

tom 59

zeszyt 6

rok 2008

nr indeksu 369721

cena 12 zł (0% VAT)

# POSTĘPY FIZYKI

Dwumiesięcznik Polskiego Towarzystwa Fizycznego

Odwracalność mikroprzepływów

Spintronika

Matematyka i fizyka

ELEKTRONIKA

KRZEMOWA

SPINTRONIKA



ISSN 0032-5430





# EasyLife LS

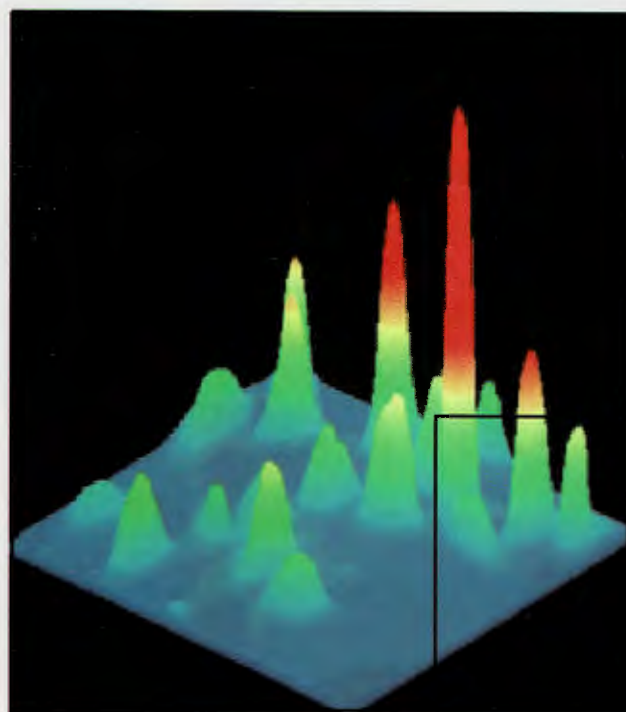
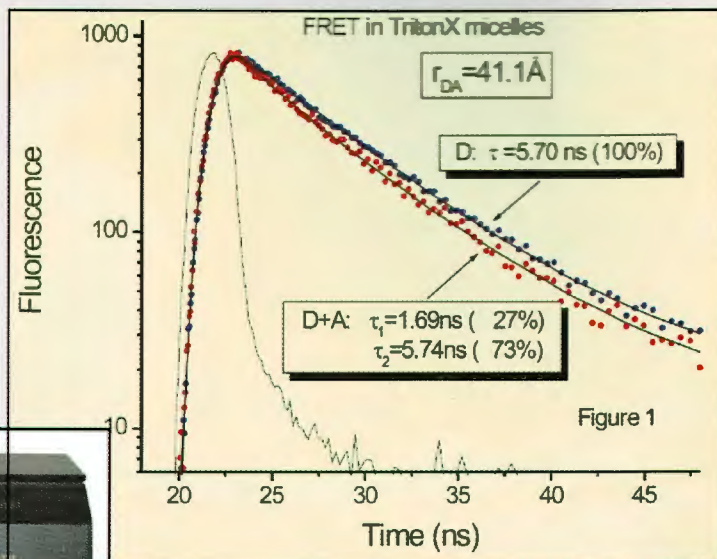
Fluorescencyjny spektrometr kinetyczny

wzbudzenie LED: 280 - 540nm

rozdzielczość: < 100 ps

bogate oprogramowanie

cena: \$25 000



## ImageMaster

Mikroskopowy układ do obrazowania fluorescencji i do spektroskopii emisyjnej.

Mierzy fluorescencję i fosforescencję rozdzieloną czasowo i przestrzennie.



**Photon Technology International**

*Eurotek International Sp. z o. o.*

022 843 70 40  
inbox@eurotek.com.pl

## RADA REDAKCYJNA

Andrzej Kajetan Wróblewski (przewodniczący), Mieczysław Budzyński, Andrzej Dobek, Witold Dobrowolski, Zofia Gołąb-Meyer, Adam Kiejna, Józef Szudy

## REDAKTOR HONOROWY

Adam Sobiczewski

## KOMITET REDAKCYJNY

Jerzy Gronkowski (redaktor naczelny), Ewa Lipka (sekretarz redakcji), Mirosław Łukaszewski, Magdalena Staszal, Marek Więckowski, Barbara Wojtowicz

## Adres Redakcji:

ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa, e-mail: postepy@fuw.edu.pl, Internet: postepy.fuw.edu.pl

## KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

Maciej Piętko (Białystok), Aleksandra Wronkowska (Bydgoszcz), Wojciech Gruhn (Częstochowa), Tomasz Jarosław Wąsowicz (Gdańsk), Roman Bukowski (Gliwice), Jerzy Warczewski (Katowice), Aldona Kubala-Kukuś (Kielce), Małgorzata Nowina Konopka (Kraków), Elżbieta Jartych (Lublin), Michał Szanecki (Łódź), Halina Pięta (Opole), Maria Połomska (Poznań), Małgorzata Pociąg (Rzeszów), Małgorzata Kuzio (Stąpisk), Janusz Tyspek (Szczecin), Winicjusz Drozdowski (Toruń), Aleksandra Miłoś (Warszawa), Bernard Jancewicz (Wrocław), Joanna Borgensztajn (Zielona Góra)

## POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

## ZARZĄD GŁÓWNY

Reinhard Kulessa (prezes), Jacek M. Baranowski (sekretarz generalny), Roman Puźniak (skarbnik), Przemysław Dereń, Mirosław Trociuk i Jerzy Warczewski (członkowie wykonawczy), Bolesław Augustyniak, Maria Dobkowska, Stanisław Dubiel, Henryk Figiel, Jacek Przemysław Goc, Zofia Gołąb-Meyer, Bernard Jancewicz i Ewa Kurek (członkowie)

## Adres Zarządu:

ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa, tel./fax: 022-6212668, e-mail: ptf@fuw.edu.pl, Internet: ptf.fuw.edu.pl

## PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW PTF

Eugeniusz Żukowski (Białystok), Stefan Kruszewski (Bydgoszcz), Józef Zbrozarczyk (Częstochowa), Bolesław Augustyniak (Gdańsk), Bogusław Adamowicz (Gliwice), Maciej Maśka (Katowice), Małgorzata Wysocka-Kunisz (Kielce), Stanisław Wróbel (Kraków), Jerzy Żuk (Lublin), Bogusław Broda (Łódź), Stanisław Waga (Opole), Roman Świetlik (Poznań), Małgorzata Klisowska (Rzeszów), Vladimir Tomlin (Stąpisk), Adam Bechler (Szczecin), Grzegorz Karwasz (Toruń), Mirosław Karpierz (Warszawa), Bernard Jancewicz (Wrocław), Marian Olszowy (Zielona Góra)

## REDAKTORZY NACZELNI INNYCH CZASOPISM

## WYDAWANYCH POD EGIDĄ PTF

Witold D. Dobrowolski – *Acta Physica Polonica A*, Kacper Zalewski – *Acta Physica Polonica B*, Andrzej Jamiołkowski – *Reports on Mathematical Physics*, Marek Kordos – *Delta*, Zofia Gołąb-Meyer – *Foton*, Zbigniew Wiśniewski (redaktor prowadzący) – *Fizyka w Szkole*

## Czasopismo ukazuje się od 1949 r.

## Wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne

Dofinansowanie: Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

## Patronat: Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

## Skład komputerowy w redakcji

Opracowanie okładki: Studio Graficzne etNova Piotr Zenda i Wspólnicy sp.j., tel.: 022-8735520, e-mail: etnova@etnova.pl

Druk i oprawa: „UNI-Druk”, Warszawa, ul. Buńczuk 7b

ISSN 0032-5430

## SPIS TREŚCI

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| A. Myłyk, M.L. Ekiel-Jeżewska – Odwracalność mikroprzepływów .....                     | 238 |
| J. Andrzejewski – Badania prowadzone przy spalacyjnym źródle neutronów w CERN-ie ..... | 244 |
| A. Fert – Geneza, rozwój i przyszłość spintroniki .....                                | 249 |
| P.D. Lax – Matematyka i fizyka .....                                                   | 262 |
| ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI .....                                                         | 270 |
| RECENZJE .....                                                                         | 275 |
| NOWI PROFESOROWIE .....                                                                | 276 |
| KRONIKA .....                                                                          | 278 |

## Drodzy Czytelnicy,

Zeszyt, który składamy dziś w Wasze ręce, jest niestety wyraźnie spóźniony. Przepraszamy za usterki (nie całkiem przez nas zawinione), pocieszając się, że zeszyt jest – jak się nam wydaje – ciekawy i różnorodny tematycznie.

Głównym zeszycu jest bez wątpienia wykład noblowski Alberta Ferta o genezie, rozwoju i przyszłości spintroniki. Choć Autor pokazuje z humorem, że spintronice daleko jeszcze do wieku dojrzałego (patrz obrazy na okładce), nie ulega wątpliwości, że to dziś jeden z najbardziej obiecujących kierunków rozwoju fizyki i techniki ciała stałego.

Anna Myłyk i Maria L. Ekiel-Jeżewska piszą o odwracalności mikroprzepływów, opisując wykonane przez siebie w celach dydaktycznych słynne doświadczenie Taylora. Autorki szczegółowo wyjaśniają jego zaskakujący, nieintuicyjny wynik, wspierając się opisem teoretycznym i modelowaniem doświadczenia, a na końcu okazuje się, że... wszystko to od dawna wiedzą dobre gospodynie i ręcznie ucierając majonez, nie zmieniają kierunku mieszania. W kolejnym artykule Józef Andrzejewski opisuje badania, które prowadzi ze współpracownikami przy spalacyjnym źródle neutronów w CERN-ie.

Na deser serwujemy przekład wykładu im. Gibbsa wygłoszonego w 2007 r. na zjeździe matematyków amerykańskich w Nowym Orleanie przez Petera Laxa. Temat – matematyka i fizyka – nie jest na naszych łamach nowy, ale każda okazja wyjścia choć trochę poza własne podwórko wydaje się dobra i godna wykorzystania (do przełożenia i opublikowania tego wykładu namówił nas Łukasz A. Turski, za co mu dziękujemy).

## Życząc ciekawej lektury,

Mirek Łukaszewski

## Na okładce:

Tak widzi porównanie postury spintroniki i elektroniki krzemowej Albert Fert, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2007 r. za odkrycie gigantycznego magnetooporu w magnetycznych strukturach wielowarstwowych, czyli jednego z filarów spintroniki (patrz <http://nobelprize.org/nobel.prizes/physics/laureates/2007/fert-slides.pdf>). Przekład wykładu noblowskiego Ferta znajdują Państwo w niniejszym zeszycie na stronie 249.

# Odwracalność mikroprzepływów

Anna Myłyk, Maria L. Ekiel-Jeżewska

*Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa*

---

## Reversibility of microflows

**Abstract:** In daily life, at the macroscopic scale, inertia of water flows is commonly experienced and applied. However, for micro-objects moving in water environment, inertia is negligible. That is why sometimes the processes observed at the microscale are in contradiction with our intuition. The examples of such amazing effects can be seen on the famous G.I. Taylor's movie. The aim of this paper is to analyze the most spectacular of the demonstrations presented there: apparently mixed fluid recovers its initial inhomogeneous structure when the direction of the mixing is reversed.

---

Fizyka i chemia, na równi z naukami opisowoprzyrodniczymi, kształcą zdolność bezpośredniej obserwacji, spostrzegawczość i samodzielność sądu. [...] Uczą czytać prawdę nie z bibuły ani z własnej fantazji, lecz tylko z obserwacji przyrody. Żeby ta ich charakterystyczna cecha zaznaczyła się również i w szkole, musimy uczyć ich w sposób prawidłowy, tj. nie tylko pokazując *ex cathedra* doświadczenia, ale opierając się na własnoręcznych ćwiczeniach uczniów w pracowni fizycznej i chemicznej, na własnej obserwacji przyrodniczej. [...] Nauki ścisłe kształcą nie tylko w samodzielnej obserwacji, ale wprawiają nas, jak żadne inne nauki, we właściwej metodzie rozumowania naukowego, zarówno w indukcyjnej, jak dedukcyjnej metodzie, kładąc przy tym największy nacisk na faktyczną dokładność i logiczną ścisłość.

Marian Smoluchowski [1]

## Wprowadzenie

Jakie prawa rządzą ruchem cząstek o rozmiarach kilku lub kilkudziesięciu mikrometrów w środowisku wodnym? Jaki jest ich opór hydrodynamiczny? Odpowiedzi na te pytania mają znaczenie uniwersalne zarówno w mikroskali jak i przy opisie zjawisk makroskopowych. Prawa te są w szczególności niezbędne do zrozumienia, jak pływają mikroobiekty, takie jak bakterie czy glony, na czym polega mechanizm ich grupowania, a także jak zaprojektować wodne mikroroboty o znaczeniu medycznym. W makroskali, dla układów zawierających ogromne liczby mikrocząstek w płynie, prawa te determinują efektywne współczynniki transportu zawieszin, np. lepkość czy prędkość opadania grawitacyjnego. Wielkości te opisują m.in. procesy o znaczeniu przemysłowym, takie jak filtracja zanieczyszczeń czy produkcja cukru, farby i PCV.

W środowisku wodnym mikrocząstki oddziałują z płynem w inny sposób niż obiekty makroskopowe. Ich prędkość i rozmiary są bowiem tak małe, że bezwładność płynu jest nieistotna. Inaczej mówiąc, płyn niemal „natchemiasz” dostosowuje swój przepływ do ruchu mikrocząstek, a czas relaksacji prędkości jest tak mały, że można go w praktyce pominąć. Dominują efekty lepkie<sup>1</sup> i przepływy są odwracalne w czasie. W mikroskali nie tak łatwo

więc wymieszać wodę. Podobna trudność pojawia się przy większych prędkościach i rozmiarach układu, gdy zamiast wody próbujemy wymieszać płyny o znacznie większej lepkości kinematycznej, np. glicerynę lub olej silikonowy, zachowując niezmienną, znacznie mniejszą od jedności liczbę Reynoldsa [2], czyli iloczyn charakterystycznej prędkości i rozmiaru podzielony przez lepkość kinematyczną płynu. Ruch płynu w tak przeskalowanych układach opisywany jest bowiem tym samym rozwiązaniem równań Stokesa [3]. Właściwość ta, zwana prawem podobieństwa, pozwala na analizowanie efektów typowych dla mikroświata w modelowych układach odpowiednio większych, a zatem łatwiejszych do badań doświadczalnych.

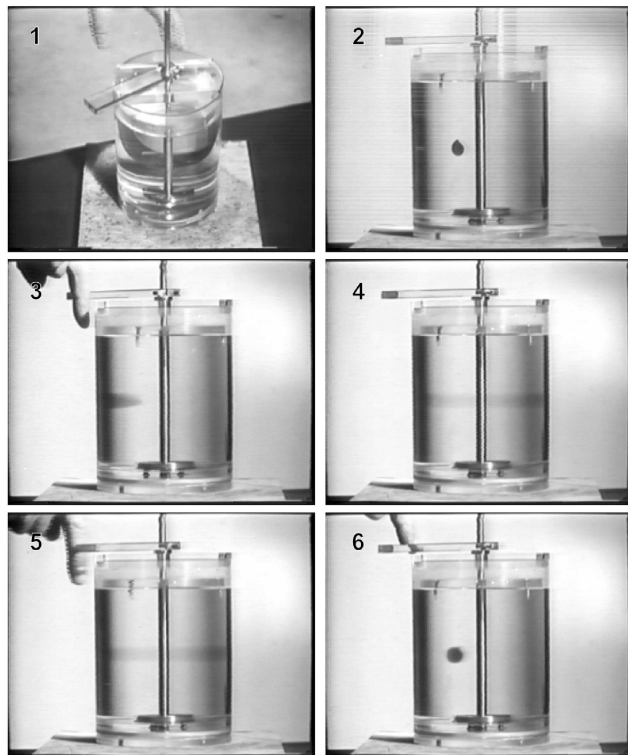
Właściwość tę niemal pół wieku temu Geoffrey Ingram Taylor wykorzystał do celów dydaktycznych. Posługując się m.in. gliceryną i syropem, przygotował pokazy doświadczalne w spektakularny sposób ilustrujące cechy charakterystyczne takich przepływów mikro- i makroskopowych, dla których efekty bezwładności są nieistotne. Pokazy te zostały zaprezentowane i przedyskutowane na filmie [2], który do dziś uważany jest [4–6] za klasyczny materiał dydaktyczny dla wszystkich zainteresowanych poznaniem hydrodynamiki przepływów o liczbie Reynoldsa znacznie mniejszej od jedności. Pokazy zadzi-

---

<sup>1</sup>Lepkość jest zdolnością cieczy do stawiania oporu przy wzajemnym przemieszczaniu się elementów płynu względem siebie.

wiają uczniów i studentów, a także inspirują współczesne badania naukowe [7,8].

