając naturalną obfitość obu pierwiastków można powiedzieć, że ich zapasy są porównywalne. Aktywność promieniotwórcza odpadów w modelach 1 i 2 jest podobna odpowiednio do aktywności w projektach KOYO i LIBRA, pokazanych na wykresach z rys. 5.

8. Podsumowanie

Wzmacniacz energii jest dużym urządzeniem biernym, w którym neutrony wytwarzane w rdzeniu reaktora jądrowego przez wiązkę protonów podtrzymują jego pracę w reżimie podkrytycznym. Moc reaktora jest regulowana natężeniem wiązki protonów.

Wypalone paliwo, po oddzieleniu produktów rozszczepień, wraca do reaktora; w konsekwencji

nie ma w odpadach aktywności. Paliwo jest efektywnie wykorzystane – energia otrzymywana z 780 kg toru w EA jest równa energii otrzymywanej z 200 ton naturalnego uranu w reaktorach współcześnie eksploatowanych. Szacuje się, że koszt produkowanej energii będzie kilka razy mniejszy od obecnego.

Aktywność promieniotwórcza odpadów po 700 latach byłaby około 2×10^4 razy mniejsza od aktywności odpadów we współczesnych reaktorach, a radioaktywność odpadów składowanych w geologicznej skali czasu (10^6 lat) byłaby zmniejszona jeszcze drastyczniej ($\leq 500 \text{ Ci}$ na GW mocy elektrycznej razy rok po 1000 latach). W przypadku „dopalania” dłużej żyjących produktów rozszczepień (jest taka możliwość) składowanie geologiczne jest wyeliminowane całkowicie i radioaktywność odpadów jest mniejsza od wytwarzanych w energetyce węglowej.

Ponieważ reaktor pracowałby w reżimie wyraźnie podkrytycznym i główne obiegi chłodzenia byłyby bierne, prawdopodobieństwo niebezpiecznych awarii byłoby niezwykle małe. Możliwość niekontrolowanej produkcji ^{239}Pu do broni jądrowej byłaby zupełnie wyeliminowana.

Zaprojektowano reaktor o mocy cieplnej 1500 MW, napędzany akceleratorem protonów o energii 1 GeV i natężeniu prądu 12.5 mA. Zespół takich trzech modułów, plus jeden akcelerator w rezerwie, produkowałby 2 GW mocy elektrycznej. Szacowana cena energii elektrycznej jest dwa razy niższa od obecnych a cena produkowanego ciepła czyniłaby opłacalną produkcję wodoru w procesie wysokotemperaturowej dysocjacji.

Literatura

- [1] M. Suffczyński, *Postępy Fizyki* **45**, 277 (1994).
- [2] F. Carminati, R. Klapisch, J.P. Revol, Ch. Roche, J.A. Rubio, C. Rubbia, „An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by a Particle-Beam Accelerator”, raport CERN/AT/93-47(ET) (1993).
- [3] C. Rubbia, „The energy amplifier: a solid-phase, accelerator driven, sub critical Th/ ^{233}U breeder for nuclear energy production with minimal actinide waste”, *Nuclear Data for Science and Technology, Proc. Int. Conf. Gatlinburg, Tennessee, May 9-13, 1994*.
- [4] C. Rubbia i in., „Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier”, raport CERN/AT/95-44 (ET) (1995).
- [5] C. Roche, C. Rubbia, „Some preliminary considera-

- tions on the economical issues of the energy amplifier”, CERN/AT/95-45 (ET), 29th October, 1995.
- [6] K. Fernandez, P. Mandrillon, C. Rubbia, J.A. Rubio, „A Preliminary Estimate of the Economic Impact of the Energy Amplifier”, raport CERN/LHC/96-01 (EET) (1996).
- [7] C. Rubbia, S. Buono, Y. Kadi, J.A. Rubio, „Fast neutron incineration in the energy amplifier as alternative to geologic storage: case of Spain”, raport CERN-LHC-97-01-(EET) (1997).
- [8] C. Rubbia, „A comparison of the safety and environmental advantages of the Energy Amplifier and of Magnetic Confinement Fusion”, raport CERN/AT/95-58 (ET) (1995).
- [9] NET Team, „NET Predesign Report”, *Fusion Engineering and Design* (1993).
- [10] „ITER Conceptual Design Report”, IAEA, Vienna, *ITER Documentation Series 18* (1991).

Teoria grawitacji i kosmologia*

Michał Heller

Watykańskie Obserwatorium Astronomiczne, Watykan

Theory of gravitation and cosmology

Abstract: Classical singularities in general relativity are usually defined as points of a „singular boundary” of space-time. However, this definition leads to serious difficulties if one applies it to stronger types of singularities, for instance to the initial and final singularities in the closed Friedman world model. It is shown that one can model space-time with any type of singularities as a noncommutative space. Moreover, any such singularity can be analysed in terms of an algebra of bounded operators on a Hilbert space. This typically quantum mechanical structure suggests that there could exist a deep connection between the theory of classical singularities and the looked-for quantum theory of gravity.

1. Wprowadzenie

Teoria grawitacji i kosmologia – to dwa ściśle ze sobą związane tematy, ale jednak odrębne i tak obszerne, że każdemu z nich trzeba by poświęcić znacznie więcej uwagi niż na to pozwala jeden wykład. W niniejszym wykładzie chciałbym wybrać tylko dwa zagadnienia – jedno typowo kosmologiczne, drugie dotyczące podstaw fizyki grawitacji (zapewne również podstaw całej fizyki) i pokazać, jak te zagadnienia wiążą się ze sobą oraz, być może, prowadzą do nowych rozwiązań. Zagadnienie kosmologiczne będzie dotyczyć klasycznej osobliwości kosmologicznej. Jak wiadomo,

równania opisujące wiele modeli kosmologicznych zawierają osobliwości, które w przypadku standardowego modelu kosmologicznego (Friedmana-Lemaître’a) interpretuje się jako osobliwość początkową (Wielki Wybuch) i osobliwość końcową (ta ostatnia występuje tylko w zamkniętym modelu Friedmana-Lemaître’a). Osobliwości te występują wówczas, gdy pomija się kwantowe efekty grawitacji, które w bardzo gęstych stanach początkowych (lub końcowych) powinny się pojawić. Panuje dość rozpowszechnione przekonanie, że stworzenie kosmologii kwantowej (czyli opierającej się na kwantowej teorii grawitacji) usunie osobliwości z modeli kosmologicznych. I tu poja-

*Wykład wygłoszony podczas XXXIV Zjazdu Fizyków Polskich w Katowicach, we wrześniu 1997 r.

wia się drugi problem niniejszego referatu – poszukiwania kwantowej teorii grawitacji. Jest ona potrzebna nie tylko do pozbycia się kłopotliwych osobliwości z kosmologii, lecz również stanowi kluczowy problem współczesnej fizyki teoretycznej.

Dzisiejsza fizyka cierpi bowiem na swoją schizofrenię. Opisuje ona świat za pomocą dwu całkowicie nieprzystających do siebie teorii, a mianowicie mechaniki kwantowej, obowiązującej w mikroskali, i ogólnej teorii względności, która obowiązuje w skali astronomicznej i kosmologicznej. Swoistość tych teorii przejawia się nie tylko w drastycznej odrębności obrazów świata, jakie kreślą, lecz przede wszystkim w zupełnej odrębności matematycznych metod, jakimi się posługują. Dotychczas nie udało się znaleźć przejrzystych reguł, które by ustalały związek pomiędzy tymi metodami.

W niniejszym referacie podejmę próbę ukazania, że pomiędzy poszukiwaniem kwantowej teorii grawitacji a problemem klasycznych osobliwości (klasycznych – a więc z pominięciem efektów kwantowych) istnieją daleko głębsze związki niż dotychczas przypuszczano.

2. Zagadnienie klasycznej osobliwości

Dziś wiemy, że osobliwości są głęboko związane z samą naturą klasycznego (tzn. niekwantowego) pola grawitacyjnego, a mianowicie z jego niestabilnością. Problem ten pojawił się już w teorii Newtona, gdy uczony ten rozważał pytanie, czy możliwy jest tak równomierny rozkład gwiazd w nieskończonej przestrzeni, by zapewnić światu „grawitacyjną równowagę” (tzn. by przeszkodzić zapadnięciu się wszystkich gwiazd do jednej wielkiej masy). W liście do Bentleya Newton napisał, iż jest to teoretycznie możliwe, ale tak mało prawdopodobne, jak ustawienie tysiąca igieł ostrzami na powierzchni lustra. Ten sam problem dał o sobie znać, gdy w 1917 r. Einstein po raz pierwszy rozwiązywał kosmologiczne równania swojej nowej teorii grawitacji. Ażeby „ustabilizować” rozwiązanie, musiał on dodać do równań człon kosmologiczny ze słynną stałą kosmologiczną Λ . Potem, gdy pod naporem faktów obserwacyjnych Einstein zgodził się wreszcie z tym, że świat nie jest tworem stabilnym, wprowadzenie członu kosmologicznego uznał za „największą pomyłkę swojego życia”. Świat galaktyk istotnie okazał się

tworem niestabilnym, ale wbrew sugestiom Newtona realizuje on nie „zapadanie się do jednego ciała”, lecz „antyzapadanie się” (rozszerzanie się) z początkowej osobliwości. Ponieważ jednak einsteinowska teoria grawitacji sama przez się nie wyróżnia kierunku czasu (w ogóle nie wyróżnia jednego czasu dla całego wszechświata), różnica ta nie jest zasadnicza.

Osobliwości pojawiły się wprost w pracach Aleksandra Friedmana. On sam interpretował osobliwość początkową jako początek świata. Znacznie później (już po II wojnie światowej) zaczęto używać nazwy „Wielki Wybuch”. Reakcja większości relatywistów na pojawienie się osobliwości w równaniach Einsteina była negatywna. W osobliwościach występowały bowiem „niefizyczne nieskończoności”, co niszczyło podstawową dla fizyki możliwość przewidywania zjawisk przed osobliwością początkową i po osobliwości końcowej. Większość fizyków (wśród nich Einstein) była skłonna sądzić, że osobliwości są artefaktem powstałym na skutek nadmiernych idealizacji, przyjętych w trakcie konstrukcji modelu. Przekonanie Lemaître’a, że odstępstwa od założenia izotropowości wzmacniają a nie osłabiają tendencję do pojawiania się osobliwości, było odosobnione.

Sytuacja zmieniła się drastycznie w latach sześćdziesiątych po udowodnieniu przez Penrose’a, Hawkinga i innych szeregu twierdzeń, zwanych dziś twierdzeniami o osobliwościach. Twierdzenia te były ważnym osiągnięciem w teorii grawitacji; przekonały one fizyków o tym, że osobliwości nie są wynikiem upraszczających założeń, lecz są związane z samą naturą pola grawitacyjnego. Chcąc usunąć osobliwości z modelu, należałoby złamać któryś z warunków twierdzeń o osobliwościach, a to niemal automatycznie wprowadzałoby do modelu elementy trudne do wyjaśnienia z punktu widzenia klasycznej fizyki (np. duże ujemne ciśnienia mogłyby złamać jeden z tzw. warunków energetycznych).

Metoda, za pomocą której udowodniono twierdzenia o osobliwościach (jej wynalezienie było głównie dziełem Penrose’a), oznaczała również wielki postęp w dziedzinie tradycyjnej geometrii różniczkowej. Geometria różniczkowa, jak wiadomo, zajmuje się badaniem rozmaitych struktur (i związków pomiędzy nimi) na różnościach różniczkowych. W osobliwościach wiele z tych struktur załamuje się (np. struktura metryczna),

a w silniejszych typach osobliwości załamuje się sama struktura gładkiej rozmaitości. Czasoprzestrzeń ogólnej teorii względności jest gładką rozmaitością. Nasuwa się więc pytanie: jak można badać osobliwości, w których załamuje się struktura rozmaitości, nie wychodząc poza regularne (tzn. modelowane gładką rozmaitością) obszary czasoprzestrzeni? Nowe metody nie przewyciężyły trudności mieszczącej się w tym pytaniu. Wprawdzie pozwoliły stwierdzić istnienie osobliwości, ale nie stworzyły jakiejś uniwersalnej strategii badania ich natury. Twierdzenia o osobliwościach mają jedynie charakter egzystencjalny (a nie konstrukcyjny).

Oczywiście matematycy pracujący „na zlecenie” ogólnej teorii względności zaproponowali kilka „definicji osobliwości”, które mogłyby ujawnić coś ze struktury osobliwości. Za najbardziej elegancką uznano definicję B. Schmidta [1]. Wydawała się ona naturalna dla teorii grawitacji, ponieważ opierała się na konstrukcji wiązki włóknistej reperów (czyli lokalnych układów odniesienia) nad czasoprzestrzenią z grupą Lorentza jako grupą strukturalną. Przestrzeń tej wiązki dopuszcza metrykę Riemanna (dodatnio określona) i jeżeli nie jest zupełna, to można ją uzupełnić (za pomocą znanej metody ciągów Cauchy’ego). Działanie grupy Lorentza rozszerza się na tak uzupełnioną przestrzeń wiązki (czyli na przestrzeń wiązki z brzegiem Cauchy’ego). Przestrzeń ilorazowa: (uzupełniona przestrzeń wiązki)/(rozszerzone działanie grupy Lorentza) daje czasoprzestrzeń z brzegiem; nazywa się go *b-brzegiem* lub *brzegiem Schmidta*. Osobliwości są „punktami” tego brzegu. Zauważmy: osobliwości nie należą do czasoprzestrzeni, lecz do jej *b-brzegu*; dlatego też słowo „punkt” należy wziąć w cudzysłów – może on mieć bogatą strukturę.

Schmidt poddał próbie swoją definicję na prostych przykładach (takich jak półpłaszczyzna Minkowskiego z brzegiem); funkcjonowała ona poprawnie. Kłopoty pojawiły się dopiero, gdy B. Bosshard [2] i R.A. Johnson [3] wykazali, że osobliwość początkowa i końcowa w zamkniętym modelu Friedmana stanowią jeden (i jedyny!) punkt brzegu Schmidta i, co więcej, topologia czasoprzestrzeni tego modelu ze swoim *b-brzegiem* nie spełnia warunku Hausdorffa. Uznano to za patologię, kompromitującą konstrukcję Schmidta.

Żadna z dość licznych prób ratowania tej definicji osobliwości nie zyskała bardziej powszechnego uznania.

3. Początek świata w kosmologii kwantowej

Po udowodnieniu twierdzeń o osobliwościach w przekonaniach fizyków i kosmologów na jakiś czas utrwaliła się tendencja do uznawania osobliwości za ważny element naukowego obrazu świata. S.W. Hawking i G.F.R. Ellis swoją znaną monografię poświęconą twierdzeniom o osobliwościach [4] zakończyli następującymi zdaniem: „Wyniki otrzymane [w tej książce – M.H.] potwierdzają ideę, że Wszechświat miał początek w skończonej przeszłości. Jednakże właściwy punkt stworzenia, osobliwość, znajduje się poza zasięgiem znanych obecnie praw fizyki” (s. 364). To ostatnie stwierdzenie można rozumieć jako komentarz do tego, że osobliwości nie należą do czasoprzestrzeni, lecz do jej brzegu.

Ażeby usunąć to dotkliwe ograniczenie, należy osobliwość w jakiś sposób wyeliminować. Nie ulega wątpliwości, że część motywacji dla teoretycznych wysiłków podejmowanych w tym kierunku miała charakter filozoficzny, ale część pochodziła z metodologicznie zdrowej tendencji, by zbyt łatwo nie poddawać się trudnościom pojawiającym się w rozwiązywaniu problemów, a także z pobudek estetycznych: jeżeli nie da się podać technicznie zadowolającej i odpowiednio ogólnej definicji osobliwości, to jest to niewątpliwie brzydkim elementem fizycznej teorii. Istnieje jeden sposób wyjścia z sytuacji. Wiele faktów teoretycznych i obserwacyjnych przemawia za tym, że ok. 10 miliardów lat temu Wszechświat znajdował się w supergęstym stanie; istniała epoka, w której gęstość Wszechświata była rzędu $c^5/\hbar G^2 \sim 10^{93}$ g/cm³, a krzywizna czasoprzestrzeni ulegała zmianom w skali długości $(\hbar G/c^3)^{1/2} \sim 10^{-33}$ cm i czasu $(\hbar G/c^5)^{1/2} \sim 10^{-44}$ s. Wielkości te są wyrażone przez fundamentalne stałe fizyki: \hbar – stałą Plancka, c – prędkość światła w próżni, G – stałą grawitacji Newtona. Epokę, którą te wielkości charakteryzują, nazywa się epoką lub progiem Plancka. Można sądzić, że próg Plancka wyznacza „brzeg” czasoprzestrzeni, na którym załamuje się ogólna teoria względności. Poza progiem Plancka ma rządzić kwantowa teo-

ria grawitacji. Ponieważ w tak ekstremalnych warunkach musi być ona również teorią Wszechświata, mówi się także o kosmologii kwantowej. Stopniowo w świadomości fizyków i kosmologów utrwaliło się przekonanie, że przyszła teoria kwantowej grawitacji ostatecznie usunie niewygodną osobliwość. Oczywiście nie może się to stać z naruszeniem twierdzeń o istnieniu osobliwości. I wcale nie musi, wystarczy, że któryś z warunków występujących w tych twierdzeniach zostanie naruszony przez postulaty przyszłej teorii. Zwykle podejrzenie pada na tzw. silny warunek energetyczny. Stany materii, które wydawały się niefizyczne z punktu widzenia fizyki klasycznej, mogą być czymś naturalnym w kwantowym reżimie grawitacyjnym.

W fizyce nie rozstrzyga się zagadnień większością głosów i o tym, czy kwantowa teoria grawitacji ostatecznie usunie osobliwość, czy nie, dowiemy się dopiero, gdy taka teoria powstanie. Obecnie istnieją różne próby poszukiwania kwantowej teorii grawitacji. Autorzy większości z nich usiłują wykazać, że ich propozycja eliminuje osobliwości (choć nie zawsze są na to ścisłe dowody); w innych roboczych modelach sprawa nie jest jasna (zwykle matematyka jest za trudna, by problem szybko rozwiązać); w jeszcze innych osobliwość nadal pozostaje. Do utrwalenia się przekonania o tym, że osobliwości zostaną ostatecznie usunięte, przyczyniły się prace proponujące modele tzw. stwarzania świata z nicości; a także wspomniany wyżej fakt, że struktura osobliwości z takim trudem poddaje się analizie matematycznej (coś, co wymyka się opisowi matematycznemu, najlepiej wyeliminować z modelu).

Znanych jest kilka modeli stwarzania świata z nicości. Wszystkie one zakładają *a priori* istnienie praw fizyki (zwłaszcza fizyki kwantowej) i starają się podać taki mechanizm, dzięki któremu istniałoby różne od zera prawdopodobieństwo wyłączenia się pewnego stanu Wszechświata ze stanu, który w jakimś sensie można by uznać za nicosc. W pierwszych modelach tego rodzaju [5] za nicosc uważano próżnię kwantową (tzn. stan o najmniejszej dopuszczalnej energii). W najbardziej znanym modelu kwantowego stwarzania Wszechświata, zaproponowanym przez Hartlego i Hawkinga [6], dzięki przyjęciu zwartości przestrzeni (co eliminuje konieczność zakładania warunków brzegowych), istotnie można mówić o prawdopo-

dobieństwie zaistnienia Wszechświata w danym stanie, jeżeli w ogóle nie było poprzedniego stanu. Okazuje się, że model ten rzeczywiście eliminuje początkową osobliwość: geometria modelu, aczkolwiek opisana w języku probabilistycznym (charakterystycznym dla fizyki kwantowej) jest całkowicie regularna. Sytuacja modelu Hartlego-Hawkinga jest dosyć typowa dla tego rodzaju prac. Zaproponowany przez nich model z pewnością nie jest jeszcze właściwą teorią kwantowej grawitacji, lecz co najwyżej pewnym jej przybliżeniem. W tym przybliżeniu nie występuje osobliwość, ale nie ma gwarancji, że brak osobliwości nie jest tylko artefaktem przybliżenia.

Znana jest jeszcze inna możliwość wyeliminowania początku wszechświata – w pewnym sensie przez rozmnażanie początków. A. Linde [7] zaproponował scenariusz, w którym wszechświat macierzysty, poprzez proces analogiczny do kwantowej kreacji, tworzy wszechświat-dziecko, który z kolei może wydać z siebie kolejne wszechświaty. Poza momentem narodzin poszczególne wszechświaty nie mają ze sobą żadnego fizycznego kontaktu. Chociaż każdy ze światów ma dobrze określony początek, to cały ten „wszechświat wszechświatów” jest wieczny. Kolejne odradzania się gwarantują mu nieśmiertelność. Scenariusz ten nazywa się niekiedy kosmologią chaotyczną i jest świadectwem tego, że niektórzy kosmologowie są gotowi poświęcić sprawdzalność modelu na rzecz możliwości zlikwidowania początku.

Myślę, że mieszanie emocji filozoficznych z zagadnieniami naukowymi rzadko przynosi korzyść nauce. Prawdą jest, że nie mamy dziś pewności, czy kwantowa kosmologia zlikwiduje osobliwości, czy nie (być może ukaże jakąś trzecią możliwość?) i dlatego warto spojrzeć na problem klasycznej osobliwości jako na problem matematyczny. Istnieją poważne poszlaki, że bliższe zbadanie klasycznych osobliwości może nam podsunąć wskazówki, które okażą się pożyteczne w poszukiwaniach kwantowej teorii grawitacji [8].

4. Osobliwości z matematycznego punktu widzenia

Jak widzieliśmy, główny problem w dotarciu do natury osobliwości polega na tym, że wszystkie (standardowe) modele relatywistyczne pracują na gładkiej rozmaitości, a w osobliwościach roz-

maitościowa struktura czasoprzestrzeni ulega załamaniu. Z matematycznego punktu widzenia do modelowania czasoprzestrzeni należy więc używać jakiegoś uogólnienia pojęcia rozmaitości. Idąc tą drogą, ciekawe wyniki udało się uzyskać wykorzystując tzw. przestrzenie strukturalne (structured spaces) [9]. Jak wiadomo, gładką rozmaitość można zdefiniować albo za pomocą map i atlasu (ta definicja jest najczęściej stosowana w podręcznikach geometrii różniczkowej), albo – równoważnie – za pomocą rodziny funkcji na (niepustym) zbiorze M . Gdy nałożymy na tę rodzinę pewne warunki, staje się ona rodziną gładkich funkcji na rozmaitości M . Jeżeli zażądamy, by rodzina ta spełniała znacznie słabsze postulaty (odpowiadające snopowi algebr funkcyjnych na zbiorze M), otrzymujemy przestrzeń strukturalną. Okazuje się, że czasoprzestrzeń z osobliwościami nie jest rozmaitością, ale jest przestrzenią strukturalną i jeżeli osobliwości są słabszego typu (np. kwaziregularne), to obiekt taki (czasoprzestrzeń z osobliwościami) da się w pełni zbadać. Jeżeli natomiast osobliwości są takie jak w zamkniętym modelu Friedmana, odpowiednia przestrzeń strukturalna trywializuje się (snop algebr składa się tylko z funkcji stałych), co wprawdzie w interesujący sposób wyjaśnia źródło kłopotów z takimi osobliwościami (np. dlaczego osobliwość początkowa i końcowa w zamkniętym modelu Friedmana są jednym punktem b-brzegu), ale same osobliwości pozostają praktycznie poza możliwością badania [9,10].

Potrzeba więc jeszcze silniejszego uogólnienia matematycznych metod. Od jakiegoś czasu jest rzeczą wiadomą matematykom, że do badania przestrzeni osobliwych należy używać tzw. geometrii nieprzemiennej [11,12]. I tym razem zastosowanie tej matematycznej metody do badania czasoprzestrzeni z (silnymi) osobliwościami okazało się owocne [13,14]. Co więcej, standardowa metoda konstruowania geometrii nieprzemiennej, odpowiadającej czasoprzestrzeni z osobliwościami, okazała się bardzo bliska konstrukcji Schmidta. Konstrukcję zaczyna się także od wiązki reperów nad czasoprzestrzenią (ale traktuje się ją jako grupoid); nad tą wiązką buduje się inną wiązkę (tzw. wiązkę półgęstości), której cięcia tworzą nieprzemienne algebrę \mathcal{A} , kodującą w sobie geometryczne własności czasoprzestrzeni z osobliwościami.

Algebra \mathcal{A} jest abstrakcyjną strukturą, trudną do manipulowania w praktyce. Należy więc poszukać dogodnej jej reprezentacji. Reprezentacja taka istnieje, a mianowicie reprezentacja algebry \mathcal{A} w przestrzeni Hilberta H , przy czym przestrzeń H jest w naturalny sposób związana z przestrzenią funkcji (całkowalnych z kwadratem, zdefiniowanych na wiązce reperów, ściślej: na grupoidzie reperów) nad czasoprzestrzenią. Reprezentacja ta jest dana przez odwzorowanie

$$\mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}(H),$$

gdzie $\mathcal{B}(H)$ oznacza rodzinę (ograniczonych) operatorów działających na przestrzeni Hilberta H . Bardzo interesującą własnością geometrii nieprzemiennej jest to, że nie ma w nich pojęć lokalnych, takich jak pojęcie punktu lub jego otoczenia. Sensowne natomiast jest pojęcie stanu (odpowiadają mu unormowane, dodatnie funkcjonały na algebrze \mathcal{A}). W omawianym modelu każdy stan wszechświata i każda osobliwość jest reprezentowana przez klasę (równoważności) reprezentacji algebry \mathcal{A} na przestrzeni Hilberta H . Metoda ta nie czyni żadnej różnicy między regularnymi stanami wszechświata i osobliwościami (nawet najmocniejszymi). Osobliwości początkowej i końcowej w zamkniętym modelu Friedmana odpowiadają dwie różne klasy reprezentacji algebr \mathcal{A} .

Problem został więc w zasadzie rozwiązany. W zasadzie – ponieważ od wytropienia właściwej metody i uzyskania pierwszych, dość ogólnych, wyników do zamienienia jej w rachunkowe przepisy droga jest zwykle długa. Jak często bywa, rozwiązanie problemu ukazuje dalsze możliwości. Bo przecież ograniczone operatory działające na przestrzeni Hilberta to typowo kwantowa struktura. Wygląda to tak, jakby osobliwość początkowa (i końcowa) wiedziała coś o kwantowej naturze grawitacji. Jeżeli potraktować dosłownie lekcję z przedstawionej metody, to w kwantowym reżimie grawitacji nie ma różnicy pomiędzy regularnymi punktami czasoprzestrzeni i osobliwościami. Czy osobliwości nie ma, czy wszystko jest w jakimś sensie osobliwe – to wydaje się zależeć od punktu widzenia: poniżej progu Plancka wszystko jest po prostu opisywane geometrią nieprzemiennej, a geometria ta nie czyni żadnej różnicy pomiędzy osobliwościami i nie-osobliwościami.

Idąc za tą sugestią, udało się skonstruować matematycznie spójny model kwantowej grawitacji [15]. Kwantowy reżim grawitacyjny jest w tym modelu opisywany za pomocą nieprzemiennej geometrii. W erze „przedplanckowskiej” nie ma pojęć lokalnych, a więc nie ma ani pojęcia punktu przestrzeni, ani pojęcia chwili czasu. Nie ma także różnicy między stanami osobliwymi a nieosobliwymi. Przejście przez próg Plancka polega zasadniczo na „redukcji” nieprzemiennej algebry \mathcal{A} do jej centrum (czyli do jej przemiennej podalgebry). Wyłączając się wówczas przestrzeń i czas w ich zwyczajnym rozumieniu. I właśnie w trakcie tego procesu formują się „klasyczne osobliwości”. Można zatem powiedzieć, że klasyczne osobliwości w naszym obrazie świata są następstwem tego, iż kiedyś z reżimu kwantowo-grawitacyjnego wyłoniła się fizyka makroskopowa.

Dokładniejsze przedstawienie tego modelu kwantowej grawitacji wykracza poza ramy niniejszego artykułu (zainteresowany Czytelnik może sięgnąć do oryginalnej publikacji [15], ewentualnie do [16,17]) i, być może, byłoby przedwczesne. Niech najpierw wypowiedzą się specjaliści.

Literatura

- [1] B.G. Schmidt, *Gen. Relativ. Gravit.* **1**, 269 (1971).
- [2] B. Bosshard, *Commun. Math. Phys.* **46**, 263 (1976).
- [3] R.A. Johnson, *J. Math. Phys.* **18**, 898 (1977).
- [4] S.W. Hawking, G.F.R. Ellis, *Large Scale Structure of Space-Time* (Cambridge University Press, 1973).
- [5] E.P. Tryon, *Nature* **246**, 396 (1973).
- [6] J.B. Hartle, S.W. Hawking, *Phys. Rev. D* **28**, 2960 (1983).
- [7] A. Linde, *Fizika elementarnykh chastits i inflacyonaya kosmologia* (Nauka, Moskwa 1990).
- [8] M. Heller, *Eur. J. Phys.* **14**, 7 (1993).
- [9] M. Heller, W. Sasin, *J. Math. Phys.* **36**, 3644 (1995).
- [10] M. Heller, W. Sasin, *Gen. Relativ. Gravit.* **26**, 797 (1994).
- [11] A. Connes, *Noncommutative Geometry* (Academic Press, San Diego-New York 1994).
- [12] J. Madore, *An Introduction to Noncommutative Differential Geometry and Its Physical Applications* (Cambridge University Press, 1995).
- [13] M. Heller, W. Sasin, *J. Math. Phys.* **37**, 5665 (1996).
- [14] M. Heller, W. Sasin, *Banach Center Publications* **41**, 153 (1997).
- [15] M. Heller, W. Sasin, D. Lambert, *J. Math. Phys.* **38**, 5840 (1997).
- [16] M. Heller, W. Sasin, „Emergence of Time”, preprint gr/qc9711051.
- [17] M. Heller, W. Sasin, „Towards Noncommutative Quantization of Gravity”, preprint gr/qc9712009.

Problem neutrino słonecznych*

Rudolf L. Mössbauer

Technische Universität München, Fachbereich Physik, Garching, Niemcy

The solar neutrino problem

Abstract: Hardly anything is known about the properties of neutrinos, in spite of the fact that they had been introduced into physics some 67 years ago. The Sun is a particular strong source of neutrinos, and for this reason has been used for pertinent experiments. At first such particles were studied at higher energies, which provide larger cross sections. It now became possible by employing gallium to study neutrinos also at the lower energies, which are the prime source for the solar energy. It is in this context, that the GALLEX project has been carried out by an international collaboration at the Gran Sasso Laboratory in Italy. The article describes the theoretical and experimental features of this project.

1. Wstęp

Mimo zaobserwowania licznych cząstek złożonych mamy dzisiaj raczej prosty obraz cząstek elementarnych składający się z sześciu kwarków (u, d, c, s, b, t) i sześciu leptonów (ν_e , e^- , ν_μ , μ^- , ν_τ , τ^-) a także ze stowarzyszonych z nimi antycząstek. Neutrino zatem stanowią 25% obecnie znanych cząstek elementarnych. Ograniczymy ten wykład do energii jądrowych (tzn. do energii neutrino poniżej 20 MeV – J.W.), ponieważ większość naturalnych procesów z udziałem neutrino zachodzi przy tych energiach. Wyjątki stanowią procesy, które zaszły tuż po stworzeniu naszego Wszechświata na drodze Wielkiego Wybuchu, głównie błyski neutrino oraz inne procesy, które próbuje się (choć przy znacznie niższych energiach) wytworzyć w akceleratorach przyspieszających cząstki do wysokich energiach. Takie pro-

cesy o wyższej energii będą wyłączone z tego wykładu. Ponieważ neutrino podlegają tylko słabemu (i grawitacyjnemu) oddziaływaniu, wielkie gwiazdy, takie jak Słońce, są praktycznie biorąc dla nich przezroczyste. W rezultacie neutrino bardzo trudno jest zaobserwować.

Poniżej zajmiemy się przede wszystkim pomiarami neutrino słonecznych mającymi na celu wyznaczenie mas neutrino. Zanim przedstawimy odpowiednie badania doświadczalne, zajmiemy się źródłami neutrino nadających się do takich eksperymentów oraz sposobami detekcji tych cząstek.

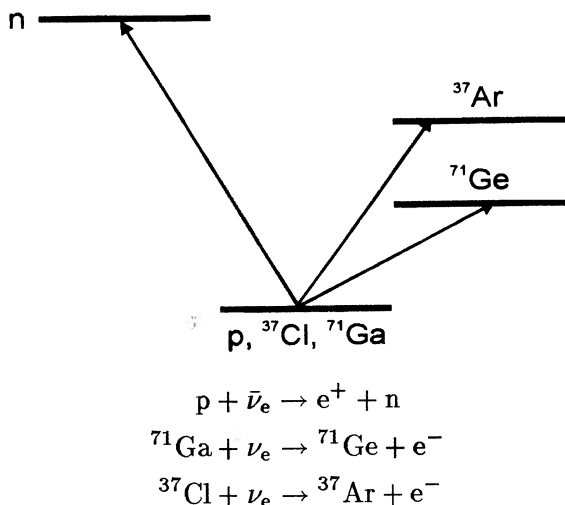
Co się tyczy źródeł neutrino, to powinniśmy podkreślić, że zwykle źródła promieniotwórcze o natężeniach nawet rzędu kilku kiurów są o wiele za słabe do badań neutrino. Tabela 1 ukazuje najważniejsze źródła nadające się do pomiarów przy energiach jądrowych.

Tabela 1. Źródła neutrino nadające się do eksperymentów przy energiach jądrowych.

| | |
|--|---|
| 1) Rozszczepienie jądrowe (reaktory jądrowe) | Reakcja podstawowa: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ |
| 2) Synteza jądrowa (Słońce) | Reakcja podstawowa: $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ |
| 3) Wybuchy supernowych | Wytwarzanie $\nu_e \bar{\nu}_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu \nu_\tau \bar{\nu}_\tau$ |

*Wykład wygłoszony na XXXIV Zjeździe Fizyków Polskich, Katowice, 15–18 września 1997 r.

Do detekcji neutrin elektronowych można zastosować pomiar odwrotnego rozpadu β , jak pokazano na rys. 1, a także reakcję z prądami neutralnymi lub rozproszenie elastyczne neutrin na elektronach. Do detekcji można także użyć promieniowania Czerenkowa wytworzonego przez rozproszone elektrony.



Rys. 1. Przykłady detekcji neutrin elektronowych za pomocą odwrotnego rozpadu β (procesy z prądami naładowanymi).

2. Badanie mas neutrin

Przytoczymy najpierw granice dla mas neutrin otrzymane w bezpośrednich doświadczeniach

$$\begin{aligned}
 m(\nu_e) &< 4.35 \text{ eV}/c^2 \quad [1]; \\
 m(\nu_\mu) &< 0.16 \text{ eV}/c^2 \quad [2]; \\
 m(\nu_\tau) &< 23.8 \text{ eV}/c^2 \quad [3].
 \end{aligned}$$

Takie bezpośrednio uzyskane ograniczenie na masę neutrin elektronowych może być poprawione co najwyżej o czynnik dwa, podczas gdy rzeczywista masa jest przypuszczalnie o wiele rzędów wielkości mniejsza. Podobne uwagi dotyczą także innych typów neutrin. Inną metodą może być obserwacja oscylacji neutrin, która w rzeczywistości jest prawdopodobnie jedynym sposobem otrzymania informacji na temat mas neutrin. Takie oscylacje powinny występować, jeżeli przynajmniej jeden z parametrów masy neutrin, $\Delta m_{ij}^2 = m_j^2 - m_i^2$, różni się od zera i jeżeli w dodatku stany własne masy neutrin (odpowiedzialne

za propagację w próżni) oraz stany własne oddziaływań słabych (odpowiedzialne za rozpad na drodze oddziaływań słabych) byłyby różne. Związek między nimi powinien być liniowy, jak tego wymagają podstawowe prawa mechaniki kwantowej. Jest on przedstawiony na rys. 2, gdzie ograniczyliśmy się do przybliżenia dwuneutrinowego, w którym występuje tylko jeden parametr mieszania.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

stany własne oddziaływań słabych macierz mieszania stany własne masy

Rys. 2. Liniowa zależność między stanami własnymi oddziaływań słabych a stanami własnymi energii (masy) neutrin. W przypadku przybliżenia dwuneutrinowego otrzymuje się tylko jeden kąt mieszania. W przypadku opisu trójneutrinowego otrzymuje się cztery parametry mieszania.

Mamy w tym przybliżeniu

$$\begin{aligned}
 \langle \nu_e(0) | &= \\
 &= \cos \theta \nu_1(0) + \sin \theta \nu_2(0) = \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta, \\
 \langle \nu_e(t) | &= \\
 &= \nu_1 \exp(-iE_1 t) \cos \theta + \nu_2 \exp(-iE_2 t) \sin \theta, \\
 \langle \nu_\mu(t) | &= \\
 &= -\nu_1 \exp(-iE_1 t) \sin \theta + \nu_2 \exp(-iE_2 t) \cos \theta,
 \end{aligned}$$

gdzie przyjęto normalizację $\langle \nu_i | \nu_j \rangle = \delta_{ij}$.

Elementy macierzowe przejścia $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ wyrażają się przez

$$\begin{aligned}
 \langle \nu_\mu(t) | \nu_e(0) \rangle &= \\
 &= \frac{1}{2} \sin 2\theta [\exp(-iE_2 t) - \exp(-iE_1 t)],
 \end{aligned}$$

prawdopodobieństwo oscylacji zaś dane jest wzorem

$$\begin{aligned}
 P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) &= P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu) \\
 &= |\langle \nu_\mu(t) | \nu_e(0) \rangle|^2 \\
 &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta [1 - \cos(E_2 t - E_1 t)] \\
 &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta [1 - \cos(\Delta m^2 / 2p_\nu)] \\
 &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \sin^2 \left[\frac{1.27 \Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E_\nu [\text{MeV}]} \right].
 \end{aligned}$$

Prawdopodobieństwo niewystąpienia oscylacji w modelu dwuneutrinowym wyraża się wzorem

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu).$$

Należy zauważyć, że małe wartości Δm^2 wymagają większych wartości odległości L , aby utrzymać (dla sensownego pomiaru) argument funkcji trygonometrycznej poniżej jednego okresu. Należy także wspomnieć, że większe wartości energii neutrin E_ν mogą być skompensowane przez większe wartości L , która to procedura będzie użyta w doświadczeniach wykorzystujących duże odległości. Taka sytuacja pozwoliłaby na użycie wysokich energii, umożliwiając obserwację innych typów neutrin. Takie doświadczenia mogłyby zapewnić wysoką czułość na kąty mieszania i równocześnie wysoką czułość na małe parametry masy. Inna możliwość to detekcja neutrin słonecznych zapewniająca wysoką czułość na małe parametry masy i równocześnie wysoką czułość także na kąty mieszania poprzez tzw. efekt MSW (Michejewa-Smirnowa-Wolfensteina – J.W.), czyli konwersję rezonansową neutrin elektronowych w inne typy neutrin, zachodzącą wewnątrz Słońca.

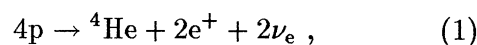
Dla różnic energii pojawiających się w oscylacjach neutrin mamy wzór

$$\begin{aligned} E_2 - E_1 &= \sqrt{p_2^2 + m_2^2} - \sqrt{p_1^2 + m_1^2} \\ &\approx \sqrt{p_\nu^2 + m_2^2} - \sqrt{p_\nu^2 + m_1^2} \\ &\approx (m_2^2 - m_1^2)/2p \approx \Delta m^2/2E_\nu, \end{aligned}$$

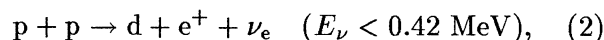
który definiuje parametr mas Δm^2 i jednocześnie wyjaśnia, dlaczego w związku z oscylacjami neutrin zwykle mówimy raczej o stanach własnych masy niż o stanach własnych energii.

Słońce, gwiazda ciągu głównego, jest źródłem fotonów i neutrin, przy czym światłość neutrin równa jest ok. 2.3% światłości fotonów. Fotony potrzebują kilkuset tysięcy lat, aby przybyć na powierzchnię Słońca. Ulegają one licznym procesom rozproszenia wzdłuż ich drogi wewnątrz Słońca i na skutek tego nie mają pamięci o swoim pochodzeniu. W przeciwieństwie do nich neutrina przybywają na Ziemię w 8.3 minuty po ich powstaniu

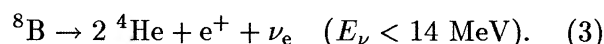
wewnątrz Słońca. Ze względu na to, że neutrina oddziałują tylko słabo, co znaczy, że Słońce jest dla nich praktycznie biorąc przezroczyste, cząstki te dostarczają z grubsza natychmiastowego obrotu reakcji z udziałem neutrin zachodzących wewnątrz Słońca. Słońce jest jedyną gwiazdą znajdującą się dostatecznie blisko Ziemi, aby pozwolić na obserwację gwiazdowych neutrin, które są wytwarzane podczas słonecznych reakcji syntezy zachodzących wewnątrz jądra Słońca o promieniu równym 25% promienia Słońca. Te słoneczne reakcje syntezy można wyrazić jako sumaryczną reakcję



uwalniającą energię 26.1 MeV wraz z wytworzeniem dwóch neutrin. Na tę sumaryczną reakcję składa się wiele procesów szczegółowych. Najważniejszym z nich jest reakcja wstępna¹



która jest odpowiedzialna za nasze istnienie, ponieważ Słońce świeci w ciągu tak długiego okresu tylko dlatego, że za wstępną reakcję syntezy słonecznej odpowiada oddziaływanie słabe. Inny doświadczalnie ważny proces jest wyrażony poprzez reakcję²



Chociaż reakcja ta jest kompletnie nieinteresująca, gdy chodzi o produkcję energii (światłość fotonową) w Słońcu, zyskała ona zasadnicze znaczenie z punktu widzenia pomiaru neutrin słonecznych, ponieważ przekrój czynny na oddziaływanie neutrin rośnie w pobliżu progu energetycznego proporcjonalnie do E_ν^2 . Pionier w dziedzinie badań neutrin słonecznych, Ray Davis, wykonał swoje pierwsze obserwacje neutrin słonecznych poprzez pomiar neutrin pochodzących z reakcji (3), które mają względnie duże energie. W pomiarach Davisa próg energetyczny wynoszący około 0.8 MeV osiągnięto za pomocą reakcji z chlorem, pokazanej na rys. 1, przy zastosowaniu detektora zawierającego około 630 t C_2Cl_4 , który dzięki zawartości 10^{29} jąder rejestrował z grubsza jeden akt absorpcji neutrina słonecznego na dwa dni, co stanowi drastyczny przykład znaczenia określenia „słabe oddziaływanie”.

¹ Neutrina powstające w tej reakcji nazywamy neutrinami pp (przyp. Red.).

² Neutrina z tej reakcji nazywamy neutrinami ${}^8\text{B}$ (przyp. Red.).

Tabela 2. Wyniki pomiarów porównane z przewidywaniami uwzględniającymi opis Słońca za pomocą MSS. Tablica wyszczególnia doświadczenia R. Davisa (kopalnia Homestake [6]), grupy japońskiej (Kamiokande [7]), współpracy GALLEX [8] i współpracy SAGE [9] (rosyjsko-amerykańska współpraca działająca w górach Kaukazu).

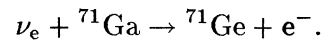
| Kopalnia Homestake | Kamiokande | GALLEX | SAGE |
|--------------------|------------|------------|------------|
| (32 ± 6)% | (49 ± 18)% | (53 ± 12)% | (56 ± 29)% |

Szczególnie interesujące są niskoenergetyczne *neutrína* pp z reakcji (2). Ich detekcja (porównaj rys. 1) wymaga jednak szczególnie drogiego ⁷¹Ga, służącego do efektywnej absorpcji. Zainteresowanie tym szczególnym rodzajem absorpcji wynika z faktu, że reakcja pp jest odpowiedzialna za większość wytwarzanej energii słonecznej, jak wynika z pomiarów dobrze znanej świetlności słonecznej. To właśnie z tego powodu reakcja ta jest tak dobrze znana, w przeciwieństwie do rzadko spotykanej reakcji ⁸B zachodzącej z o wiele mniej zrozumiałym przekrojem czynnym. Odpowiednie doświadczenie, znane jako GALLEX (GALLium EXperiment), zostało tymczasem przeprowadzone w podziemnym laboratorium *neutrínowym* Gran Sasso, odległym od Rzymu o 180 km w kierunku północno-wschodnim. Przypadki wywoływane przez promienie kosmiczne, które są nieodróżnialne od przypadków wywoływanych przez *neutrína* słoneczne, wymagają, aby takie obserwacje były przeprowadzane pod ziemią. Rysunek 3 ukazuje widmo *neutrín* emitowane przez Słońce zgodnie ze Standardowym Modelem Słońca. Rysunek ten odzwierciedla

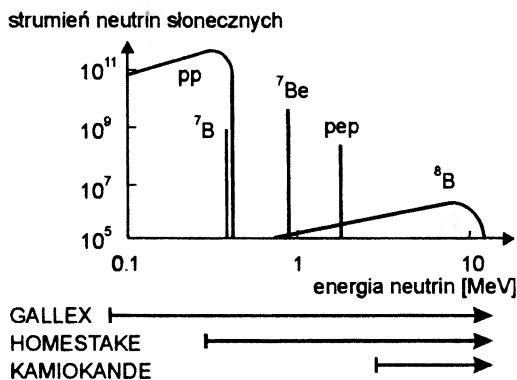
ukazuje widmo pochodzące od podstawowego cyklu wodorowego, zasadniczo odpowiedzialnego za świetlności słoneczną.

Wszystkie pomiary *neutrín* słonecznych, zebrane w tab. 2, wykazały deficyt *neutrín* słonecznych, niezależnie od badanego przedziału energii. Pozostaje do wyjaśnienia, czy ten deficyt wynika z przyczyn astrofizycznych (odstępstwa od Standardowego Modelu Słońca), czy też z przyczyn, które można wyjaśnić w kategoriach fizyki jądrowej (występowanie oscylacji *neutrín* słonecznych, przypuszczalnie we wnętrzu Słońca, dzięki efektowi MSW).

Instytuty członkowskie współpracy GALLEX są podane w tab. 3. Reakcja stosowana w eksperymencie GALLEX w celu detekcji *neutrín* słonecznych jest następująca:



Neutrína o energii z przedziału $0.23 \text{ MeV} \leq E_\nu \leq 0.42 \text{ MeV}$ są wykrywane przy zastosowaniu absorbenta – 30.3 t galu znajdującego się w wysoko kwaśnym roztworze GaCl₃, zawierającym około 10²⁹ jąder ⁷¹Ga. Z grubsza jeden atom ⁷¹Ge jest wytwarzany dziennie przez *neutrína* słoneczne. Wydobywanie jąder ⁷¹Ge odbywa się co 3 tygodnie, przedtem jednak dodaje się do roztworu 1 mg nieaktywnego nośnika – germanu, ekstrakcję zaś osiąga się przez przedmuchiwanie zbiornika 2000 m³ gazowego azotu, co na ogół prowadzi do usunięcia 99% nośnika. Lotny GeCl₄ odzyskuje się przez naprzemienne przemywanie gazu wodą i zakwaszanie go w trzech kolejnych etapach. Szczegóły dotyczące procedury ekstrakcji są dostępne w literaturze [4]. Konwersja chemiczna do GeH₄ pozwala na użycie tego materiału jako gazu w liczniku proporcjonalnym o bardzo niskim tle i o objętości 1 cm³, który mierzy reakcję odwrotną ⁷¹Ge → ⁷¹Ga, służącą jako wskaźnik padającego strumienia *neutrín* słonecznych. Podjęto specjalne środki zaradcze w celu zredukowania i mierze-



Rys. 3. Widmo *neutrín* emitowanych przez Słońce.

rozmaite reakcje wnoszące wkład do energii całkowitej wyzwalanej przez Słońce. W szczególności

nia promieniowania tła. Szczególny problem powoduje obecność w zbiorniku ^{68}Ge , którego czas połowicznego rozpadu równy jest 271 dni, na skutek zaś jego rozpadu poprzez wychwyty elektronu było trudno odróżnić impulsy stąd pochodzące od prawdziwych impulsów pochodzących od ^{71}Ge . Izotop ^{68}Ge pojawił się na skutek reakcji $^{68}\text{Ga}(p,n)^{68}\text{Ge}$, zachodzącej na powierzchni Ziemi pod wpływem protonów z promieniowania kosmicznego. Ocenia się, że w zbiorniku powstało 2×10^7 atomów ^{68}Ge . Zastosowano procedury usuwające ^{68}Ge , powodujące tysiąckrotne zmniejszenie jego zawartości. Problem został ostatecznie rozwiązany przez podgrzewanie całego roztworu w zbiorniku do 42°C , co zredukowało liczbę jąder ^{68}Ge do bardzo niskiego poziomu tła, z którym mogły sobie poradzić liczniki proporcjonalne stosowane w rzeczywistych pomiarach. Obecnie problem całkowicie zniknął. Weryfikacja całej procedury pomiarowej była dokonywana przy użyciu sztucznego źródła neutrin ^{51}Cr o natężeniu ok. 2 MCi [5].

Tabela 3. Lista instytutów członkowskich współpracy GALLEX.

| Laboratorium | Miasto | Kraj |
|--------------|----------------|---------|
| MPI | Heidelberg | Niemcy |
| KFK | Karlsruhe | Niemcy |
| TU | Monachium | Niemcy |
| INFN | Mediolan | Włochy |
| INFN | Rzym | Włochy |
| CEN | Saclay | Francja |
| CEN | Grenoble | Francja |
| U | Nicea | Francja |
| WIS | Rehovoth | Izrael |
| BNL | Long Island/NY | USA |

3. Przyszłe eksperymenty

3.1. SUPERKAMIOKANDE

Fizycy japońscy zbudowali detektor kilkakrotnie większy od istniejącego urządzenia Kamiokande w celu powiększenia o następny rząd wielkości istniejącej granicy na czas życia protonu. Dzięki obniżeniu energii progowej do 5 MeV, eksperyment ten przyspieszy także pomiary czerenkowowskie neutrin słonecznych pochodzących z rozpadu ^8B . Wstępne pomiary są już w toku.

3.2. SNO

Sudbury Neutrino Observatory (Obserwatorium Neutrin w Sudbury): To wspólne amerykańsko-kanadyjskie przedsięwzięcie wykorzystuje ciężką wodę i z uwagi na to powinno się również nadawać do pomiaru reakcji z prądami neutralnymi neutrin słonecznych według schematu $\nu_x + d \rightarrow n + p + \nu_x$. Ta reakcja jest niezależna od oscylacji neutrin wewnątrz jądra słonecznego i dlatego powinna odpowiedzieć na pytanie, ile neutrin wylatuje ze Słońca. Odpowiedź na to pytanie powinna także rozstrzygnąć problem, czy obserwowany deficyt neutrin słonecznych jest, czy też nie jest związany z odstępstwami od Standardowego Modelu Słońca.

3.3. BOREXINO

Eksperyment ten jest obecnie instalowany w Podziemnym Laboratorium Neutrinowym w Gran Sasso. Ma on na celu rozstrzygnięcie problemu brakującego strumienia słonecznych neutrin z reakcji ^7Be . Ponieważ obserwowany strumień z reakcji ^8B musi najpierw przejść przez reakcję ^7Be , której wydaje się brakować, można przypuszczać, że prawie monochromatyczne neutrina pochodzące z reakcji ^7Be znikają na skutek oscylacji. Eksperyment ma na celu poszukiwanie tych brakujących neutrin w sposób ilościowy.

Tłumaczył Jerzy Warczewski
Instytut Fizyki UŚI
Katowice

Literatura

- [1] E. Belevsev i in., *Phys. Lett.* **B350**, 263 (1995).
- [2] K. Assamagan i in., *Phys. Lett.* **B335**, 231 (1994); *Phys. Rev. D* **53**, 6065 (1996).
- [3] D. Buskulic i in. (ALEPH Collab.), *Phys. Lett.* **B349**, 585 (1995).
- [4] P. Anselmann i in. (GALLEX Collab.), *Phys. Lett.* **B285**, 376 (1992).
- [5] P. Anselmann i in. (GALLEX Collab.), *Phys. Lett.* **B242**, 440 (1995).
- [6] B. Cleveland i in. (HOMESTAKE Collab.), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **38**, 47 (1995).
- [7] Y. Suzuki i in. (KAMIOKA Collab.), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **35**, 407 (1994).
- [8] W. Hampel i in. (GALLEX Collab.), *Phys. Lett.* **B388**, 384 (1996).
- [9] J.N. Abdurashikov i in. (SAGE Collab.), *Phys. Lett.* **B328**, 234 (1994).

Planety poza Układem Słonecznym*

William Cochran

McDonald Observatory, University of Texas at Austin, USA

Extrasolar planets

Abstract: The discovery of planets outside the solar system has revolutionized our understanding of the origins of planetary systems and rekindled speculation about the possibility of life elsewhere in the universe.

1. Wstęp

Czy jesteśmy sami we Wszechświecie? Pytanie to od tysięcy lat przyciąga uwagę ludzkości. Nie ma nic nadzwyczajnego w samym Słońcu, co mogłoby sugerować, że Układ Słoneczny jest czymś wyjątkowym. Wręcz przeciwnie – zarówno w układzie Drogi Mlecznej jak i innych galaktykach znajdują się miliardy gwiazd podobnych do Słońca. Czy którekolwiek z tych gwiazd posiadają układ planetarny?

Astrofizycy-teoretycy opracowali szczegółowy model opisujący powstawanie takich gwiazd jak Słońce. W modelu tym formowanie się planet jest naturalnym i prawie koniecznym wynikiem procesu powstawania gwiazd. Jeśli Słońce posiada tak złożony i fascynujący układ planetarny, że co najmniej na jednej z planet mogło powstać życie, wówczas różnorodność planet wokół innych gwiazd musi być zaiste oszałamiająca.

Odkrycie w ostatnich latach szeregu planet wokół innych gwiazd (patrz tabela) potwierdziło z pewnością te oczekiwania. Niezależnie od sposobu obliczania znamy obecnie więcej planet poza Układem Słonecznym niż w nim samym. Jednak żadna z nich nawet nie przypomina planety, na której żyjemy, a niektóre z nich mogą być raczej wygasłymi gwiazdami niż planetami.

2. Narodziny gwiazdy

Przyjmujemy, że planety Układu Słonecznego powstały ok. 4.5 mld lat temu z dysku pyłowo-gazowego otaczającego nowo utworzone Słońce. Proces formowania gwiazd rozpoczyna się, gdy gęsty obszar gazowo-pyłowy w obłoku materii międzygwiazdowej staje się grawitacyjnie niestabilny. Obłok zaczyna się wówczas powoli, kwazistatycznie zapadać, ponieważ na skutek ochładzania i dyfuzji pola magnetycznego na zewnątrz stopniowo zanikają mechanizmy magnetyczne i dynamiczne (turbulencja wewnętrzna) utrzymujące go w równowadze. Jądro obłoku kondensuje się, tworząc protogwiazdę. Jeśli moment pędu jest wystarczająco duży, zapadający się obłok może podzielić się na dwie lub więcej mniejszych części, co prowadzi do powstania podwójnego lub wielokrotnego układu gwiazd.

Pozostały gaz i pył nadal przemieszczają się do wewnątrz. Materiał ten musi zachować pierwotny moment pędu obłoku i dlatego tworzy dysk wokół protogwiazdy. Każdy atom gazu lub ziarno pyłu obiega protogwiazdę zgodnie z prawami Keplera, więc wewnętrzne części dysku wirują szybciej niż obszary zewnętrzne.

Proces formowania planet zachodzi wewnątrz wirującego dysku. Ziarna pyłu zderzają się i zle-

* Artykuł, opublikowany w *Physics World* 10, nr 7, 31 (1997), został przetłumaczony za zgodą Autora i Wydawcy [Translated with permission. Copyright ©1997 by IOP Publishing Ltd.] (przyp. Red.).

piają, tworząc coraz większe cząstki. W ciągu milionów lat na skutek zderzeń tworzą się ostatecznie kamienne ciała o średnicy kilku kilometrów zwane „planetozymalami”. W tym momencie przyciąganie grawitacyjne planetozymali zaczyna przeważać nad losowym rozkładem ich prędkości, zwiększając tempo wzrostu do momentu, gdy szybko powstaną jądra planet o średnicy ok. tysiąca kilometrów. Podczas dalszej ewolucji dysku, jądra planet w wewnętrznej części dysku zderzają się ze sobą, zlepiają i powiększają, tworząc ziemopodobne planety, takie jak Ziemia i Mars.

W zewnętrznej części dysku, gdzie dostępna jest większa ilość materiału, jądra osiągają większą masę. Po osiągnięciu masy ok. 10-krotnie większej od masy Ziemi pole grawitacyjne jądra staje się wystarczająco silne i wychwytuje gazowy wodór oraz hel z dysku, tworząc ogromną planetę gazową, jak Jowisz lub Saturn. W tej fazie szybkiego rozwoju większość materiału w pobliżu orbity powstającej planety zostaje usunięta i powstają przerwy w dysku, hamujące dalszy rozwój planet. Tak więc sądzimy, że planety rozbudowują się ze swoich jąder na zewnątrz poprzez proces akrecji w dysku wokółgwiazdowym.

Często trudno jest jednak odróżnić prawdziwą planetę od obiektu zwanego brązowym karłem. Brązowe karły powstają w taki sam sposób jak gwiazdy podobne do Słońca, lecz z powodu za małej masy w ich jądrach nie powstaje wysoka temperatura i ciśnienie wystarczające do zapoczątkowania termojądrowych reakcji syntezy wodoru w hel. Zwykły układ złożony z gwiazdy i brązowego karła może powstać, jeśli zapadający się obłok materii międzygwiazdowej rozpadnie się na dwie części. Graniczną wartością masy rozdzielającą gwiazdy od brązowych karłów jest 0.07 masy Słońca, czyli 70 mas Jowisza.

Minimalna masa brązowego karła nie jest dokładnie określona, lecz prawdopodobnie zawarta jest w przedziale od 3 do 7 mas Jowisza. Oznacza to, że cięższe planety mogą mieć taką samą masę jak lżejsze brązowe karły. Ponadto brązowe karły i planety o takiej samej masie mają podobne promienie, a więc podobną budowę i atmosferę. Główna różnica tkwi w procesie formowania i stąd w budowie najgłębszych warstw. Struktura ta jest niestety trudna do wyznaczenia z obserwacji astronomicznych.

W rezultacie zawsze istnieje pewna dwuznaczność związana z charakterem obiektu odkrytego wokół jakiejś gwiazdy, zwłaszcza w przypadku obiektów o masie Jowisza. Jednak analiza orbit i mas takich obiektów umożliwi wyciągnięcie pewnych wniosków dotyczących sposobu ich uformowania.

3. Metody detekcji

Odkrywanie planetarnych towarzyszy krążących wokół pobliskich gwiazd wymaga niezwyklej pomysłowości i ogromnej cierpliwości. Strumień światła widzialnego wysyłanego przez Słońce jest ok. 10^9 razy większy od strumienia światła odbitego od jakiejkolwiek planety (rys. 1). W zakresie podczerwieni sytuacja jest trochę bardziej korzystna; na długości fali $10 \mu\text{m}$ Ziemia jest najjaśniejszą planetą Układu Słonecznego, o jasności tylko 7 milionów razy mniejszej od Słońca. Na długości fali $100 \mu\text{m}$ emisja cieplna Jowisza dominuje nad wszystkimi planetami, lecz jest nadal 10^4 razy słabsza od Słońca.

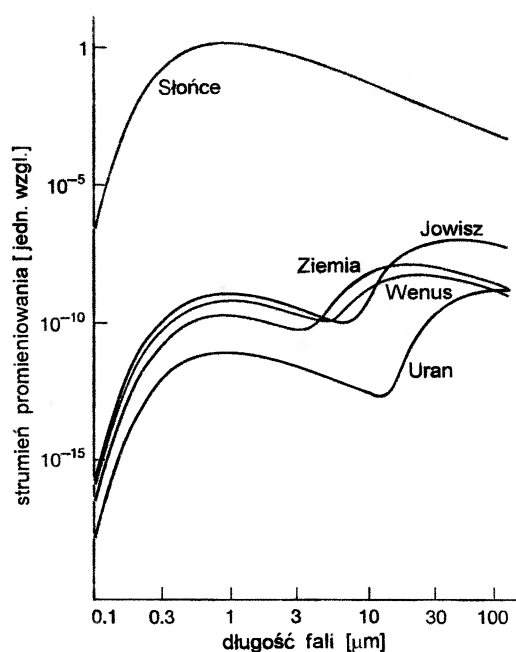
Trudność odkrywania nowych planet krążących wokół pobliskich gwiazd nie jest związana z detekcją tak małych strumieni promieniowania (można to łatwo osiągnąć za pomocą wielkich teleskopów), ale z małą odległością kątową planety od gwiazdy. Podczas obserwacji naziemnych turbulencje atmosferyczne powodują rozmycie obrazu gwiazdy i znaczne jego powiększenie. Praktycznie nie ma możliwości oddzielenia światła planety od znacznie silniejszego sygnału gwiazdy. Nawet w przypadku teleskopu umieszczonego w kosmosie połączenie dyfrakcji spowodowanej optyką teleskopu i rozpraszania na niedoskonałościach zwierciadeł przysyłania kilka fotonów pochodzących od planety.