Przyjrzyjmy się jednemu ze sfilmowanych eksperymentów Taylora [2,4,5,8]: na rys. 1 przedstawione zostały wybrane klatki filmu. Układ doświadczalny, pokazany na



Rys. 1. Doświadczenie Taylora [2]: 1 – układ doświadczalny, 2 – wprowadzenie zabarwionej kropli, 3 – obracanie walcem wewnętrznym, 4 – zatrzymanie, 5 – wykonanie takiej samej liczby obrotów cylindra wewnętrznego w przeciwnym kierunku, 6 – wynik

rys. 1.1, składał się z dwóch współosiowych cylindrów. Przestrzeń między nimi była wypełniona gliceryną. Możliwość obrotu miał tylko cylinder wewnętrzny. W przestrzeń między cylindrami wprowadzono małą kroplę zabarwionej gliceryny (rys. 1.2). Następnie tak długo obracano cylinder wewnętrzny (rys. 1.3), aby już prawie nie było widać zabarwionej substancji (rys. 1.4). Wtedy odwrócono kierunek ruchu cylindra, wykonując tę samą liczbę obrotów. Zabarbiona kropla wróciła do pozycji początkowej, nie mieszając się z pozostałą substancją!

## Cel artykułu

Zdarza się, że widzowie podają w wątpliwość wiarygodność oglądanego pokazu. Podejrzewają, że to fotomontaż, film puszczonej od tyłu. Chcą sprawdzić wynik, który zdaje się przeczyć zdrowemu rozsądkowi. Jeśli do kawy wlejemy śmietankę i zaczniemy ją mieszać, a następnie zmienimy kierunek ruchu łyżeczki, to substancje oczywiście się wymieszają. Dlaczego w eksperymencie Taylora jest inaczej? Należałoby zrozumieć różnice między prze-

plywem w kawie a przepływem w doświadczeniu Taylora. Może nam w tym pomóc dziedzina nauki, która zajmuje się badaniem ruchu płynów.

Obserwatorom pokazu nasuwa się wiele pytań. Jak takie zjawisko jest możliwe? Dlaczego zabarwiony płyn nie miesza się podczas ruchu? Co powoduje, że prawie niewidoczna, pozornie wymieszana z gliceryną kropla po odwróceniu kierunku ruchu w magiczny sposób przybiera znów pierwotny kształt i wraca do pozycji początkowej? Jak to zrozumieć? Jak zmienia się w czasie kształt kolorowej kropli oglądany od góry czy od spodu naczynia zamiast z boku?

Celem artykułu jest odpowiedź na te wszystkie pytania. A ściślej biorąc, Czytelnik dowie się, jak szukał, znajdował i spisywał odpowiedzi na własne pytania pewien dociekliwy obserwator. Motywacją jego niemal rocznej pracy była ciekawość i chęć zrozumienia dobrze znanego z literatury [2,4–6] zjawiska odwracalności przepływów, tak intrygująco przedstawionego na filmie Taylora. Potrzebny był jeszcze ktoś, kto coś wie i może zostać przewodnikiem: pomóc wybrać drogę, podjąć dyskusję, inspirować zmiany i ulepszenia. W ten sposób powstały warunki, w których obserwator zaczął się uczyć [9].

Najpierw pojawiła się potrzeba własnoręcznego przeprowadzenia doświadczenia. Trzeba było skonstruować układ pomiarowy. Potem, korzystając z filmu Taylora, wykonano pokaz tego zjawiska. Sprawdzone, czy odwracalność w czasie przepływu gliceryny jest prawdziwa, zgodnie z doświadczeniem Taylora. Zbadano, jak deformuje się zabarwiona kropla i czy na końcu wróci do pozycji początkowej. W szczególności można było obejrzeć ją nie tylko z boku, ale także od dołu. Później postanowiono na podstawie literatury [3] opisać matematycznie eksperyment za pomocą równań. Ale których: Naviera–Stokesa czy Stokesa? Trzeba się było zastanowić, jakie warunki nałożyć na rozwiązanie. Wreszcie pojawiły się wzory na pole prędkości płynu. Ale wzory jeszcze nie pokazują, czy wynik teoretyczny oddaje istotę doświadczenia. Chcąc zrozumieć wzory, za pomocą programu Matlab przedstawiono na filmie teoretyczny ruch zabarwionej kropli i porównano z filmem doświadczalnym. Na końcu przedyskutowano jeszcze... Pst! Nie będziemy przecież Czytelnikowi zdradzać wszystkiego od razu...

## Pokaz doświadczalny

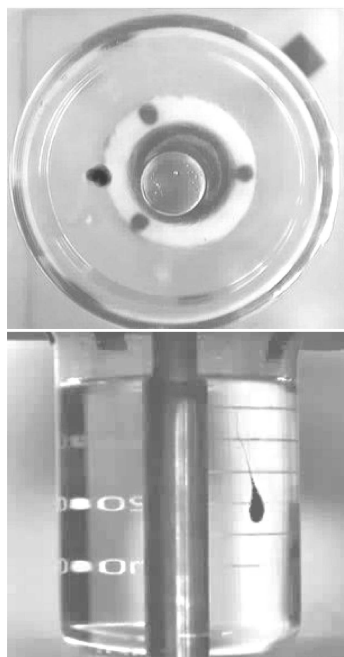
### Układ pomiarowy

Układ pomiarowy składał się ze zlewki o średnicy 8 cm, wysokości 11 cm i pojemności 400 ml, miedzianego cylindra o średnicy 1,5 cm, gliceryny o gęstości  $\rho = 1253 \text{ kg/m}^3$ , zajmującej całą pojemność zlewki, oraz specjalnie przygotowanej niewielkiej ilości zabarwionej substancji (gliceryna + barwnik rodamina B,  $\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{N}_2\text{O}_3\text{Cl}$ ). W skład układu wchodziła również kamera CCD (Color Vision Camera Module) umieszczona na statywie.

### Doświadczenie

Kroplę zabarwionej substancji o kształcie zbliżonym do kuli umieszczono w wypełnionej gliceryną prze-

strzeni między dwoma współosiowymi cylindrami, a następnie obracano cylinder wewnętrzny. Na podstawie obrazów z kamery wyznaczono średni (przybliżony) rozmiar kropli zabarwionej substancji, otrzymując  $l = 3$  mm, oraz odległość środka kropli od osi symetrii wewnętrznego walca  $r = 2,5$  cm. Następnie wyznaczono średnią prędkość środka plamy, otrzymując  $v = 6,3$  cm/s. Wykonano 30 obrotów, po czym zmieniono kierunek ruchu i wykonano tę samą liczbę obrotów. Widok kropli w chwili początkowej w rzucie z dołu i boku przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Widok doświadczenia z dołu i z boku w chwili początkowej

Ewolucję prześledzić można na filmach [10] oraz na rys. 3A, gdzie widoczne jest w rzucie z dołu, jak plama zabarwionej substancji się rozciąga, przyjmując kształt spiralny. Natomiast w rzucie z boku zaobserwowano, że kropla się rozmywa i rozciąga w kierunku poziomym podobnie jak na filmie Taylora [2]. Do momentu zmiany kierunku ruchu cylindra zabarwiona kropla całkowicie utraciła już początkowy kształt. Gdy odwrócono kierunek ruchu cylindra, zaobserwowano, że rozciągnięty zabarwiony płyn z powrotem gromadzi się w kroplę. Zauważono, iż niezależnie od zmiany prędkości chwilowej poruszania cylindrem wewnętrznym plama zabarwionej cieczy wraca do położenia początkowego.

Obserwacja odpowiada przewidywaniom teoretycznym, które będą opisane w następnym rozdziale. W rozdziale tym przedyskutowana zostanie także przyczyna zaobserwowanej niewielkiej deformacji kształtu końcowego kropli w porównaniu z początkowym.

Wykonano takie samo doświadczenie dla dużych liczb Reynoldsa ( $Re \gg 1$ ) w wodzie. Ruch małej kropli zabarwionej wody odbywa się inaczej. Po wprowadzeniu do

układu kropli wody zabarwionej rodaminą nastąpiło rozciągnięcie kropli z rozmyciem jej brzegu. Podczas ruchu mieszanie to coraz bardziej się wzmacniało. Następnie, po zmianie kierunku ruchu brzegu na przeciwny, zabarwiony płyn nie zmienił natychmiast kierunku ruchu. Podczas całego ruchu zaobserwowano ciągłe mieszanie się, tak że na końcu doświadczenia kształt kropli nie przypominał zupełnie wyglądu początkowego.

## Jak zrozumieć wynik doświadczenia?

W opisanym układzie doświadczalnym odwracalność przepływów w czasie oznacza, że przy zmianie kierunku ruchu naczynia na przeciwny zostanie również odwrócony kierunek przepływu. W celu zrozumienia zagadnienia odwracalności przeanalizowano jego podstawy teoretyczne i zastosowano je do wyjaśnienia wyniku doświadczenia (patrz następne rozdziały). Skorzystano z rozwiązania stacjonarnego równań Naviera–Stokesa dla przepływu między dwoma współosiowymi cylindrami [3]. Z symetrii wynika, że jest ono jednocześnie rozwiązaniem równań Stokesa. Ogólnie równania Naviera–Stokesa można zapisać w postaci równań Stokesa, jeśli stosunek sił bezwładności do sił lepkich (czyli liczba Reynoldsa) jest mały. Analityczne rozwiązania stacjonarnych równań Naviera–Stokesa modelujące eksperyment przedstawiono graficznie za pomocą programu Matlab i porównano je z doświadczeniem.

Podczas doświadczenia zauważono niewielką różnicę między początkowym i końcowym kształtem oraz położeniem zabarwionej kropli substancji. Sprawdzone więc, jaki wpływ na to zjawisko ma proces dyfuzji. Jeśli proces ten podczas ruchu cieczy jest istotny, to po odwróceniu ruchu brzegów kropla nie wróci do początkowego położenia. W związku z tym obliczono średni kwadrat przesunięcia brownowskiego i porównano go z kwadratem przesunięcia elementu płynu podczas doświadczenia. W celu wyjaśnienia, czy niewielka różnica między końcowym a początkowym kształtem i położeniem kropli może być spowodowana efektami bezwładności, obliczono także liczbę Reynoldsa.

## Opis teoretyczny

### Stacjonarne pola prędkości płynu między dwoma współosiowymi cylindrami

Stacjonarne pole prędkości cieczy lepkiej [3] między dwoma nieskończonymi współosiowymi walcami wykonanymi z ciała stałego, obracającymi się z różnymi prędkościami kątowymi  $\omega_1$  oraz  $\omega_2$ , spełnia równania Naviera–Stokesa:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \mathbf{F} + \nu \nabla^2 \mathbf{u}, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:  $p$  – ciśnienie zmodyfikowane płynu (uwzględniające także grawitację),  $\nu$  – lepkość kinematyczna płynu,  $\mathbf{u}$  – szukane pole prędkości płynu,  $\mathbf{F}$  – siły na jednostkę masy płynu,  $\rho$  – gęstość płynu.

Zakłada się, że siła grawitacji uwzględniona jest w ciśnieniu zmodyfikowanym, a inne siły na jednostkę masy

nie występują ( $\mathbf{F} = 0$ ). Poszukuje się przepływu stacjonarnego, dla którego  $\partial \mathbf{u} / \partial t = 0$ . Przy takim założeniu równanie Naviera–Stokesa (1) przybiera postać

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u}, \quad (2)$$

gdzie  $(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}$  – przyśpieszenie elementu płynu o jednostkowej masie,  $-\nabla p / \rho$  – siły ciśnienia na jednostkę masy,  $\nu \nabla^2 \mathbf{u}$  – siła na jednostkę masy pochodząca od lepkości płynu.

Podamy teraz rozwiązanie układu równań (2) z uwzględnieniem warunków brzegowych przylegania na powierzchni walców (prędkość płynu równa prędkości walców) i w nieskończoności (nie ma różnicy ciśnień w nieskończoności, inaczej mówiąc, gradient ciśnienia w kierunku  $\hat{z}$  jest równy zeru, gdzie oś  $z$  wybrano wzdłuż osi symetrii walca). We współrzędnych biegunowych ( $r, \varphi, z$ ), zgodnie z symetrią układu,

$$\mathbf{u} = u(r) \hat{\mathbf{e}}_\varphi, \quad (3)$$

$$p = \text{const.} \quad (4)$$

Dla prędkości postaci (3) mamy  $(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = 0$  i stacjonarne równania Naviera–Stokesa (1) są równoważne równaniom Stokesa:

$$\begin{cases} -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} = 0, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Po wstawieniu pola prędkości (3) do równania (5) ze stałym ciśnieniem (4) otrzymano [3]

$$\mathbf{u} = (Ar + B/r) \hat{\mathbf{e}}_\varphi. \quad (6)$$

Warunki brzegowe przylegania na powierzchni walców mają postać:

$$\begin{cases} r_1 \omega_1 = (Ar_1 + B/r_1), \\ r_2 \omega_2 = (Ar_2 + B/r_2), \end{cases} \quad (7)$$

gdzie odpowiednio:  $r_1, \omega_1$  – promień i prędkość kątowa walca wewnętrznego,  $r_2, \omega_2$  – promień i prędkość kątowa walca zewnętrznego.

Stałe przyjmują postać:

$$A = \frac{r_1^2 \omega_1 - r_2^2 \omega_2}{r_1^2 - r_2^2}, \quad (8)$$

$$B = \frac{(\omega_2 - \omega_1) r_1^2 r_2^2}{(r_1^2 - r_2^2)}. \quad (9)$$

Stacjonarne pole prędkości dane wzorami (6–9) dla  $\omega_2 = 0$  wykorzystano poniżej do modelowania doświadczenia.

#### Ruchy Browna

Ruchy Browna to nieuporządkowany ruch cząstek zawieszonych w płynie (tutaj: cząsteczek rodaminy w glicerynie) wywołany zderzeniami cząstek zawieszonych z cząsteczkami płynu. Taki ruch można opisać [11] za pomocą średniego kwadratu przesunięcia brownowskiego, który powinien być proporcjonalny do czasu obserwacji. Współczynnikiem proporcjonalności jest współczynnik dyfuzji.

Na podstawie kinetycznej teorii ruchów Browna średni kwadrat przesunięcia wzdłuż jednego kierunku na obrazie zarejestrowanym przez kamerę wynosi

$$\langle x^2 \rangle = 2Dt, \quad (10)$$

gdzie:  $t$  – czas obserwacji,  $D = kT/6\pi\eta r$  – współczynnik dyfuzji,  $T$  – temperatura bezwzględna,  $k$  – stała Boltzmanna,  $\eta = \nu\rho$  – współczynnik lepkości dynamicznej cieczy,  $r$  – promień cząstki zawieszony.