Zastosowanie metod optyki aktywnej i adaptacyjnej opracowanych w latach „zimnej wojny” jako część Inicjatywy Obrony Kosmicznej, czyli „wojen gwiazdnych”, może znacznie poprawić jakość obrazu teleskopów naziemnych i umożliwić odkrycie planet podobnych do Jowisza, krążących wokół najbliższych gwiazd. Uzyskanie „rodzinnej fotografii” całego układu planetarnego jakiejś gwiazdy byłoby znaczącym osiągnięciem i czymś w rodzaju świętego Graala w dziedzinie odkrywania planet.

Najnowsze odkrycia planet i brązowych karłów.

| Obiekt | Masa (minimum) | Okres (doby) | Półoś orbity (jedn. astron.) | Mimośród |
|-------------------------|----------------|--------------|---------------------------------|----------|
| PSR 1257+12 | 0.015 m_Z | 25.34 | 0.19 | 0.004 |
| | 3.4 m_Z | 66.54 | 0.36 | 0.018 |
| | 2.8 m_Z | 98.22 | 0.47 | 0.026 |
| HD114762 | 9.0 m_J | 83.91 | 0.38 | 0.38 |
| 70 Virginis | 6.5 m_J | 116.7 | 0.47 | 0.40 |
| 51 Pegasi | 0.5 m_J | 4.23 | 0.05 | 0.0 |
| 55 Cancri | 0.84 m_J | 14.65 | 0.11 | 0.05 |
| τ Bootis | 3.87 m_J | 3.31 | 0.05 | 0.02 |
| ν Andromedae | 0.68 m_J | 4.61 | 0.06 | 0.11 |
| ρ Coronae Borealis | 1.1 m_J | 39.65 | 0.23 | 0.03 |
| 47 Ursae Majoris | 2.3 m_J | 1107.9 | 2.1 | 0.08 |
| 16 Cygni B | 1.5 m_J | 800.8 | 1.7 | 0.63 |

m_Z – masa Ziemi, m_J – masa Jowisza.



Rys. 1. Względne strumienie promieniowania wysyłanego przez Słońce i planety na różnych długościach fal. W obszarze światła widzialnego i nadfioletu (poniżej $0.8 \mu\text{m}$) planety świecą światłem odbitym. Strumień wysyłany przez nie w tej części widma zależy od ich odległości od Słońca, powierzchni przekroju i albedo. W zakresie podczerwieni (powyżej $0.8 \mu\text{m}$) w widmie planet dominuje termiczna emisja ciała doskonale czarnego. W tym przypadku strumień zależy od pola powierzchni planety (lub obłoków) oraz jej temperatury.

Bezpośrednie odkrycie pozasłonecznego układu planetarnego ciągle przekracza nasze obecne możliwości, więc musimy do tego celu wykorzystać zmiany jasności samej gwiazdy, które mogą wykazać obecność niewidocznej planety. Można zrobić

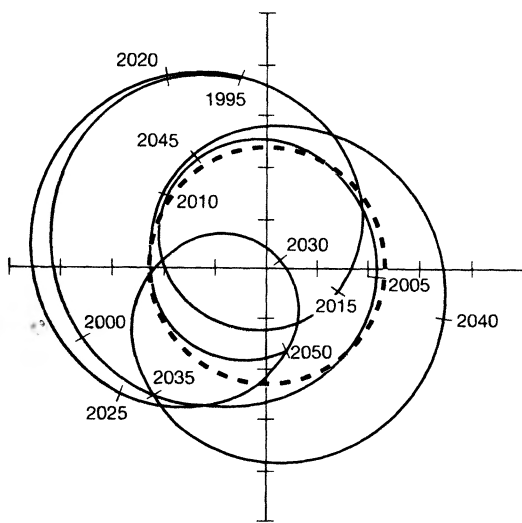
to na kilka sposobów, wchodzących w zakres pośrednich metod detekcji przedstawionych w Uzupełnieniu.

Jak planety mogą wpływać na jasność gwiazdy i ujawniać w ten sposób swoją obecność? Planety oczywiście krążą wokół gwiazdy. Ponieważ w takim izolowanym układzie musi być zachowany moment pędu, sama gwiazda nie może pozostawać w spoczynku. Musi poruszać się wokół barycentrum, czyli środka masy układu, a jej moment pędu musi być równy momentowi pędu planety. Ruch gwiazdy wokół barycentrum jest m_p/m_g razy wolniejszy i mniejszy niż ruch planety, gdzie m_p jest masą planety, a m_g masą gwiazdy. Stosując metody astrometryczne próbuje się zmierzyć bardzo małe zmiany położenia gwiazdy podczas jej pełnego okresu obiegu wokół barycentrum. Informacje uzyskane za pomocą metod astrometrycznych są uzupełniane przez pomiary prędkości radialnej (tzn. pomiary składowej prędkości orbitalnej równoległej do kierunku obserwacji, patrz rys. 2 i 3).

4. Planety wokół pulsarów

Pierwszymi obiektami o masach planetarnych znalezionymi poza Układem Słonecznym były ciała o masach zbliżonych do masy Ziemi, odkryte wokół pulsara milisekundowego PSR 1257+12 przez Aleksandra Wolszczana, pracującego obecnie na Pensylwańskim Uniwersytecie Stanowym, oraz Dale'a Fraila z Narodowego Obserwatorium

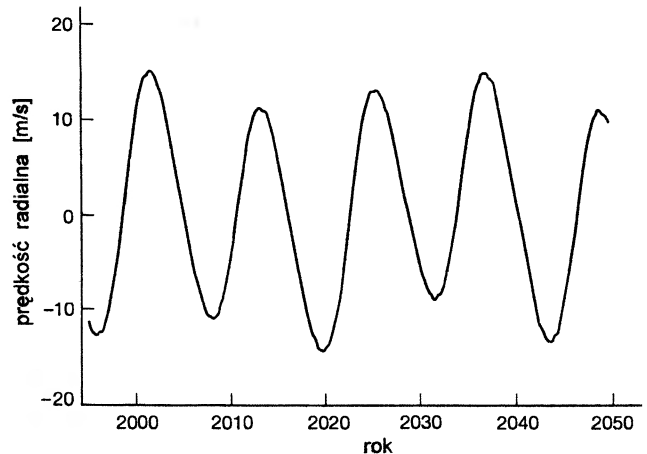
Radioastronomicznego w Nowym Meksyku. Pulsary są szybko wirującymi gwiazdami neutronowymi – pozostałościami po wybuchu ciężkiej gwiazdy supernowej lub białego karła (bardzo gęstej gwiazdy, w której siły grawitacyjne są równoważone przez ciśnienie degeneracji elektronów). Silne pole magnetyczne gwiazdy neutronowej zawęża promieniowanie radiowe emitowane przez pulsar do postaci wąskiej wiązki obracającej się wraz z gwiazdą. Radioteleskopy wykrywają impuls energii za każdym razem, gdy wiązka skierowana jest w stronę Ziemi. Pulsary o milisekundowych okresach obrotu wykorzystywane są jako stabilne i precyzyjne zegary.



Rys. 2. Ruch Słońca wokół środka masy Układu Słonecznego w latach 1990–2050 widziany z północnego bieguna ekliptyki. Rozmiar Słońca zaznaczony jest okręgiem narysowaną linią przerywaną. Z odległości 10 parseków (32.6 roku świetlnego) każda jednostka odłożona na osi byłaby widoczna pod kątem 0.0002 sekundy łuku.

W 1991 r. Wolszczan i Frail odkryli okresowe zmiany odstępów czasowych między impulsami pulsara PSR 1257+12. Zmiany te zinterpretowali jako wynik nieznacznej zmiany położenia pulsara (ok. 300 km) na skutek jego ruchu wokół środka masy układu planetarnego (przekraczające zmiany wywołane ruchem obiegowym Ziemi wokół Słońca). Ten rodzaj pomiarów jest ściśle powiązany z metodą pomiaru prędkości radialnych, z tym, że zamiast prędkości mierzy się czas. Ich pierwsze dane wykazały obecność dwóch obiektów towarzyszących o masach $3.4/\sin i$ oraz $2.8/\sin i$ masy Ziemi i okresach obiegu odpowiednio 67 i 98 dni. Szybko uświadomiono sobie, że stosunek okresów bliski 2:3 powinien spowodować

występowanie powtarzalnych, łatwych do zaobserwowania, wzajemnych perturbacji grawitacyjnych orbit, które można dokładnie przewidzieć i bez trudu zmierzyć. W 1994 r. Wolszczan przedstawił dodatkowe dane pochodzące z następnych trzech lat, które stwierdzały to zjawisko, co w dobitny sposób potwierdziło istnienie dwóch planet wokół pulsara. Wolszczan odkrył również istnienie w tym układzie trzeciej planety o masie Księżyca.



Rys. 3. Zmiany prędkości radialnej Słońca wokół środka masy Układu Słonecznego w latach 1990–2050, widziane w płaszczyźnie orbity.

Obecnie opracowywane są szczegółowe teorie wyjaśniające obecność planet wokół pulsarów. Jest możliwe, lecz bardzo mało prawdopodobne, że pierwotne planety uformowane wokół gwiazdy, która stała się pulsarem, mogły przetrwać wybuch gwiazdy supernowej. Łatwiej przyjąć hipotezę, że wokół pulsara powstał dysk, z którego uformowały się planety.

Reakcja społeczności astronomicznej na odkrycie planet wokół pulsarów była nieco osobliwa. Wielu astronomów sprzeciwia się nazywaniu planetami obiektów wokół pulsarów, ponieważ nie są one „zwykłymi” planetami wokół „zwykłych” gwiazd, jak Słońce. Chociaż środowisko na planetach krążących wokół pulsarów byłoby całkiem szkodliwe dla jakiegokolwiek postaci życia, ciała te zostały bezsprzecznie i jednoznacznie zidentyfikowane jako planety poza Układem Słonecznym. Według mnie, ich bardzo nieprawdopodobne położenie wokół pulsara milisekundowego wykazuje, jak silny i zróżnicowany musi być proces formowania planet.

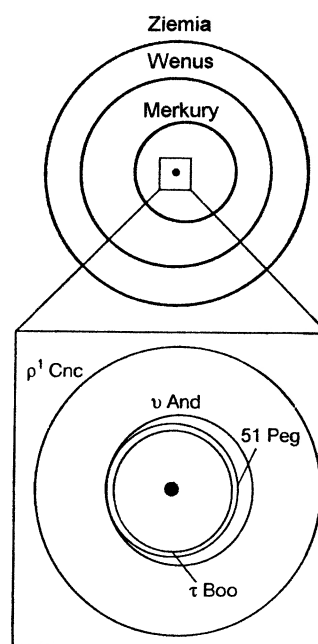
5. Obiekty wokół gwiazdy 51 Pegasi

W październiku 1995 r. Michel Mayor i Didier Queloz z Obserwatorium Genewskiego w Szwajcarii ogłosili, że wykryli małe zmiany prędkości radialnej gwiazdy 51 Pegasi, podobnej do Słońca. Swoje obserwacje zinterpretowali jako wynik obecności planety o masie dwukrotnie mniejszej od masy Jowisza, obiegającej gwiazdę. Jedy-nym problemem był fakt, że okres orbitalny równy 4.2 doby był o dwa do trzech rzędów wielkości za krótki w porównaniu z przewidywaniami teorii. Ponadto wielka półoś orbity wynosząca 0.05 jednostki astronomicznej jest równa 1/8 odległości Merkurego od Słońca. Planeta nie mogłaby powstać tak blisko 51 Peg, ponieważ dysk protoplanetarny miałby w tym obszarze temperaturę 2000 K, w której ziarna pyłu musiałyby wyparować.

Obserwacje szwajcarskich badaczy zostały szybko potwierdzone przez dwie niezależne grupy w USA. Wkrótce potem Douglas Lin, Peter Bodenheimer i Derek Richardson z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Santa Cruz zaproponowali mechanizm, zgodnie z którym planeta została uformowana w bardziej odległym, chłodniejszym obszarze dysku protoplanetarnego, a później przesunęła się do wewnątrz. Ogromna planeta gazowa powstająca w odległości kilku jednostek astronomicznych od gwiazdy szybko zebrałaby cały materiał dysku protoplanetarnego w jej pobliżu i utworzyłaby przerwę w dysku. Dalsze oddziaływanie pływowe pomiędzy planetą a zewnętrznymi i wewnętrznymi częściami dysku powoduje przesyłanie momentu pędu na zewnątrz i przemieszczanie planety oraz materii dysku do wewnątrz w tempie zależnym od lepkości dysku. Tak więc planeta powoli zbliża się po spirali do gwiazdy.

Lecz co zatrzymuje planetę w odległości ok. 8 milionów kilometrów od gwiazdy i powstrzymuje ją przed ostatecznym rozpadem? W tak małych odległościach oddziaływania pływowe planety z szybko wirującą protogwiazdą przeważają nad oddziaływaniami z zewnętrzną częścią dysku i planeta może uzyskać od gwiazdy moment pędu wystarczający do ustabilizowania wielkiej półosi. Ponadto magnetosfera gwiazdy może oczyścić wewnętrzny obszar dysku protoplanetarnego i w ten sposób zatrzymać zbliżanie się planety.

Już wcześniej można było przewidzieć, że dzięki temu mechanizmowi można uzyskać planety podobne do Jowisza w dowolnej odległości od gwiazdy. Niestety, poszczególne elementy teorii nie zostały ze sobą powiązane aż do momentu odkrycia 51 Peg. Gdy obserwatorzy zdali sobie sprawę, że należy szukać krótkookresowych zmian prędkości radialnej, Geoffrey Marcy i Paul Butler z Uniwersytetu Stanowego w San Francisco ogłosili odkrycie podobnych planet krążących wokół gwiazd 55 Cancri, τ Bootis i ν Andromedae (rys. 4). Robert Noyes z Uniwersytetu Harvarda wraz z kolegami odkrył obiekt o masie 1.1 masy Jowisza okrążający gwiazdę ρ Coronae Borealis w średniej odległości 0.23 jednostki astronomicznej. Wydaje się, że ok. 2 – 3% gwiazd typu słonecznego posiada podobnych towarzyszy.



Rys. 4. Orbity czterech planet typu „51 Pegasi” w porównaniu z wewnętrznymi planetami Układu Słonecznego (Słońce nie jest pokazane w skali). W powiększonym okienku gwiazda jest przedstawiona w odpowiedniej skali.

Jednak w marcu 1997 r. David Gray z Uniwersytetu Zachodniego Ontario w Kanadzie wywołał burzę polemik, gdy podważył planetarną interpretację krótkookresowych zmian prędkości gwiazd. Zamiast tego przyjął, że gwiazdy pulsują. Gray zapoczątkował analizę linii absorpcyjnych atomów i jonów w atmosferach gwiazd. Kształt tych linii jest nieznacznie zmieniony z powodu małego przesunięcia Dopplera gazu przemieszczającego się w górę i w dół w komórkach konwek-

cyjnych w atmosferze gwiazdy. Proces konwekcji w gwiazdach podobnych do Słońca często zmienia się powoli na skutek cyklicznej aktywności magnetycznej, podobnej do cyklu plam słonecznych.

Gray zgromadził dane dotyczące linii widmowych 51 Peg od 1989 r. Dane te szczegółowo przeanalizował i znalazł delikatne zmiany kształtu, które wydawały się skorelowane z 4.2-dniowym okresem zmian prędkości radialnej. Zwykły ruch orbitalny gwiazdy nie może powodować zmian kształtu linii widmowych. Dlatego Gray twierdził, że jedyną sensowną interpretacją zarówno tych danych, jak i zmian prędkości radialnej były pulsacje gwiazdy, a więc według niego nie było planety krążącej wokół 51 Peg. Niestety, nie wiadomo, jaki rodzaj pulsacji mógłby tu zachodzić i co mogłoby je powodować w gwiazdach tego typu.

Mayor i Marcy odpowiedzieli z furją, umieszczając obszernie argumenty przeciw pracy Graya w Internecie (<http://cannon.sfsu.edu/~gmarcy/planetsearch/planetsearch.html>). Gray odparł atak na swojej własnej stronie WWW (<http://phobos.astro.uwo.ca/~dfgray/51-peg.html>). Przynajmniej raz debata naukowa odbywała się publicznie! Kontrowersje zostaną wkrótce rozstrzygnięte przez niezależne obserwacje, które mogą potwierdzić lub odrzucić wnioski Graya.

6. Ciężkie planety na orbitach eliptycznych

Model pulsacji nie potrafi jednakże wyjaśnić obecności niezbyt ciężkiego towarzysza gwiazdy HD114762, odkrytego w 1989 r. przez Davida Lathama i współpr. z Uniwersytetu Harvarda. Na podstawie pomiarów prędkości radialnej zespół Lathama doszedł do wniosku, że ten obiekt o masie równej co najmniej 9 mas Jowisza był prawdopodobnie pierwszym odkrytym brązowym karłem. W styczniu 1996 r. Marcy i Butler ogłosili odkrycie innego bardzo podobnego obiektu o minimalnej masie ok. 6.5 masy Jowisza, okrążającego gwiazdę 70 Virginis. Wielka półoś obu obiektów wynosi ok. 0.4 jednostki astronomicznej, a mimośród orbity – ok. 0.35. Okres i amplituda zmian prędkości radialnej tych dwóch gwiazd są znacznie większe niż dla gwiazd typu 51 Peg. Jeśli za zmiany prędkości radialnej byłyby odpowiedzialne pulsacje, to amplituda pulsacji byłaby

dostatecznie duża, aby powodować łatwo wykrywalne zmiany jasności gwiazdy.

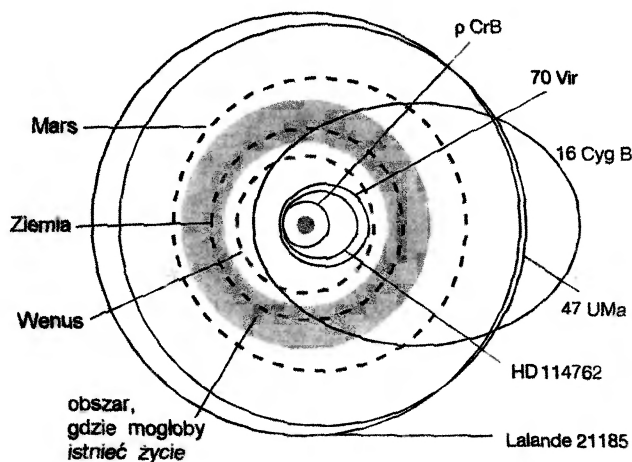
Nie ma w zasadzie wątpliwości, że gwiazdy te rzeczywiście mają towarzysza o małej masie. Czym są takie obiekty towarzyszące i jak znalazły się na eliptycznych orbitach? Możliwym wyjaśnieniem jest przyjęcie, że w obu przypadkach są to zwykłe brązowe karły. Ponieważ brązowe karły tworzą się w taki sam sposób jak gwiazdy, możemy oczekiwać, że charakterystyki orbit brązowych karłów powinny być takie same, jak gwiazd podwójnych. Tak jest rzeczywiście w przypadku HD114762 oraz 70 Virginis.

Innym wyjaśnieniem istnienia dwóch obiektów jest przyjęcie, że są one w istocie planetami. Oczywistym problemem jest fakt, że planety powinny powstawać na prawie kołowych orbitach, a ponadto moglibyśmy oczekiwać, że ich masy powinny być mniejsze. Doug Lin z Santa Cruz i Shigeru Ida z Politechniki Tokijskiej wysunęli hipotezę, że jeśli planety te uformowały się we względnie ciężkim dysku, to wówczas jest całkiem prawdopodobne, że kilka wielkich planet o masach równych 1 – 3 mas Jowisza mogło powstać w odległości 1 – 10 jednostki astronomicznej od gwiazdy. Po rozproszeniu gazu z pozostałości dysku protoplanetarnego wzajemne perturbacje grawitacyjne każdej z kilku planet doprowadziłyby stopniowo do wzrostu mimośrodu orbit, aż orbity te zaczęłyby się przecinać. W tym momencie planety mogłyby się zderzać i zlewać ze sobą. Symulacje komputerowe wykazują, że w rezultacie często powstawałaby ciężka planeta o dużym mimośrodku orbity i małej półosi, tak jak w przypadku HD114762 i 70 Virginis.

7. Planety podobne do Jowisza

Czy jakiegokolwiek planety krążące wokół innych gwiazd przypominają nasz Układ Słoneczny z ciałem o masie Jowisza w odległości kilku jednostek astronomicznych od gwiazdy? Trzy bardzo podobne układy planetarne odkryto wokół Lalande 21185, 16 Cygni B i 47 Ursae Maioris (rys. 5). Wszystkie te planety mają masę 1 – 2 razy większą od Jowisza, a wielkie półosie ich orbit wynoszą ok. 2 jednostek astronomicznych. Planety wokół Lalande 21185 są pierwszym układem planetarnym odkrytym metodami astrometrycznymi. Wyczynu tego dokonał George Gatewood

z Uniwersytetu w Pittsburghu. Jako dokonane na granicy rozdzielczości instrumentów astrometrycznych, odkrycie to powinno być traktowane jako wymagające potwierdzenia. Istnieją pewne dowody, że wokół tej gwiazdy krąży jeszcze jedna planeta o okresie obiegu ok. 30 lat, chociaż potwierdzenie obecności tego drugiego obiektu będzie prawdopodobnie wymagało uzyskania bezpośrednich obrazów.



Rys. 5. Orbity ciężkich planet krążących wokół HD114762 i 70 Virginis na orbitach eliptycznych wraz z planetami podobnymi do Jowisza obiegającymi 47 Ursae Maioris, Lalande 21185 i 16 Cygni B. Dla porównania pokazano orbity Wenus, Ziemi i Marsa. Zacięniowano obszar, gdzie mogłoby istnieć życie wokół gwiazdy podobnej do Słońca. Jest to obszar, gdzie mogłaby istnieć woda w fazie ciekłej, więc w sprzyjającym środowisku mogłoby rozwinąć się życie.

Towarzysz gwiazdy 16 Cygni B, odkryty niezależnie przez Artiego Hatzesa i mnie na Uniwersytecie Teksańskim oraz Marcy'ego i Butlera, jest niezwykle pod wieloma względami. Połączone zestawy pomiarów prędkości radialnej wykazują istnienie obiektu o masie 1.5 masy Jowisza na silnie eliptycznej orbicie o wielkiej półosi równej 1.7 jednostki astronomicznej. Drugim interesującym aspektem tego układu jest fakt, że gwiazda centralna jest składnikiem układu podwójnego. Obie gwiazdy tworzące układ są bardzo podobne do Słońca pod względem masy, temperatur, jasności i składu chemicznego. Orbity tych gwiazd są bardzo słabo poznane, ponieważ dobrej jakości dane dotyczące ich wzajemnych położeń pokrywają zaledwie 100 ostatnich lat, co stanowi prawdopodobnie mniej niż 1% okresu orbitalnego (przyjmuje się, że okres ten wynosi kilka tysięcy lat). Obecnie odległość wzajemna tych gwiazd wynosi około

700 jednostek astronomicznych. Składnik główny, 16 Cyg A, nie wykazuje żadnych śladów obecności planetarnego towarzysza.

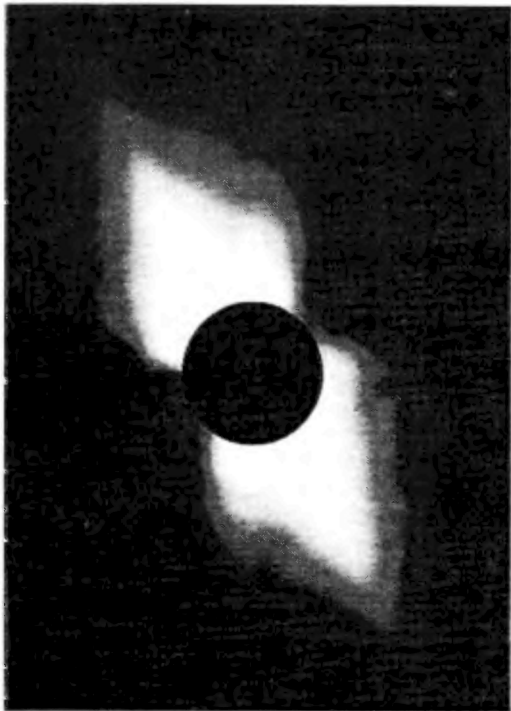
Dlaczego planeta porusza się po silnie eliptycznej orbicie? Jedną z możliwości jest działanie mechanizmu Lina-Idy. Planeta mogła więc powstać z mniejszych, pierwotnych planet, które zlały się w jedną całość podczas wczesnej, chaotycznej ewolucji układu. Drugą możliwością jest hipoteza, że duży mimośród orbity wynika z grawitacyjnych perturbacji drugiego składnika, 16 Cygni A. Możliwość ta była badana przez dwa niezależne zespoły, jeden kierowany przez Tsevi Mazeha z Uniwersytetu w Tel Awiwie w Izraelu, a drugi przez Matthew Holmana z Kanadyjskiego Instytutu Astrofizyki Teoretycznej w Toronto. Badania te wykazały, że planeta została uformowana na orbicie kołowej nachylonej do płaszczyzny orbity obu gwiazd pod kątem co najmniej 60° , a następnie siły pływowe wywierane na 16 Cygni B i jej planetę przez składnik 16 Cygni A spowodowały oscylacje orbity planety, która w różnych okresach miała duży lub mały mimośród. Oscylacjom towarzyszą zmiany nachylenia płaszczyzny orbity planetarnej do płaszczyzny orbity gwiazd. Planeta zasadniczo wymienia energię pomiędzy mimośrodem i nachyleniem swojej orbity, a proces ten stymulowany jest przez drugą gwiazdę.

8. Perspektywy

Po długim oczekiwaniu odkryto wreszcie planety wokół innych gwiazd. Komu należy przypisać pierwsze odkrycie? Zależy to od tego, czy towarzysz HD114762 jest w istocie planetą, czy brązowym karłem, lub czy planety krążące wokół pulsara mogą być uznane za „prawdziwe” planety, oraz od tego, czy w przypadku 51 Pegasi mamy do czynienia z planetami, czy z gwiazdą pulsującą. W ciągu następnych kilku lat z pewnością zostaną odkryte inne obiekty przy użyciu tych samych metod.

Obecnie dla poszukiwaczy planet nadszedł jednak czas opisu nowych światów i zrozumienia fizyki powstawania układów planetarnych. Chcemy dowiedzieć się, jak formowanie planet zależy od takich parametrów, jak masa gwiazdy macierzystej lub jej towarzysza, gęstość i pole magnetyczne dysku protoplanetarnego. Odpowiedź na te pytania będzie wymagać rozległego

przeгляdu wykonanego za pomocą teleskopów 8 – 10 m nowej generacji, ostatnio zbudowanych lub uruchomionych w najbliższym czasie.



Rys. 6. Obraz gwiazdy Beta Pictoris – faworyta w dziedzinie poszukiwania innych układów planetarnych.

Nasz model formowania planet został zbudowany na pojedynczym przykładzie Układu Słonecznego. Choć model ten daje wspaniałe wskazówki ogólne, odkrywamy, że przyroda wytworzyła zdumiewającą różnorodność układów planetarnych wokół bliskich gwiazd. Fizyczny proces formowania planet jest, jak się wydaje, bardzo wydajny i zdolny do wytworzenia planet wielkości Jowisza w prawie dowolnej odległości od gwiazdy macierzystej. Ponadto zdarzenia, jakie zaszły podczas wczesnej ewolucji dynamicznej tych układów mają ogromny wpływ na parametry orbit pozasłonecznych planet dotychczas odkrytych. Można się było tego spodziewać, ponieważ Układ Słoneczny również doznał ogromnych zmian dynamicznych w ciągu pierwszych 500 milionów lat swego istnienia. Na przykład Księżyc został prawdopodobnie uformowany na skutek zderzenia młodej Ziemi z planetą wielkości Marsa.

Realnym celem na przyszłość jest odkrycie planety podobnej do Ziemi, na której mogłoby istnieć życie. To ambitne zadanie będzie prawdopodobnie możliwe do zrealizowania za pomocą na-

szej techniki w najbliższej dekadzie. Mam szczerą nadzieję, że główne państwa świata mają chęć wydać pieniądze konieczne do osiągnięcia tego celu. Trudno byłoby przecenić wpływ odkrycia planety podobnej do Ziemi, krążącej wokół pobliskiej gwiazdy, na ludzką psychikę i ducha.

Uzupełnienie: Pośrednie metody detekcji

W przypadku orbit kołowych, gwiazda porusza się wokół środka masy układu gwiazda-planeta z prędkością v_g :

$$v_g = \frac{m_p}{m_g + m_p} \left[\frac{G(m_g + m_p)}{a} \right]^{1/2},$$

gdzie m_p jest masą planety, m_g – masą gwiazdy, G – stałą grawitacji, natomiast a – wielką półosią orbity. Okres obiegu T można wyznaczyć z III prawa Keplera:

$$T^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(m_g + m_p)}.$$

Powiązanie tych dwóch równań umożliwia wyznaczenie zależności v_g od T :

$$v_g = \left(\frac{2\pi G}{T} \right)^{1/3} = \frac{m_p}{(m_g + m_p)^{2/3}}.$$

Ponieważ możemy mierzyć tylko składową prędkości wzdłuż kierunku obserwacji, mierzona prędkość jest zmniejszona o czynnik $\sin i$, gdzie i jest kątem pomiędzy kierunkiem obserwacji a linią prostopadłą do płaszczyzny orbity. Ponadto prędkość będzie zmieniać się w przedziale $\pm v_g$ w zależności od tego, czy gwiazda zbliża się do nas, czy oddala.

Na szczęście bardziej prawdopodobny jest przypadek oglądania układu z boku ($\sin i = 1$) niż od strony biegunów ($\sin i = 0$). Jeśli wyrazimy m_g w masach Słońca, m_p w masach Jowisza, okres orbitalny w latach, a wielką półosią orbity w jednostkach astronomicznych (średnia odległość Ziemi od Słońca), wówczas obserwowana prędkość orbitalna gwiazdy w m/s wyniesie:

$$v_g = \frac{30m_p \sin i}{(am_g)^{1/2}} = \frac{30m_p \sin i}{(Tm_g^2)^{1/3}}.$$

Prędkość v_g wyznacza się z pomiarów przesunięć dopplerowskich tysięcy linii absorpcyjnych obserwowanych w atmosferze gwiazdy. Tak więc, gdybyśmy oglądali Układ Słoneczny z boku, ruch orbitalny Słońca byłby określony przez 12-letni cykl orbitalny Jowisza i prędkość v_g wyniosłaby około 12.5 m/s.

Pomiary prędkości radialnej zazwyczaj najbardziej skutecznie wykrywają ciężkie planety w pobliżu gwiazd. Przy założeniu, że znamy masę gwiazdy, pomiar prędkości radialnych umożliwia wyznaczenie $m_p \sin i$, a więc minimalnej masy planety. Jeżeli kąt i

jest mały, wówczas masa obiektu może być znacznie większa od tej dolnej wartości granicznej.

Astrometryczne poszukiwanie planet polega na wykryciu obecności planety na podstawie pomiaru bardzo małych zmian położenia gwiazdy na niebie, spowodowanych jej ruchem wokół środka masy układu gwiazda-planeta. Kątowa amplituda φ_g orbity gwiazdy wokół środka masy spowodowana obecnością obiektu towarzyszącego jest dana wzorem

$$\varphi_g = \frac{am_p}{Dm_g},$$

gdzie D jest odległością do gwiazdy zmierzoną w parsekach (1 parsek = 3.06×10^{16} m lub 3.26 roku świetlnego).

Astrometryczne przesunięcie położenia gwiazdy jest największe w przypadku ciężkich planet krążących daleko od gwiazdy albo gwiazd położonych w pobliżu Układu Słonecznego. Nie ma tu zależności od kąta nachylenia orbity układu, co umożliwia bezpośredni pomiar masy planety. Tak więc metody wykorzystujące prędkości radialne i pomiary astrometryczne w pewnym stopniu uzupełniają się wzajemnie.

Nie należy się dziwić, że obie metody pozwalają odkrywać raczej większe niż mniejsze planety, co wyjaśnia, dlaczego większość planet poza Układem Słonecznym odkrytych dotychczas ma przeważnie rozmiary

Jowisza, a nie Ziemi. Z masą 1.9×10^{27} kg Jowisz jest 318 razy cięższy od Ziemi. Odkrycie planety wielkości Ziemi krążącej wokół gwiazdy podobnej do Słońca w odległości 1 jednostki astronomicznej będzie wymagać umieszczenia w kosmosie specjalistycznych przyrządów obserwacyjnych.

Tłumaczył Krzysztof Włodarczyk

Obserwatorium Astronomiczne UJ
Kraków

Lektura uzupełniająca

- R.P. Butler, G.W. Marcy, „A planet orbiting 47 Ursae Majoris”, *Astrophys. J.* **464**, L153 (1996).
- D.F. Gray, „Absence of a planetary signature in the spectra of the star 51 Pegasi”, *Nature* **385**, 795 (1997).
- *Protostars and Planets III*, red. E.H. Levy, J.I. Lunine (University of Arizona Press, 1993).
- M. Mayor, D. Queloz, „A Jupiter-mass companion to a solar-type star”, *Nature* **378**, 355 (1995).
- A. Wolszczan, „Confirmation of Earth-mass planets orbiting the millisecond pulsar PSR B1257+12”, *Science* **264**, 538 (1994).

Lasery na kropkach kwantowych*

Karl Eberl

Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, Niemcy

Quantum-dot lasers

Abstract: Arrays of quantum dots promise improved performance for semiconductor lasers and have the added advantage that they can assemble themselves.

1. Wstęp

Lasery półprzewodnikowe znaleźć możemy w wielu urządzeniach, do których przyzwyczailiśmy się w życiu codziennym. Światłowodowe urządzenia telekomunikacyjne i odtwarzacze płyt kompaktowych to prawdopodobnie najbardziej znane zastosowania laserów półprzewodnikowych. Szeroko zakrojone badania i prace rozwojowe, prowadzone na całym świecie, mają za zadanie poprawę parametrów eksploatacyjnych tych przyrządów. Ich celem jest dalsza miniaturyzacja laserów, uczynienie ich jaśniejszymi i bardziej wydajnymi źródłami światła oraz rozszerzenie zakresu długości fal ich pracy. Nowa klasa laserów półprzewodnikowych – lasery oparte na samoorganizujących się kropkach kwantowych – wiele obiecuje w tej dziedzinie.

Laser półprzewodnikowy emituje światło, gdy elektron z pasma przewodnictwa rekombinuje z pustym stanem elektronowym (dziurą) w pasmie walencyjnym. Długość fali emitowanego światła określona jest zwykle przez wartość przerwy energetycznej półprzewodnika – różnicę energii pomiędzy wierzchołkiem pasma walencyjnego a dnem pasma przewodnictwa. Na przykład fosforek indowo-galowy ma przerwę energetyczną około 1.9 eV, która prowadzi do emisji światła czerwonego.

Przerwa energetyczna, która odpowiada za większość użytecznych właściwości półprzewodników, jest konsekwencją kwantowej natury fal elektronowych rozchodzących się w kryształach. Mechanika kwantowa zabrania elektronom przyjmować wartości energii z zakresu przerwy wzbronionej.

W półprzewodniku objętościowym, jak krzem czy arsenek galu, elektron w pasmie przewodnictwa zachowuje się jak elektron swobodny i może znajdować się w stanach o ciągłym widmie wartości pędu i energii. Obraz ten zmienia się dramatycznie, gdy ruch elektronu staje się ograniczony w jednym lub więcej wymiarów (rys. 1a i b). Jeśli elektrony zamknięte są w dostatecznie małym obszarze, ich poziomy energetyczne stają się skwantowane, podobnie do poziomów energetycznych w atomie. Jednym ze sposobów stworzenia takiego sztucznego atomu, czy inaczej mówiąc „kropki kwantowej”¹ jest otoczenie małej objętości półprzewodnika drugim półprzewodnikiem o większej przerwie energetycznej (rys. 1c). Elektrony są wówczas efektywnie zamknięte w obszarze półprzewodnika o mniejszej przerwie energetycznej, ponieważ w sposób naturalny dążą do obniżenia swojej energii.

W najprostszym modelu potencjał ograniczający ruch elektronów może być przybliżony prostokątną jamą (rys. 1d). W modelu tym odstęp pomiędzy dyskretnymi poziomami ener-

* Artykuł, opublikowany w *Physics World* 10, nr 9, 47 (1997), został przetłumaczony za zgodą Autora i Wydawcy [Translated with permission. Copyright ©1997 by IOP Publishing Ltd.] (przyp. Red.).

¹ Porównaj artykuł L. Jacaka i A. Wójcisa, *Postępy Fizyki* 49, 1 (1998) – przyp. Red.

tycznymi jest odwrotnie proporcjonalny do rozmiarów kropki kwantowej. Rozmiary kropki muszą być rzędu 10 nm lub mniejsze, żeby odstęp pomiędzy poziomami energetycznymi w „jamie kwantowej” był większy od wartości energii termicznej w temperaturze pokojowej. Takie kropki kwantowe, składające się z zaledwie kilku tysięcy atomów, powinny emitować światło o energii określonej przez poziomy energetyczne w kropce, a nie przez szerokość przerwy zabronionej półprzewodnika.

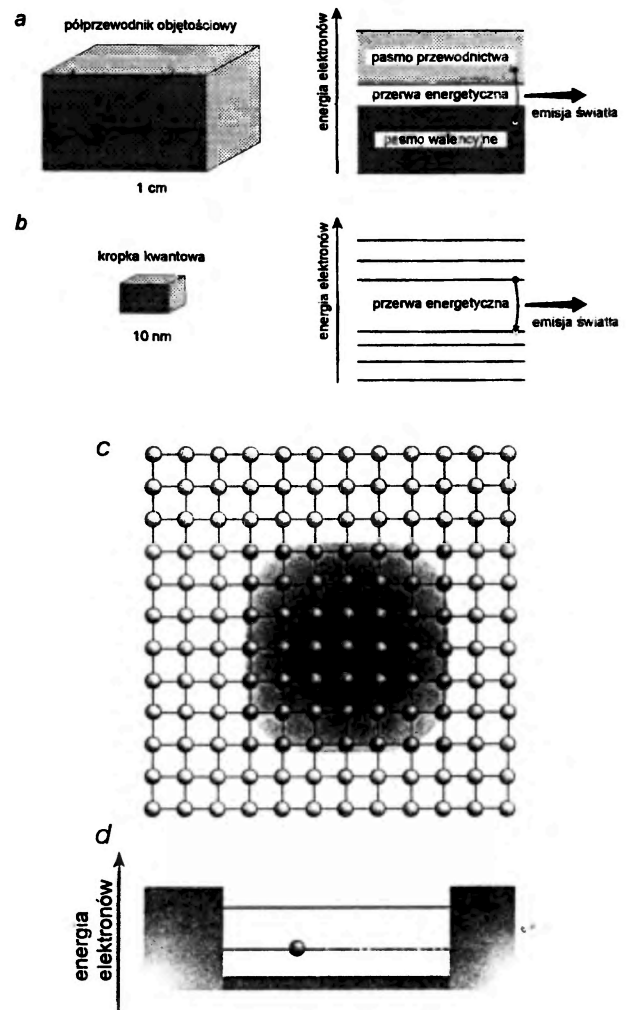
Niestety, wiele różnych procesów może powstrzymać emisję światła z półprzewodnika. Na przykład atomy domieszek mogą pułapkować nośniki ładunku, uniemożliwiając tym samym ich rekombinację. Sam proces rekombinacji elektronów i dziur może zamiast emisji fotonów prowadzić do emisji fononów (tj. drgań sieci krystalicznej). Żeby przewyciężyć te trudności, powierzchnia kropki kwantowej musi być odpowiednio „pasywowana”, innymi słowy, materiał o mniejszej przerwie energetycznej musi być całkowicie zanurzony w materiale tworzącym bariery, bez żadnych defektów sieci krystalicznej i domieszek.

Kropki kwantowe są szeroko wykorzystywane w doświadczeniach, których celem jest sprawdzenie podstawowych zjawisk kwantowych w półprzewodnikach. Mają one również wiele potencjalnych zastosowań w konstrukcji przyrządów półprzewodnikowych. Jak dotąd, najbardziej obiecujące to tranzystory na pojedynczym elektronie (patrz artykuł Harmansa w spisie lektury uzupełniającej) i lasery na kropkach kwantowych. Te ostatnie oferują możliwość poprawy parametrów eksploatacyjnych lasera i elastyczność w wyborze długości fali.

2. Początki

Od momentu ich wynalezienia w 1962 r. lasery półprzewodnikowe rozwijały się burzliwie. Pierwszy laser tego typu składał się ze spolaryzowanego w kierunku przewodzenia złącza p-n, wykonanego z arsenku galu, w którym rekombinacja elektronów i dziur zachodziła w warstwie zubożonej pomiędzy obszarami półprzewodnika domieszkowanymi dodatnio (p) i ujemnie (n). Naturalne (przełupane) powierzchnie kryształu, prostopadłe do złącza, tworzyły rezonator konieczny dla uzyskania akcji laserowej. Powierzchnie te pełniły rolę

analogiczną do zwierciadeł w laserach konwencjonalnych.



Rys. 1. (a) Periodyczny potencjał krystaliczny w makroskopowym kawałku objętościowego materiału półprzewodnikowego umożliwia niemal swobodny ruch elektronów, czego wynikiem są pasma energetyczne, oddzielone przerwą wzbronioną. Wewnątrz pasm energetycznych elektrony mają ciągły rozkład energii i pędu. (b) Z całkowicie odmienną sytuacją mamy do czynienia, gdy elektrony zamknięte są w małym klastercie półprzewodnikowym (o średnicy rzędu 10 nm), gdy widmo energetyczne stanów staje się dyskretne, podobnie jak w atomie. (c) Schematyczny model pasywowanej kropki kwantowej wypełnionej nośnikami ładunku, zamkniętymi w obszarze materiału o mniejszej przerwie wzbronionej i całkowicie zanurzonej w materiale o szerszej przerwie energetycznej, pozbawionej defektów i obcych domieszek. Ruch nośników ładunku jest ograniczony we wszystkich kierunkach. Obszar położenia elektronu, zaznaczony schematycznie, przypomina orbital w atomie. (d) Modelowa kwadratowa jama potencjału z zaznaczonymi skwantowanymi stanami energetycznymi.

Parametry wczesnych laserów półprzewodnikowych uległy znacznej poprawie na skutek zanurzenia obszaru aktywnego z GaAs pomiędzy obszarami aluminoarsenku galu (AlGaAs) w tak

zwanej „heterostrukturze”. Zastosowanie heterostruktur poprawiło parametry laserów, ponieważ warstwy AlGaAs mają większą przerwę energetyczną niż GaAs, co ułatwia ograniczenie ruchu nośników ładunku do obszaru czynnego. Po drugie, AlGaAs ma mniejszy współczynnik załamania od GaAs, co prowadzi do ograniczenia rozchodzenia się światła do obszaru czynnego na skutek zjawiska falowodowego. W 1970 r. koncepcja ta doprowadziła do uzyskania pracy ciągłej w temperaturze pokojowej w laserze heterozłączowym z GaAs/AlGaAs.

Podstawowym parametrem lasera półprzewodnikowego jest gęstość prądu wymagana dla rozpoczęcia akcji laserowej. Powinna ona być jak najmniejsza. W 1975 r. w laserach z obszarem czynnym o grubości około $0.1 \mu\text{m}$ osiągnięto progowe gęstości prądu ok. 500 A/cm^2 . Otworzyło to drogę do praktycznego zastosowania laserów w telekomunikacji światłowodowej i transmisji danych.

W 1974 r. Raymond Dingle z Laboratoriów Bella w USA zademonstrował po raz pierwszy zjawisko kwantowego ograniczenia ruchu nośników ładunku w półprzewodniku. W 1997 r. Won-Tien Tsang, również z Laboratoriów Bella, zbudował pierwszy laser półprzewodnikowy oparty na zjawisku kwantowego ograniczenia ruchu nośników. Grubość obszaru aktywnego w laserze Tsanga wynosiła zaledwie $0.01 \mu\text{m}$ (10 nm), tak że nośniki ładunku (elektrony i dziury) mogły poruszać się swobodnie jedynie w dwóch kierunkach. Lasery z kwantowym obszarem czynnym miały trzy główne zalety w porównaniu z laserami wytwarzanymi wcześniej: zdecydowanie większy współczynnik wzmocnienia światła (zwany „wzmocnieniem optycznym”), znacznie mniejsze progowe gęstości prądu (poniżej 50 A/cm^2) i słabszą zależność parametrów lasera od temperatury. Wszystkie te zalety mają swoje źródło w skupieniu rozkładu energetycznego stanów obsadzonych przez elektrony i dziury w laserach z jamą kwantową w porównaniu do rozkładu energetycznego stanów w półprzewodnikach objętościowych.

Następny krok – od laserów na jamach kwantowych do laserów na drutach kwantowych – został wykonany pod koniec lat osiemdziesiątych. W laserach na drutach kwantowych nośniki ładunku mogą poruszać się swobodnie tylko w jednym kierunku, co dalej zwiększa wzmocnienie

optyczne, zmniejsza progową gęstość prądu (do wartości poniżej 10 A/cm^2) i poprawia stabilność temperaturową.

W 1986 r. Masahiro Asada wraz ze współpracownikami z Politechniki Tokijskiej, opierając się na wcześniejszej pracy Yasuhito Arakawy z Uniwersytetu Tokijskiego, przewidział, że lasery na kropkach kwantowych – czyli lasery, których obszar czynny zawiera dużą liczbę kropek kwantowych jednakowych rozmiarów – powinny mieć jeszcze lepsze charakterystyki. Kropka kwantowa ogranicza ruch elektronów we wszystkich trzech kierunkach w przestrzeni.

Dyskretne widmo stanów energetycznych kropki kwantowej rokuje wydajną akcję laserową dla ściśle określonej wartości energii. Dwa główne warunki, których spełnienie jest konieczne w każdym laserze to: inwersja obsadzeń (powinno być więcej elektronów w stanie wzbudzonym niż w stanie podstawowym) i przewaga wzmocnienia optycznego nad stratami. Działanie lasera polega na emisji wymuszonej. W procesie tym foton o danej częstotliwości powoduje emisję innego fotonu o tej samej częstotliwości. W diodzie laserowej, do emisji wymuszonej dają wkład tylko te elektrony z okolicy dna pasma przewodnictwa, które rekombinują z dziurami z wierzchołka pasma walencyjnego. Ponieważ stany elektronowe w kropce kwantowej tworzą grupy odpowiadające przejściom dyskretnym, liczba nośników ładunku wymagana dla osiągnięcia inwersji obsadzeń jest odpowiednio mniejsza, co w konsekwencji prowadzi do mniejszych progowych natężeń prądów niż wartości, z którymi mamy do czynienia w obecnych diodach laserowych.

Lasery na kropkach kwantowych powinny również wykazywać lepszą stabilność temperaturową. W konwencjonalnym laserze półprzewodnikowym rozrzut energetyczny stanów biorących udział w akcji laserowej powoduje silną zależność prądu progowego od temperatury. W laserze na kropkach kwantowych dyskretna natura stanów energetycznych i duży odstęp pomiędzy poziomami energetycznymi praktycznie eliminują jakąkolwiek zależność temperaturową.

3. Wytwarzanie kropek kwantowych

Celem, do którego dążymy, jest powtarzalna i praktyczna technologia wytwarzania struktur

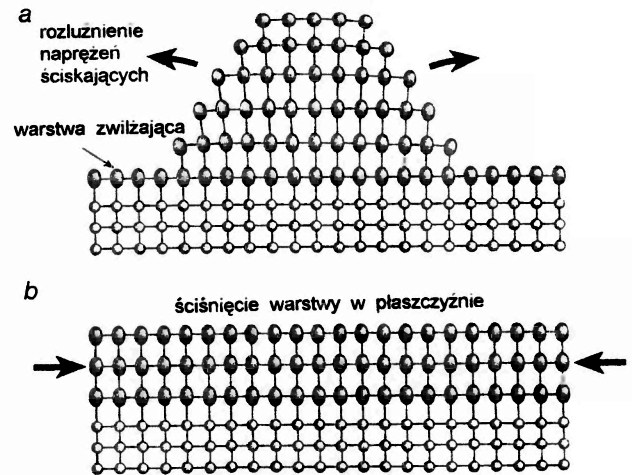
półprzewodnikowych o wymiarach rzędu 10 nm. Konstrukcja lasera wymaga dużej liczby optycznie aktywnych kropek kwantowych o identycznych rozmiarach. Niestety, konwencjonalne techniki kształtowania materiałów półprzewodnikowych, oparte na litografii i procesach trawienia, stwarzają szereg problemów związanych z ograniczoną rozdzielczością przestrzenną i wprowadzaniem defektów powierzchniowych w trakcie obróbki.

W ostatnich latach kilka grup badawczych rozpoczęło prace nad bezpośrednią syntezą różnorodnych nanostruktur półprzewodnikowych, w tym kropek kwantowych, wykorzystując połączenie z litografią metod wzrostu epitaksjalnego, jak epitaksja z wiązek molekularnych czy osadzanie z par związków chemicznych. Konwencjonalne techniki litograficzne stosowane są do przeniesienia wzorów na powierzchnię półprzewodnika przed nałożeniem materiału, z którego wytwarzane są kropki kwantowe. Wzrost epitaksjalny na odpowiednio spreparowanych podłożach prowadzi do tworzenia się na powierzchni ostrych krawędzi lub kanalików w kształcie litery V. Kropki lub druty kwantowe mogą być następnie wytwarzane na drodze samoregulujących się procesów wzrostu.

Prostszy pomysł polega na wykorzystaniu wysp tworzących się w przypadku, gdy półprzewodnik nakładany jest na podłoże o znacznie różniącej się stałej sieci. Proces taki znany jest jako mechanizm wzrostu Stranskiego-Krastanowa. Był on wykorzystywany do wytwarzania kropek kwantowych o rozmiarach liniowych rzędu kilku odległości międzyatomowych (rys. 2a). Ważną cechą takiego procesu jest to, że rozmiary struktur kwantowych są samorzutnie regulowane w trakcie procesu wzrostu epitaksjalnego. Kilka pierwszych warstw atomowych rosnącego kryształu tworzy jednorodną, płaską warstwę „zwilżającą”. W kolejnych fazach wzrostu epitaksjalnego atomy skupiają się, tworząc klaster. Powstawanie klasterów jest uprzywilejowane energetycznie, bowiem w ten sposób, na skutek odkształceń sprężystych, można doprowadzić do rozluźnienia naprężeń ściskających w sieci krystalicznej i tym samym zmniejszyć energię naprężeń wewnątrz tworzących się wysp.

W innym rodzaju wzrostu, znanym jako „wzrost pseudomorficzny”, warstwa epitaksjalna ulega ściśnięciu w płaszczyźnie, by dopasować się do stałej sieci podłoża (rys. 2b). Naprężenia ści-

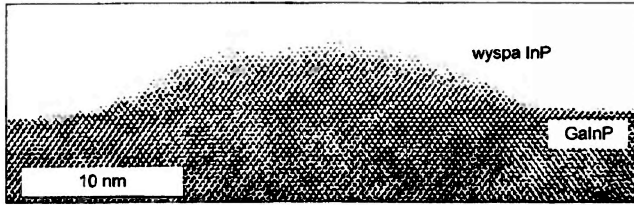
skające w płaszczyźnie warstwy są wprowadzane automatycznie w trakcie wzrostu.



Rys. 2. (a) Tworzenie się klastera w trakcie epitaksjalnego wzrostu materiału półprzewodnikowego na powierzchni innego półprzewodnika o mniejszej (o kilka procent) stałej sieci. Na przykład, fosforek indu ma stałą sieci o 4% większą od stałej sieci fosforu indowo-galowego, w wyniku czego InP tworzy klaster, takie jak pokazany na rys. 3. Powstawanie klasterów jest uprzywilejowane energetycznie, ponieważ sieć krystaliczna może w ten sposób rozluźnić naprężenia ściskające i tym samym zmniejszyć zmagazynowaną energię odkształceń. (b) W innym rodzaju wzrostu warstwa epitaksjalna jest ściśniona w płaszczyźnie i dopasowuje się do stałej sieci podłoża. Jest to tak zwany „wzrost pseudomorficzny”, obserwowany w przypadku heterostruktur o małym niedopasowaniu sieciowym.

W celu zilustrowania diskutowanych metod wzrostu rozważmy przypadek epitaksji fosforu indu (InP) na fosforu galowo-indowym (GaInP). $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ ma identyczną stałą sieci jak arsenek galu; można zatem hodować warstwy GaInP dobrej jakości na podłożu z arsenku galu. Stała sieci InP jest o około 4% większa. Jednakże po zoptymalizowaniu warunków wzrostu w metodzie epitaksji z wiązek molekularnych, po nałożeniu 1.5 lub więcej monowarstw InP, zaczynają tworzyć się klaster (kropki) materiału wolnego od defektów. Na przykład, po nałożeniu trzech (nominalnych) warstw materiału, na powierzchni tak wytworzonej warstwy zwilżającej można obserwować proces tworzenia się klasterów. Ich koncentracja jest ok. 5×10^{10} kropek na centymetr kwadratowy, a zardokują przeważnie na krawędziach „stopni” atomowych, które zawsze są obecne na powierzchni. Kropki mają kształt ściętej piramidy; ich rozmiar u podstawy wynosi ok. 15 nm i mają ok. 3 nm wysokości (rys. 3). Dość zaskakujący fakt, że fluktuacje rozmiarów kropek nie są większe od 10%,

ma istotne znaczenia dla możliwości wytworzenia w ten sposób lasera na kropkach kwantowych. Po wyhodowaniu kropek kwantowych z InP, na powierzchnię struktury nakłada się grubą warstwę GaInP, której zadaniem jest pasywacja kropek.



Rys. 3. Obraz klastra z InP na GaInP otrzymany za pomocą transmisyjnego mikroskopu elektronowego. Klastr powstał w trakcie wzrostu epitaksjalnego trzech (nominalnie) warstw atomowych InP. Ponieważ wyspy tego rodzaju są bardzo małe i pojawiają się samorzutnie w trakcie wzrostu, noszą nazwę samoorganizujących się kropek kwantowych.

Rozmiar kropek silnie zależy od ilości nakładanego materiału. Ponieważ poziomy energetyczne w kropce kwantowej zależą od jej rozmiarów, zależy od nich również długość fali emitowanej przez kropkę. Objętościowy fosforek indu ma przerwę energetyczną o szerokości 1.35 eV, co odpowiada długości fali około 1 μm . Wzrost dwu monowarstw InP na GaInP prowadzi do powstawania kropek o średnicy ok. 12 nm, podczas gdy w przypadku siedmiu monowarstw średnica ta sięga 50 nm. Wartość energii przejść optycznych dla kropki o średnicy 12 nm wynosi 1.85 eV, co odpowiada emisji światła czerwonego. Większe kropki (o średnicy 50 nm) mają energię przejścia równą 1.65 eV i emitują w podczerwieni. Wyraźny w obu przypadkach wzrost energii emitowanych kwantów jest wynikiem ograniczenia ruchu nośników oraz naprężeń. Gdy nakłada się więcej niż siedem monowarstw InP, zaczynają pojawiać się dyslokacje, zmniejszające sprawność świecenia kropek.

Rozmiar kropek można w pewnym zakresie regulować przez zmianę warunków wzrostu. Na przykład, zatrzymanie procesu wzrostu na pewien czas pomiędzy nakładaniem materiału kropek a wzrostem warstwy przykrywającej prowadzi do rozrostu kropek i zmniejszania ich koncentracji – małe kropki znikają, a większe rosną dalej w trakcie przerwy. To samo dzieje się podczas wzrostu z małymi prędkościami. Większe klastry są energetycznie uprzywilejowane, ponieważ na

ich powierzchni naprężenia są mniejsze. Z drugiej strony lasery krótkofalowe (tj. pracujące w zakresie widzialnym widma) wymagają mniejszych kropek, które można uzyskać, stosując krótkie przerwy wzrostu, co dodatkowo zmniejsza rozrzut rozmiarów kropek.

Dzięki zdolności skrajnie małych kropek kwantowych do samoorganizowania się i tworzenia regularnych matryc, bez konieczności stosowania litografii i trawienia, technologia ta jest niezwykle obiecująca w perspektywie wytwarzania laserów na kropkach kwantowych.

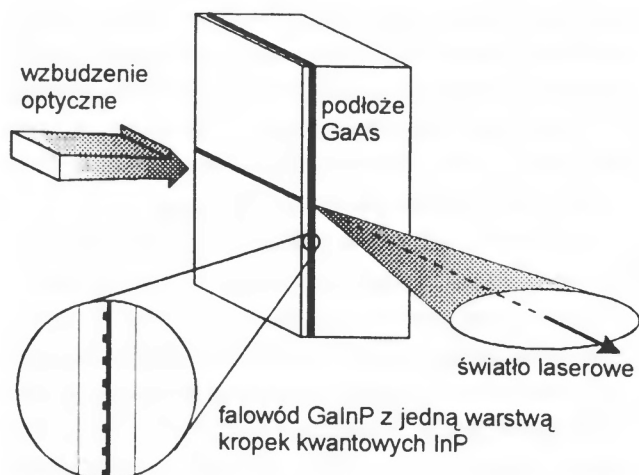
4. Niech się stanie światło

Aby skonstruować laser na kropkach kwantowych, potrzebne są: gęsta matryca kropek kwantowych jednakowych rozmiarów w obszarze aktywnym i zwierciadła na końcach tego obszaru, tworzące wnękę laserową. Energia emitowanego promieniowania zależy od przerwy energetycznej materiału kropek oraz wielkości naprężeń i maleje ze wzrostem rozmiarów kropek. Elektron-y i dziury mogą być wytwarzane w kropce za pomocą wzbudzenia optycznego bądź elektrycznego (rys. 4).

W 1995 r. kierowana przez mnie grupa w Instytucie Maxa Plancka w Stuttgarcie, we współpracy z grupą Andreasa Hangleitera z Uniwersytetu Stuttgarckiego, zaobserwowała w temperaturze pokojowej akcję laserową w zakresie widzialnym widma, w pobudzonym optycznie laserze na kropkach kwantowych z InP. Pary elektron-dziura wytwarzane były za pomocą zielonego światła zogniskowanego na obszarze aktywnym, z którego, poprzez zwierciadła, emitowane było światło laserowe o barwie czerwonej (rys. 5). Wartość progu akcji laserowej była porównywalna do obserwowanej w laserach na jamie kwantowej z GaInP/AlGaInP, wzbudzanych w podobnej konfiguracji.

Również w 1995 r. grupa Dietera Bimberga z Politechniki w Berlinie, we współpracy z naukowcami z Instytutu Fizyko-Technicznego im. A.F. Joffego w St. Petersburgu, zademonstrowała w temperaturze pokojowej działanie elektrycznie pompowanego lasera na kropkach kwantowych. Tym razem obszar czynny przyrządu stanowił gęsto upakowany stos płaszczyzn, zawierających kropki kwantowe z arsenku indu (InAs); laser emitował w podczerwieni. W temperaturze

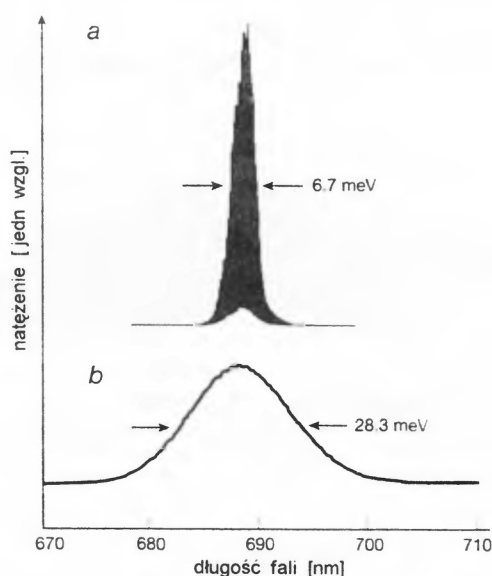
ciekłego azotu Bimberg i współpracownicy uzyskali prądy progowe porównywalne z laserami na jamach kwantowych (poniżej 20 A/cm^2). Nie byli jednak w stanie otrzymać do tej pory porównywalnych parametrów lasera w temperaturze pokojowej.