Jeśli w doświadczeniu wartość średniego kwadratu przesunięcia brownowskiego  $\langle x^2 \rangle$  nie jest znacznie mniejsza niż kwadrat  $\Delta^2$  różnicy początkowego i końcowego położenia elementu zabarwionego płynu, to proces dyfuzji jest istotny.

Alternatywnie można obliczyć liczbę Pécleta, która jest charakterystycznym parametrem wykorzystywanym w opisie ruchów Browna i może być zdefiniowana jako

$$Pe = \frac{lv}{D}, \quad (11)$$

gdzie:  $l$  – charakterystyczny rozmiar,  $v$  – charakterystyczna prędkość. Proces dyfuzji nie jest istotny, jeśli  $Pe \gg 1$ .

#### Liczba Reynoldsa

Liczba Reynoldsa określa stosunek sił bezwładności do sił lepkich i jest zdefiniowana jako

$$Re = \frac{lv}{\nu} = \frac{lv\rho}{\eta}. \quad (12)$$

Liczba ta określa jak szybko płyn dochodzi do stanu stacjonarnego, ponieważ  $Re = \tau_v/\tau_m$  jest stosunkiem czasu  $\tau_v = l^2\rho/\eta$  lepkiej relaksacji płynu do czasu charakteryzującego makroskopowy ruch elementu płynu  $\tau_m = l/v$ .

#### Analiza wyników doświadczenia

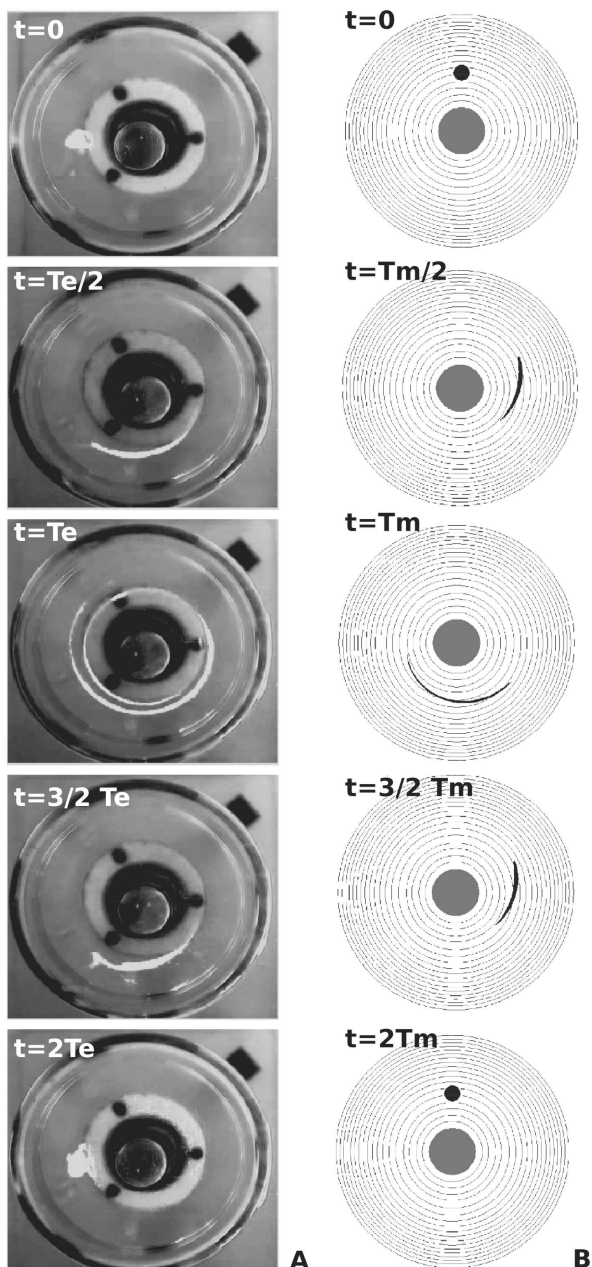
##### Modelowanie doświadczenia

Modelowanie teoretyczne eksperymentu przeprowadzono z wykorzystaniem stacjonarnego pola prędkości dla przepływu między dwoma nieskończonymi walcami (6). W doświadczeniu cylinder zewnętrzny jest nieruchomy, a zatem  $\omega_2 = 0$ . W tym przypadku zależność stacjonarnego pola prędkości płynu od położenia przyjmuje postać:

$$\mathbf{u} = \frac{r_1^2 \omega_1}{r_1^2 - r_2^2} \left( r - \frac{r_2^2}{r} \right) \hat{\mathbf{e}}_\varphi. \quad (13)$$

Wykorzystując to równanie, za pomocą programu Matlab wykonano symulację zachowania się elementu zabarwionego płynu w eksperymencie. W czasie  $0 \leq t \leq T_m$  ruch odbywał się z prędkością  $\mathbf{u}$  daną wzorem (13). W czasie  $T_m$  wykonano  $\omega_1 T_m / 2\pi = 4$  obroty. Następnie w chwili  $T_m$  odwrócono kierunek ruchu cylindra, co pociągnęło za sobą natychmiastowe odwrócenie kierunku prędkości płynu (dalej ruch odbywał się z prędkością  $-\mathbf{u}$ ). Symulację przedstawiono na rys. 3B i filmie [10]. Zabawiony płyn rozciągnął się, przyjmując spiralny kształt. Następnie, po odwróceniu kierunku ruchu cylindra, każdy element płynu wracał po tej samej drodze do pozycji początkowej.





Rys. 3. Widok układu od dołu. Położenie zabarwionej kropli w kolejnych chwilach (obrazy od góry do dołu:  $0 \leq t \leq T$ , obrót zgodnie z ruchem wskazówek zegara;  $T \leq t \leq 2T$ , obrót w przeciwną stronę). A. Eksperyment ( $T = T_e$ ). B. Modelowanie za pomocą równań Stokesa ( $T = T_m$ ).

Porównując rozwiązanie teoretyczne z eksperymentem widzimy jakościowe podobieństwo zmiany kształtu zabarwionego płynu, przy czym warto zwrócić uwagę, że ewolucja w eksperymencie trwała znacznie dłużej (jej czas trwania  $2T_e$  odpowiada 30 obrotom) niż podczas modelowania teoretycznego ( $2T_m$  odpowiada 4 obrotom). Według modelu kropla idealnie wraca do pozycji początkowej. Na końcu doświadczenia zaobserwowano jednak niewielką deformację i przesunięcie plamy w stosunku do początkowego kształtu i położenia. Co jest przyczyną: nieuporząd-

kowane ruchy cząstek, czy to, że układ nie osiąga stanu stacjonarnego dostatecznie szybko? Skoro siły bezwładności nie są równe zero, to czy przyspieszenie elementu płynu można pominąć? W następnych punktach sprawdzimy, czy oba te efekty są istotne w doświadczeniu.

#### Wyznaczenie lepkości gliceryny

Za pomocą wiskozymetru Höpplera wyznaczono lepkość kinematyczną gliceryny w temperaturze 297,15 K, otrzymując  $\nu = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . W tabeli 1 porównano zmierzona wartość lepkości użytej w doświadczeniu gliceryny z danymi tablicowymi [12] i stwierdzono, że wartość jej odpowiadała glicerynie o stężeniu ok. 97%. Lepkość otrzymana na podstawie pomiaru jest odpowiednia do przewidywanej.

Tabela 1. Lepkość gliceryny [13]. Wartość zmierzona w temperaturze 24 °C podkreślono.

| Gęstość<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Stężenie<br>[%] | Lepkość kinematyczna<br>[10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s] |             |
|---------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|-------------|
|                                 |                 | 20 °C                                                        | 25 °C       |
| 1182                            | 70              | 0,19                                                         | 0,15        |
| 1209                            | 80              | 0,51                                                         | 0,38        |
| 1236                            | 90              | 1,90                                                         | 1,32        |
| 1249                            | 95              | 4,36                                                         | 2,93        |
| 1252                            | 96              | 5,28                                                         | 3,48        |
| <u>1253</u>                     | —               | —                                                            | <u>4,19</u> |
| 1254                            | 97              | 6,42                                                         | 4,17        |
| 1257                            | 98              | 7,75                                                         | 5,00        |
| 1262                            | 100             | 11,88                                                        | 7,49        |

#### Średni kwadrat przesunięcia dla ruchów Browna w eksperymencie

W celu obliczenia średniego kwadratu przesunięcia cząsteczek rodaminu o gęstości 1,31 g/cm<sup>3</sup> i masie molowej 479,02 g/mol, wyznaczono najpierw promień cząsteczki na podstawie jej gęstości, otrzymując  $r = 5,25 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ , a następnie znając wartość współczynnika lepkości kinematycznej gliceryny wyznaczono lepkość dynamiczną ( $\eta = 526 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ) i współczynniki dyfuzji  $D$ . Czas obserwacji wynosił  $t = 150 \text{ s}$ . Podstawiając te wartości do wzoru (10), otrzymano  $\langle x^2 \rangle = 2,3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ . Zmierzony końcowy kwadrat przesunięcia plamy był rzędu  $\Delta^2 = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ . Po porównaniu  $\Delta^2$  z pierwiastkiem średniego kwadratu przesunięcia brownowskiego  $\langle x^2 \rangle$  stwierdzono, iż podczas ruchu dyfuzja była nieistotna. Liczba Pécleta  $Pe = 2,4 \cdot 10^8$  obliczona zgodnie ze wzorem (11) przy charakterystycznym rozmiarze zabarwionej plamy  $l = 0,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$  oraz prędkości  $v = 6,3 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$  jest znacznie większa od jedności.

#### Wyznaczenie liczby Reynoldsa

Wyznaczono wartość liczby Reynoldsa ze wzoru (12) w celu sprawdzenia, czy w warunkach doświadczalnych układ równań (1) może zostać uproszczony do równań Stokesa; otrzymano  $Re \approx 0,5$ .



Na podstawie tej wartości widzimy, że skala czasowa lepkiej relaksacji jest mniejsza niż skala czasowa ruchu makroskopowego, ale nie aż tak, żeby w układzie doświadczalnym siły bezwładności można było pominąć. Wartość liczby Reynoldsa jest tylko nieco mniejsza od jedności, czyli siły bezwładności mogą wyjaśniać powstanie małej zmiany kształtu i położenia plamy zabarwionej substancji pod koniec eksperymentu.

## Podsumowanie

### Odwracalność mikroprzepływów

Dla mikroprzepływów w środowisku wodnym liczba Reynoldsa jest znacznie mniejsza od jedności. Oznacza to, że naprężenia lepkie płynu dominują nad siłami bezwładności. Efekty typowe dla takiego warunku, np. odwracalność przepływu, można obserwować także przy większych rozmiarach i prędkościach charakterystycznych, o ile płyn wykazuje lepkość odpowiednio większą niż woda. Na przykład, w temperaturze pokojowej lepkość kinematyczna gliceryny jest tysiąc razy większa niż wody, a miodu, syropu i niektórych olei – kilka tysięcy razy<sup>2</sup>. Co więcej, przedyskutowane w tej pracy doświadczenie wzorowane na filmie Taylora [2] pokazuje, że odwracalność przepływów można zaobserwować nawet dla liczb Reynoldsa niewiele mniejszych od jedności. Nie bez powodu dobre gospodynie, ręcznie ucierając majonez, nie zmieniały kierunku mieszania...

### Wnioski dydaktyczne

Czytelnika może dziwić, dlaczego artykuł ten napisany został w konwencji oryginalnej pracy naukowej. Nie opisujemy w nim przecież wyników oryginalnych badań, a praca wykonana została wyłącznie w celach dydaktycznych. Niech nas jednak nie zmyli bezosobowa forma tekstu. Pamiętajmy, że nie powstałby on bez obecności ciekawego obserwatora, który z własnej inicjatywy, przy pomocy swojego opiekuna-przewodnika, szukał zrozumienia odwracalności mikroprzepływów. Nieprzypadkowo odbywało się to w opisany powyżej sposób. Jak bowiem pisał Piaget [15], „podstawową zasadą metod aktywnych jest szukanie inspiracji w historii nauki, a wyrazić można tę zasadę w następującej formie: *rozumieć – to znaczy*

*odkrywać lub odtwarzać przez ponowne odkrycie*. Trzeba będzie nagiąć się do tych wymagań, jeśli chcemy kształtować jednostki zdolne w przyszłości do wytwarzania lub do tworzenia, a nie tylko do powielania”.

A.M. serdecznie dziękuje S. Błońskiemu oraz P. Korczykowi za cenne uwagi. Praca powstała częściowo w ramach sieci MANAR oraz projektu badawczego 45/N-COST/2007/0, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

- [1] M. Smoluchowski, „Znaczenie nauk ścisłych w wykształceniu ogólnym”, przemówienie wygłoszone podczas Zjazdu Członków Towarzystwa Nauczycieli Szkół Wyższych w dniu 27 maja 1917 r. w Auli Uniwersytetu Jagiellońskiego, *Muzeum XXXII*, 286 (1917). Przedruk w: *Wybór pism filozoficznych* (PWN, Warszawa 1956).
- [2] G.I. Taylor, „Low Reynolds number flows”, *Encyclopaedia Britannica Educational Corp.*, Chicago, 1985, video No 21617 (originally a colour sound film, Educational Services Inc., 1967).
- [3] L.D. Landau, E.M. Lifszyc, *Hydrodynamika* (PWN, Warszawa 1994).
- [4] G.M. Homsy i in., *Multi-Media Fluid Mechanics (DVD-ROM)* (Cambridge University Press, 2000).
- [5] <http://web.mit.edu/hml/ncfmf.html>.
- [6] D.J. Jeffrey, „Some basic principles in interaction calculation”, w: *Sedimentation of small particles in a viscous fluid*, red. E.M. Tory (Computational Mechanics Publications, 1996).
- [7] D.J. Pine i in., *Nature* **438**, 997 (2005).
- [8] [www.physics.nyu.edu/pine/research/hydrereverse.html](http://www.physics.nyu.edu/pine/research/hydrereverse.html).
- [9] S.D. Głazek, S.B. Sarason, *Productive learning* (Corwin Press, 2007).
- [10] [www.ippt.gov.pl/~amylyk/activity.html](http://www.ippt.gov.pl/~amylyk/activity.html).
- [11] N.G. van Kampen, *Procesy stochastyczne w fizyce i chemii* (PWN, Warszawa 1990).
- [12] Ch.D. Hodgman, *Handbook of Chemistry and Physics*, 40th ed. (Chemical Rubber Publishing Co., Cleveland, Ohio 1959).
- [13] [www.fizyka.umk.pl/lab2/tables/viscosit.html](http://www.fizyka.umk.pl/lab2/tables/viscosit.html).
- [14] [www.seed.slb.com/en/scictr/lab/index\\_liquid.htm](http://www.seed.slb.com/en/scictr/lab/index_liquid.htm); [www.practicingoilanalysis.com/article\\_detail.asp?articleid=294](http://www.practicingoilanalysis.com/article_detail.asp?articleid=294).
- [15] J. Piaget, *Dokąd zmierza edukacja* (PWN, Warszawa 1977).

Mgr ANNA MYŁYK w roku 2007 obroniła pracę magisterską na Wydziale Matematyczno-Fizycznym Uniwersytetu w Białymstoku. Zajmowała się teorią rozpraszania i tunelowania w mechanice kwantowej. Obecnie rozpoczyna drugi rok studiów doktoranckich w IPPT PAN w Warszawie. Teraz interesuje ją opis teoretyczny przepływów lepkich ([www.ippt.gov.pl/~amylyk](http://www.ippt.gov.pl/~amylyk)).

Dr hab. MARIA L. EKIEL-JEŻEWSKA jest docentem w IPPT PAN w Warszawie. Zajmuje się fizyką teoretyczną materii miękkiej. W szczególności badania obejmują dynamikę mikroobiektów w płynie i ich proces grupowania, opór hydrodynamiczny wywierany przez mikrocząstki na przepływ oraz transport i strukturę zawieszin ([www.ippt.gov.pl/~mekiel](http://www.ippt.gov.pl/~mekiel)).