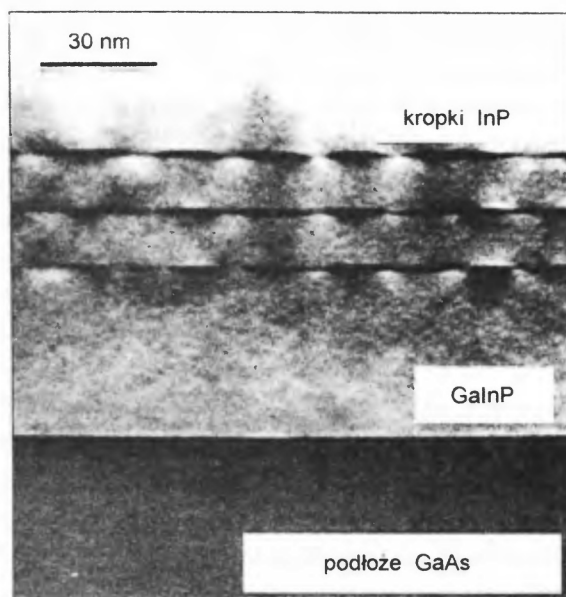
Rys. 4. Pompowany optycznie laser na kropkach kwantowych z InP. Pary elektron-dziura wzbudzone są przez zogniskowane światło zielone, padające z lewej strony (ognisko ma kształt paska). Czerwone światło emisji wymuszonej z kropek (promieniowanie lasera) jest obserwowane w kierunku prostopadłym do kierunku pobudzenia. Doświadczenie przeprowadzono w niskiej temperaturze (8 K) i przy ciągłym pobudzeniu. Próbka była umieszczona w kriostacie. Warstwa kropek kwantowych z InP usytuowana była w środku warstwy GaInP, która z kolei ulokowana była pomiędzy warstwami AlInP o mniejszym współczynniku załamania, tworzącymi falowód utrzymujący światło w bezpośrednim sąsiedztwie obszaru czynnego.

Tworzenie stosów warstw z kropkami kwantowymi w strukturze laserowej zwiększa objętość materiału aktywnego w przyrządzie (rys. 6). W 1995 r. James Harris ze współpracownikami

z Uniwersytetu Stanforda w Kalifornii doniósł o znacznym zmniejszeniu szerokości połówkowej



Rys. 5. Widmo promieniowania laserowego (a) i widmo fotoluminescencji (b) lasera na kropkach kwantowych z InP, pokazanego na rys. 4. Natężenie promieniowania laserowego jest około 200 razy większe od natężenia fotoluminescencji.



Rys. 6. Obraz stosu składającego się z trzech warstw kropek kwantowych z InP, otrzymany za pomocą transmisyjnego mikroskopu elektronowego. Wytwarzanie tego typu stosów pozwala na zwiększenie objętości materiału aktywnego w obrębie falowodu struktury laserowej.

linii luminescencji ze stosu warstw kropek kwantowych z InAs. Uważa się, że to zmniejszenie ma źródło w bardziej jednorodnym rozkładzie rozmiarów kropek, powodowanym skorelowanym mecha-

nizmem nukleacji kropek; atomy przybywające w trakcie wzrostu górnej warstwy mają tendencję do skupiania się i tworzenia nowych kropek dokładnie nad atomami w warstwie poniżej. Taką korelację – powodowaną przez pole naprężeń wokół zanurzonej w matrycy kryształu kropki kwantowej – obserwuje się, jeśli odstęp pomiędzy warstwami kropek nie jest zbyt duży. Niedawno Bimberg ze współpracownikami i grupa Hideaki Saito z NEC w Tsukubie zbudowali diodę laserową ze stosem dziesięciu warstw kropek kwantowych.

5. Co dalej?

Chociaż prace badawcze nad samoorganizującymi się kropkami kwantowymi są ciągle na wstępnym etapie rozwoju, dotychczasowe eksperymenty wykazały ponad wszelką wątpliwość, że można w ten sposób otrzymać dobre lasery. Wyzwaniem stojącym przed naukowcami jest zbudowanie laserów o parametrach porównywalnych i lepszych od laserów na jamach kwantowych. To powinno umożliwić laserom na kropkach kwantowych osiągnięcie poziomu, umożliwiającego praktyczne zastosowania w optycznych układach ultrazszybkiej transmisji danych. Kluczowym problemem, który będzie musiał być rozwiązany, jest lepsze sterowanie rozkładem rozmiarów kropek, wytwarzanych w procesie samoorganizacji. Biorąc pod uwagę dotychczasowy szybki postęp na tym polu, eksperci w tej dziedzinie spodziewają

się znacznej poprawy parametrów laserów w najbliższej przyszłości.

Tłumaczył *Maciej Bugajski*

Instytut Technologii Elektronowej
i Szkoła Nauk Ścisłych
Warszawa

Lektura uzupełniająca

- M. Asada, Y. Miyamoto, Y. Suematsu, „Gain and the threshold of three-dimensional quantum box lasers”, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-22**, 1915 (1986).
- D. Bimberg i in., „InGaAs-GaAs quantum dot lasers”, *IEEE J. Quantum Electron.* **3**, 1 (1997).
- K. Eberl, P.M. Petroff, P. Demeester, „Low-dimensional structures prepared by epitaxial growth or re-growth on patterned substrates”, w: *NATO ASI Series E: Applied Science*, t. 298 (Kluwer, Dordrecht 1995).
- K. Harmans, „Next electron, please...”, *Phys. World*, March 1992, s. 50.
- A. Moritz i in., „Optical gain and lasing in self-assembling InP/GaInP quantum dots”, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 212 (1996).
- P.M. Petroff, S.P. DenBaars, „MBE and MOCVD growth and properties of self-assembling quantum dot arrays in III-V semiconductor structures”, *Superlattices and Microstructures* **15**, 15 (1994).
- H. Saito i in., „Room-temperature lasing operation of a quantum-dot vertical-cavity surface-emitting laser”, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 3140 (1996).

O popularyzacji fizyki

Jacek Turnau

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego, Kraków

On popularization of physics

Abstract: Impressions from a CERN meeting on popularization of high energy physics are presented, with some reflections on the problem in Poland.

Wstęp

Systematyczny spadek zainteresowania fizyką (zarówno w sensie jej dokonań, jak i wyboru fizyki jako kariery zawodowej) obserwowany jest zarówno w USA, jak i w Europie. Powstało wiele inicjatyw mających na celu przeciwdziałanie tej tendencji. Należy do nich również spotkanie reprezentantów krajów członkowskich CERN-u, poświęcone sprawom popularyzacji fizyki wysokich energii, które odbyło się w Genewie 19 września 1997 r. Głównym celem spotkania było zorganizowanie wymiany materiałów i doświadczeń w informowaniu publiczności o badaniach w zakresie fizyki cząstek elementarnych i ich znaczeniu dla nauki i techniki. W spotkaniu udział wzięło wielu wybitnych fizyków, m.in. prof. Christopher Llewellyn Smith – dyrektor generalny CERN-u, prof. Maurice Jacob – prezes Europejskiego Towarzystwa Fizycznego w kadencji 1992–93 i prof. Frank Close – wybitny teoretyk, a zarazem autor znakomitych książek popularnych, m.in. tłumaczonej na język polski *Kosmicznej cebuli*.

Z uwagi na inicjatorów spotkania (CERN i Komitet Europejski na Rzecz Przyszłych Akceleratorów – European Committee for Future Accelerators (ECFA)), a także jego uczestników (fizycy wysokich energii), mówiono tam przede wszystkim o popularyzacji fizyki cząstek elementarnych, jednak nie ulega wątpliwości, że wiele poruszonych

spraw ma szerszy aspekt, tzn. dotyczy popularyzacji nauki w ogóle.

Popularyzacja nauki w klasycznym rozumieniu, tj. książki popularnonaukowe oraz artykuły w wyspecjalizowanych czasopismach, adresowana jest do osób z już wykrystalizowanymi zainteresowaniami i nie może pozostać jedyną formą kontaktu naukowców ze społeczeństwem w czasach tak ogromnego naporu informacyjnego, z jakim mamy dziś do czynienia. Otwierając spotkanie prof. Llewellyn Smith zwrócił uwagę zebranych na to, że społeczność naukowa po pierwsze ma moralny obowiązek informowania szerokiej publiczności o tym co robi, a po drugie taka informacja ma zasadnicze znaczenie z uwagi na wpływ opinii publicznej na polityków. Za jedną z kilku przyczyn dramatycznego upadku projektu budowy superakceleratora SSC w USA uważa się właśnie zaniedbanie właściwego informowania szerokich kręgów społecznych o celach i znaczeniu naukowym planowanych tam badań. Od 1989 r. argumentacja ta nabiera znaczenia i w Polsce, w miarę powstawania demokratycznych mechanizmów administrowania wydatkami publicznymi.

Tabela 1, opracowana przez Peggy Rimmer, dyrektora Wystaw Objazdowych CERN-u, przedstawia ocenę skuteczności różnych sposobów popularyzacji dla różnych grup odbiorców. Poniżej omawiam te sposoby zarówno w świetle informacji pochodzących ze spotkania w CERN-ie, jak i własnych doświadczeń na polskim gruncie.

Tabela 1. Skuteczność różnych sposobów popularyzacji dla różnych grup odbiorców: im większa liczba krzyżyków, tym większa skuteczność.

| Rodzaj publiczności | Uczniowie liceów | Nauczyciele liceów | Studenci | Urzędnicy zarządzający nauką | Przywódcy polityczni | Szeroka publiczność |
|-----------------------------|------------------|--------------------|----------|------------------------------|----------------------|---------------------|
| Akcja | | | | | | |
| Strony WWW | xx | xx | xx | x | | x |
| Odpowiedzi na pytania w WWW | xx | xx | xx | | | x |
| Dyski optyczne | xxx | xxx | xx | x | | x |
| Broszury | xx | xx | x | x | x | x |
| Zwiedzanie laboratoriów | xxx | xxx | xx | xx | x | |
| Wystawy objazdowe | xxx | xxx | xx | xx | xx | |
| Muzea nauki | xxx | xxx | xx | | | x |
| Dni otwarte | xx | xx | xx | | | xx |
| Referaty w liceach | xxx | xxx | | | | |
| Dzienniki | | x | xx | x | | xx |
| Telewizja | x | x | x | xx | xx | xxx |

Strony WWW

Wiele instytucji naukowych prowadzi w Internecie strony o charakterze interakcyjnego programu edukacyjnego. Ich jakość bywa różna, jednak niektóre posiadają rzeczywiście wybitne walory edukacyjne i są całkiem popularne wśród uczniów szkół średnich i nauczycieli (w Europie Zachodniej). Przykładem bardzo dobrych programów edukacyjnych w sieci są „Fusion – Physics of a Fundamental Energy Source: an on-line interactive course” (Synteza jądrowa – fizyka podstawowego źródła energii: kurs interakcyjny) oraz „The Particle Adventure: an interactive tour of the inner workings of the atom and tools for discovery” (Przygoda z cząstkami: interakcyjna wycieczka do wnętrza atomu i narzędzi do jego odkrycia). Obydwa te programy powstały z inicjatywy Programu Edukacji w Zakresie Fizyki Współczesnej (Contemporary Physics Education Program – CPEP; <http://pdg.lbl.gov/cpep.html>) – instytucji, o której powiem nieco więcej w innym miejscu. Wersja polska programu „The Particle Adventure” znajduje się obecnie na stronie internetowej Instytutu Fizyki Jądrowej (IFJ) w Krakowie: www.ifj.edu.pl/edukacja.

Bardzo istotnym elementem w działaniu popularyzatorskim „wirtualnych muzeów nauki”

i sieciowych programów edukacyjnych jest odpowiadanie na pytania czytelników. Warto też zaznaczyć, że strona internetowa nigdy nie jest przedsięwzięciem jednorazowym – wymaga bowiem stałego uaktualniania i modyfikacji.

Ciekawa inicjatywa powstała w Wielkiej Brytanii, gdzie Brytyjskie Stowarzyszenie na Rzecz Postępu Nauk Przyrodniczych (British Association for the Advancement of Science) sponsoruje stronę Internetu SCIENCEdotNEWS (<http://www.britassoc.org.uk/press/index.html>), pomyślaną jako źródło inspiracji i szybkiego dostępu do nowości, fotografii i tekstów źródłowych dla dziennikarzy naukowych. Chociaż obecnie nawet w Wielkiej Brytanii poczta elektroniczna nie jest jeszcze preferowanym sposobem komunikacji dziennikarzy ze światem akademickim, to jednak w niedalekiej przyszłości z pewnością będzie. Gwarantuje to łatwość przekazywania tą drogą informacji wraz z materiałem fotograficznym wysokiej rozdzielczości.

Dyski optyczne (CD-ROM) oraz materiały audiowizualne

Dyski optyczne są w dziedzinie popularyzacji bezpośrednim następcą kaset wideo, bez wąt-

pienia znacznie atrakcyjniejszym, bo umożliwiającym interakcyjny kontakt z obrazem i dźwiękiem. Program CPEP jest w trakcie realizowania dysku optycznego na temat fizyki cząstek elementarnych, podobny projekt jest w trakcie realizacji w Austrii, natomiast w CERN-ie rozważano możliwość jego produkcji w taki sposób, aby powstało jednocześnie wiele wersji językowych. Problem polega bowiem na bardzo wysokich kosztach, nieporównanie większych niż np. profesjonalna produkcja filmu na kasie wideo.

Przy tej okazji warto wspomnieć o istniejących materiałach popularyzacyjnych w formie kaset wideo. CERN wyprodukował wiele bardzo dobrych filmów na temat fizyki cząstek elementarnych. Polskie wersje językowe tych filmów w systemie VHS są w posiadaniu Departamentu Szkolenia i Informacji Społecznej Państwowej Agencji Atomistyki i są wypożyczane zainteresowanym szkołom i innym instytucjom. Również IFJ rozprowadza kopie tych filmów w szkołach. Ich projekcje w czasie Dnia Otwartego IFJ cieszą się niezmiernie dużym powodzeniem.

Wielu uczestników spotkania podkreślało potrzebę stworzenia listy dostępnych popularnych materiałów audiowizualnych i dysków optycznych. Lista materiałów wideo wyprodukowanych przez CERN zawiera obecnie 348 pozycji i jest dostępna przez WWW (http://pcdh01.cern.ch/hep-pr/Members/CERN/CERN_videos.html).

Broszury

Wielkie centra badawcze jak CERN i DESY wydają broszury popularyzujące badania, które są w nich prowadzone. Na ogół są one rozprowadzane wśród odwiedzających je wycieczek. CERN-owski komiks *The World of Particles*, przetłumaczony na język polski i wydany nakładem Polskiej Agencji Atomistyki (B. Southworth, G. Boixader, *Świat cząstek* (PAA, Warszawa 1996)), jest systematycznie rozdawany wśród gości odwiedzających IFJ w czasie Dnia Otwartego. Krakowski Oddział PTF zorganizował natomiast w 1996 r. kwiz na temat fizyki cząstek oparty na informacjach zawartych w komiksie.

Na 2000 kopii tej broszury przeprowadzonych w szkołach, otrzymano ok. 700 odpowiedzi. Wydaje się, że nauczyciele fizyki chętnie sięgają do tego rodzaju nietypowych materiałów, jeżeli mają one odpowiednio atrakcyjną formę.

Wycieczki do wielkich laboratoriów

Każde z wielkich laboratoriów fizyki wysokich energii (i nie tylko) dysponuje personelem do obsługi zwiedzających. Bez przesady można powiedzieć, że CERN należy do większych atrakcji turystycznych Genewy, podobną rolę ma DESY dla Hamburga. CERN i DESY są szczególnie chętnie odwiedzane przez uczniów i nauczycieli z całej Europy. Efektywność takiej popularyzacji jest oceniana bardzo wysoko. Oczywiście wycieczka do CERN-u jest zbyt kosztowna na przeciętną polską kieszeń, chociaż ostatnio wyjechała tam jedna z klas I Liceum Ogólnokształcącego im. Nowodworskiego w Krakowie (patrz *Foton* 54/97 oraz notatka w *Kronice Postępów Fizyki* 49, z. 1 (1998)). Od pewnego czasu wycieczki do CERN-u i DESY są też fundowane przez różne instytucje jako nagrody dla zwycięzców polskich olimpiad i konkursów fizycznych. W Europie Zachodniej przywiązuje się dużą wagę do organizacji wycieczek nauczycieli fizyki do wielkich centrów badawczych, wychodząc ze słusznego założenia, że to im przede wszystkim należy uświadamić walory dydaktyczne prowadzonych tam badań.

W Polsce z inicjatywy Polskiej Agencji Atomistyki zostały zorganizowane wycieczki większych grup dziennikarzy do CERN-u (w 1991 r.) i DESY (w 1997 r.).

Dni otwarte uniwersytetów i instytutów naukowych

W Europie Zachodniej większość uniwersytetów i instytutów naukowych organizuje dni otwarte, podczas których grupy eksperymentalne przedstawiają działające urządzenia, wygłaszają wykłady itp. W Polsce tego typu działalność jest również prowadzona, np. Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie organizuje już tradycyjnie Dzień Otwarty z przeciętną frekwencją ok. 1000 osób. Chociaż jego organizacja jest bardzo pracochłonna, wydaje się, że warto to robić, bo jest to jeden z najlepszych sposobów dotarcia do szerokiej publiczności.

Sądzę, że wymiana doświadczeń w organizacji imprez tego typu w Polsce byłaby bardzo pożądana.

Wykłady w liceach

Popularne wykłady prowadzone w liceach uważane są za bardzo efektywną formę popularyzacji. Grupa fizyków z Instytutu Fizyki Jądrowej i Fizyki Cząstek Elementarnych IN2P3 (Francja) opracowała standardowe przeźrocza do pięciu wykładów z takim właśnie przeznaczeniem („LEP – maszyna do podróży w czasie”, „Co to jest masa – projekt LHC”, „Neutrino – widmowa cząstka” itp.). Ułatwia to bardzo przygotowanie wykładu. W Belgii większość grup doświadczalnych fizyki wysokich energii prowadzi wykłady popularne w szkołach regularnie, np. raz w roku. Inną aktywnością popularyzatorską tego typu jest „dzień fizyki”, organizowany w Norwegii raz w roku dla uczniów starszych klas licealnych, którzy wybrali fizykę jako jeden z przedmiotów. Oprócz wykładów popularnych, w czasie tego spotkania uczniowie są informowani o studiach fizyki i możliwościach zatrudnienia po jej ukończeniu.

Wystawy objazdowe

CERN posiada wystawę objazdową, cieszącą się dużą popularnością we wszystkich krajach europejskich. W Polsce wystawa CERN-owska odwiedziła Warszawę i Kraków. W obydwu miastach obejrzało ją kilkadziesiąt tysięcy osób. Wystawy objazdowe są uważane za bardzo dobry sposób dotarcia do szerokiej publiczności, są jednak bardzo kosztowne (ok. 70 tys. franków szwajc. na jedną podróż wystawy CERN-owskiej), dlatego liczba krajów, które może ona odwiedzić w ciągu roku, jest ograniczona. Koszty transportu i instalacji pokrywane są przez CERN, natomiast lokalny organizator pokrywa koszty wynajęcia lokalu, obsługi, infrastruktury itp.

Obecność wystawy w danym mieście zazwyczaj łączy się z innymi ważnymi wydarzeniami naukowymi (np. konferencja Europejskiego Towarzystwa Fizycznego) lub ogólnokulturalnymi. W 1998 r. wystawę CERN-owską będzie gościł Sztokholm – Miasto Kultury Europejskiej 1998. Kraków – Miasto Kultury Europejskiej 2000 – wydaje się następnym dobrym kandydatem do przyjęcia wystawy.

W Krakowie była również otwarta w dniach od 24 listopada do 9 grudnia 1997 r. wystawa DESY. Składała się ona jednak głównie z plaka-

tów z dużą ilością tekstu do czytania, i cieszyła się trochę mniejszym zainteresowaniem publiczności, chociaż dużą frekwencję zapewniły jej wycieczki szkolne. Warto przy tej okazji zaznaczyć, że nowa wystawa CERN-owska, zrobiona przez specjalistów od kontaktów publicznych, zawiera zdecydowanie mniej tekstów; zastąpiono je obiektami, które zmuszają zwiedzających do aktywnego kontaktu z przedstawianym na wystawie materiałem.

Warto w tym miejscu wspomnieć o dyskusji wywołanej nową organizacją wystawy CERN-owskiej, zaadresowanej tym razem do dzieci i ludzi nie mających żadnego przygotowania z dziedziny fizyki. Otóż nie wszystkim się ona spodobała. Głównie zarzucano nowej wystawie jarmarczność i brak istotnych informacji o fizyce cząstek. Wydaje się, że główną przyczyną sporu było nieporozumienie dotyczące adresata wystawy. Właściwe ustalenie odbiorcy jakichkolwiek działań popularyzacyjnych jest warunkiem ich powodzenia. CERN zorganizował wystawę dla szerokiej publiczności, wzorując się na ogromnym sukcesie muzeów nauki w rodzaju „La Villette” w Paryżu, czy Science Center w Jodrell Bank (W. Brytania). Chociaż wydaje się, że wystawa CERN-owska powinna mieć także swoją część „poważną”, której przesłanie skierowane jest do bardziej elitarniej publiczności, to jednak totalna krytyka jej „jarmarcznej” części nie jest uzasadniona.

Muzea nauki

Muzea nauki znajdują się we wszystkich większych miastach Europy Zachodniej. Do najświetniejszych należy Muzeum Nauki (Science Museum) w Londynie, Pałac Odkryć (Palais de la Decouverte) w Paryżu oraz Muzeum Nauki i Techniki (Deutsches Museum) w Monachium. W Polsce nie istnieje żadne muzeum nauki, co było wielokrotnie krytykowane przez nauczycieli fizyki. Brak tego rodzaju instytucji stanowi jedną z większych luk w systemie popularyzacji nauk ścisłych w Polsce.

Jak już wspomnieliśmy wyżej przy omawianiu objazdowej wystawy CERN-u, bardzo ważną kwestią jest właściwe ustalenie adresata ekspozycji muzeów naukowych. Ciekawym przykładem jest Ośrodek Nauki (Science Center) w Jodrell Bank, zorganizowany przez Sir Bernarda Lovella. Jego

taktyka polegała na zrobieniu wystawy atrakcyjnej dla najszerszej publiczności, szczególnie dzieci ze szkół podstawowych. Ośrodek ten odwiedza rocznie 150 tys. gości, płacąc słono za wstęp (4 funty – dorośli, 2 funty – dzieci).

Sławne „miasteczko naukowe” La Villette w Paryżu jest skrzyżowaniem budy jarmarcznej z laboratorium fizycznym. Tutaj można zaprosić kolegów i koleżanki na urodziny zamiast do McDonalda, ale też nauczyciel starszych klas licealnych znajdzie dobry materiał ilustracyjny do swoich lekcji. Podobnie jak w Jodrell Bank, nawet drogi wstęp nie odstrasza tłumów.

Wszystko to warto wziąć pod uwagę, kiedy i w Polsce zaczną powstawać muzea nauki (oby niedługo).

Prasa

Należy tu zrobić wyraźne rozróżnienie między prasą codzienną a czasopismami popularnonaukowymi; te ostatnie przeznaczone są dla doświadczonej elitarnej publiczności, mają z reguły bardzo dobry poziom i kontakty z fizykami. Dotarcie do szerokiej publiczności wymaga jednak publikacji w prasie codziennej, i tu napotykamy na podstawową trudność: co innego stanowi wiadomość dla fizyka, a co innego dla dziennikarza. Kierownik biura prasowego CERN-u Neil Calder podkreśla, że styl prasy codziennej wymaga, aby doniesienia o pracy naukowców miały charakter opowiadania o jakimś nadzwyczajnym wydarzeniu, tzw. „story”, a samo odkrycie naukowe zazwyczaj nim nie jest (chyba że chodzi rzeczywiście o jakąś rewelację). Dla przykładu, w ciągu ostatnich kilku lat największe powodzenie miała w prasie codziennej historia o tym, jak robotnicy pozostawili w rurze akceleratora butelkę po piwie, co udało się stwierdzić po wadliwym działaniu aparatury. Przy okazji udało się przemyścić kilka informacji o charakterze bardziej naukowym. Wydaje się, że obecność fizyki w prasie codziennej zależy od tego, na ile potrafimy udratyzować szarą codzienność badań naukowych. Do tego potrzebna jest dobra współpraca zawodowych dziennikarzy o wyższym wykształceniu ścisłym oraz aktywnych naukowo fizyków, posiadających doświadczenie w kontaktach z mediami. W krajach Europy Zachodniej popularny jest zawód dziennikarza naukowego, w Polsce dotychczas nie ist-

niejący, chociaż ostatnio pojawili się jego pierwsi kompetentni przedstawiciele. W 1997 r. redaktor Piotr Cieśliński z *Gazety Wyborczej* i dr hab. Stanisław Mrówczyński zostali uhonorowani Nagrodą za Popularyzację Fizyki Polskiego Towarzystwa Fizycznego.

Telewizja i radio

Chociaż bez wątpienia telewizja jest wymarzoną drogą przekazu dla popularyzatorów, to jednak we wszystkich krajach Europy dostęp do niej jest bardzo ograniczony, i żaden z uczestników spotkania w CERN-ie nie widział możliwości zmiany tej sytuacji. Problem stanowi nie tyle przekonanie władz telewizji do nakręcenia reportażu na temat fizyki, ile do wyemitowania tego materiału w porze dobrej oglądalności. Telewizja Polska nakręciła ok. dziesięciu filmów na temat fizyki cząstek.

Wprawdzie zamieszczona wyżej tabela nie wspomina o radiu, jednak przynajmniej w warunkach polskich jest to środek przekazu, którego nie należy lekceważyć. Osobiście słyszałem kilka bardzo dobrych audycji na temat fizyki w porach „dobrej słuchalności” (wywiady z fizykami, audycja o DESY itp.)

Finansowanie popularyzacji

Godnym uwagi faktem jest duże instytucjonalne i finansowe poparcie dla popularyzacji nauki w Europie Zachodniej i USA, którego niemal całkowicie brak w Polsce. Dla przykładu przyjrzyjmy się popularyzacji fizyki cząstek w Wielkiej Brytanii. Badania w zakresie fizyki cząstek elementarnych są finansowane za pośrednictwem Rady ds. Badań w Dziedzinie Fizyki Cząstek i Astronomii (Particle Physics and Astronomy Research Council – PPARC). Instytucja ta nie tylko zezwala, ale bardzo zachęca grantobiorców do wydawania do 1% swoich grantów na cele o charakterze popularyzacyjnym. Oprócz tego finansuje niewielkie projekty (do 10 tysięcy funtów) o charakterze czysto popularyzatorskim. PPARC bezpośrednio zatrudnia fizyka (na dwa dni w tygodniu) posiadającego doświadczenie w kontaktach z mediami, a także finansuje prowadzenie strony internetowej, poświęconej fizyce cząstek (<http://hepweb.rl.ac.uk/ppUK/>).

Sprawami popularyzacji nauki zajmują się aż trzy instytucje: Brytyjskie Stowarzyszenie na Rzecz Postępu Nauk Przyrodniczych, sławna Royal Institution oraz Komitet ds. Publicznego Zrozumienia Nauk Przyrodniczych (Committee for the Public Understanding of Science). Poza pomocą organizacyjną i finansową dla popularyzatorów, dbają one o zapewnienie tej działalności odpowiedniego prestiżu. W 1990 r. Towarzystwo Królewskie ustanowiło Nagrodę im. Faradaya dla osób, które wniosły ważny wkład w upowszechnianie wiedzy. Natomiast w związku z przystąpieniem Wielkiej Brytanii do budowy wielkiego akceleratora LHC w CERN-ie, minister edukacji ogłosił konkurs na najlepszy artykuł popularny na temat cząstki Higgsa, której odkrycie należy do najważniejszych zadań tego projektu.

W USA do popularyzacji nauki przykładą się równie duże znaczenie. W NASA popularyzowanie badań jest warunkiem ich prowadzenia, np. Laboratorium Kosmicznego Teleskopu Hubble'a zatrudnia 23 osoby odpowiedzialne wyłącznie za kontakty ze środkami masowego przekazu. Stany Zjednoczone mogą się również pochwalić wspomnianą już organizacją CPEP, zrzeszającą nauczycieli i naukowców, której zadaniem jest produkcja i dystrybucja materiałów popularyzacyjnych i dydaktycznych (plakaty, programy komputerowe, dyski optyczne itp.). Jest ona finansowana przez Departament Energii, Narodową Fundację Badań (NSF), Amerykańskie Towarzystwo Fizyczne, niektóre większe labora-

toria i uniwersytety, wreszcie korporacje przemysłowe, np. General Atomics.

W bardzo wielu wypowiedziach uczestników spotkania w CERN-ie powtarzała się uwaga na temat dużej roli kontaktów z nauczycielami szkół, szczególnie średnich (ale nie tylko). Dla nich organizuje się specjalne kursy na temat fizyki współczesnej, szkoły letnie, wyjazdy do dużych laboratoriów itp. Aktywni nauczyciele są bardzo dobrym adresatem informacji o tym, co dzieje się w fizyce, ponieważ to właśnie oni mogą je efektywnie powielać. Robię tę dość trywialną uwagę, ponieważ wydaje mi się, że w Polsce środowiska naukowe mają zbyt słaby kontakt z nauczycielami.

Spotkanie na temat popularyzacji fizyki cząstek elementarnych w CERN-ie spełniło swoje podstawowe zadanie: nawiązano pierwsze kontakty oraz określono główne kierunki działania. Powstała Europejska Grupa Promocji Fizyki Cząstek (European Particle Physics Outreach Group), której koordynatorem został Frank Close. Informacje o jej działalności można uzyskać na stronie WWW <http://pcdh01.cern.ch/hep-pr/> oraz od autora artykułu (turnau@chall.ifj.edu.pl).

Na zakończenie jeszcze jedna uwaga: warto rozważyć potrzebę zorganizowania spotkania ludzi interesujących się tą tematyką, którego celem byłoby nawiązanie kontaktów, wymiana doświadczeń oraz dyskusja nad stworzeniem instytucjonalnych i finansowych podstaw popularyzacji fizyki, czy nauk ścisłych w ogóle, w Polsce.

Trojańskie paczki falowe

Zofia Białyńska-Birula

Instytut Fizyki PAN i Szkoła Nauk Ścisłych, Warszawa

Trojan wave packets

Abstract: Nonspreading wave packets describing an electron in a hydrogen atom interacting with microwave radiation may exist under special conditions. They are called Trojan wave packets by an analogy with Trojan asteroids in the Sun-Jupiter system. The Trojan wave packets are extremely stable against ionization and even more stable against decay by spontaneous emission of light.

Planetary model of the atom was the fruit of genius intuition and Niels Bohr's courage. The model, in which electrons orbit stably around the nucleus, was contrary to the laws of classical physics. The additional postulate of quantum jumps between orbits, which accompanied the emission of radiation, made the model even more strange. However, this model served spectroscopy well, until it was replaced by a probabilistic description based on quantum mechanics. According to quantum mechanics, stationary electron states in an atom are described by wave functions, whose moduli determine the probability of finding the electron in space. These functions are spread out over the shape of the atom. The electron in such a state is not a small lump of matter orbiting the nucleus.

Stationary states are extremely useful in calculating various properties and atomic processes; they are the basis of spectroscopic calculations. However, these are the only electron states in an atom that we can construct theoretically or create in a laboratory. In studying short-time processes in atoms and particles, stationary states are useful.

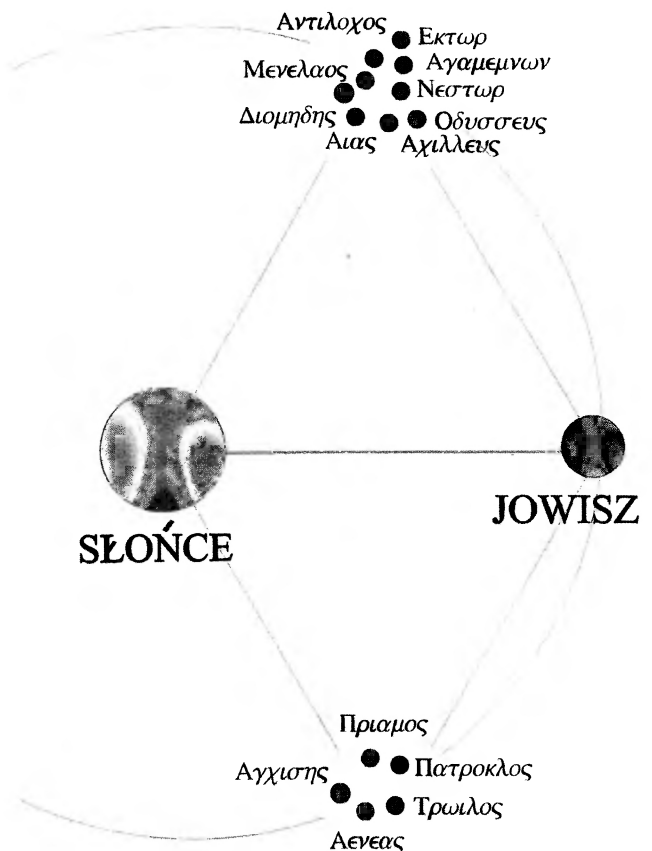
They exist in space, which can be built as a superposition of many stationary states. The wave function of such a state has the form of a wave packet and can be localized in a small region of space, which is consistent with Heisenberg's uncertainty principle. Such a state is not stationary; its wave packet spreads quickly.

At the University of Rochester (USA) Carlos Stroud [1] created such wave packets in sodium atoms. The atoms were excited by a short light pulse from a dye laser to a high-energy stationary state of the main quantum number $n = 50$ by absorbing a two-photon transition in the presence of a circularly polarized microwave radiation of radio frequency, which caused transitions between adjacent states with different angular momentum quantum numbers l . As a result of these processes, a wave packet was formed, localized on the orbit corresponding to $n = 50$, which was a superposition of states with quantum numbers $29 < l < 37$, $m = l$. The created atomic state was then studied with the help of a short ionizing pulse of an electric field, which allowed to determine where at a given time the wave packet was. It turned out that the wave packet spread so quickly that it disappeared almost immediately.

jednego obiegu wokół jądra zajmowała już prawie całą orbitę.

Niedawno Iwo Białynicki-Birula z Centrum Fizyki Teoretycznej PAN w Warszawie oraz Joseph Eberly i Maciej Kaliński z Uniwersytetu w Rochester [2] przewidzieli istnienie nie rozplywających się paczek falowych, opisujących elektron w atomie wodoru poddanym działaniu kołowo spolaryzowanego promieniowania mikrofalowego. Atom taki musiałby być, podobnie jak w doświadczeniach Strouda, wzbudzony uprzednio do tzw. kołowego stanu rydbergowskiego, czyli do stanu stacjonarnego o dużej głównej liczbie kwantowej n (np. $n = 60$) oraz o największych możliwych liczbach kwantowych momentu pędu l i magnetycznej m ($m = l = n - 1$). Związany w atomie elektron, opisany takimi liczbami kwantowymi, znajduje się stale bardzo daleko od jądra, w odległości n^2 razy większej niż rozmiary pierwszej orbity bohrowskiej, czyli w odległości 1.8×10^{-7} m dla $n = 60$. Wydawało się więc, że promieniowanie mikrofalowe o częstości rezonansowej spowoduje szybką jonizację takiego atomu. W pewnych jednak warunkach jonizacja praktycznie nie następuje, wytwarza się natomiast stan elektronu „ubrany w promieniowanie mikrofalowe” w postaci paczki falowej, dobrze zlokalizowanej w przestrzeni i krążącej wokół jądra po orbicie kołowej z częstością keplerowską równą częstości fali. Orbita ta leży w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali. Te nie rozplywające się paczki zawdzięczają swą stabilność równowadze trzech sił: przyciągania kulombowskiego pochodzącego od jądra, siły wywieranej przez falę i siły odśrodkowej. Spełnienie tego warunku równowagi wymaga doboru amplitudy i częstości pola mikrofalowego odpowiedniego do odległości od jądra, w której formuje się paczkę falową. Autorzy nazwali przewidziane przez siebie, nie rozplywające się paczki falowe paczkami trojańskimi z uwagi na ich podobieństwo do chmur asteroid, które wraz z Jowiszem obiegają Słońce i które stabilność swego położenia na orbicie zawdzięczają też równowadze trzech sił: sił grawitacyjnych wywieranych przez Słońce i przez Jowisza oraz siły odśrodkowej. Punkty stabilności dla ciała próbnego, znajdującego się w układzie dwóch ciężkich ciał obracających się wokół swego środka masy, przewidział już Lagrange w 1772 r. Pierwsze asteroidy, o których mowa,

zaobserwował Wolf w Obserwatorium w Heidelbergu w 1906 r. i obdarzył je imionami bohaterów wojny trojańskiej. Występują one w dwóch grupach; jedna wyprzedza Jowisza w jego obiegu wokół Słońca, a druga podąża za nim. Obrazuje to rys. 1. Warto tu może zwrócić uwagę na to, że często ruch okresowy (obrót lub oscylacje) powoduje stabilizację. Dzieje się tak nie tylko w przypadku asteroid trojańskich, ale też np. w pułapce Paula (gdzie rolę stabilizującą odgrywa oscylujące napięcie) oraz w modelu mechanicznym, pokazanym przez Paula w czasie jego wykładu noblowskiego [3]. W modelu tym kulka umieszczona na powierzchni o kształcie siodła (jak na rys. 2) utrzymywana jest w równowadze przez odpowiednio szybki obrót tej powierzchni.

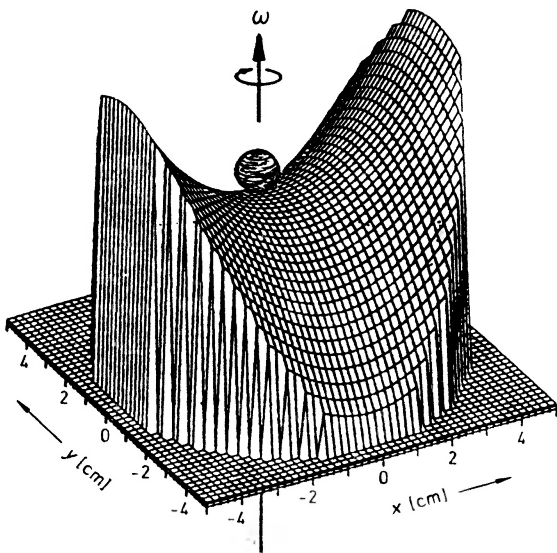


Rys. 1. Asteroidy trojańskie na orbicie Jowisza.

Analiza paczek trojańskich w atomie wodoru naświetlanym kołowo spolaryzowaną falą elektromagnetyczną o amplitudzie E i częstości Ω oparta jest na nierelatywistycznej mechanice kwantowej z zależnym od czasu hamiltonianem

$$H(t) = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} - eE[x \cos(\Omega t) + y \sin(\Omega t)], \quad (1)$$

gdzie pierwszy człon reprezentuje energię kinetyczną elektronu, drugi energię potencjalną



Rys. 2. Mechaniczny model pułapki Paula. Położenie kulki na nieruchomej powierzchni jest niestabilne. Gdy jednak powierzchnia obraca się z odpowiednią prędkością, kulka nie spada.

w polu kulombowskim, a ostatni energię elektrycznego dipolowego oddziaływania z falą. Zależności od czasu w hamiltonianie $H(t)$ można się pozbyć, dokonując transformacji unitarnej $U = \exp(i\Omega M_z t)$, którą można interpretować jako przejście do wirującego układu odniesienia. Po tej transformacji w hamiltonianie pojawia się dodatkowy człon, proporcjonalny do składowej w kierunku osi z (czyli w kierunku rozchodzenia się fali) momentu pędu elektronu M_z :

$$H = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} - eEx - \Omega(xp_y - yp_x). \quad (2)$$

Klasycznym punktem równowagi w przestrzeni fazowej jest $\mathbf{r} = (x_0, 0, 0)$, $\mathbf{p} = (0, mx_0\Omega, 0)$, gdzie równoważą się trzy siły:

$$-\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 x_0^2} + eE + mx_0\Omega^2 = 0. \quad (3)$$

Rozwijając potencjał kulombowski wokół tego punktu i zachowując tylko wyrazy kwadratowe, otrzymujemy w tym przybliżeniu hamiltonian trójwymiarowego oscylatora harmonicznego, który można następnie przedstawić w postaci kanonicznej za pomocą operatorów kreacji i anihilacji wzbudzeń: $a_+^\dagger, a_+, a_-^\dagger, a_-, a_z^\dagger, a_z$,

$$H \approx \hbar\omega_+ a_+^\dagger a_+ - \hbar\omega_- a_-^\dagger a_- + \hbar\omega_z a_z^\dagger a_z + E_0, \quad (4)$$

gdzie

$$\omega_{\pm} = \Omega \sqrt{1 - \frac{q \mp \sqrt{9q^2 - 8q}}{2}}, \quad (5)$$

$$\omega_z = \Omega\sqrt{q}, \quad (6)$$

a bezwymiarowy parametr q mierzy stosunek siły kulombowskiej do siły odśrodkowej:

$$q = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m\Omega^2 x_0^3}. \quad (7)$$

Na uwagę zasługuje fakt, że drugi wyraz wchodzi do hamiltonianu (4) ze znakiem minus. Hamiltonian ten nie jest więc ograniczony od dołu. Posiada on jednak układ zupełny związanych stanów własnych, z których jeden, zwany fundamentalnym, anihilowany jest przez wszystkie operatory anihilacji. Funkcja falowa tego stanu ma postać gaussowskiej paczki falowej

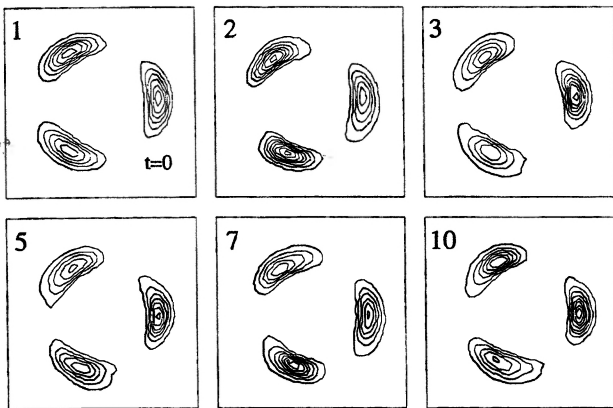
$$\begin{aligned} \psi_0(\mathbf{r}) = & N_0 \exp(im\Omega x_0 y / \hbar) \exp(-iE_0 t / \hbar) \times \\ & \times \exp\left[-\frac{m\Omega}{2\hbar} [A(x-x_0)^2 + By^2 + \right. \\ & \left. + 2iC(x-x_0)y + Dz^2]\right]. \quad (8) \end{aligned}$$

Współczynniki A, B, C i D wyznaczają rozmiary paczki falowej. Zależą one wyłącznie od parametru q . Wartości tego parametru ograniczone są do zakresu od $8/9$ do 1 , gdyż tylko w tym zakresie wszystkie częstości dane wzorami (5) i (6) są rzeczywiste i stan opisywany paczką falową ψ_0 jest stabilny (nie rozplywa się w czasie). W układzie wirującym paczka ta zlokalizowana jest wokół pewnego punktu orbity kołowej, odległej o x_0 od jądra. W układzie laboratoryjnym stan elektronu opisuje paczka falowa wirująca wokół jądra z częstością Ω . W tym szczególnym przypadku na gruncie mechaniki kwantowej odżywa idea elektronu z planetarnego modelu atomu Bohra.

Obliczenia numeryczne wykonane niezależnie przez kilku autorów [4-6] potwierdziły wyniki uzyskane w przybliżeniu harmonicznym. Okazało się, że specjalnie uformowane trojańskie paczki falowe zachowują swój kształt w czasie tysięcy obiegów wokół jądra. Na rys. 3 widać ewolucję paczki trojańskiej w kilku pierwszych okresach jej obiegu wokół jądra. Niedawno pokazano też [6], że pominięte w przybliżeniu harmonicznym części hamiltonianu powodują wprawdzie jonizację atomu

w stanie trojańskim, lecz jonizacja w tym przypadku jest bardzo mało prawdopodobna. Czas życia paczki trojańskiej uformowanej wokół $n = 60$ wynosi zgodnie z tymi rachunkami około miliona okresów keplerowskich.

Ostatnio obliczono też [7] czas życia stanu trojańskiego ze względu na emisję spontaniczną. Stan elektronu opisany gaussowską paczką falową ψ_0 ze wzoru (8) nie jest stanem o najniższej energii z uwagi na znak minus przy ω_- w hamiltonianie (4). Elektron może przejść do stanu wzbudzonego $a_+^\dagger \psi_0$ emitując foton¹. Obliczenia wskazują, że stan trojański jest niezwykle stabilny i pod tym względem. Emisja spontaniczna praktycznie nie następuje, gdyż czas życia ze względu na ten proces wynosi dla $n = 60$ około pół sekundy. Prawdopodobieństwo emisji spontanicznej jest milion razy mniejsze niż prawdopodobieństwo jonizacji.



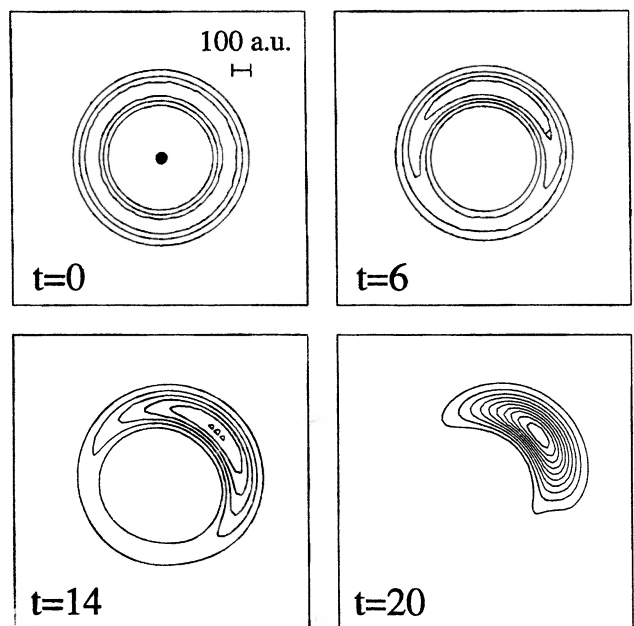
Rys. 3. Ewolucja paczki trojańskiej uformowanej w $t = 0$ jako funkcja gaussowska we współrzędnych cylindrycznych. Zaznaczone są trzy położenia paczki w każdym z wybranych cykli: pierwszym, drugim, trzecim, piątym, siódmym i dziesiątym.

Ciekawe, że trojańskie paczki falowe w atomie wodoru oddziałującym z polem mikrofalowym są stabilniejsze nawet od normalnych kołowych stanów rydbergowskich na tej samej orbicie. Kołowe stany rydbergowskie znane są jako niezwykle trwałe i z tego powodu używane są jako narzędzie w precyzyjnych pomiarach. Grupa Serge'a Haroche'a z Ecole Normale Supérieure w Paryżu [8] zmierzyła przy ich użyciu pole mikrofalowe we wnęce rezonansowej z dokładnością do

¹ Z uwagi na to, że analizę przeprowadzamy w układzie wirującym, hamiltonian (4) nie jest operatorem energii. Możliwe jest więc też przejście do stanu wzbudzonego $a_+^\dagger \psi_0$ z emisją fotonu. To przejście jednak jest mniej prawdopodobne od przejścia „w dół” (prywatna informacja od D. Delande'a).

„ułamków fotonu”, wyznaczając w układzie interferencyjnym Ramsey'a przesunięcie fazowe wywołane polem mikrofalowym. Stany trojańskie mogą stać się jeszcze jednym precyzyjnym narzędziem badań.

Symulacje numeryczne [9] pokazały, że trojańskie paczki falowe w wodorze można tworzyć przez stopniowe włączanie pola mikrofalowego padającego na atom, wzbudzony uprzednio do kołowego stanu rydbergowskiego. Rysunek 4 pokazuje, że funkcja falowa wzbudzonego elektronu skupia się w paczkę trojańską już po dwudziestu okresach obiegu wokół jądra od chwili, w której rozpoczyna się włączanie pola.



Rys. 4. Formowanie paczki trojańskiej przez stopniowe włączanie pola mikrofalowego. W chwili $t = 0$ elektron znajduje się w kołowym stanie rydbergowskim o $n = 20$. Czas t podany jest jako wielokrotność okresu keplerowskiego.

Paczki falowe o tych samych własnościach co trojańskie paczki w wodorze, mogą też istnieć [10] w obracających się cząsteczkach obdarzonych elektrycznym momentem dipolowym. Taki obracający się moment dipolowy rdzenia działa na elektron znajdujący się na kołowej orbicie rydbergowskiej podobnie do spolaryzowanej kołowo fali elektromagnetycznej. Można więc mieć nadzieję, że w niedalekiej przyszłości paczki trojań-

skie zostaną utworzone w atomach lub cząsteczkach zgodnie z przewidywaniami teorii.

Literatura

- [1] J.A. Yeazell, C.R. Stroud, Jr., *Phys. Rev. Lett.* **60**, 1494 (1988).
- [2] I. Białynicki-Birula, M. Kaliński, J.H. Eberly, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 1777 (1994).
- [3] W. Paul, *Postępy Fizyki* **42**, 503 (1991).
- [4] M. Kaliński, J.H. Eberly, I. Białynicki-Birula, *Phys. Rev. A* **52**, 2460 (1995).
- [5] D. Delande, J. Zakrzewski, A. Buchleitner, *Europhys. Lett.* **32**, 107 (1995).
- [6] J. Zakrzewski, D. Delande, A. Buchleitner, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 4015 (1995).
- [7] Z. Białynicka-Birula, I. Białynicki-Birula, *Phys. Rev. A* **56**, 3623 (1997).
- [8] M. Brune, P. Nussenzveig, F. Schmidt-Kaler, F. Bernadot, A. Maali, J.M. Raimond, S. Haroche, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 3339 (1994).
- [9] M. Kaliński, J.H. Eberly, *Phys. Rev. A* **53**, 1715 (1996).
- [10] I. Białynicki-Birula, Z. Białynicka-Birula, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 4298 (1996).

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

Konferencja i Szkoły Krystalografii w Wiśle

W dniach od 31 sierpnia do 4 września 1997 r. odbyła się w Wiśle kolejna, XVII Konferencja Krystalografii Stosowanej. Bezpośrednio po konferencji odbyły się dwie imprezy towarzyszące (4–7 września 1997 r.): III Letnia Szkoła Metody Rietvelda oraz organizowana po raz pierwszy w Polsce Szkoła Krystalografii Elektronowej. Konferencję oraz Szkoły zorganizował już tradycyjnie Instytut Fizyki i Chemii Metali Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Współorganizatorami Konferencji były: Komitet Nauki o Materiałach PAN oraz Komitet Krystalografii PAN. Tym razem po raz pierwszy gościliśmy w Hotelu „Stok” w Wiśle-Jaworniku, gdzie przygotowano sale wykładowe, pracownie komputerowe i foyer dla sesji plakatowych.

Sponsorami tegorocznej konferencji byli: Ministerstwo Edukacji Narodowej, Polska Akademia Nauk, Stal-export S.A., Huta „Bankowa” oraz Philips Analytical X-ray z Holandii i JEOL Ltd. z Japonii. Komitet Badań Naukowych dofinansował Międzynarodową Letnią Szkołę Rietvelda, a Międzynarodowa Unia Krystalografii ufundowała 20 stypendiów dla młodych naukowców pragnących brać udział w Szkole oraz opłaciła podróż zagranicznych wykładowców Szkoły.

Patronat nad Konferencją objął Rektor Uniwersytetu Śląskiego prof. Tadeusz Sławek, a przewodniczącym Konferencji był prof. Henryk Morawiec, dyrektor Instytutu Fizyki i Chemii Metali. W Konferencji uczestniczył również inicjator i długoletni organizator tych imprez prof. Zbigniew Bojarski, obecnie honorowy przewodniczący Konferencji. Sekretarzem Konferencji była autorka tego sprawozdania.

W Konferencji uczestniczyło ponad 140 osób, w tym 60 uczestników zagranicznych z USA, Argentyny, Australii, Francji, Wielkiej Brytanii, Grecji, Włoch, Rosji,

Ukrainy i in. W trakcie trwania konferencji wygłoszono 41 referatów na sesjach plenarnych oraz przedstawiono 77 prac w sesjach plakatowych. Większość referatów na sesjach plenarnych wygłosili wybitni specjaliści w dziedzinie krystalografii i badań strukturalnych, profesorowie: A. Authier, D. Louer, R. Cernik, D. Smith, P.W. Schmidt, G. Kostorz, T. Tadaki, S. Hovmöller, B. von Dreele, H. Bunge i inni.

Program Konferencji obejmował zagadnienia określania struktury materiałów polikrystalicznych na podstawie dyfrakcji rentgenowskiej z wykorzystaniem metody Rietvelda. Wiele prac obejmowało szersze zastosowanie tej metody, m.in. do ilościowej analizy fazowej i do określania uprzywilejowanej orientacji krystalograficznej. Omówiono także rozwój metod i technik rentgenowskiego, neutronograficznego i synchrotronowego badania struktury. Ilustracją postępu w tej dziedzinie była wystawa wielu firm wyspecjalizowanych w produkcji nowoczesnej aparatury badawczej. Inny temat prac to krystalografia przemian fazowych; w tym obszarze najliczniejsza grupa prac dotyczyła krystalografii przemiany martenzytycznej w stopach wykazujących pamięć kształtu. Poruszono też zagadnienia tekstury czyli uprzywilejowanej orientacji krystalograficznej oraz własności defektów, a w szczególności granic ziarn. Przedstawiono również prace na temat materiałów metalowych, ceramicznych i polimerów z uwzględnieniem materiałów amorficznych, cienkich warstw, włókien itp.

Przedstawione prace zostaną opublikowane w materiałach konferencyjnych wydawanych przez brytyjską firmę World Scientific.

Ponadto, przedstawiciele firm Philips Analytical X-ray, JEOL, Seifert i AXS przedstawili swoje oferty.

Bezpośrednio po konferencji odbyły się równolegle Szkoły: Metody Rietvelda i Krystalografii Elektronowej. Tę pierwszą Instytut zorganizował już po raz trzeci w odpowiedzi na szerokie zainteresowanie uczest-

ników szkół poprzednich. Dyrektorem tej Szkoły był prof. R. Young z Atlanty (USA), a wykładowcami profesorowie: R. Von Dreele (USA), I. Madsen (Australia) i J.P. Attfield (Wielka Brytania). Uczestnicy Szkoły poza udziałem w wykładach mieli okazję do zapoznania się z prezentowanymi programami na zajęciach praktycznych na komputerach, które często trwały do późnych godzin wieczornych.

Drugiej ze szkół, Szkole Krystalografii Elektronowej, przewodniczył prof. S. Hövöller (Szwecja) przy współpracy lokalnego przewodniczącego prof. J. Kozubowskiego z Politechniki Warszawskiej. Ponadto wykładawcą była dr X. Zou (Szwecja). Szkoła ta adresowana była tylko do uczestników krajowych. Również i tutaj zaprezentowano wiele interesujących wykładów oraz programy komputerowe, za pomocą których dokonuje się analizy wysokorozdzielczych obrazów mikroskopowych i dyfrakcji elektronów, co umożliwia wyznaczenie struktur krystalicznych badanych materiałów.

Celem tej szkoły było przygotowanie młodej kadry do pełniejszego wykorzystania nowych metod badania struktury krystalicznej, w których stosuje się nowoczesną mikroskopię elektronową. Powinno się to przyczynić do efektywnego wykorzystania trzech nowoczesnych transmisyjnych mikroskopów elektronowych w kraju, będących darem Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej.

Konferencja i Szkoły w opinii ich uczestników wyróżniały się wysokim poziomem merytorycznym i sprawną organizacją.

Danuta Stróż

Instytut Fizyki i Chemii Metali UŚ
Katowice

„Gauge Theories of Gravitation”

W dniach 4–10 września 1997 r. w ośrodku wypoczynkowym Kancelarii Prezesa Rady Ministrów w Jadwisinie pod Warszawą odbyło się międzynarodowe spotkanie robocze (workshop) pn. „Gauge Theories of Gravitation”, zorganizowane przez Zakład Teorii Względności i Gravitacji Instytutu Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego. Spotkanie było współfinansowane przez Komitet Badań Naukowych, Fundację Współpracy Polsko-Niemieckiej, Fundację Batorego, Niemieckie Towarzystwo Fizyczne – Fundację Heraeusów i Międzynarodowe Centrum Fizyki Teoretycznej w Trieście. Wzięło w nim udział 53 fizyków, w tym 30 z zagranicy. Na 9 sesjach wygłoszono 27 referatów. Główne referaty wygłosili zagraniczni członkowie Komitetu Naukowego spotkania: Yuval Ne’eman (Tel Aviv), Joshua Goldberg (Syracuse), Paolo Budinich (Triest) i Friedrich Hehl (Kolonja). Szczególnie uroczysty charakter miała sesja w dniu 7 września, poświęcona obchodom 64. rocznicy urodzin prof. Andrzeja Trautmana; na sesji tej usłyszeliśmy referaty: Jürgena Ehlersa (Poczdami), Iwo Białynickiego-Biruli (Warszawa) i Petera Aichelburga (Wiedeń). Przewodniczył jej Marek Demiański. Spotkanie należy uznać za bardzo udane.

Było ono konferencją relatywistów z rzadko spotykanym na takich konferencjach tematem przewodnim. Dzięki takiemu zawężeniu tematycznemu uzyskano większą jednorodność, co przyczyniło się – zdaniem wielu uczestników (w tym niżej podpisanego, przewodniczącego Komitetu Organizacyjnego) – do tego, że konferencja była ciekawsza od standardowej konferencji relatywistycznej. Innym, niemniej ważnym powodem sukcesu konferencji była sprawna praca jej sekretarzy: mgr Ewy Czuchry i mgra Konrada Banaszka. Materiały zostaną opublikowane w *Acta Physica Polonica B*.

Należy też zauważyć, że jubileusz prof. Trautmana został uczczony przez międzynarodową społeczność relatywistów specjalnym wydaniem zeszytu *Classical and Quantum Gravity* (14, z. 1A (styczeń 1997)), o czym informowała notatka w *Postęпах Fizyki* w Kronice 2/97.

Wojciech Kopczyński

Instytut Fizyki Teoretycznej UW
Warszawa

Symposium AIG-2

Drugie międzynarodowe sympozjum poświęcone zastosowaniu izotopów w geochemii (Second International Applied Isotope Geochemistry Symposium: AIG-2) odbyło się w dniach 30 września – 4 października 1997 r. w Lake Louise (Alberta, Kanada). Zostało ono znakomicie zorganizowane w przepięknej scenerii Gór Skalistych przez prof. H.R. Krouse’a i jego współpracowników z Uniwersytetu w Calgary. Wzięło w nim udział 52 uczestników (najwięcej z Kanady i krajów skandynawskich, jako że AIG-1 odbyło się w Norwegii, a także z Niemiec, USA i Australii). W sympozjum udział wzięli fizycy, chemicy i geolodzy. W ciągu 4 dni wygłoszono referaty tematycznie pogrupowane w następujących sesjach: (1) Postępy w metodach analitycznych i technikach instrumentalnych, (2) Biosfera – pedosfera, (3) Zastosowania w przemyśle petrochemicznym (poszukiwanie i pozyskiwanie ropy i gazu), (4) Zastosowania w ochronie środowiska, (5) Atmosfera – hydrosfera, (6) Środowisko kontynentalne, (7) Archeologia i żywność, (8) Geologia.

W ciągu jednej sesji wygłaszano od 4 do 6 referatów 20-minutowych, a po 3 do 4 przedstawiano na plakatach. Uczestnicy otrzymali powielone streszczenia referatów, zaś materiały z konferencji zostaną wydane przez Uniwersytet w Calgary w terminie późniejszym.

Z wielkiej liczby referatów kilka z nich szczególnie zasługuje na wzmiankę w tym sprawozdaniu. T.P. Ding z Chin zreferował wyniki absolutnych pomiarów stosunku izotopowego $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ we wzorcu IAEA S-1 oraz V-CDT. Stosunki te wynoszą odpowiednio 22.6564 oraz 22.4696 ± 0.0060 . Wartości te znacznie różnią się od przyjmowanych dotychczas (22.220). J. Morrison z Micromass UK przedstawił szybki sposób analizy izotopowej tlenu w materiale organicznym, AgNO_3 i BaSO_4 poprzez pirolizę do CO bez czasochłonnej konwersji CO do CO_2 .

M. Wieser (Calgary) omówił nową metodę analizy izotopowej siarki przy zastosowaniu mikrogramowej próbki As_2S_3 nakładanej na taśmę renową i pomiarów prądów jonowych $^{75}As^{32}S^+$ oraz $^{75}As^{34}S^+$. M. Satish-Kumar (Japonia) zreferował wyniki pomiarów $\delta^{18}O$ w płycie marmuru z rozdzielczością przestrzenną ok. 0.5 mm. Stwierdził on aż 21-promilowe zubożenie w izotop ciężki w pobliżu ziaren flogopitu. Natomiast niżej podpisany omówił anomalię w składzie izotopowym tlenu i siarki w gipsie z Borkowa (por. S. Hałas, T.M. Peryt, M. Jasionowski, *Przeł. Geol.*, z. 12 (1996)).

Dwa wolne popołudnia przeznaczono na wycieczkę wokół jeziora Louise oraz wycieczkę geologiczną w Góry Skaliste na granicy Alberta i Kolumbii Brytyjskiej. W czasie tej wycieczki pogoda dopisała, dzięki czemu zwiedziliśmy więcej niż zaplanowano. Na mnie osobiście wielkie wrażenie zrobiły następujące miejsca: (1) Marble Canyon – utworzony w dolinie polodowcowej, wyrzeźbiony przez potok z licznymi wodospadami, (2) Spiral Tunnel zbudowany 100 lat temu na przełęczy Kicking Horse Pass

w celu łatwiejszego ruchu pociągów na trasie z Vancouver do Calgary, (3) Emerald Lake – pięknie zagospodarowane jezioro górskie, trzykrotnie większe od Morskiego Oka, (4) Kicking Horse River Valley z naturalnymi mostami skalnymi, (5) The Great Divide – dział wodny na terenie Yoho National Park; w tym miejscu spory strumień wypływający ze skrasowiałych skał dzieli się na dwa, z których jeden podąża do Pacyfiku, a drugi do Atlantyku.