<sup>2</sup>Jak się przekonać, że płyn ma dużą lepkość? Można sprawdzić, czy potrzeba dużej siły, żeby przesunąć w nim tyłeczkę, albo też zaobserwować, czy płyn wolno wycieka z brzegu przechylonego słoika. Tak zachowuje się np. miód. Wiele innych płynnych produktów spożywczych, w języku potocznym zwanych „gęstymi” (czyli o lepkości znacznie większej niż woda), takich jak majonez, keczup czy jogurt, ma lepkość zależną od gradientu ich prędkości. „Nie chcą” wylać się z pojemnika tak szybko jak miód, ale stawiają mniejszy niż miód opór przy mieszaniu [14].

# Badania prowadzone przy spalacyjnym źródle neutronów w CERN-ie

Józef Andrzejewski

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Łódzki

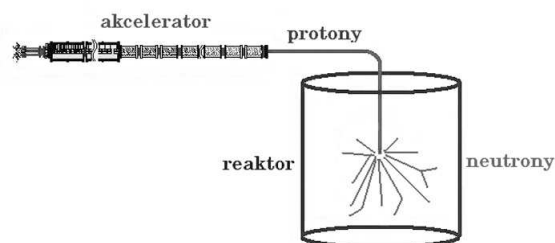
## Measurements at the spallation neutron source in CERN

*Abstract:* The new spallation neutron source named the n-TOF facility, with high instantaneous neutron flux and the intrinsically low background has been built in CERN. Some high-quality neutron cross section measurements performed at this facility, important for nuclear technology, nuclear astrophysics and nuclear physics are reported.

### Reaktor ADS

Pomysł skonstruowania nowego rodzaju reaktora jądrowego nazwanego Accelerator-Driven System (ADS) stał się w CERN-ie impulsem do budowy wyjątkowego w skali światowej źródła neutronów. Inicjatorem uruchomienia spalacyjnego źródła neutronów w tym znanym instytucie pod Genewą był laureat Nagrody Nobla Carlo Rubbia – były dyrektor CERN-u, jeden z pomysłodawców reaktora typu ADS.

Budowie reaktora ADS przyświecają dwa główne cele – wykorzystanie toru (Th) jako paliwa jądrowego, jak również potrzeba wypalania (transmutacji) odpadów (popiołów) jądrowych przez ich dodawanie (domieszkowanie) do paliwa uranowego. W obu tych przypadkach doprowadzenie reaktora do stanu krytycznego będzie możliwe przez dodatkowe zasilanie go neutronami z reakcji kruszenia (spalacji) wywołanej wysokoenergetycznymi protonami. Reaktor typu ADS będzie więc reaktorem podkrytycznym, w którym liczba neutronów generowanych w procesie rozszczepienia nie wystarcza do podtrzymania reakcji łańcuchowej. Dlatego planuje się wytwarzać dodatkowe neutrony w reakcji kruszenia przez wstrzykiwanie wiązki protonów do rdzenia reaktora (rys. 1). Na podkreślenie zasługuje fakt, że ADS jako układ podkrytyczny będzie urządzeniem bezpiecznym, zatrzymywanym przez wyłączenie prądu wiązki protonów. Zastosowanie torowego, a nie uranowego cyklu paliwowego, istotnie obniży ilość wytwarzanych aktywności takich jak pluton (Pu), ameryk (Am) i kiur (Cm), gromadzących się w wypalonym materiale rozszczepialnym. Poza tym, warto tu przypomnieć, że w przyrodzie istnieje tylko jeden izotop toru, a obfitość tego pierwiastka w skorupie ziemskiej jest około trzykrotnie większa niż uranu. Obecnie znaczenie energetyczne posiada tylko jeden izotop uranu –  $^{235}\text{U}$ , którego zawartość w naturalnym uranie wynosi jedynie 0,72%. Zatem, użycie toru jako paliwa może wydłużyć wielokrotnie czas, w którym na naszym globie będzie wytwarzana energia pochodząca z materiałów rozszczepialnych.



Rys. 1. Układ sterowany akceleratorem (ADS): połączenie silnonprądowego akceleratora protonów i podkrytycznego reaktora jądrowego

Niektóre izotopy wymienionych transuranowców charakteryzują się bardzo dużą radiotoksycznością i czasem połowicznego zaniku sięgającym milionów lat, dlatego stanowią największy problem związany z przechowywaniem wypalonego paliwa jądrowego. Przekształcić je będzie można w krótko żyjące radionuklidy (fragmenty rozszczepienia) dokonując ich rozszczepienia w strumieniu neutronów w urządzeniu typu ADS. Z dotychczas zdobytego doświadczenia wynika, że całkowita aktywność fragmentów rozszczepienia zgromadzonych w prętach paliwowych spada po 50 latach od chwili wyjęcia z reaktora do około 0,1% początkowej aktywności. W ten sposób można zmniejszyć problem długoterminowego przechowywania wysokoaktywnych odpadów reaktorowych i istotnie obniżyć koszt ich składowania.

### Współpraca n-TOF

W 1999 roku grupa inicjatywna skupiająca fizyków z czterech krajów europejskich posiadających rozwiniętą energetykę jądrową zorganizowała w CERN-ie Współpracę n-TOF. Jej celem jest przede wszystkim eksperymentalne wyznaczenie przekrojów czynnych na reakcje jądrowe typu  $(n,\gamma)$  i  $(n,f)$  (czyli reakcje wychwytu radiacyj-

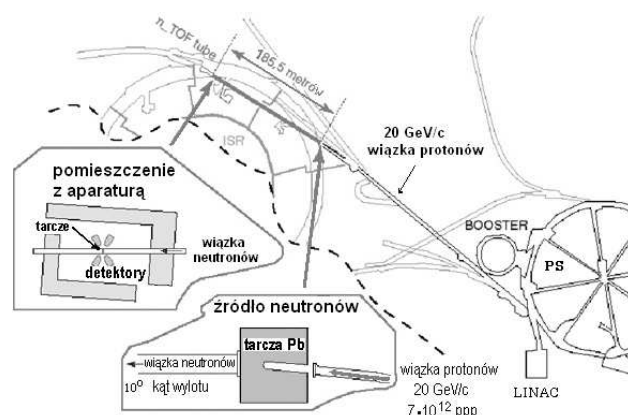
nego neutronów i reakcje rozszczepienia wywołanego neutronami) dla szeregu izotopów stabilnych i promieniotwórczych. Dokładniejsza niż do tej pory znajomość tych przekrojów dla szerokiego przedziału energii neutronów jest istotna dla budowy przyszłych, bezpiecznych reaktorów jądrowych typu ADS. Ważna jest też dla astrofizyki jądrowej do opisu przebiegu nukleosyntezy zachodzącej w gwiazdach w procesach s (tj. powolnego – slow), r (tj. szybkiego – rapid) wychwytu neutronów, oraz w stosunkowo mało poznanym dotychczas procesie p, jak również dla prowadzenia badań podstawowych z zakresu fizyki jądrowej.

Międzynarodowa Współpraca n\_TOF skupia badaczy z prawie czterdziestu instytutów naukowych i uczelni głównie z Europy (w tym z CERN-u), ale także z USA, Japonii i Indii. Członkiem Współpracy jest jeden zespół z Polski (z Uniwersytetu Łódzkiego).

Podstawowym urządzeniem badawczym jest spektrometr neutronów, który uruchomiono w CERN-ie w kwietniu 2001 r. Uzyskany w tym urządzeniu intensywny, impulsowany strumień neutronów jest wynikiem reakcji kruszenia jąder ołowiu bombardowanych protonami o energii 20 GeV, przyspieszanymi w synchrotronie CERN-PS. Przy tej energii protonów wydajność wytwarzania neutronów w reakcji kruszenia osiąga wartość około 300 neutronów na jeden proton. Intensywność wiązki protonów uderzającej w dużą tarczę z ołowiu wynosiła średnio  $7 \cdot 10^{12}$  protonów/s w impulsie trwającym 6 ns (krótki czas „błysku” neutronowego), powtarzanym co 2,4 s. Sumaryczny strumień neutronów docierający ze źródła na odległość 187,5 m (rys. 2), wynosił ok.  $10^5$  neutronów/cm<sup>2</sup>/impuls. Neutrony docierały w próżniowym kanale do podziemnego pomieszczenia z aparaturą badawczą po przejściu przez dwa kolimatory. Dla tej odległości między źródłem neutronów a tarczą jądrową, zastosowana spektrometria neutronów w metodzie czasu przeletu (TOF) dała znakomitą energetyczną zdolność rozdzielczą:  $\Delta E/E = 5,5 \cdot 10^{-4}$  dla neutronów o energii 1 keV i  $\Delta E/E = 4,2 \cdot 10^{-3}$  dla energii 1 MeV. Tarczę w postaci bloku ołowiu o rozmiarach  $40 \times 80 \times 80$  cm chłodzono warstwą wody o grubości 5 cm, która jednocześnie stanowiła moderator neutronów, zwiększający ich strumień w zakresie niskich energii. Dzięki temu spektrometr umożliwiał rejestrację neutronów w przedziale energii od 0,1 eV do 250 MeV [1]. W celu uzyskania w pomieszczeniu eksperymentalnym niskiego poziomu tła, na drodze wiązki neutronów umieszczono masywne osłony w postaci betonowych ścian o grubości kilku metrów, żelazną przesłonę o grubości trzech metrów, a także silny magnes do „wymiatania” cząstek naładowanych (rys. 3). To w połączeniu z rzadką powtarzalnością impulsu i krótkim czasem jego trwania (a bardzo wysoką natychmiastową intensywnością neutronów) umożliwiło prowadzenie pomiarów przekroju czynnego na wychwyt radiacyjny i rozszczepienie dla małej ilości jąder izotopów stabilnych oraz promieniotwórczych.

W początkowym okresie działania Współpraca n\_TOF przygotowała całą niezbędną infrastrukturę dla pomiarów neutronowych przekrojów czynnych. Zaliczyć do

niej należy monitory neutronów, detektory promieniowania  $\gamma$ , detektory do badań rozszczepienia, dysponujący 64 kanałami wysoko wydajny system gromadzenia danych pomiarowych oparty na digitalizatorach z szybkimi przetwornikami amplituda–cyfra (FADC) [2].



Rys. 2. Spektrometr neutronów w CERN-ie



Rys. 3. Widok magnesu „wymiatającego” naładowane cząstki lecące razem z neutronami

## Pomiary przekrojów czynnych

W latach 2001–04 w ramach Współpracy n\_TOF wykonano serię eksperymentów, uzyskując kilka najlepszych w skali światowej wyników dla przekroju czynnego na radiacyjny wychwyt neutronów dla izotopów (fragmentów rozszczepienia) o długim czasie połowicznego zaniku i innych izotopów oraz dla przekroju czynnego na rozszczepienie jąder aktywnych wywołane neutronami. Wykonane pomiary potwierdziły wyjątkową przydatność spalacyjnego źródła neutronów do tego rodzaju badań. Większość uzyskanych wyników została już opublikowana [3–22], a kolejne publikacje są w przygotowaniu. Izotopy, dla których prowadzono badania, przedstawione są w tab. 1.



Tabela 1. Izotopy, dla których w latach 2001–04 zmierzono przekroje czynne na wychwyt radiacyjny i rozszczepienie (tłustym drukiem zaznaczono izotopy promieniotwórcze).

| Wychwyt radiacyjny                     | Rozszczepienie                             |
|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| <b><math>^{151}\text{Sm}</math></b>    | <b><math>^{233,234,236}\text{U}</math></b> |
| $^{204,206,207,208}\text{Pb}$          | <b><math>^{232}\text{Th}</math></b>        |
| $^{209}\text{Bi}$                      | <b><math>^{237}\text{Np}</math></b>        |
| <b><math>^{232}\text{Th}</math></b>    | <b><math>^{241,243}\text{Am}</math></b>    |
| $^{139}\text{La}$                      | <b><math>^{245}\text{Cm}</math></b>        |
| $^{24,25,26}\text{Mg}$                 |                                            |
| $^{90,91,92,93,94,96}\text{Zr}$        |                                            |
| $^{186,187,188}\text{Os}$              |                                            |
| <b><math>^{233,234}\text{U}</math></b> |                                            |
| <b><math>^{237}\text{Np}</math></b>    |                                            |
| <b><math>^{242}\text{Am}</math></b>    |                                            |
| <b><math>^{240}\text{Pu}</math></b>    |                                            |

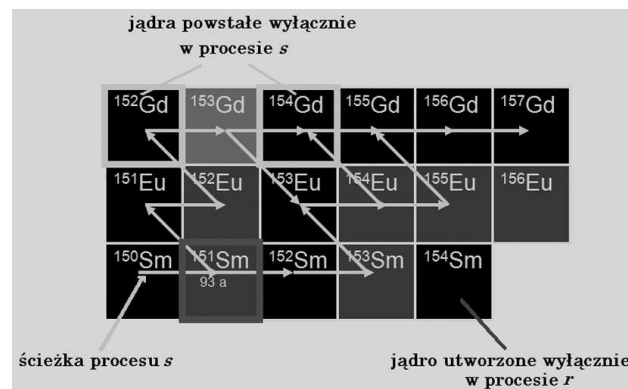
Spośród wielu bardzo wartościowych wyników uzyskanych przez Współpracę n\_TOF wymienić należy kilka wyróżniających się. Szczególnie ważny wynik to wyznaczenie przekroju czynnego reakcji  $^{151}\text{Sm}(n,\gamma)$  z użyciem silnie promieniotwórczej tarczy zawierającej 200 mg izotopu  $^{151}\text{Sm}$ , zamkniętej w kapsule wykonanej z cienkiej blachy z tytanu. Aktywność tarczy wynosiła 200 GBq (5,3 Ci). Pomiar wykonano z zastosowaniem detektorów z ciekłym scyntylatorem  $\text{C}_6\text{D}_6$  o małej czułości na wychwyt neutronów. Dokładne wyznaczenie przekroju czynnego na reakcję  $^{151}\text{Sm}(n,\gamma)$  dostarcza istotnej informacji o warunkach termodynamicznych panujących w gwiazdach typu AGB (Asymptotic Giant Branch), znajdujących się w głównym ciągu diagramu Hertzsprunga–Russella i grupującym gwiazdy, które charakteryzują się okresową ciepłą pulsacją. Jądro  $^{151}\text{Sm}$  jest punktem rozgałęzienia na ścieżce procesu s nukleosyntezy (rys. 4), a szybkość jego wytwarzania w reakcji wychwytu radiacyjnego neutronów zależy od temperatury panującej w gwieździe [6].

## Implikacje astrofizyczne

Warto przypomnieć, że blisko połowa pierwiastków cięższych od żelaza powstaje we wnętrzach gwiazd w procesie s, a druga połowa wytwarzana jest w procesie r. Procesy powolny s i szybki r można odnieść do szybkości rozpadu  $\beta^-$  jądra w porównaniu z szybkością wychwytu neutronu przez dane jądro. Proces s związany jest z powolną fazą ewolucji gwiazdy i przebiega w pobliżu ścieżki stabilności  $\beta$ , podczas gdy proces r występuje podczas wybuchu gwiazdy, np. supernowej, i doprowadza do powstania jąder silnie oddalonych od ścieżki stabilności. Zwykle rozpad  $\beta^-$  niestabilnych jąder występujących na drodze procesu s jest znacznie szybszy od wychwytu neutronu. Jednak, gdy na drodze odpowiadającej temu procesowi znajdzie się niestabilny izotop, którego czas połowicznego zaniku jest porównywalny ze średnim czasem potrzebnym dla wychwytu neutronu w gwieździe (rzędu

jednego roku), to w takim przypadku wystąpi konkurencja między wychwytem neutronu a rozpadem  $\beta$ . Prowadzi to do rozgałęzienia się ścieżki procesu s.