Bankiet jest w programie każdej konferencji. Ten wyróżniał się tym, że prof. Krouse zorganizował interesujący konkurs dla uczestników oraz „performance”, tj. ponad godzinny występ zespołu wokalnemuzycznego, w którym partie solowe wykonywał sam prof. Krouse. W zespole tym prof. Krouse gra na gitarze. Po występie wszyscy otrzymali kasety z nagraniem zespołu.

Następne sympozjum, AIG-3, odbędzie się prawdopodobnie w Europie za 3 lata.

Stanisław Hałas
Instytut Fizyki UMCS
Lublin

RECENZJE

Dzieje świecy

Michael Faraday: *Dzieje świecy*, z jęz. angielskiego tłumaczyli Maria i Stanisław Kalinowscy, Wydawnictwo Prószyński i S-ka, Warszawa 1997, seria „Klasyki Nauki”, s. 119, cena 17,50 zł.

Blisko 150 lat temu Michael Faraday wygłosił w Royal Institution sławną serię 6 wykładów przeznaczonych dla dzieci i młodzieży i zatytułowanych „The Chemical History of a Candle”. William Crookes, późniejszy badacz promieni katodowych i odkrywca talu, europu oraz nietrwałego izotopu toru-234, a wówczas 17-letni student, najwidoczniej docenił ich niezwykłość, bo sporządził dokładne notatki i opracował je do druku. Tak właśnie powstało jedyne w swoim rodzaju arcydzieło literatury popularnonaukowej. Jest to bowiem zapis niemal dosłowny żywego słowa prelegenta, ze wszystkimi powtórzeniami i dygresjami. Gdy czytamy *Dzieje świecy*, wydaje nam się czasem, że uczestniczymy w spektaklu z czasów wiktoriańskiej Anglii, w którym słowa wykładowcy są jedynie dodatkiem do szybko po sobie następujących, starannie zaprojektowanych, pokazowych doświadczeń fizycznych.

Wznowiona po przeszło 40 latach (tekst został przygotowany na podstawie V wydania, Wiedza Powszechna 1953, wyd. wcześniejsze: 1914, 1927, 1947 i 1948 r.), w czasach wyraźnie słabnącego zainteresowania fizyką, książka ta nabiera charakteru swoistego memento. Tak jakby ktoś chciał nam powiedzieć: popatrzcie na tego dżentelmena, który z pomocą nieocenionego laboranta.

pana Andersona, fascynuje młodą widownię w czasie świątecznych wykładów (Christmas Lectures). Co się aż tak zmieniło w ciągu tych 150 lat, że fizyka stała się najbardziej nie lubianym, żeby nie powiedzieć zniechęcającym, przedmiotem szkolnym? Zmieniło się oczywiście kilka rzeczy, jednak przy lekturze *Dzieje świecy* najbardziej uderzają nas: całkowicie nieformalne ujęcie rozległej tematyki przyrodniczej i rola, jaką w wykładzie odgrywają doświadczenia pokazowe. Całość prelekcji skonstruowana jest na zasadzie ząbiejących się i wynikających jedno z drugiego pytań: dlaczego? Dlaczego świeca się pali? Dlaczego knot tworzy zagłębienie? Jaka jest struktura płomienia? Jakie są produkty spalania? Dlaczego? ...jak? ...dlaczego?

Czytelnik pozna proces spalania, zaznajomi się ze zjawiskami chemicznymi w ogólności, pierwiastkami i związkami chemicznymi, analizą, syntezą, procesem oddychania. Dowie się, co to są przemiany fazowe, jak działa ciśnienie atmosferyczne, na czym polega elektroliza itd. itd. Są to wykłady „od zera”, dla słuchacza (czy czytelnika) zupełnie nieprzygotowanego. Fizyka i chemia budują się przed jego oczyma jako nauki doświadczalne *sensu stricte*. Zamiast tablicy za plecami Faraday ma przed sobą stół laboratoryjny, na którym cały czas coś się dzieje, wybucha, pali się, napełnione wodorem bańki szybuja ku sufitowi:

„Naczynie zawiera jedną objętość tlenu i dwie objętości wodoru... Nie chcę zapalać od razu całej mieszaniny, zbyt wielka to ilość. Będę powoli wpuszczał gaz do mydlin i w miarę powstawania baniek będę je zapa-

łał. Doświadczenie to wykaże nam rolę tlenu w paleniu się wodoru”.

Faraday bawi, ale jednocześnie, a raczej przede wszystkim, uczy. Uczy uważnej obserwacji zjawisk, specyficznego dla nauk ścisłych rozumowania „przyczyna-skutek”. Słuchacze Faradaya nie mogli nie dostrzec, że fizyka jest w istocie kluczem do zrozumienia zjawisk zachodzących w przyrodzie:

„Przyjrzyjcie się uważnie działaniu wznoszącego prądu powietrza: oto spłynęło trochę stearyny i zastygło, tworząc zgrubienie na świecy... W tym wypadku przyglądając się wadliwociom świecy nauczyliśmy się czegoś nowego, staliśmy się badaczami przyrody... Spodziewam się, że odtąd wobec każdego nieznanego zjawiska nie omieszkanie zapytać, jaka jest jego przyczyna i jaki jest jego przebieg, a z czasem zdobędziecie odpowiedź na te pytania”.

Jak już wspominałem, wykład Faradaya jest zupełnie niesformalizowany. Tak właśnie należy mówić do dzieci, ponieważ dla większości z nich rozumowanie formalne, oparte na wzorach matematycznych, jest intelektualnie jeszcze niedostępne. Faraday był idealnym prelegentem do prowadzenia wykładu w takim właśnie stylu, ponieważ sam nie posiadał wykształcenia matematycznego. Był zapewne ostatnim wielkim fizykiem, który mógł jeszcze funkcjonować w nauce, nie wykraczając w swoich obliczeniach poza cztery działania arytmetyczne, co nie przeszkodziło mu stać się pionierem elektromagnetyzmu, twórcą koncepcji pola, a także wynalazcą silnika i dynamy elektrycznego.

Gdyby potraktować *Dzieje świecy* jedynie jako zbiór opisów doświadczeń przydatnych w elementarnym nauczaniu fizyki i chemii, być może nie byłoby to nic aż tak nadzwyczajnego – pokolenia nauczycieli stworzyły wiele takich podręczników, nie brak opisów bardzo pomysłowych i efektownych doświadczeń. To, co mnie wydało

się niezwykle przy jej lekturze, to klimat spektaklu, jakim niewątpliwie musiały być te wykłady, którego autor, reżyser i aktor w jednej osobie, potrafił przekazać swoją pasję wielkiego eksperymentatora. Myślę, że dobrym mottem dla tych wykładów byłyby słowa samego Faradaya:

„Mam o wiele więcej zaufania do jednego człowieka, który ciałem i duszą usiłuje rozwiązać pewne zadanie, aniżeli do sześciu ludzi, którzy tylko o nim wciąż rozprawiają. Nic nie dorówna doświadczeniu; ono prostuje sądy mylne i dla wiedzy jest prawdziwym postępem”.

Pewne uogólnienie powyżej wyrażonej opinii można by zastosować do całej serii wydawniczej „Klasyki Nauki”. Czy jest sens wznawiać pozycje popularnonaukowe sprzed pół wieku i starsze? Otóż niektóre na pewno tak, ponieważ literatura popularnonaukowa to też literatura i oprócz informacji zawiera część osobowości autora, która z pewnością w przypadku Feynmana, Einsteina czy Weyla jest warta poznania.

Do tekstu wykładów Wydawca dołączył esej o Faradayu pióra Władysława Natanson, pochodzący z tomu *Widnokrąg Nauki* z 1934 r. Osobiście wolałbym bardziej współczesne opracowanie biografii Faradaya, których zresztą ukazało się wiele z okazji 200-lecia jego urodzin, obchodzonych kilka lat temu. Współczesnego czytelnika razić może nieco egzaltacja stylu pisania o nauce sprzed pół wieku. Chociaż, z drugiej strony, może ten styl też wart jest przypomnienia? Jednego jestem pewien: ta niewielka książeczka w eleganckiej, czarnej okładce powinna się znaleźć na półce każdego nauczyciela fizyki i chemii.

Jacek Turnau

Instytut Fizyki Jądrowej
Kraków

LISTY DO REDAKCJI

Jeszcze o Romanie Smoluchowskim

W szkicu biograficznym (*Postępy Fizyki* 48, 257 (1997)) autorstwa profesora Macieja Suffczyńskiego, upamiętniającym postać wybitnego fizyka polsko-amerykańskiego Romana Smoluchowskiego (1910–1996) – syna Mariana Smoluchowskiego, omówiono szeroko i kompetentnie jego dokonania naukowe w dziedzinie podstaw teorii ciała stałego, strukturalnych badań kryształów oraz pionierskich, znakomitych zastosowań w astrofizyce w latach obecnych.

Należy jeszcze dodać, że Romanowi Smoluchowskiemu zawdzięczamy klasyczne już wyjaśnienie anizotropii elektronowej pracy wyjścia z metali. Jego publikacja pt. „Anisotropy of the Electronic Work Function of Me-

tals” (*Phys. Rev.* 60, 661 (1941)) była często cytowana przez pół wieku. Odkryte przez niego relaksacyjne, przeciwstawne efekty powlekania i wygładzania powierzchni kryształów metali przez ładunek elektronowy (spreading and smoothing effects) zależą od orientacji i atomowej struktury powierzchni. Uzasadnił tam, że w przestrzeni wektora falowego k (w objętości kryształu), niezależnie od usytuowania powierzchni Fermiego wewnątrz strefy Brillouina lub poprzez jej granice, anizotropia emisji elektronowej wynika tylko z elektrycznego momentu dipolowego podwójnej warstwy powierzchniowej kryształu.

Stanisław Surma

Instytut Fizyki Doświadczalnej UWr
Wrocław

PTF

Porozumienie o współpracy między PTCh i PTF

Dnia 2 lutego 1998 r. zostało podpisane w Warszawie porozumienie o współpracy między Polskim Towarzystwem Chemicznym i Polskim Towarzystwem Fizycznym. Jest ono wyrazem woli obu Towarzystw współpracy w zamiarze lepszego wykorzystania swoich możliwości.

Akt porozumienia zawiera następujące postanowienia:

1. Oba Towarzystwa będą się wzajemnie informować o planowanych imprezach naukowych.

2. Członkowie obu Towarzystw będą mieć uprawnienia do korzystania w każdym z Towarzystw z przysługujących im zniżek.

3. Oba Towarzystwa będą podejmować inicjatywy organizacji wspólnych przedsięwzięć w przypadkach znacznego pokrywania się tematyki ich działań lub wspólnoty interesów.

Porozumienie podpisali: prezes PTCh prof. Jerzy Konarski i prezes PTF prof. Ireneusz Strzałkowski.

Nagroda Smoluchowskiego-Warburga

W dniu 15 listopada 1997 r. podpisana została przez Polskie Towarzystwo Fizyczne i Niemieckie Towarzystwo Fizyczne ostateczna wersja statutu nowej wspólnej nagrody z fizyki. Otrzymała ona nazwę „Polsko-Niemiecka Nagroda z Fizyki imienia Mariana Smoluchowskiego i Emila Warburga”. Nagroda ta jest wyrazem nowej formy pogłębiającej się współpracy między Polskim Towarzystwem Fizycznym i Niemieckim Towarzystwem Fizycznym. Pierwszym laureatem wybranym zgodnie ze statutem przez stronę niemiecką został prof. Andrzej Biały (Instytut Fizyki UJ). Nagrodę przyznano „za wybitny wkład w rozwój teorii zderzeń i produkcji cząstek elementarnych”.

Statut zawiera m.in. następujące postanowienia:

Nagroda będzie przyznawana za wybitny wkład do fizyki czystej lub stosowanej co dwa lata, raz fizykowi polskiemu, raz fizykowi niemieckiemu.

Kandydatów polskich (nie więcej niż 3 osoby) przedstawia PTF do wyboru przez DPG i odwrotnie – DPG przedstawia kandydatów niemieckich do wyboru przez PTF.

Laureatowi będzie wręczana nagroda pieniężna 1000 ECU (jej fundatorem jest Peter Gottfried Meyer-Viola, wnuk Emila Warburga) i srebrny medal, którego koszt pokrywa DPG.

Porozumienie zawarto na 10 lat (5 nagród) z możliwością przedłużenia i/lub zmian statutu po tym okresie.

Maciej Kolwas

Liczba członków PTF i prenumeratorów PF

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

| Oddział | L. czł. | L. pren. | % |
|--------------|-------------|------------|-----------|
| Białystok | 33 | 3 | 9 |
| Bydgoszcz | 25 | 8 | 32 |
| Częstochowa | 64 | 18 | 28 |
| Gdańsk | 130 | 19 | 15 |
| Gliwice | 47 | 17 | 36 |
| Katowice | 51 | 18 | 35 |
| Kielce | 43 | 7 | 16 |
| Kraków | 197 | 95 | 48 |
| Lublin | 120 | 32 | 27 |
| Łódź | 97 | 8 | 8 |
| Opole | 43 | 24 | 56 |
| Poznań | 132 | 120 | 91 |
| Rzeszów | 61 | 10 | 16 |
| Słupsk | 49 | 6 | 12 |
| Szczecin | 60 | 24 | 40 |
| Toruń | 86 | 80 | 93 |
| Warszawa | 389 | 67 | 17 |
| Wrocław | 179 | 48 | 27 |
| Razem | 1806 | 604 | 33 |

Jeśli któraś z liczb nie jest już aktualna, prosimy odpowiedni oddział o szybką informację do Biura Zarządu Głównego PTF i Redakcji *PF*.

Przypominamy, że oddziały, w których liczba prenumeratorów przekracza połowę liczby członków, mają prawo (podobnie jak prenumeratory – studenci) do 30% zniżki.

Zwiększenie prenumeraty na bieżący rok jest jeszcze możliwe.

Nominacje profesorskie

Tytuł naukowy profesora nauk fizycznych, nadany przez Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej otrzymali w dniu 17 kwietnia 1998 r.: Stanisław Chwirot (UMK), Piotr Jan Garbaczewski (UWr), Marek Napiórkowski (UW), Janusz Andrzej Sielanko (UMCS), Alexander Ushveridze (UŁ) i Aleksander Wolszczan (UMK).

Rzeczpospolita, 17 kwietnia 1998

EPS

Obecnie prezesem Komitetu Wykonawczego Europejskiego Towarzystwa Fizycznego jest D.L. Weaire (Dublin); jednym z członków Komitetu jest Ryszard Sosnowski (Warszawa).

Wśród członków zarządów poszczególnych oddziałów, komisji i grup międzyoddziałowych są następujący polscy fizycy:

I. Sosnowska (Warszawa) – Komisja Ruchliwości, J.A. Zakrzewski (Kraków) – Oddz. Fizyki Atomowej i Molekularnej, F. Bylicki (Toruń) – Sekcja Spektroskopii Atomowej, T. Dietl (Warszawa) – Oddz. Materii Skondensowanej, Sekcja Niskich Temperatur, H. Lachowicz (Warszawa) – Oddz. Materii Skondensowanej, Sekcja Magnetyzmu, S.G. Rohoziński (Warszawa) – Oddz. Fizyki Jądrowej, W. Gawlik (Kraków) – Oddz. Elektroniki i Optyki Kwantowej, J. Niewodniczański (Kraków) – Międzyoddziałowa Grupa Fizyki Stosowanej i Fizyki w Przemysle, M. Bubak (Kraków) – Międzyoddz. Grupa Fizyki Obliczeniowej, L. Kostro (Gdańsk) – Międzyoddz. Grupa Historii Fizyki, J. Blinowski (Warszawa) – Międzyoddz. Grupa Nauczania Fizyki.

Europejskie Towarzystwo Fizyczne ma obecnie ponad 70 000 członków.

Europhys. News 29, nr 1 (1998)

B. W.

Nagroda im. Steinhausa

Polska Fundacja Upowszechniania Nauki oraz Towarzystwo Popierania i Krzewienia Nauk ustanowiły w 1994 r. Nagrodę im. Hugona Steinhausa w dziedzinie upowszechniania i popularyzacji nauki. Jej celem jest nagradzanie najlepszych popularyzatorów oraz zainteresowanie ludzi nauki tą działalnością i przekonanie społeczeństwa, że nauka jest ważna i potrzebna, a jej zagadnienia mogą być w sposób przystępny i fascynujący przedstawiane osobom nie mającym fachowego przygotowania.

Na patrona nagrody wybrano Hugona Steinhausa (1887 – 1972), światowej sławy polskiego matematyka, a zarazem znakomitego popularyzatora wiedzy. Jego zainteresowania popularyzacją nauki znalazły potwierdzenie w książkach: *Czym jest, a czym nie jest matematyka*, *Kalejdoskop matematyczny*, *Orzeł czy reszka*.

Nagroda jest przyznawana corocznie w drodze konkursu. W poprzednich latach otrzymali ją: prof. Andrzej Jerzmanowski, Izabella Galicka, Hanna Sygietyńska i Marcin Ryszkiewicz (1994), prof. Marek Kordos, Ryszard Rakowski, prof. Zdzisław Libera i red. Aleksandra Frykowska (1995) oraz Jan Walencik, prof. Irena Obuchowska, prof. Stanisław Mrówczyński i red. Krzysztof Michalski (1996).

Nagroda za 1997 rok przyznana została za wybitną działalność organizacyjną w zakresie upowszechniania nauki. Otrzymali ją: prof. Łukasz A. Turski, red. Krystyna Kępska-Michalska i red. Robert Firmhofer za zorganizowanie Pikniku Naukowego oraz prof. David Shugar, prof.

Magdalena Fikus i dr hab. Maciej Geller za zorganizowanie Festiwalu Nauki. O obu imprezach pisaliśmy w Kronice w ubiegłym roku (z. 4 i 6/97).

Nagrody są równorzędne, a ich wysokość wynosi 2500 zł. Nagrodzeni otrzymują też okolicznościową statuetkę. Ma ona kształt czworosięci foremnej z wpiisaną weń szyszką. Fundatorzy Nagrody wyjaśniają postać statuetki następująco: „We wstępie do najbardziej znanej książki popularyzującej matematykę, w *Kalejdoskopie matematycznym*, Hugo Steinhaus pisze mniej więcej tak: »jest to książka z obrazkami. Główne jej zadanie, mianowicie uwidocznienie matematyki, stoi na pierwszym planie... Książka ta pokazuje przedmioty nieznanne i fascynujące, jednak sama przyroda postępuje nie inaczej«. A jako przykład na s. 134 pokazuje rysunek szyszki z takim opisem: »Oglądając szyszkę przyjrzyjmy się jak są na niej ułożone łuski; dostrzeżemy tam także linie spiralne...« Wśród modeli zdobiących lokal Seminarium Matematycznego, w którym odbywały się zajęcia Profesora, znajdowały się bryły Platona, a wśród nich model czworosięci foremnej. Stąd właśnie wziął się pomysł statuetki łączącej w sobie oba te elementy. Zaś jedną łuskę szyszki zrobiono z bursztynu. Gdyż bursztyn od najdawniejszych czasów symbolizuje pomysłowość i zdrowie”.

Uroczystość wręczenia Nagrody za rok 1997 odbyła się w dniu 24 marca br. w Sali Lustrzanej Pałacu Staszica. Wzięli w niej udział przedstawiciele PAN, KBN, MEN, Telewizji Polskiej, Polskiego Radia, rektorzy szkół wyższych, dyrektorzy fundacji i towarzystw działających w sferze nauki, a także wybitne postacie nauki i kultury polskiej, przedstawiciele środowisk zajmujących się popularyzacją wiedzy.

M. Ł.

Seminarium ku czci prof. Ryszarda Męclewskiego

Z okazji przejścia na emeryturę prof. R. Męclewskiego, Zakład Elektroniki Emisyjnej Instytutu Fizyki Doświadczalnej UWr zorganizował seminarium okolicznościowe „In Honour of Professor Ryszard Męclewski”, które odbyło się we Wrocławiu w dniach 19–20 marca 1998 r. Prof. Męclewski był uczniem i współpracownikiem śp. prof. Jana Nikliborca – kierownika Katedry Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu w powojennym Wrocławiu. Inicjatywa powstała w wyniku wysokiej pozycji naukowej i dydaktycznej Profesora oraz pragnienia podziękowania mu za całokształt jego pracy; zrodziła się ona nie tylko w kręgu najbliższych uczniów Profesora, ale także wśród kierownictwa Instytutu, spotkała się z gorącym poparciem władz Uczelni oraz Wydziału Fizyki i Astronomii, a także zyskała uznanie wśród zagranicznych i krajowych kolegów Profesora.

Przybyli goście zagraniczni i krajowi, z którymi Profesor bezpośrednio współpracował lub pozostawał w bliskich kontaktach naukowych. Otwarcia seminarium dokonał prorektor UWr, prof. Z. Latajka. Tematyka semina-

rium objęła zagadnienia fizyki powierzchni ciała stałego, dziedziny badań naukowych Profesora.

Goście seminarium wygłosili następujące wykłady: R. Duś (Instytut Chemii Fizycznej PAN, Warszawa) – „Hydrogen segregation on the surface during process of palladium hydride formation”, Ch. Kleint (Uniwersytet w Lipsku) – „Horror, happenings and highlights in the history of vacuum physics”, T.E. Madey (Rutgers University, USA) – „Desorption of alkalis from oxide surfaces – relevance to the origin of Na and K in tenuous planetary atmospheres”, A.J. Melmed (Johns Hopkins University, USA) – „APFIM study of impurities in nanocrystalline Fe-Al alloy”, A.G. Naumovets (Instytut Fizyki Ukraińskiej Akademii Nauk, Kijów) – „Interplay of surface diffusion and phase transitions in adsorbed layers”, Anna T. Szaynok (Instytut Fizyki PWr) – „Physics in Wrocław, first two decades after the World War II”. Wykłady lub komunikaty wygłosili również pracownicy Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego: J. Bęben – „Reaction-diffusion fluctuations during CO oxidation on Pt”, A. Ciszewski – „Faceting of tungsten microcrystal, induced by platinum adsorption”, S. Mróz – „Some atypical applications of Auger electron spectroscopy”, T. Radoń – „Photofield emission spectroscopy”. Sesje uzupełniła plakatowa prezentacja wyników badań prowadzonych przez innych uczestników seminarium.

Wykłady zostaną opublikowane przez wydawnictwo Pergamon Press w tomie specjalnym *Progress in Surface Science*, poświęconym XIX Międzynarodowemu Seminarium Fizyki Powierzchni (ISSP-19) organizowanemu przez IFD UWr w czerwcu br. w Polanicy Zdroju.

Oprócz dużej rangi naukowej impreza miała również miły wymiar koleżeński. Pracownicy i dykcja IFD wydali uroczysty obiad z okazji pożegnania dwojga wieloletnich pracowników: Profesora oraz dr Katarzyny Sendeckiej – byłej adiunkt w IFD. Ich odejście na emeryturę bynajmniej nie oznacza kresu aktywności naukowej i społecznej obojga. Profesor nadal utrzymuje ścisłe więzi z Uczelnią i Zakładem, zaś Pani Doktor udziela się także w środowisku przewodników miasta Wrocławia.

Ryszard Błaszczyszyn, Stanisław Surma

Nagroda ICO

Nagrodę Międzynarodowej Komisji Optyki (ICO) za rok 1997 otrzymał amerykański optyk Andrew M. Weiner.

Weiner (ur. 1958 r.) studiował inżynierię elektryczną w MIT, gdzie w 1984 r. uzyskał stopień doktorski. Od 1992 r. jest profesorem inżynierii elektrycznej i komputerowej na Uniwersytecie Purdue w West Lafayette, Indiana. Głównym przedmiotem jego badań jest wytwarzanie i kształtowanie ultraszybkich impulsów optycznych. Między innymi wprowadził metody fourierowskie do sterowania kształtem femtosekundowych impulsów światła. Wiele prac poświęca zastosowaniom impulsów femtosekundowych, np. do selektywnego wzmacniania fononów optycznych w kryształach i sterowania spójnym ruchem ładunków w warstwowych strukturach półprzewodnikowych.

Weiner jest członkiem zespołu redakcyjnego *Optics Letters*.

ICO Newsletter, styczeń 1998

B. W.

Przyszły dyrektor generalny CERN-u

Luciano Maiani został wybrany przez Radę CERN-u na dyrektora generalnego w kadencji 1999–2003. Kadencja obecnego dyrektora generalnego Christophera Llewellyna Smitha kończy się 31 grudnia 1998 r.

Maiani jest dobrze znanym fizykiem z zakresu cząstek elementarnych. W 1970 r. przewidział, wraz z Sheldonem Glashowem i Johnem Iliopoulossem, istnienie powabnego kwarka, co odegrało decydującą rolę w powstaniu teorii oddziaływania elektroslabego. Jest od 1984 r. profesorem fizyki teoretycznej rzymskiego uniwersytetu La Sapienza. Ma również wielkie doświadczenie w zarządzaniu nauką. Od 1993 r. jest prezesem włoskiego Instytutu Fizyki Jądrowej (INFN), był także delegatem Włoch do Rady CERN-u w latach 1993–96, a później prezesem tej Rady.

Głównym zadaniem Maianiego będzie nadzór nad konstrukcją Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC), dopilnowanie terminowości prac i nieprzekraczania zaplanowanego budżetu, a także zapewnienie, aby prace badawcze nie przerwały się po zamknięciu w 2001 r. Wielkiego Zderzacza Elektron-Pozyton (LEP), zanim zaczną działać LHC, co jest przewidziane na rok 2005.

W zebraniu Rady CERN-u wzięli po raz pierwszy udział przedstawiciele Stanów Zjednoczonych, które mają od grudnia 1997 r. status obserwatora, co ma związek z przyznaniem przez USA dotacją ok. 530 mln dolarów na budowę LHC, o czym pisaliśmy w poprzedniej Kronice.⁵²

Phys. Today 51, nr 2 (1998)

B. W.

Stowarzyszenie Azjatycko-Pacyficznych Towarzystw Fizycznych

Prezesem Stowarzyszenia Azjatycko-Pacyficznych Towarzystw Fizycznych (powstałego w 1990 r.) został wybrany na nową, trzyletnią kadencję Chen Jia-er. Jest on fizykiem akceleratorowym, rektorem Uniwersytetu Pekinńskiego i prezesem Chińskiego Towarzystwa Fizycznego. W poprzedniej kadencji prezesem Stowarzyszenia, które skupia 17 towarzystw fizycznych i instytucji, był Michiji Konuma (Japonia).

Phys. Today 51, nr 2 (1998)

B. W.

Stypendia FNP dla najlepszych młodych

W 1998 r. Fundacja na Rzecz Nauki Polskiej przyznała, już po raz szósty, stypendia młodym pracownikom nauki i doktorantom (do 30 lat), mającym dorobek naukowy udokumentowany publikacjami w uznanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Stypendia przyznawane (podobnie jak inne subwencje FNP) w drodze konkursu wynoszą w tym roku 16 320 zł i są wypłacane w ratach kwartalnych.

W tym roku przyznano 102 stypendia, w tym 12 fizykom, 2 biofizykom i 2 astronomom.

Oto nasi najlepsi młodzi fizycy: Konrad Banaszek (UW), Stanisław Baran (UJ), Magdalena Jolanta Górská (UW), Michał Horodecki (UG), Paweł Horodecki (PG), Romuald Aleksander Janik (UJ), Andrzej Łapiński (IFM PAN, Poznań), Ewelina Maria Łobodzińska (IFJ, Kraków), Leszek Motyka (UJ), Marian Paluch (UŚI), Krzysztof Sacha (UJ) i Dariusz Wiśniewski (UMK); najlepsi biofizycy: Andrzej Kierzek (IBB PAN, Warszawa), Arkadiusz Ptak (PP) i najlepsi astronomowie: Andrzej Maciołek-Niedźwiecki (UŁ) i Rafał Moderski (CAMK, Warszawa).

B. W.

Polskie nazwy pierwiastków superciężkich

W dniu 30 sierpnia 1997 r. Rada Międzynarodowej Unii Chemii Czystej i Stosowanej (IUPAC) przyjęła ostateczne nazwy pierwiastków 101 – 109. Polskie nazwy pierwiastków 101 – 103 określone zostały wiele lat temu i brzmią jak następują:

- 101 Md (Mendelewium) – mendelew,
- 102 No (Nobelium) – nobel,
- 103 Lr (Lawrencium) – lorens.

Natomiast nazwy polskie pierwiastków 104 – 109 były, jak dotąd, prowizoryczne i dopiero po podjęciu stosownej uchwały przez Radę IUPAC można było przystąpić do procedury tworzenia ostatecznych polskich nazw tych pierwiastków.

W tym celu w dniu 21 marca br. odbyła się w Krakowie narada Podkomisji Nomenklatury Nieorganicznej PTChem, z udziałem prof. Jerzego Konarskiego, prezesa PTChem, prof. Michała Pietrusiewicza, przewodniczącego Komisji Nomenklatury PTChem, prof. Jerzego Masalskiego i prof. Leszka Sokołowskiego, delegowanych przez Polskie Towarzystwo Fizyczne.

Po burzliwej dyskusji, zebrani proponują co następuje: polskie nazwy pierwiastków, pochodzące od nazwisk uczonych, utworzyć zgodnie z pisownią nazwiska. Tu przeważał argument, że w ten sposób lepiej uhonoruje się wybranych uczonych i uniknie nazw śmiesznych (w rodzaju majtner) lub niejednoznacznie wymawianych (np. razerford lub ruterford lub jeszcze inaczej). Dla pierwiastka 107 rozważana była nazwa bohrium albo borium, dla lepszego odróżnienia od pierwiastka boru (B); jednak większość zebranych uznała, że końcówka -ium nie jest stosowana w polskich nazwach pierwiastków i utrudniałaby tworzenie nazw pochodnych. W przypadku nazw innego pochodzenia zaproponowano ich formy możliwie najprostsze, które pozwolą na łatwe tworzenie nazw pochodnych. W rezultacie propozycje polskich nazw pierwiastków 104 – 109 są następujące:

- 104 Rf (Rutherfordium) – rutherford
- 105 Db (Dubnium) – dubn
- 106 Sg (Seaborgium) – seaborg
- 107 Bh (Bohrium) – bohr
- 108 Hs (Hassium) – has
- 109 Mt (Meitnerium) – meitner

Polskie nazwy pierwiastków 104 – 109, po dyskusji ich propozycji w środowisku chemików i fizyków, zostaną ostatecznie zatwierdzone na wspólnym posiedzeniu Polskiego Towarzystwa Chemicznego i Polskiego Towarzystwa Fizycznego.