Niezwykle ważnym powodem precyzyjnego wyznaczania przekroju czynnego na radiacyjny wychwyt neutronu dla izotopu w punkcie rozgałęzienia przebiegu procesu s nukleosyntezy jest fakt, że za wynikające rozpowszechnienie kolejnych izotopów na ścieżce stabilności  $\beta$  odpowiadają warunki fizyczne panujące w gwieździe w czasie przebiegu tego procesu. Odnosi się to głównie do wielkości strumienia neutronów. Występują jednak takie jądra – punkty rozgałęzienia, których wytwarzanie silnie zależy od temperatury, ciśnienia, a nawet prądów konwekcyjnych wewnątrz gwiazdy. Tego rodzaju informacja jest niezwykle potrzebna do testowania modeli gwiazd typu AGB, w których zachodzi proces s. Takim ważnym punktem rozgałęzienia jest jądro  $^{151}\text{Sm}$ , regulujące strumień reakcji w kierunku izotopu  $^{152}\text{Gd}$ , uważanego dotąd za wyłączny produkt procesu s.

Rys. 4. Przebieg procesu s w obszarze o liczbie masowej  $A \approx 150$ 

Uzyskana wartość gwiazdowego przekroju czynnego (maxwellowsko uśrednionego przekroju czynnego), będącego splotem przekroju różniczkowego i maxwellowskiego rozkładu gęstości neutronów przy danej temperaturze,  $\langle\sigma(n,\gamma)\rangle = 3100 \pm 160$  mb, jest od 10 do 100% wyższa od otrzymanych wcześniej oszacowań teoretycznych [8]. Ten po raz pierwszy doświadczalnie wyznaczony przekrój czynny pozwala wyciągnąć następujące wnioski dotyczące przebiegu procesu s nukleosyntezy w gwiazdach AGB: 1) klasyczny model procesu s nie daje spójnych wyników dla rozgałęzienia w  $^{151}\text{Sm}$  i  $^{147}\text{Pm}$ , 2) wkład procesu p nukleosyntezy w wytworzenie izotopu  $^{152}\text{Gd}$  można ocenić na poziomie do 30% jego rozpowszechnienia obserwowanego w układzie słonecznym. Należy wyjaśnić, że procesowi p przypisuje się wytworzenie trzydziestu dwóch protonowo nadmiarowych stabilnych izotopów pozostających poza ścieżką stabilności  $\beta$ . Izotopy te nie mogą powstać ani w procesie s, ani w procesie r. Astrofizyczne miejsce występowania tego procesu jest w dalszym ciągu przedmiotem dyskusji. Żaden z przedstawionych dotąd modeli procesu p nie jest w stanie wytłumaczyć obserwowanego

rozpowszechnienia wspomnianych trzydziestu dwóch izotopów.

Ponadto, analiza rozdzielonych rezonansów neutronowych w zakresie energii 0,6–1000 eV obserwowanych w reakcji  $^{151}\text{Sm}(n,\gamma)$  pozwoliła określić takie ich parametry jak: średnia odległość między rezonansami  $\langle D \rangle$ , neutronowa funkcja nasilenia  $S_0$  i uśredniony przekrój czynny. Te parametry stanów wzbudzonych jądra  $^{152}\text{Sm}$  są ważne zarówno z punktu widzenia technologii jądrowych ( $^{151}\text{Sm}$  powstaje obficie podczas pracy reaktora), jak również ze względu na wagę informacji o strukturze jądrowej w rejonie między sferycznym jądrem magicznym  $^{144}\text{Sm}$  a zdeformowanym jądrem  $^{154}\text{Sm}$ .

Ważnymi wynikami mającymi także swoje implikacje astrofizyczne było dokładniejsze niż dotychczas wyznaczenie przekroju czynnego na wychwyt radiacyjny neutronów przez jądra  $^{186}\text{Os}$  i  $^{187}\text{Os}$ . Wyjaśniając celowość tych pomiarów, należy przypomnieć, że izotop  $^{187}\text{Re}$  ( $T_{1/2} = 42,4 \cdot 10^9$  lat) stanowi istotny kosmiczny chronometr. Astrofizycy zakładają, że izotop ten powstał we względnie krótkim czasie ewolucji masywnych gwiazd w okresie formowania się galaktyki, wyłącznie w procesie r podczas wybuchów tych gwiazd. Wchodząc następnie w skład kolejnego pokolenia mniejszych, nowych gwiazd i układów planetarnych, jądra  $^{187}\text{Re}$  ulegały powolnemu rozpadowi  $\beta^-$ , tworząc nuklidy  $^{187}\text{Os}$ . Z kolei jądra  $^{187}\text{Os}$  i  $^{186}\text{Os}$  mogły powstawać we wnętrzu gwiazd wyłącznie w procesie s. Zatem, w wyniku dokładnego wyznaczenia przekrojów czynnych na reakcje  $^{186}\text{Os}(n,\gamma)$  i  $^{187}\text{Os}(n,\gamma)$  można określić udział procesu s w rozpowszechnieniu jąder  $^{187}\text{Os}$ , a tym samym dodatkowy wkład rozpadu  $\beta^-$  jąder  $^{187}\text{Re}$  w obserwowanym rozpowszechnieniu izotopu  $^{187}\text{Os}$ . Na tej podstawie można określić czas, jaki upłynął od powstania galaktyki. Oczywiście jest to jedynie ogólne przedstawienie sposobu dochodzenia do tej wielkości. Problemy, jakie należy dodatkowo rozwiązać, aby określić kosmiczny upływ czasu, który dla wskazanej metody jądrowej daje spójny wynik z wartością czasu określoną dwiema innymi astronomicznymi metodami, przedstawione są szczegółowo w pracy [16].

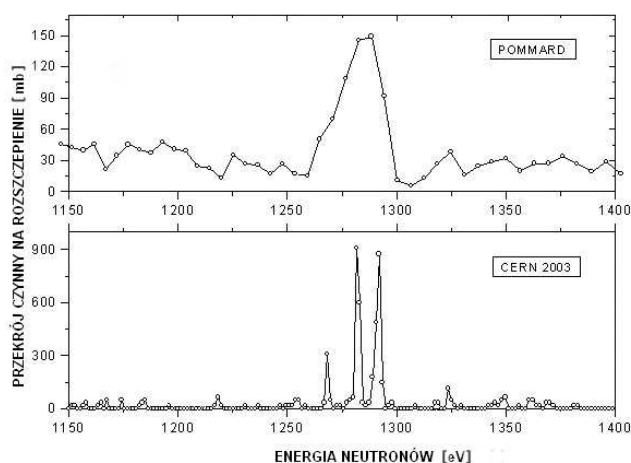
Serię eksperymentów poświęcono wyznaczeniu przekroju czynnego na rozszczepienie aktynowców i izotopów uranu, wymienionych w tab. 1. W badaniach rozszczepienia wywołanego przez neutrony użyto dwóch rodzajów detektorów: Szybkiej Komory Jonizacyjnej (SKJ) i Liczników Lawinowych z Płasko Równoległymi elektrodami (LEPR).

Charakterystycznym przykładem wysokiej precyzji w badaniach rozszczepienia, prowadzonych przez Współpracę n-TOF, jest wynik badania reakcji  $^{236}\text{U}(n,f)$  uzyskany za pomocą detektora SKJ. Osiągnięta w tym pomiarze rozdzielczość energetyczna dla neutronów znacznie przewyższa rozdzielczość uzyskaną podczas podziemnego wybuchu jądrowego w Pommard [22]. Obrazuje to rys. 5, na którym widać trzy rozdzielone rezonanse neutronowe w pomiarach n-TOF, oraz jedno szerokie maksimum w miejscu występowania tych rezonansów, otrzymane w „wybuchowym” eksperymencie.

## Wychwyt radiacyjny toru i aktynowców

Z punktu widzenia przyszłego wykorzystania paliwa torowego, duże znaczenie miało badanie reakcji  $^{232}\text{Th}(n,\gamma)$ . Jak wcześniej podkreślono, zastosowanie w reaktorze cyklu paliwowego opartego na  $^{232}\text{Th}$  istotnie ograniczy produkcję odpadów jądrowych. Jądra  $^{232}\text{Th}$  nie ulegają rozszczepieniu w energetycznym reaktorze jądrowym, jednak w wyniku radiacyjnego wychwytu neutronu przez jądro  $^{232}\text{Th}$  i następujących po nim dwóch rozpadów  $\beta^-$  tworzy się rozszczepialny izotop uranu  $^{233}\text{U}$ . Zatem, wytwarzanie ciężkich aktynowców, takich jak ameryk czy kiur, jest silnie ograniczone ze względu na znacznie większą liczbę masową i atomową, jaką mają izotopy tych pierwiastków.

Zmierzona wartość przekroju czynnego reakcji  $^{232}\text{Th}(n,\gamma)$  w przedziale energii neutronów 5–15 keV wykazuje rozbieżność w stosunku do wcześniej publikowanych wyników sięgającą 30%. Ta duża różnica dotycząca prawdopodobieństwa wychwytu neutronów przez najważniejszy nuklid przyszłego paliwa jądrowego wskazuje na potrzebę potwierdzenia nowego wyniku.



Rys. 5. Porównanie dwóch pomiarów przekroju czynnego na rozszczepienie  $^{236}\text{U}$ , z wyraźnie widocznymi rezonansami neutronowymi na dolnym wykresie

Pomiary reakcji wychwytu radiacyjnego na jądrach aktynowców wykonano z użyciem tarcz zawierających niewielkie ilości silnie wzbogaconego izotopu. Jednak nawet te niewielkie próbki wykazywały dużą aktywność, będącą głównym eksperymentalnym problemem oraz istotną barierą w pokonaniu ograniczeń z zakresu ochrony radiologicznej. Tarcze zawierające izotopy:  $^{237}\text{Np}$  ( $m = 43,3$  mg,  $A = 1,29$  MBq),  $^{240}\text{Pu}$  ( $m = 51,2$  mg,  $A = 458$  MBq) i  $^{243}\text{Am}$  ( $m = 10$  mg,  $A = 75$  MBq), gdzie  $m$  oznacza masę próbki,  $A$  – aktywność izotopu, były przygotowane w ten sposób, że materiał promieniotwórczy znajdował się w folii aluminiowej, a całość zamknięto wewnątrz pojemnika z tytanu o grubości ścianki 0,35 mm, zgodnie z certyfikatem ISO 2919, określonym przez przepisy bezpie-

czeństwa obowiązujące w CERN-ie. Czystość izotopowa wszystkich wymienionych próbek, określona za pomocą spektroskopii  $\gamma$ , przekraczała 98%. Pomiary wykonano za pomocą Kalorymetru Całkowitej Absorpcji (KAC) [24] składającego się z czterdziestu scyntylacyjnych kryształów  $\text{BaF}_2$  o prawie stuprocentowej efektywności detekcji fotonów  $\gamma$ . Wiele szczegółów dotyczących omawianych pomiarów i ich wyników zainteresowany czytelnik może znaleźć w opublikowanych dotychczas pracach [2–21].

Ta dobrze zorganizowana i efektywnie działająca współpraca rozpoczyna właśnie kolejny etap aktywności, testując zmodernizowaną tarczę z ołowiu naświetlaną wiązką protonów oraz przygotowując kolejne eksperymenty. Podobnie jak w pierwszej fazie badań, eksperymenty będą nakierowane na potrzeby technologii jądrowych, astrofizyki jądrowej i badań podstawowych z zakresu fizyki jądrowej. We wszystkich trzech obszarach głównym zadaniem jest precyzyjne wyznaczenie przekrojów czynnych na wychwyt radiacyjny neutronów, rozszczepienie oraz reakcje zachodzące z emisją cząstek naładowanych, a wywoływane neutronami. W większości przypadków będą użyte tarcze zawierające próbki promieniotwórcze i małe ilości rzadkich izotopów. Planowana jest istotna poprawa warunków prowadzenia eksperymentów polegająca na lepszym przygotowaniu próbek, zwiększeniu efektywności detektorów, obniżeniu tła  $\gamma$ , modernizacji systemu akwizycji danych pomiarowych. Kolektywny wysiłek włożony w te działania zaowocuje zapewne nowymi, wartościowymi wynikami.

Obecnie współpraca obejmuje 119 osób z 15 krajów. Wśród nich jest naturalnie jej inicjator Carlo Rubbia.

Z Polski biorą w niej udział dwie osoby: Justyna Marganiec i autor tego artykułu, oboje z Uniwersytetu Łódzkiego. Wkrótce dołączy do nich Jarosław Perkowski, także z tego Uniwersytetu.

## Literatura

- [1] C. Borcea i in., *Nucl. Instr. Meth. A* **513**, 524 (2003).
- [2] G. Lorusso i in., *Nucl. Instr. Meth. A* **532**, 622 (2004).
- [3] U. Abbondanno i in., *Nucl. Instr. Meth. A* **538**, 692 (2005).
- [4] U. Abbondanno i in., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 161103 (2004).
- [5] U. Abbondanno i in., *Nuclear Physics A* **758**, 501c (2005).
- [6] S. Marrone i in., *Nucl. Phys. A* **758**, 533c (2005).
- [7] G. Tagliente i in., *Nucl. Phys. A* **758**, 573c (2005).
- [8] S. Marrone i in., *Phys. Rev. C* **73**, 034604 (2006).
- [9] G. Aerts i in., *Phys. Rev. C* **73**, 054610 (2006).
- [10] C. Domingo-Pardo i in., *Phys. Rev. C* **74**, 025807 (2006).
- [11] P.F. Mastinu i in., *J. Phys.: Conference Series* **41**, 352 (2006).
- [12] C. Domingo-Pardo i in., *Phys. Rev. C* **74**, 055802 (2006).
- [13] C. Domingo-Pardo i in., *Phys. Rev. C* **75**, 015806 (2007).
- [14] R. Terlizzi i in., *Phys. Rev. C* **75**, 035807 (2007).
- [15] C. Domingo-Pardo i in., *Phys. Rev. C* **76**, 045805 (2007).
- [16] M. Masconi i in., *Prog. Part. Nucl. Phys.* **59**, 165 (2007).
- [17] F. Gusing i in., *Nucl. Instr. Meth. B* **261**, 925 (2007).
- [18] G. Tagliente i in., *Phys. Rev. C* **77**, 035802 (2008).
- [19] M. Mosconi i in., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **35**, 014015 (2008).
- [20] C. Domingo-Pardo i in., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **35**, 014020 (2008).
- [21] G. Tagliente i in., *Phys. Rev. C* **78**, 045804 (2008).
- [22] W.K. Brown i in., *Nucl. Phys. A* **156**, 609 (1970).
- [23] G. Aerts i in., *AIP Conf. Proc.* **769**, 1470 (2005).
- [24] M. Heil i in., *Nucl. Instr. Meth. A* **459**, 229 (2001).



Dr hab. JÓZEF ANDRZEJEWSKI jest profesorem na Uniwersytecie Łódzkim, gdzie pełni funkcję kierownika Zakładu Fizyki Jądrowej. Zajmuje się badaniami reakcji jądrowych wywoływanych przez neutrony, jak również spektroskopią elektronów konwersji wewnętrznej.

# Geneza, rozwój i przyszłość spintroniki\*

Albert Fert

*Unité Mixte de Physique CNRS/Thales, Palaiseau oraz Université Paris-Sud, Orsay, Francja*

---

## The origin, development and future of spintronics

---

*Nobel Lecture, 8 December 2007, Stockholm*

Elektron ma ładunek elektryczny i spin, jednakże do niedawna wielkości te rozpatrywane były oddzielnie. W konwencjonalnej elektronice ładunkiem manipuluje się za pomocą pola elektrycznego, natomiast spin jest ignorowany. Inne klasyczne technologie, jak na przykład zapis magnetyczny, wykorzystują spin, ale tylko poprzez jego przejaw makroskopowy, tj. namagnesowanie ferromagnetyka. Obraz ten zaczął się zmieniać w roku 1988, kiedy to odkrycie [1,2] gigantycznego magnetooporu (GMR, ang. Giant Magnetoresistance) w multiwarstwach magnetycznych otworzyło drogę do efektywnego sterowania ruchem elektronów poprzez działanie na ich spin kierunkiem magnetyzacji. Doprowadziło to szybko do rozwoju nowego obszaru badań i technologii, nazywanego dzisiaj spintroniką, która podobnie jak GMR wykorzystuje wpływ spinu elektronu na jego ruchliwość w metalach ferromagnetycznych. W istocie wpływ spinu na ruchliwość elektronów w metalach ferromagnetycznych, zaproponowany pierwotnie przez Motta [3], został stwierdzony doświadczalnie i opisany teoretycznie w mojej pracy doktorskiej ponad dziesięć lat przed odkryciem efektu GMR w 1988 r. Efekt GMR był pierwszym krokiem na drodze do wykorzystania tej zależności w celu sterowania prądem elektrycznym. Jego wykorzystanie w głowicach odczytu w twardych dyskach przyczyniło się znacznie do szybkiego wzrostu gęstości zapisu informacji i do poszerzenia wykorzystania tej technologii w technikach multimedialnych. Rozwój spintroniki ujawnił wiele nowych zjawisk związanych z kontrolą i manipulacją prądem spinowym. Obszar ten rozwija się dzisiaj intensywnie w obiecujących nowych kierunkach, jak na przykład kierunek wykorzystujący zjawiska transferu spinu, spintronika półprzewodnikowa, spintronika molekularna czy też spintronika jednoelektronowa.

### Od zależnego od spinu przewodnictwa ferromagnetyków do gigantycznego magnetooporu

GMR i spintronika biorą swój początek we wcześniejszych badaniach wpływu spinu na przewodnictwo elek-

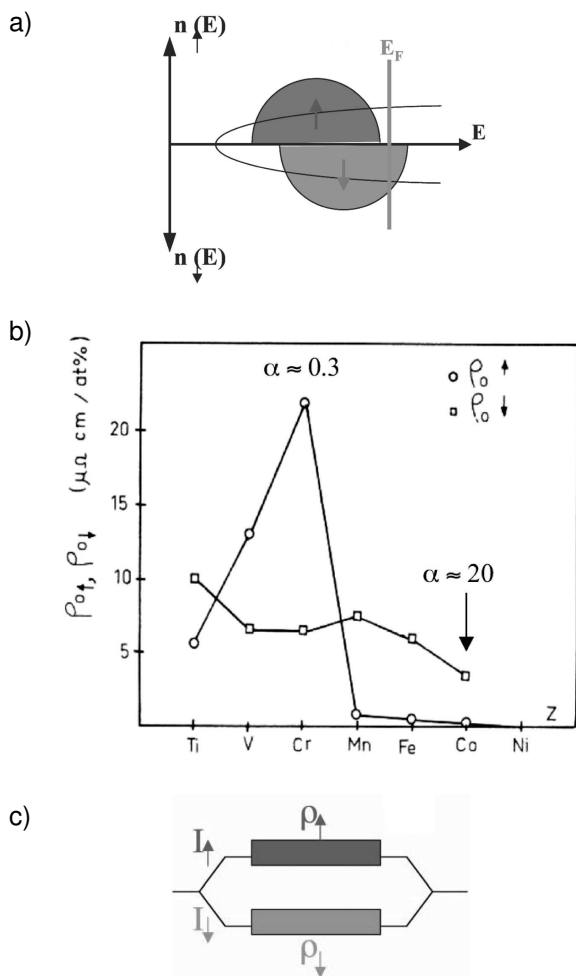
tryczne metali ferromagnetycznych [3–5]. Zjawisko zależnego od spinu przewodnictwa można wytłumaczyć typową strukturą pasmową metali ferromagnetycznych, pokazaną na rys. 1a. Rozszczepienie między energiami elektronów o spinie „większościowym” i „mniejszościowym” („spin w górę” i „spin w dół” według zwykłej notacji) powoduje, że odpowiedzialne za prąd elektryczny elektrony na poziomie Fermiego znajdują się w różnych stanach dla przeciwnych orientacji spinu i wykazują różne własności przewodzące. Już w 1936 r. Mott [3] dla wyjaśnienia pewnych cech oporu metali ferromagnetycznych w temperaturze Curie postulował przewodnictwo zależne od spinu. Jednakże w 1966 r., kiedy rozpocząłem pracę doktorską, temat ten był w dalszym ciągu mało zbadany. Mój promotor, Ian Campbell, zaproponował mi doświadczalne zbadanie tego problemu w stopach niklu i żelaza, przez co miałem przywilej być jednym z pierwszych, którzy badali te zagadnienia. Udało mi się potwierdzić, że ruchliwość elektronów jest zależna od spinu; w szczególności wykazałem, że opory dwóch kanałów spinowych w metalach domieszkowanych atomami charakteryzującymi się silną spinową zależnością przekroju czynnego na rozpraszanie mogą się znacznie różnić [4]. Na rysunku 1b pokazuję przykładowe opory dla spinu w górę („spiny większościowe”) i spinu w dół („spiny mniejszościowe”) niklu domieszkowanego 1% atomów innego typu. Można zauważyć, że stosunek  $\alpha$  oporu dla kanału „spin w dół” do oporu dla kanału „spin w górę” może wynosić nawet 20 dla domieszkowanych atomów Co, a mniejszy od jedności może być dla domieszek Cr i V, zgodnie z teoretycznym modelem struktury elektronowej tych domieszek opracowanym przez Jacquesa Friedela. Dwukanałowe przewodnictwo zostało szybko potwierdzone przez inne grupy, na przykład zostało rozszerzone na stopy Co przez Loegela i Gautiera [5] w Strasburgu.

W swojej pracy doktorskiej opracowałem również tzw. model dwóch prądów [4] do opisu przewodnictwa metali ferromagnetycznych. Model ten oparty jest na ob-  
razie dwóch prądów; jeden dla elektronów w kanale „spin

---

\*Wykład noblowski, wygłoszony 8 grudnia 2007 r. w Sztokholmie, został przetłumaczony za zgodą Fundacji Nobla. [Translated with permission. Copyright © 2007 by the Nobel Foundation]



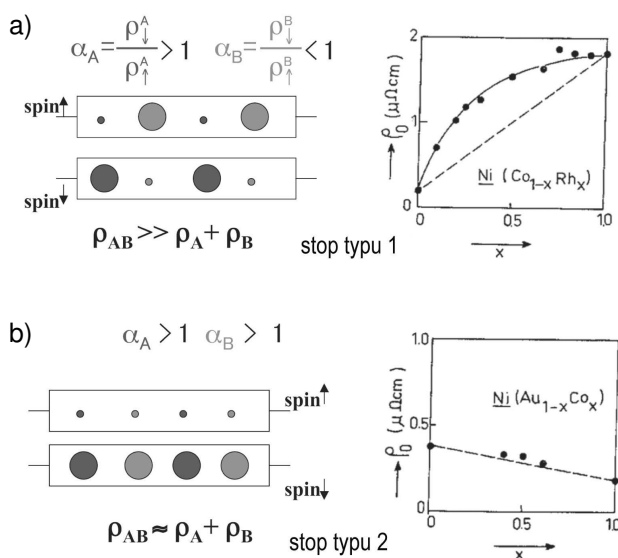


Rys. 1. Podstawy spintroniki. a) Schemat struktury pasmowej metalu ferromagnetycznego pokazujący spinowe rozszczepienie pasma. b) Opory właściwe kanałów przewodnictwa „spin w górę” i „spin w dół” dla niklu domieszkowanego 1% różnego typu atomów (pomiar w 4,2 K) [4]. Stosunek  $\alpha$  oporów właściwych  $\rho_{0\downarrow}$  i  $\rho_{0\uparrow}$  dla kanałów spin- $\downarrow$  i spin- $\uparrow$  może sięgać nawet 20 (domieszki Co), albo może być mniejszy od jedności (domieszki Cr lub V). c) Schemat zależności oporu od spinu przewodzenia dwoma niezależnymi kanałami spinowymi (spin- $\downarrow$  i spin- $\uparrow$ ) w granicy zaniedbywalnego mieszania kanałów ( $\rho_{\uparrow\downarrow} = 0$  w ramach formalizmu przedstawionego w pracy [4]).

w górę”, drugi dla elektronów w kanale „spin w dół”, sprzężonych procesami oddziaływania między kanałami poprzez wymianę pędu. Oddziaływanie to pochodzi od procesów rozpraszania z odwróceniem spinu (procesy spin-flip), głównie w wyniku rozpraszania elektronów na falach spinowych, które rośnie z temperaturą i przywraca równowagę między prądami w kanałach „spin w górę” i „spin w dół” powyżej temperatury pokojowej w większości metali ferromagnetycznych. Model dwuprądowy jest dzisiaj podstawą elektroniki spinowej, ale interpretacja zja-

wisk spinowych leżących u podstaw elektroniki spinowej oparta jest na ogół na uproszczonej wersji modelu, zaniebującą mieszanie prądów i zakładającą, że przewodzenie odbywa się w dwóch nieoddziałujących kanałach połączonych równolegle, jak pokazano na rys. 1c. Celowe byłoby ponowne rozważenie interpretacji wielu niedawnych doświadczeń z uwzględnieniem przyczynków pochodzących od procesów mieszania prądów (nie należy mylić mechanizmu mieszania prądów z mechanizmem relaksacji akumulacji spinowej w wyniku procesów spin-flip innego typu<sup>1</sup>).

W oparciu o niektóre wyniki eksperymentalne z mojej pracy doktorskiej dotyczące metali domieszkowanych dwoma rodzajami domieszek [4] faktycznie można było przewidzieć efekt GMR. Zilustrowano to na rys. 2. Załóżmy na przykład, że nikiel jest domieszkowany atomami Co, które rozpraszają silnie elektrony w kanale „spin w dół” i atomami Rh, które rozpraszają silnie elektrony w kanale „spin w górę”. W potrójnych stopach Ni(Co+Rh), nazwijmy je typu 1, elektrony w obydwu kanałach są silnie rozpraszane albo przez domieszki Co, albo Rh, tak że opór jest zwiększony. Przeciwnie, w stopach typu 2 z domiesz-



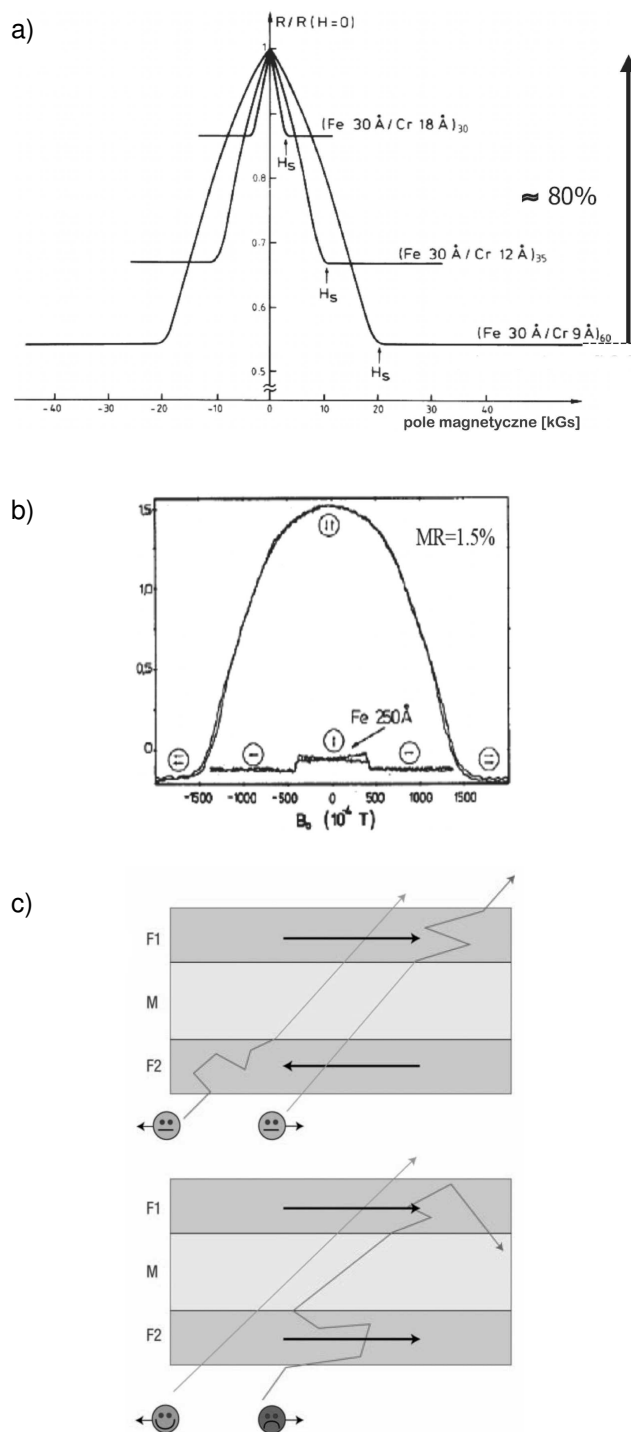
Rys. 2. Doświadczenie dla potrójnych stopów, oparte na tej samej koncepcji co GMR [4]. a) Schemat spinowego zależnego przewodnictwa w stopach z domieszkami o przeciwnej spinowej asymetrii rozpraszania ( $\alpha_A = \rho_{A\downarrow}/\rho_{A\uparrow} > 1$ ,  $\alpha_B = \rho_{B\downarrow}/\rho_{B\uparrow} < 1$ , co prowadzi do  $\rho_{AB} > \rho_A + \rho_B$ ) i wyniki doświadczalne dla stopów Ni(Co<sub>1-x</sub>Rh<sub>x</sub>). b) To samo dla stopów z domieszkami o podobnej spinowej asymetrii rozpraszania ( $\alpha_A = \rho_{A\downarrow}/\rho_{A\uparrow} > 1$ ,  $\alpha_B = \rho_{B\downarrow}/\rho_{B\uparrow} > 1$ , co prowadzi do  $\rho_{AB} = \rho_A + \rho_B$ ) i wyniki doświadczalne dla stopów Ni(Au<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>). W przypadku GMR domieszki A i B zastąpione są multiwarstwami, przy czym sytuacja w części a odpowiada konfiguracji antyrównoległej (a w części b – równoległej) magnetyzacji sąsiednich warstw magnetycznych.

<sup>1</sup>Wkład procesów spin-flip do mieszania prądów, tj. wymiany momentu pędu między kanałami, zachodzi głównie przez rozpraszanie na magnonach, a ich wkład do relaksacji akumulacji spinowej polega zwłaszcza na relaksacji spin-sieć w wyniku oddziaływania spinowo-orbitalnego.

kami np. Co i Au rozpraszającymi silnie elektrony z tego samego kanału, przy czym drugi kanał jest otwarty, nie ma takiego wzrostu oporu. Idea GMR polega na zastąpieniu domieszek A i B w potrójnych stopach przez warstwy A i B w multiwarstwach. Antyrównoległa konfiguracja magnetyczna warstw A i B odpowiada sytuacji stopu 1, natomiast konfiguracja równoległa odpowiada przypadkowi stopu 2. Daje to możliwość przełączania między stanami o dużym i małym oporze przez zmianę względnej orientacji magnetyzacji warstw A i B z antyrównoległej na równoległą. Z równań transportu wynika jednak, że elektrony mogą „widzieć” względną orientację warstw A i B tylko wtedy, gdy ich odległość jest mniejsza niż średnia droga swobodna, czyli praktycznie nie większa niż kilka nanometrów. Niestety, w latach siedemdziesiątych nie było technologicznych możliwości wytwarzania multiwarstw o grubościach poszczególnych warstw rzędu kilku nanometrów. Dlatego też odłożyłem niektóre swoje pomysły na później i w swoim zespole w Laboratorium Fizyki Ciała Stałego Uniwersytetu Paris-Sud od początku lat siedemdziesiątych do roku 1985 zajmowałem się innymi zagadnieniami, m.in. nadzwyczajnym i spinowym efektem Halla oraz magnetyzmem szkieł spinowych i układów amorficznych.