Zofia Stasicka

Przewodnicząca Podkomisji
Nomenklatury Nieorganicznej PTChem

Neutrina w Ardenach

W marcu 1997 r. rozpoczęto serię doświadczeń neutrinowych przy świeżo otwartej elektrowni jądrowej w Chooz, we francuskiej części Ardenów. Celem doświadczeń ma być wyjaśnienie obserwowanego dotychczas deficytu neutrin mionowych (wytwarzanych w promieniowaniu kosmicznym) i uzyskanie informacji, czy zachodzą tzw. oscylacje neutrin. Neutrina występują w trzech rodzajach, każdy związany z innym leptonem, a więc neutrina elektronowe, mionowe i taonowe. Dotychczas wydawało się, że poruszające się neutrina zachowują swój rodzaj. Jednak wyniki pomiarów neutrin pochodzących ze Słońca oraz wytwarzanych w atmosferze w oddziaływaniach promieniowania kosmicznego wydają się wskazywać, że neutrina mogą w locie zamieniać się na inne, czyli, jak to się przyjęło nazywać, „oscylować”.

Do niedawna uważano, że neutrino ma masę zerową, jednak istnienie oscylacji implikowałoby masę niezerową, i to różną dla różnych rodzajów neutrin.

W doświadczeniach z wiązkami przyspieszonymi do dużych energii w akceleratorach mamy głównie do czynienia z neutrinami mionowymi, natomiast intensywne wiązki z reaktorów jądrowych są źródłem głównie neutrin elektronowych. Ośrodek w Chooz rozporządza silną wiązką neutrin elektronowych o energii 3 MeV. Umieszczenie detektora w odległości kilometra od źródła stwarza większą niż w innych laboratoriach szansę na obserwację oscylacji.

W zaplanowanych doświadczeniach biorą udział fizycy francuscy z Annecy i z Collège de France, jak również amerykańscy ze stanów: Nowy Meksyk, Pensylwania i Kalifornia, włoscy z Pizy i Triestu oraz rosyjscy z Instytutu Kurczatowa. Połowę kosztów przedsięwzięcia pokryje przedsiębiorstwo Electricité de France.

W Chooz jest badane oddziaływanie neutrin (odwrotny rozpad β), przy którym wytwarzany jest pozyton i neutron. Neutrino także rejestruje się w układzie opóźnionej koincydencji między wytworzonym pozytonem i wychwytem radiacyjnym neutronu (wytwarzającym promieniowanie γ). Sygnały są odbierane przez ciekły scyntylator z gadolinem, ważący 5 ton, umieszczony w naczyniu akrylowym pokrytym warstwą scyntylatora. Ten z kolei otoczony jest przez 192 fotopowielacze. Całe urządzenie w ciężkiej osłonie umieszczone jest pod ziemią, co osłabia 300-krotnie sygnały pochodzące od promieniowania kosmicznego.

Uzyskana liczba sygnałów neutrinowych zgadza się z oczekiwaną, co wyklucza oscylacje neutrin w dostępnym dla pomiaru obszarze w płaszczyźnie parametrów ($\sin^2 2\Theta, \Delta m^2$). Wykluczony przez doświadczenie w Chooz obszar parametrów pokrywa ten, w którym w doświadczeniu w Kamiokande (Japonia) zaobserwowano niedobór neutrin mionowych. Ta niezgodność sugeruje, że mogą tu grać pewną rolę neutrina taonowe, których doświadczenie w Chooz nie wykrywa.

Między marcem i październikiem 1997 r. zarejestrowano w Chooz 1320 sygnałów pochodzących od neutrin. Ostateczne wyniki doświadczenia będą zapewne znane w końcu 1998 r.

CERN Courier 38, nr 1 (1998)

B. W.

Kaskadowe lasery półprzewodnikowe

Federico Capasso z Laboratoriów Bella skonstruował kaskadowy laser półprzewodnikowy. W urządzeniu tym wstrzyknięty elektron przechodzi przez 25 bardzo cienkich warstw półprzewodnikowych („obszary aktywne”). W każdym z takich obszarów elektron spada na niższy poziom energetyczny i emituje foton. Dobierając odpowiednio grubości warstw można uzyskać potrzebną długość fali emitowanych fotonów.

W temperaturze 8 K laser kaskadowy Capassy wytwarza ciągłą wiązkę światła o długości fali 5.2 μm i mocy 200 mW, podczas gdy zwykłe lasery półprzewodnikowe dają w tym zakresie długości fali tylko 1–2 mW. W temperaturze pokojowej laser kaskadowy wytwarza impulsy o czasie trwania 50 ns, długości fali 8.2 μm i mocy 170 mW.

Światło w średnim zakresie podczerwieni przechodzi przez czyste powietrze, natomiast jest absorbowane i rozpraszane przez gazy cieplarniane i inne zanieczyszczenia. Podjęto zatem próby zastosowania tego typu lasera do wykrywania zanieczyszczeń powietrza o koncentracji 10 części na miliard.

AIP Phys. News Update, nr 359 (1998)

B. W.

Pierwsi pacjenci w GSI

Po kilkuletnich przygotowaniach, prowadzonych we współpracy z Niemieckim Centrum Badań Raka, Kliniką Radiologii Uniwersytetu w Heidelbergu i Centrum Badawczym w Rossendorfie (por. Kronika 4/96), przeprowadzono w grudniu 1997 r. w Laboratorium Ciężkich Jonów GSI (Darmstadt) terapię ciężkojonową dwóch pierwszych pacjentów chorych na raka.

Implantowane jony oddają energię głównie przy końcu zasięgu i dzięki temu nadają się lepiej do terapii nowotworów niż promieniowanie elektromagnetyczne. W terapii jonami można bowiem doprowadzić do zniszczenia chorej tkanki prawie nie uszkadzając po drodze tkanki zdrowej.

Synchrotron w GSI został specjalnie przystosowany, tak że w czasie zabiegu można zmieniać energię jonów w ten sposób, by swoim zasięgiem pokryły całą głębokość

nowotworu. Ponadto wiązka przemiata cały jego przekrój poprzeczny. Komora jonizacyjna kontroluje potrzebną dawkę padającą na poszczególne punkty nowotworu. W razie jej przekroczenia system zabezpieczający wyłącza wiązkę w ciągu jednej milisekundy. Wyniki zabiegu są sprawdzane na miejscu, bez poruszania pacjenta, za pomocą pozytonowej tomografii emisyjnej (PET). Odpowiednią do tego kamerę opracowało i dostarczyło Centrum Badawcze w Rossendorfie. Obecnie nastąpi kilkumiesięczna przerwa w terapii jonowej, gdyż synchrotron w GSI będzie w tym czasie wykorzystywany, zgodnie ze swoim podstawowym zadaniem, do doświadczeń fizycznych.

W następnej, pięcioletniej fazie projektu terapii jonowej przewiduje się poddawanie zabiegom 70 pacjentów rocznie. W dalszych planach jest zbudowanie w którejś z klinik na terenie Niemiec specjalnego urządzenia do tej terapii.

Phys. Bl., nr 2 (1998)

B. W.

Małe dziurki przepuszczają dużo światła

T.W. Ebbesen z NEC Research Institute w New Jersey i grupa jego współpracowników z innych laboratoriów amerykańskich, francuskich i niemieckich przeprowadziła doświadczenie z przepuszczaniem światła przez cylindryczne otwory o średnicy mniejszej niż długość padającego światła i rozmieszczone jak regularna sieć o stałej również mniejszej niż długość fali. Na podłożu z kwarcu naniesiono cienką warstwę srebra o grubości ok. 200 nm. Zogniskowana wiązka jonów, padając na tę warstwę, wytwarzała w niej periodyczny układ otworów. Uzyskano dwa warianty sieci: średnica otworów 150 nm, stała sieci 0.6 μm i średnica 1 μm , stała 1.8 μm . Okazało się, że taka sieć otworów może selektywnie przepuszczać padające prostopadle do przesłony promieniowanie.

Przy pewnych długościach fali przepuszczalność warstewki metalu z periodyczną siecią cylindrycznych otworów jest o rząd wielkości większa niż oczekiwana na podstawie standardowej teorii apertury. Sieć o stałej 0.6 μm przepuszcza bardzo silnie przy $\lambda = 0.96 \mu\text{m}$. Gdy zwiększyć grubość warstwy srebra z 200 nm do 500 nm, przepuszczalność rośnie.

Dążenie, aby móc sterować fotonami w sposób analogiczny, jak steruje się elektronami w ciele stałym, spowodowało wielkie zainteresowanie lokalizacją światła, elektrodynamiką kwantową mikrownęk i optyką bliskiego pola. Główną trudnością przy manipulowaniu światłem jest nadzwyczaj mała przepuszczalność otworów mniejszych niż długość fali padającej. Wynik doświadczenia pokazał jednak, że periodyczny układ cylindrycznych otworów w warstwie metalu wykazuje niezwykłą zdolność transmisji światła o długości fali większej niż stała sieci otworów (jeśli padająca i przepuszczona wiązka są współliniowe). Nie są to efekty dyfrakcyjne. Zaobserwowano np. ostre maksimum przepuszczalności przy długości fali ok. 10 razy większej niż średnica otworów. Autorzy przypisują zaobserwowane zjawisko sprzęganiu światła z pla-

zmonami (wzbudzeniami elektronowymi) na powierzchni metalicznej sieci. Z plazmonami powierzchniowymi związane są oscylacje ładunku. Silna transmisja światła padającego prostopadle na sieć otworów zachodzi dla długości fali bliskiej stałej sieci otworów pomnożonej przez współczynnik załamania podkładu kwarcowego. Być może jest to nowy sposób geometrycznego filtrowania promieniowania elektromagnetycznego bez efektów dyfrakcyjnych.

Przez odpowiedni dobór odległości otworów można będzie zapewne uzyskiwać wąskie pasmo długości fal, co mogłoby znaleźć zastosowania w konstrukcji wyświetlaczy ciekłokrystalicznych i przy filtrowaniu promieniowania.

Nature 391, nr 6668 (1998)

B. W.

Słoneczny piec w PSI

W Instytucie Paula Scherrera (PSI) w Villigen pod Zurychem skonstruowano słoneczny piec. Głównym elementem urządzenia jest płaskie zwierciadło o powierzchni 120 m², które odbija światło ku zwierciadłu parabolicznemu o średnicy 8.5 m. W jego ognisku temperatura osiąga 2000°C, a gęstość energii 5000 kW/m². Za pomocą tego pieca będą opracowywane metody magazynowania energii słonecznej w chemicznych nośnikach energii. Na przykład w konwencjonalnym hutnictwie żelaza najpierw węgiel przez odgazowanie przechodzi proces koksowania i następnie redukuje się tlenek żelaza. W piecu słonecznym oba procesy będą zachodzić równocześnie, co spowoduje dwukrotne obniżenie emisji dwutlenku węgla.

Chociaż główną dziedziną badań w PSI jest fizyka jądrowa, Instytut ma dział energetyki, który zajmuje się przede wszystkim rozwijaniem bezpiecznych dla środowiska metod technologii źródeł energii.

Phys. Bl. 54, nr 1 (1998)

B. W.

Fizyka transportu i ruchu kołowego

Wydział Fizyki Uniwersytetu w Duisburgu (Niemcy) wprowadził kierunek studiów „Fizyka transportu i ruchu kołowego”. Studia na tym kierunku trwają 10 semestrów i kończą się dyplomem fizyka (odpowiednik naszego magistra). Studenci uczą się modelowania i symulacji komputerowych związanych z tymi zagadnieniami, z uwzględnieniem problemów ekonomii i ochrony środowiska. Absolwenci będą przygotowani do podejmowania różnych zadań, jak planowanie i strategia ruchu kołowego, transport towarów, optymalizacja stosowania różnych środków transportu, przewożenie materiałów granulowanych, obsługa sieci komputerowych.

Informacje o tych studiach są w Internecie pod: <http://www.comphys.uni-duisburg.de/>.

Phys. Bl. 54, nr 2 (1998)

B. W.

Krakowski Jarmark Doświadczeń Pokazowych

Oddział Krakowski PTF wraz z Wydziałem Fizyki i Techniki Jądrowej AGH i Instytutem Fizyki UJ orga-

nizują w Krakowie w dniach 25–26 września 1998 r. Krakowski Jarmark Doświadczeń Pokazowych. Będzie to kontynuacja Ogólnopolskiego Konkursu na Pokazowe Doświadczenia z Fizyki, jaki rozgrywał się w Krakowie w 1996 r. (Kronika 1/97).

Klasyfikacja konkursowa prowadzona będzie w 2 kategoriach pokazów: dla szkół podstawowych i średnich oraz dla szkół wyższych. Dla zdobywców pierwszych miejsc przewidziane są nagrody pieniężne. Wyniki konkursu będą ogłoszone m.in. w *Postęпах Fizyki*, a opisy nagrodzonych pokazów zostaną opublikowane w *Fotonie*.

Osoby i instytucje zainteresowane udziałem w Jarmarku powinny porozumieć się z dr. hab. Andrzejem Ziębą, Wydział Fizyki i Techniki Jądrowej AGH, ul. Reymonta 19, 30-059 Kraków, adres elektroniczny: jarfiz@novell.ftj.agh.edu.pl.

Foton, nr 55 (1998)

B. W.

Informator toruński

Ukazało się już trzecie, stale aktualizowane, wydanie informatora *Physics at Nicolas Copernicus University 1992 – 1997*, wydawanego przez Instytut Fizyki UMK. Zawiera krótki szkic historii Instytutu, przedstawienie jego struktury, wykaz organizowanych przez Instytut konferencji, oraz informacje o poszczególnych zakładach i jednostkach organizacyjnych z podaniem obsady personalnej, programu badań i posiadanej najważniejszej aparatury.

Informator jest bogato ilustrowany fotografiami oraz karykaturami fizyków toruńskich, wykonanymi przez nieżyjącego już profesora matematyki UMK, Leona Jeśmanowicza.

B. W.

A.S. Borowik-Romanow (1920 – 1997)

Dnia 31 lipca 1997 r. w czasie Międzynarodowej Konferencji Magnetycznej (ICM '97) w Cairns (Australia) zmarł profesor A.S. Borowik-Romanow, jeden z najwybitniejszych fizyków fazy skondensowanej. Śmierć nastąpiła w dniu, w którym miał on przedstawić wyniki badań dotyczących właściwości dynamicznych jednowymiarowych antyferromagnetyków, charakteryzujących się trójkątną strukturą magnetyczną.

Andrzej Stanisławowicz Borowik-Romanow urodził się w Leningradzie 18 marca 1920 r. W 1938 r. rozpoczął studia fizyczne na Uniwersytecie Moskiewskim. Studia przerwała wojna, w której czynnie uczestniczył. Po zakończeniu studiów rozpoczął pracę w Instytucie Problemów Fizycznych (obecnie im. P.L. Kapicy, który przez wiele lat kierował tym Instytutem). W Instytucie Problemów Fizycznych (którym kierował w latach 1984–91) pracował aż do śmierci.

Profesor A.S. Borowik-Romanow był genialnym fizykiem-eksperymentatorem, posiadającym niezwykłą intuicję fizyczną, połączoną z głęboką znajomością fizyki

teoretycznej. Był on odkrywcą słabego ferromagnetyzmu w antyferromagnetykach, zjawiska związanego z oddziaływaniem Działoszyńskiego-Moriyi, odkrył również zjawisko piezomagnetyzmu. W ostatnich 10 latach nazwisko jego związane było z badaniami rezonansu jądrowego i dynamiki spinowej nadciekłego ^3He . W helu tym odkrył (w 1985 r.) zjawisko analogiczne do nadciekłości (lub nadprzewodnictwa), w którym bezstratny transport dotyczy spinów jądrowych (namagnesowania jądrowego) – patrz artykuł Picketta „Odkrycie nadprzewodnictwa magnetycznego”, *Postępy Fizyki* 46, 167 (1995).



A.S. Borowik-Romanow

Andrzej Stanisławowicz miał wielu przyjaciół wśród polskich uczonych, którzy pamiętają go jako niezwyklego człowieka, pełnego pogody i humoru, gotowego rozmawiać o problemach fizyki o dowolnej godzinie dnia i nocy. W latach 1993–97 był przewodniczącym Rady Naukowej Międzynarodowego Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Niskich Temperatur we Wrocławiu.

Jan Klamut, Henryk Szymczak

Apolonia Wrzesińska (1910 – 1997)

Dnia 20 listopada 1997 r. zmarła dr hab. Apolonia Wrzesińska, emerytowany profesor fizyki Uniwersytetu Opolskiego. Przez prawie 50 lat była członkiem Polskiego Towarzystwa Fizycznego, a całe swe życie zawodowe związała z fizyką, którą współtworzyła i której nauczwała. Profesor Wrzesińska była coraz rzadszym reprezentantem pokolenia, które rozpoczęło pracę zawodową przed II wojną światową i któremu przypadło w udziale tworzenie powojennej fizyki polskiej.

Po ukończeniu Państwowego Gimnazjum im. Narcezy Żmichowskiej w Warszawie i odbyciu studiów na Uniwersytecie Warszawskim uzyskała dyplom magistra filozofii w zakresie fizyki w 1937 r. Jej praca dyplomowa dotycząca luminescencji barwników organicznych zwróciła

uwagę opiekunów naukowych (m.in. prof. Stefana Pieńkowskiego) i została nagrodzona przez Wydział Matematyczno-Przyrodniczy Uniwersytetu Warszawskiego, a jej wyniki zostały opublikowane w *Acta Physica Polonica*. Do wybuchu II wojny światowej oraz w czasie okupacji nauczwała fizyki i chemii, najpierw w szkołach średnich, potem na tajnych kompletach w stolicy i na prowincji. Od 1948 r. podjęła pracę jako asystent, a potem adiunkt na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. Jej badania dotyczyły własności optycznych fosforów krystalicznych (nieorganicznych), a praca doktorska (wówczas zwana kandydacką) nosiła tytuł „Aktywowane fosfory krystaliczne, ich wyrób i krzywe termoluminescencji”. Wyniki zostały opublikowane także w *Acta Physica Polonica*.

Wyrazem zaistnienia w fizyce światowej był staż naukowy w Laboratorium Luminescencji w Paryżu i praca pod kierunkiem prof. Destriau – odkrywcy elektro- i fotoluminescencji. Efektem intensywnej działalności naukowej (m.in. udział w konferencjach naukowych poza granicami kraju) była jej rozprawa habilitacyjna na UMK pt. „Fotoluminescencja fosforów ZnS i ZnS-Cu” zakończona w 1965 r. W tym samym roku rozpoczęła pracę na Politechnice Łódzkiej, która poszukiwała doświadczonego naukowca celem zorganizowania Katedry Fizyki Technicznej, nadania jej profilu naukowego i otoczenia opieką młodych pracowników. Tutaj pracowała do 1970 r. jako docent etatowy. W okresie jej kierownictwa zakończono 5 przewodów doktorskich i zorganizowano laboratorium fizyki współczesnej.

W roku akademickim 1970/71 prof. Apolonia Wrzesińska została kierownikiem Katedry Fizyki Doświadczalnej ówczesnej Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Opolu, sprawując opiekę naukową nad zespołem zajmującym się badaniami foto- i elektroluminescencji. W czasie swej prawie osiemnastoletniej pracy w Opolu pełniła wiele funkcji, w tym członka Rady Naukowej Instytutu Fizyki, kierownika zakładu, a przez dwie kadencje funkcję prezesa Oddziału Opolskiego PTF. W 1975 r. została mianowana profesorem nadzwyczajnym. Mimo przejścia na emeryturę kontynuowała pracę naukową i dydaktyczną do 1988 r., sprawując w ostatnim czasie opiekę nad rozwojem naukowym pracowników Zakładu Dydaktyki Fizyki. Do końca życia była osobą samotną, stąd chyba starała się w kierowanym przez siebie zakładzie tworzyć atmosferę rodzinną, „matkując” młodszym pracownikom. Zapewniło jej to bliski kontakt z ludźmi nawet wówczas, gdy nie pracowała już w Instytucie Fizyki. Profesor Apolonia Wrzesińska była osobą skromną, bardziej nastawioną na pomoc swoim współpracownikom, niż szukającą uznania szeroko rozumianej władzy. Stąd też oficjalne uznanie w postaci Krzyża Kawalerskiego Orderu Odrodzenia Polski otrzymała dopiero tuż przed odejściem na emeryturę. Ważniejsze jest na pewno to, że pozostawiła w Opolu wielu wdzięcznych jej wychowanków i kolegów fizyków.

Stanisław Chabik

KALENDARZ IMPREZ

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

1998

6 – 7 czerwca 1998, Ustroń-Jaszowiec

Przedszkole Fizyki Półprzewodników

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

7 – 12 czerwca 1998, Ustroń-Jaszowiec

XXVII Int. School on Physics of Semiconducting Compounds

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

U: 250, ang.

14 – 20 czerwca 1998, Jaszowiec

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

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

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

17 – 19 czerwca 1998, Kazimierz Dolny

II Int. Symp. on Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons – ION '98

Inst. Fizyki UMCS, Pol. Lubelska, Pol. Wrocławska; dr Janusz Zinkiewicz, IF UMCS, tel.: (81) 5376257, fax: (81) 5376191, adr.el.: jzinkiew@tytan.umcs.lublin.pl lub dr Paweł Węgierek, Pol. Lubelska, tel./fax: (81) 5256972, adr.el.: mario@elektron.pol.lublin.pl.

P, U: 100, O: 220 USD, ang., ros., pol.

30 czerwca – 4 lipca 1998, Warszawa

Nuclear Physics Close to the Barrier

Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów UW, Inst. Fizyki Doświadczalnej UW, Inst. Problemów Jądrowych; Anna Stolarz, ŚLCJ UW, tel.: (22) 6582021, fax: (22) 6592714, adr.el.: conf@slcj.uw.edu.pl, informacje: <http://www.slcj.uw.edu.pl/~conf>.

P, U: ok. 130, O: 280 USD, ang.

30 czerwca – 2 lipca 1998, Poznań

XII Konferencja: Nauczanie Fizyki w Wyższych Szkołach Technicznych

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

23 – 27 lipca 1998, Toruń

The Jabłoński Centennial Conference on Luminescence and Photophysics

Inst. Fizyki UMK; prof. J.S. Kwiatkowski, IF UMK, Grudziądzka 5, 87-100 Toruń, tel. (56) 21065, fax: (56) 25397,

adr.el.: lum98@phys.uni.torun.pl.

P, ang.

17 – 21 sierpnia 1998, Kudowa Zdrój

II Polish-US Conf.: Advanced Materials – High Temperature Superconductivity

Inst. Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN oraz Argonne National Laboratory, Science and Technology Center for Superconductivity at Urbana-Champaign; dr Danuta Włosewicz, INTIBS PAN, 50-950 Wrocław, skr. poczt. 1410, tel.: (71) 3435020, fax: (71) 441092, adr.el.: d.wlosewicz@int.pan.wroc.pl.

Z: 17.5.98, P, U: ok. 100, O: 370 zł (z zakwaterowaniem i wyżywieniem), ang.

1 – 5 września 1998, Zakopane

32nd Solid Mechanics Conf. (SolMec '98)

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

O: 300 USD, ang.

6 – 11 września 1998, Jaszowiec

Int. Conf. on Extended Defects in Semiconductors

Inst. Fizyki PAN, Georg-August-Universität, Getynga; Halina Granat, IF PAN, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, tel.: (22) 8436034, fax: (22) 8430926, adr.el.: granat@ifpan.edu.pl, informacje: http://info.ifpan.edu.pl/pelkay/eds_98.html.

P, O: 320 USD (z zakwaterowaniem i wyżywieniem), ang.

7 – 10 września, Łódź

Eurotherm Seminar on Quantitative Infrared Thermography (QIRT '98)

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

A: 8.9.98, O: 300 ECU, ang.

10 – 15 września 1998, Ustroń

22nd Int. School on Theoretical Physics – Quantum Coherence in Superconductors and Nanostructures

Zakład Fizyki Teoretycznej IF UŚI, Inst. Fizyki PAN, Inst. Fizyki UAM; prof. Elżbieta Zipper, Inst. Fizyki UŚI, Uniwersytecka 4, 40-007 Katowice, tel.: (32) 588211 w. 1409, fax: (32) 588431, adr.el.: thschool@us.edu.pl, informacje: <http://server.phys.us.edu.pl/thschool/>.

Z: 30.6.98, A: 30.5.98, P, U: 70, ang.

13 – 19 września 1998, Jaszowiec

III Int. School and Symp. on Physics in Material Science – Modifications and Characterization of Materials Using Nuclear Methods

Inst. Energii Atomowej; prof. A. Czachor, IEA, 05-400 Świerk-Otwock, tel.: (22) 7798805, fax: (22) 7793888, adr.el.: isspms@cyf.gov.pl.

A: 30.6.98, P, U: 120, O: ok. 200 USD, ang.

14 – 20 września 1998, Łódź

XVI Krakowska Szkoła Kosmologiczna – Materia międzygalaktyczna i galaktyczne hala

Kat. Fizyki Doświadczalnej UŁ, sponsorzy: KBN, Urząd miasta Łodzi, Fundacja OMEGA; dr Wiesław Tkaczyk, KFD UŁ, Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, tel.: (42) 355720, fax: (42) 6787087, adr.el.: wtkaczyk@krycia.uni.lodz.pl

Z: 1.8.98, O: 60 USD – członkowie PTA, PTMA i PTF mający opłacone składki za 1998 r. oraz studenci mogą być zwolnieni z opłaty, ang.

15 – 18 września 1998, Gdańsk

Krajowy Kongres Metrologii (KKM '98)

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

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

20 – 26 września 1998, Jurata

Modern Optics: From Photophysics to Photochemistry

Inst. Fizyki PAN; prof. M. Kolwas, IF PAN, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, tel.: (22) 8432509, fax: (22) 8430926, adr.el.: kolwas@ifpan.edu.pl.

ang.

24 – 27 września 1998, Bielsko-Biała/Szczyrk

5th Int. Conf. on Dielectric and Related Phenomena '98

Pol. Łódzka Filia w Bielsku-Białej, Inst. Polimerów, Inst. Fizyki PŁ; dr inż. Elżbieta Targosz-Wrona, PŁ Filia w Bielsku-Białej, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, tel.: (33) 27400 i (33) 29224 w. 29, fax: (33) 123502, adr.el.: awlo@merc.pb.bielsko.pl; informacje: <http://www.power.inms.nrc.ca/deis/other/drp98.htm>.

P, O: 750 zł, studenci 550 zł (łącznie z wyżywieniem i zakwaterowaniem), ang.

12 – 16 października 1998, Zakopane

Int. Conf. on Solid State Crystals

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

P, ang.

18 – 20 października 1998, Mądralin k. Otwocka

II Ogólnopolskie Seminarium Rozpraszania Neutronów

Polskie Towarzystwo Rozpraszania Neutronów i Inst. Energii Atomowej; prof. A. Czachor, tel.: (22) 779885, fax: (22) 779388, adr.el.: e08cza@cx1.cyf.gov.pl oraz prof. A. Szytuła, tel.: (12) 6336377 w. 546, fax: (12) 6337086, adr.el.: szytula@if.uj.edu.

Z: 1.7.98, A: 1.9.98, U: 40, O: ok. 250 zł (z zakwaterowaniem i wyżywieniem).

NOWE KSIĄŻKI

- Henryk Zbigniew Wrembel, *Mercury in the Baltic Sea – current problems*, Wyd. WSP w Słupsku, Słupsk 1997, s. 390, cena 25 zł.
- Mieczysław Pater, *Historia Uniwersytetu Wrocławskiego do roku 1918*, Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław 1997, s.308, cena 27 zł.
- Donald Goldsmith, *Największa pomyłka Einsteina – stała kosmologiczna i inne niewiadome w fizyce Wszechświata*, z jęz. angielskiego tłum. Bogumił Bieniok i Ewa L. Łokas; Prószyński i S-ka, Warszawa 1998, s. 205, cena 18 zł.
- Steven Weinberg, *Pierwsze trzy minuty* (z nowym posłowiem Autora), z jęz. angielskiego tłum. Aleksander Blum; Prószyński i S-ka, Warszawa 1998, s. 223, cena 22 zł.
- *Wybrane zagadnienia z biofizyki*, red. Stanisław Mię-kisz i Andrzej Hendrich; Wyd. VOLUMED, Wrocław 1998, s. 364.

WARUNKI PRENUMERATY

Cena prenumeraty krajowej w 1998 r. wynosi 13,50 zł za pół roku, 27,00 zł za rok. Prenumeratę można zamówić za pośrednictwem:

I. RUCH-u

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

II. ZARZĄDU GŁÓWNEGO PTF

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

III. ODDZIAŁÓW PTF

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

INFORMACJE DLA AUTORÓW

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

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

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

INFORMATION FOR SUBSCRIBERS

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

SPIS TREŚCI

CONTENTS

| | | | |
|--|-----|---|-----|
| A. Zastawny – Wzmacniacze energii | 121 | A. Zastawny – Energy amplifiers | 121 |
| M. Heller – Teoria grawitacji i kosmologia | 131 | M. Heller – Theory of gravitation and cosmology | 131 |
| R.L. Mössbauer – Problem neutrin słonecznych | 137 | R.L. Mössbauer – The solar neutrino problem | 137 |
| W. Cochran – Planety poza Układem Słonecznym | 142 | W. Cochran – Extrasolar planets | 142 |
| K. Eberl – Lasery na kropkach kwantowych ... | 151 | K. Eberl – Quantum-dot lasers | 151 |
| DYDAKTYKA FIZYKI | | PHYSICS TEACHING | |
| J. Turnau – O popularyzacji fizyki | 158 | J. Turnau – On popularization of physics | 158 |
| NOWOŚCI NAUKOWE | | SCIENTIFIC NEWS | |
| Z. Białynicka-Birula – Trojańskie paczki falowe | 164 | Z. Białynicka-Birula – Trojan wave packets ... | 164 |
| ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI | 168 | MEETINGS AND CONFERENCES | 168 |
| RECENZJE | 170 | REVIEWS | 170 |
| LISTY DO REDAKCJI | 171 | LETTERS TO THE EDITOR | 171 |
| KRONIKA | 172 | CHRONICLE | 172 |

WKRÓTCE

- *Czesław Radzewicz i Piotr Wiewiór o ultrakrótkich impulsach laserowych*
- *Włodzimierz Zawadzki (laureat Medalu Smoluchowskiego) o półwzględności w półprzewodnikach*
- *Sztuka pomiaru stanów kwantowych*
- *Stanisław Dembiński o drodze życiowej Aleksandra Jabłońskiego*
- *Wspomnienia Jana Rzewuskiego*