W połowie lat osiemdziesiątych dzięki rozwojowi takich technik, jak epitaksja z wiązek molekularnych, można było wytwarzać multiwarstwy złożone z bardzo cienkich indywidualnych warstw, dlatego mogłem pomyśleć o rozszerzeniu moich doświadczeń z potrójnymi stopami na układy multiwarstwowe. Ponadto, w 1986 r. zobaczyłem piękny eksperyment z rozpraszaniem Brillouina wykonany przez Petera Grünberga i współpracowników [6], którzy wykazali istnienie antyferromagnetycznego sprzężenia wymiennego w multiwarstwach Fe/Cr. Układ Fe/Cr okazał się układem multiwarstwowym, w którym możliwe było przełączanie względnej orientacji namagnesowania w sąsiednich warstwach magnetycznych z antyrównoległej na równoległą za pomocą pola magnetycznego. We współpracy z grupą Alaina Friedericha z Thomson-CSF rozpocząłem wytwarzanie i badanie multiwarstw Fe/Cr. Ekspertem od MBE w Thomsonie był Patrick Etienne, a w projekcie zaangażowani byli też trzej moi doktoranci: najpierw Frédéric Nguyen Van Dau, a później Agnès Barthélémy i Frédéric Petroff. Doprowadziło nas to w 1988 r. do odkrycia [1] bardzo dużego efektu magnetooporowego, który nazwaliśmy GMR (rys. 3a). Efekt tego samego typu w trójwarstwach Fe/Cr/Fe został otrzymany praktycznie w tym samym czasie przez Petera Grünberga w Jülich [2] (rys. 3b). Interpretacja efektu jest podobna do tej opisanej wyżej dla potrójnych stopów i jest zilustrowana na rys. 3c. Pierwszy kwaziklasyczny model efektu GMR został opublikowany w 1989 r. przez Camleya i Barnasia [7], natomiast ja pracowałem w 1991 r. z Levym i Zhangiem nad pierwszym modelem kwantowym [8].

Często jestem pytany, czy spodziewałem się tak dużego efektu magnetooporowego. Moja odpowiedź jest: tak i nie – z jednej strony można było oczekiwać dużego magnetooporu z ekstrapolacji moich poprzednich wyników dotyczących potrójnych stopów, z drugiej strony można się



Rys. 3. Pierwsze obserwacje gigantycznego magnetooporu. a) Multiwarstwy Fe/Cr(001) [1] (przy aktualnej definicji magnetooporu,  $MR = 100(R_{AP} - R_P)/R_P$ ,  $MR = 80\%$  dla multiwarstw (Fe 3 nm/Cr 0,9 nm)). b) Trójwarstwy Fe/Cr/Fe [2]. c) Schemat mechanizmu efektu GMR. W równoległej konfiguracji magnetycznej (część dolna) elektrony o jednej orientacji spinu mogą łatwo przechodzić przez wszystkie warstwy magnetyczne i „zwarć” przez ten kanał spinowy prowadzi do małego oporu elektrycznego. W konfiguracji antyrównoległej (górna część) elektrony w każdym kanale spinowym są spowalniane w co drugiej warstwie magnetycznej i opór elektryczny jest duży (rysunek z pracy [17]).

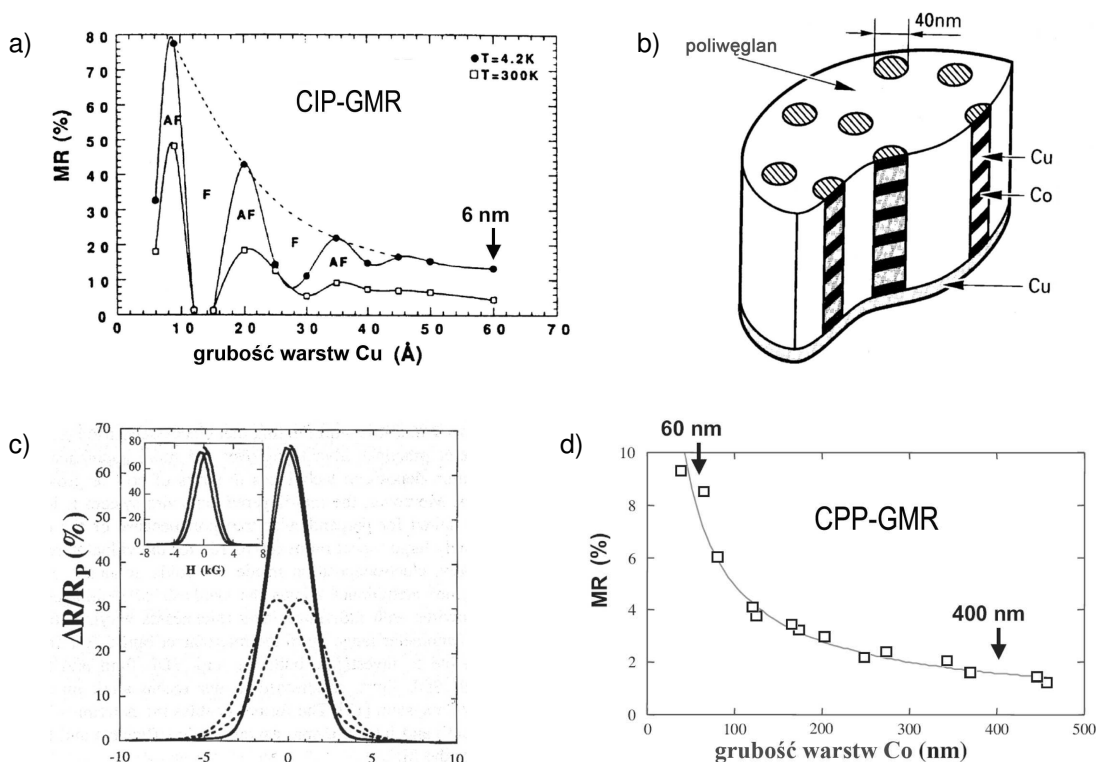
było obawiać, że nieuniknione defekty strukturalne w multiwarstwach, na przykład niejednorodność granic międzywarstwowych, może wprowadzić rozpraszanie niezależne od spinu, kompensujące zależne od spinu rozpraszanie wewnątrz warstw magnetycznych. Na szczęście okazało się, że rozpraszanie na niejednorodnościach granic jest również zależne od spinu i odpowiedni wkład dodaje się do objętościowego (wkłady objętościowy i od granic międzywarstwowych mogą być wyznaczone z doświadczeń CPP-GMR).

## Złoty wiek efektu GMR

Odkrycie efektu GMR szybko wzbudziło duże zainteresowanie z fundamentalnego punktu widzenia, a także ze względu na możliwości jego zastosowań; dlatego badania multiwarstw magnetycznych i efektu GMR stały się jednym z kluczowych kierunków. W moim zespole, wzmocnionym po zatrudnieniu Agnès Barthélémy i Frédéric Pettoffa, jak również w wąskim, ale szybko rosnącym środowisku naukowym zajmującym się tą tematyką, mieliśmy wrażenie badania nieznanego obszaru pełnego różnych niespodzianek. Od strony doświadczalnej, dwa ważne wyniki zostały opublikowane w 1990 r. Parkin i inni wykazali [9], że efekt GMR istnieje również w układach otrzymanych prostszą i szybszą techniką naparowania (Fe/Cr,

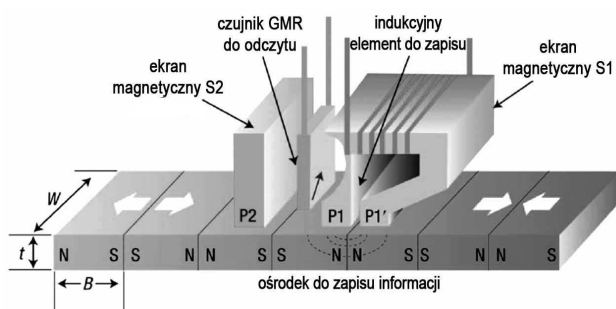
Co/Ru i Co/Cr) i stwierdzili periodyczność efektu GMR w wyniku oscylacji międzywarstwowego oddziaływania wymiennego w funkcji grubości warstw niemagnetycznych. Również w 1990 r. Shinjo i Yamamoto [10], jak również Dupas i inni [11] pokazali, że efekt GMR może występować w wielowarstwach bez antyferromagnetycznego sprzężenia wymiennego, ale złożonych z warstw magnetycznych o różnym polu koercji.

Innym ważnym wynikiem było otrzymanie w 1991 r. dużego oscylacyjnego efektu GMR w Co/Cu, który stał się typowym układem do badania efektu GMR (rys. 4a). Pierwsze obserwacje [12] zostały uzyskane w mojej grupie przez mojego doktoranta Dante Mosca na multiwarstwach wykonanych metodą naparowania na Uniwersytecie Stanowym w Michigan i prawie w tym samym czasie przez Stuarta Parkina z IBM [13]. Również w 1991 r. Dieny i inni [14] zaobserwowali efekt GMR w zaworach spinowych, tj. trójwarstwowych strukturach opartych na koncepcji Petera Grünberga [15], w których magnetyzacja jednej z warstw magnetycznych jest „przyszpilona” (w wyniku oddziaływania) do warstwy antyferromagnetycznej, natomiast magnetyzacja drugiej warstwy jest swobodna. Magnetyzacja warstwy swobodnej może być odwrócona bardzo słabym polem magnetycznym; ta koncepcja jest dzisiaj wykorzystywana w większości praktycznych zastosowań.



Rys. 4. a) Zależność wielkości GMR w warstwach Co/Cu [12] od grubości warstw Cu dla prądu płynącego w płaszczyźnie warstwy (CIP). Charakterystyczną długością jest tu średnia droga swobodna (krótka). b) Struktura wielowarstwowych nanodrutów wykorzystanych do pomiarów CPP-GMR [20]. c) Krzywe CPP-GMR dla nanodrutów (permaloj 12 nm/miedź 4 nm) (linia ciągła) i (kobalt 10 nm/miedź 5 nm) (linia kropkowana) [20] (wstawka: krzywe dla układu permaloj/miedź w temperaturze 4,2 K). d) Zmiana efektu CPP-GMR nanodrutów Co/Cu w funkcji grubości warstw Co [20]. Charakterystyczną długością jest tu droga dyfuzji spinu (długa).

Rozwój badań wielowarstw magnetycznych i efektu GMR na początku lat siedemdziesiątych jest opisany w wykładzie noblowskim Petera Grünberga, zawierającym w szczególności prezentację różnych elementów opartych na efekcie GMR w zaworach spinowych [16,17]. W głowicach odczytu (rys. 5) w twardych dyskach czujniki oparte na AMR (magnetoopór anizotropowy, ang. Anisotropic Magnetoresistance) zastąpione zostały w 1997 r. przez czujniki oparte na efekcie GMR. Efekt GMR, dostarczając czulej techniki odczytu doprowadził do wzrostu gęstości zapisu informacji o ponad dwa rzędy wielkości (od ok. 1 do ok. 600 Gbit na cal kwadratowy w 2007 r.). Wzrost ten otworzył drogę zarówno do bezprecedensowej pojemności dysków wykorzystywanych do nagrywania obrazów (do 1 terabajta), jak i do ich małych rozmiarów (średnica dysku 0,85 cala) dla zastosowań przenośnych, jak na przykład w bardzo lekkich laptopach czy odtwarzaczach multimedialnych. Czujniki GMR są też wykorzystywane w wielu innych zastosowaniach, głównie w przemyśle samochodowym i technikach biomedycznych [18].



Rys. 5. Głowica GMR w twardych dyskach. Rysunek z pracy Chapperta i in. [17].

## CPP-GMR i akumulacja spinowa

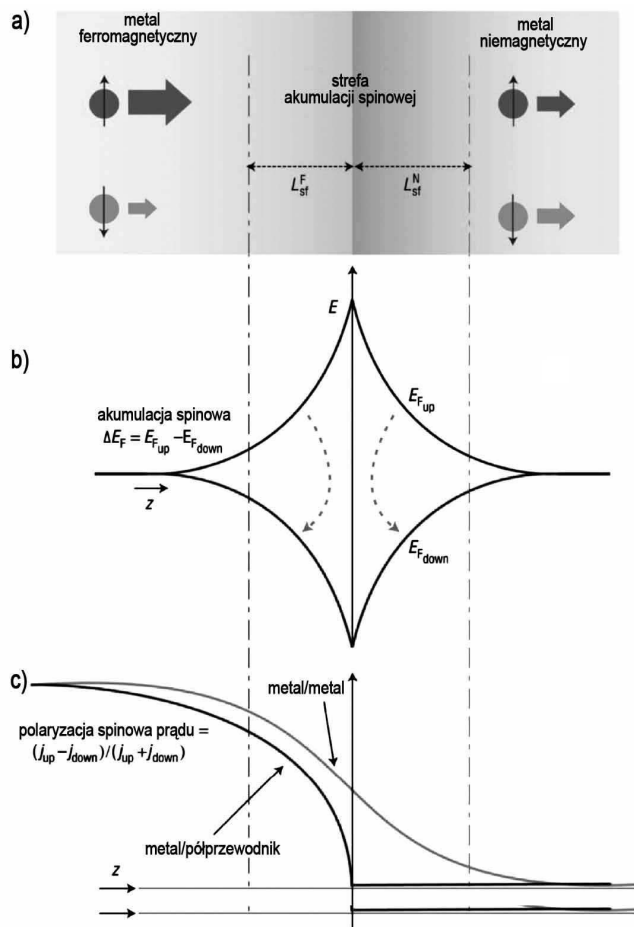
W pierwszych latach badań na efektem GMR, doświadczenia wykonywane były jedynie dla prądu płynącego w płaszczyźnie warstw, w geometrii którą nazywamy CIP (ang. current-in-plane). Dopiero w 1993 r. pojawiły się doświadczenia w geometrii CPP (ang. current-perpendicular-to-plane), tj. doświadczenia dotyczące GMR w przypadku prądu płynącego prostopadle do płaszczyzny warstw. Po raz pierwszy zostało to zrobione przez dołączenie magnetycznej wielowarstwy do nadprzewodzących elektrod przez Bassa, Pratta i Schroedera na Uniwersytecie Stanowym w Michigan [19] i parę lat później w mojej grupie we współpracy z Lukiem Piraux z Uniwersytetu w Louvain przez naniesienie multiwarstwy metodami elektrolitycznymi do nanoporów w membranie poliwęglanowej [20] (rys. 4b–d). Efekt GMR w geometrii CPP jest nie tylko znacznie większy aniżeli w geometrii CIP (CPP-GMR będzie prawdopodobnie wykorzystany w głowicach odczytu w twardych dyskach nowej generacji), ale również występuje w multiwarstwach o relatywnie grubych warstwach składowych, aż do zakresu mikrona [20], jak można zauważyć na rys. 4c–d. W pracy

teoretycznej z Thierry Valetem [21] pokazałem, że dzięki efektowi akumulacji spinowej, występującemu w geometrii CPP, charakterystyczną skalą długości jest droga dyfuzji spinu zamiast znacznie krótszej średniej drogi swobodnej w przypadku geometrii CIP. Geometria CPP-GMR ujawniła efekt akumulacji spinowej, która rządzi propagacją spinowo spolaryzowanego prądu przez sekwencję warstw magnetycznych i niemagnetycznych i odgrywa istotną rolę w aktualnym rozwoju spintroniki. Prąd dyfuzyjny indukowany przez akumulację spinów na granicach warstw magnetycznych i niemagnetycznych jest mechanizmem podtrzymującym spinowo spolaryzowany prąd przy dużych odległościach od granic międzywarstwowych, znacznie poza zakresem balistycznym (tj. znacznie powyżej średniej drogi swobodnej), aż na odległość rzędu drogi dyfuzji spinu (SDL, ang. spin diffusion length). Na przykład, w cząsteczkach węgla droga dyfuzji spinu przekracza zakres mikronów i dzięki temu silnie spinowo spolaryzowany prąd może płynąć przez nanorurki węglowe, jak zobaczymy w części dotyczącej spintroniki molekularnej.

Fizyka akumulacji spinowej, występującej gdy strumień elektronów przechodzi przez granice między materiałem ferromagnetycznym i niemagnetycznym, jest wyjaśniona na rys. 6. Z dala od granicy po stronie magnetycznej prąd jest większy w jednym z kanałów spinowych („spin w górę” na rysunku), podczas gdy z dala od granicy po drugiej stronie jest równo rozłożony w obydwu kanałach. Dla kierunku prądu i polaryzacji spinowej jak na rysunku pojawia się akumulacja elektronów ze spinem w górę wokół granicy (i niedobór elektronów ze spinem w dół dla zachowania obojętności elektrycznej). Inaczej mówiąc, występuje rozszczepienie energii Fermiego (potencjału chemicznego) dla elektronów ze spinem w górę i w dół. Elektrony dyfundują w obie strony od granicy na odległość SDL. Akumulacja spinowa generuje procesy odwrócenia spinu i rozszczepienie stacjonarne występuje, gdy liczba procesów spin-flip osiąga wartość potrzebną do dopasowania strumieni nadchodzących i odchodzących elektronów o spinie w górę i w dół. Podsumowując, istnieje pewna szeroka strefa spinowej akumulacji, która rozciąga się po obu stronach na odległość SDL i w której prąd jest stopniowo depolaryzowany przez procesy spin-flip generowane przez akumulację.

Rysunek 6 odpowiada przypadkowi wstrzykiwania spinu, tj. elektronom płynącym z przewodnika magnetycznego do niemagnetycznego. Dla elektronów poruszających się w przeciwną stronę sytuacja jest podobna, z tą różnicą że akumulacja spinowa o przeciwnym kierunku stopniowo polaryzuje prąd w przewodniku niemagnetycznym. W obydwu przypadkach akumulacja spinowa rozpoczyna się w przewodniku niemagnetycznym na dużych odległościach od granicy. Fizyka tego efektu może być opisana nowymi równaniami transportu [21], w których potencjał elektryczny jest zastąpiony przez zależny od spinu i położenia potencjał elektrochemiczny. Równania te mogą być zastosowane nie tylko do prostego przypadku jednej granicy, ale również do układów z wieloma granicami, z przekrywaniem się akumulacji spinowych na kolejnych

granicach. Mogą być również rozszerzone tak, by uwzględnić zagięcie pasm oraz efekty dużej gęstości prądu [22,23].



Rys. 6. Schematyczne przedstawienie akumulacji spinowej na granicy między metalem ferromagnetycznym i warstwą niemagnetyczną. a) Prądy w kanale „spin w górę” i „spin w dół” z dala od granicy między przewodnikiem magnetycznym i niemagnetycznym (poza obszarem strefy akumulacyjnej). b) Rozszczepienie potencjału chemicznego  $E_{F\uparrow}$  i  $E_{F\downarrow}$  przy granicy. Strzałki symbolizują procesy spin-flip indukowane przez rozszczepienie spinowe w sytuacji nierównowagowej. Procesy spin-flip sterują procesem stopniowej depolaryzacji prądu elektrycznego z lewej strony na prawą. Dla odwrotnego kierunku prądu elektrycznego występuje odwrócenie spinowej akumulacji i procesów spin-flip, co polaryzuje prąd, gdy przepływa on przez strefę akumulacji spinowej. c) Zmiana polaryzacji spinowej prądu, gdy istnieje przybliżona równowaga między procesami spin-flip po obu stronach (metal/metal) oraz gdy procesy spin-flip zachodzą głównie po lewej stronie (metal/półprzewodnik bez zależnego od spinu oporu kontaktowego). Rysunki z pracy [17].

Akumulacja spinowa odgrywa istotną rolę w wielu obszarach spintroniki, na przykład w jednym z bardziej aktywnych obszarów, tj. spintronice półprzewodnikowej. W przypadku wstrzykiwania spinu z metalu ferromagnetycznego do niemagnetycznego półprzewodnika (albo wydzielania spinu dla odwrotnego kierunku prądu), dużo

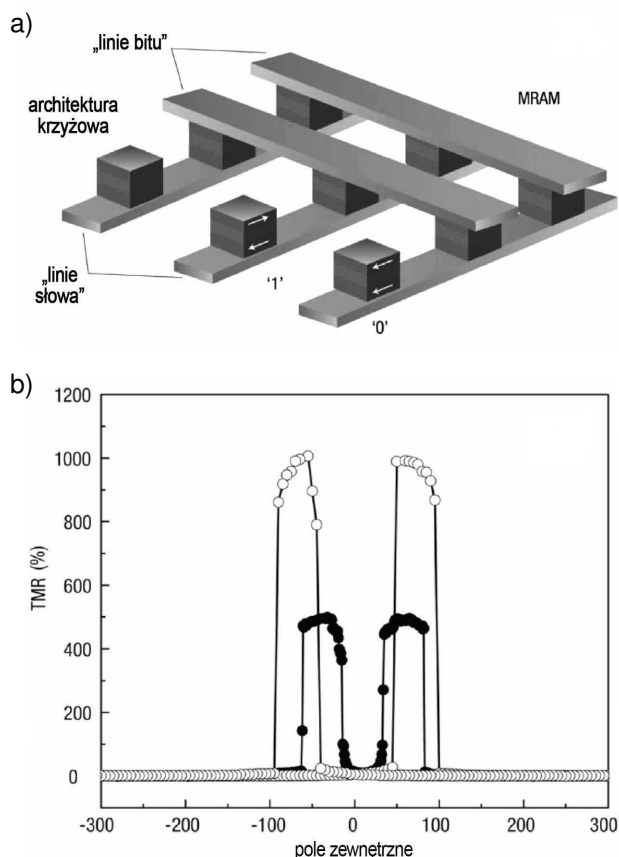
większa gęstość stanów w metalu powoduje, że podobne rozszczepienia po obydwu stronach, jak na rys. 6, prowadzą do dużo większej gęstości akumulacji spinowej i do dużo większej liczby procesów spin-flip po stronie metalu. Depolaryzacja jest przez to szybsza po stronie metalicznej i prąd jest prawie całkowicie zdepolaryzowany, wchodząc do półprzewodnika, jak pokazano na rys. 6c. Problem ten został rozpatrzony wpięrcz przez Schmidta i współpracowników [24]. Do teorii powróciłem z moim współpracownikiem Henri Jaffrèssem i pokazałem, że problem może być rozwiązany przez wprowadzenie zależnego od spinu oporu na granicy, typowego dla złącza tunelowego, który wprowadza na granicy nieciągłość akumulacji spinowej, zwiększa jej udział po stronie półprzewodnikowej i przesuwa depolaryzację ze strony metalicznej do strony półprzewodnikowej (ten sam wniosek pojawia się również w pracach Rashby) [25,26]. Wstrzykiwanie spinu przez barierę tunelową osiągnięto z powodzeniem w wielu eksperymentach, ale opór bariery jest generalnie zbyt duży do efektywnej zamiany informacji spinowej na sygnał elektryczny [23].

## Magnetyczne złącza tunelowe i magnetoopór tunelowy (TMR)

Ważnym etapem w rozwoju spintroniki były badania nad magnetoporem tunelowym (TMR, ang. Tunnel Magnetoresistance) w magnetycznych złączach tunelowych (MTJ, ang. Magnetic Tunnel Junctions). MTJ są złączami tunelowymi z elektrodami ferromagnetycznymi, których opór w równoległej konfiguracji magnetycznej elektrod jest różny od oporu w konfiguracji antyrównoległej. Pierwsze obserwacje efektu TMR, o małych wartościach i w niskich temperaturach, poczynione zostały przez Jullière’a [27] w 1975 r., ale były one trudno powtarzalne i właściwie nie zostały powtórzone przez 20 lat. Dopiero w roku 1995 duży ( $\approx 20\%$ ) i powtarzalny efekt został otrzymany przez grupy Moodery i Miyazakiego dla MTJ z barierą tunelową z amorficznego aluminium [28,29]. Z technologicznego punktu widzenia, zainteresowanie magnetycznymi złączami tunelowymi wynika z prostokątnego kierunku prądu oraz możliwości redukcji rozmiarów złącza do rozmiarów submikronowych dzięki technikom litograficznym. MTJ stanowią podstawę nowej koncepcji magnetycznych pamięci zwanych MRAM (ang. Magnetic Random Access Memory), schematycznie przedstawionej na rys. 7a. Oczekuje się, że pamięci MRAM połączą w sobie krótki czas dostępu półprzewodnikowych pamięci RAM z trwałym charakterem pamięci magnetycznych. W pierwszych MRAM-ach, które ukazały się na rynku w 2006 r., komórki pamięci stanowią MTJ z barierą aluminiową. Pole magnetyczne generowane przez linie „słowa” i „bitu” jest wykorzystywane do przełączania konfiguracji magnetycznej (rys. 7a). Przypuszcza się, że pamięci MRAM nowej generacji, oparte na złączach tunelowych z barierą MgO i z przełączaniem poprzez transfer spinu, będą miały znacznie większy wpływ na technologie komputerowe.

Badania efektu TMR prowadzone były bardzo aktywnie po roku 1995 i najistotniejszym krokiem było



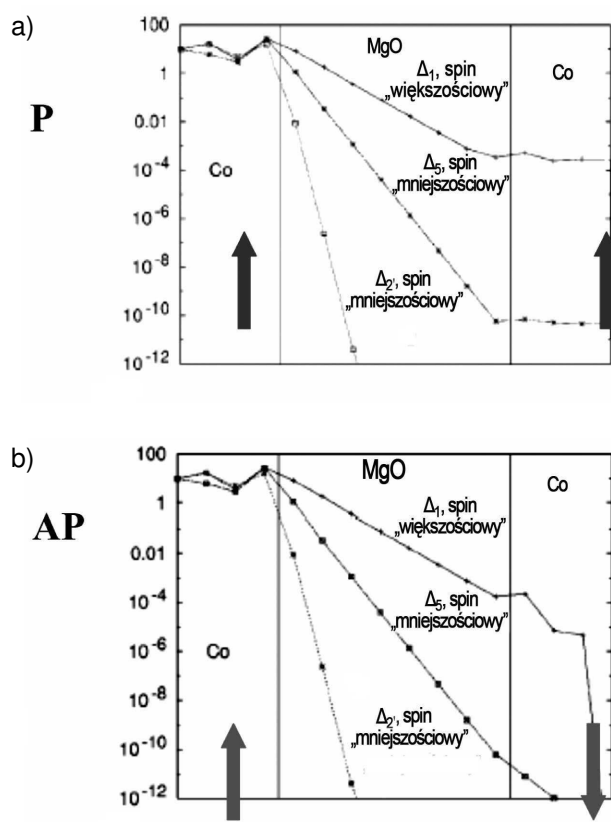


Rys. 7. a) Zasada działania magnetycznych pamięci MRAM w podstawowej „krzyżowej” architekturze. Binarna informacja „0” i „1” jest zapisana w postaci przeciwnych orientacji magnetyzacji warstwy swobodnej magnetycznych złącz tunelowych (MTJ), które są przyłączone w punkcie skrzyżowania do dwóch prostokątnych sieci równoległych linii przewodzących. W celu zapisania informacji impuls elektryczny jest przesyłany przez jedną linię każdej sieci i jedynie na skrzyżowaniu tych dwóch linii wypadkowe pole magnetyczne jest wystarczająco duże, aby odpowiednio zorientować magnetyzację warstwy swobodnej. Celem odczytu informacji mierzy się opór między dwoma liniami łączącymi daną komórkę. Schemat pochodzi z pracy [17]. b) Duży magnetoopór,  $TMR = (R_{max} - R_{min})/R_{min}$ , otrzymany w pracy [33] dla struktury magnetycznej  $(Co_{25}Fe_{75})_{80}B_{20}$  (4 nm)/MgO (2,1 nm)/ $(Co_{25}Fe_{75})_{80}B_{20}$  (4,3 nm) wyżarzanej po naparowaniu w temperaturze 475 °C, zmierzony w temperaturze pokojowej (punkty) i w niskich temperaturach (kółka).

ostatnio przejście od MTJ z barierą amorficzną (aluminium) do złączy krystalicznych, a w szczególności do MTJ z barierą MgO. W laboratorium CNRS/Thales, założonym w 1995 r., badanie TMR było jednym z naszych głównych projektów i we współpracy z grupą hiszpańską otrzymaliśmy jeden z pierwszych wyników [30] dla MTJ z epitaksjalną barierą MgO. Jednakże nasza wartość TMR była tylko nieznacznie większa od wartości TMR znalezionej w złączach z barierą aluminiową i tymi samymi elektrodami. Istotny przełomowy wynik nadszedł w roku 2004 z Tsukuby [31] i IBM [32], gdzie stwierdzono, że bardzo

duży magnetoopór, aż do 200% w temperaturze pokojowej, można otrzymać w złączach tunelowych MgO o doskonałej strukturze krystalicznej. Aktualnie osiągnięto TMR o wartości 600% [33] (rys. 7b). W złączach takich bariera krystaliczna filtruje symetrię funkcji falowej tunelujących elektronów [34–36], tak że TMR zależy od spinowej polaryzacji elektrod dla określonej symetrii.

Duża polaryzacja spinowa otrzymana przez wybór symetrii funkcji falowej elektronów tunelujących przez barierę krystaliczną jest bardzo dobrym przykładem tego co kryje się pod słowem „polaryzacja spinowa” w doświadczeniach spintronicznych. W przypadku pokazanym na rys. 8, wziętym z pracy Zhanga i Butlera [36], widać

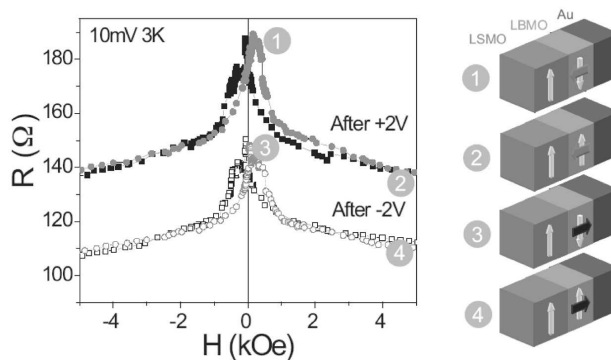


Rys. 8. Fizyka efektu TMR zilustrowana stopniem zaniku funkcji falowych stanów o różnej symetrii w warstwie MgO między dwoma elektrodami kobaltowymi; obliczenia Zhanga i Butlera [36]. Symetria  $\Delta_1$  wolno zanikającego kanału jest dobrze reprezentowana na poziomie Fermiego dla elektronów o spinie większościowym i słabo w paśmie mniejszościowym, tak że dobre połączenie przez tunelowanie między elektrodami istnieje tylko dla konfiguracji równoległej, kiedy to kanał  $\Delta_1$  może być sprzężony do obydwu elektrod (powyżej). W konfiguracji antyrównoległej (poniżej) obydwa kanały spinowe są słabo sprzężone do jednej ze stron. Tłumaczy to dużą wartość TMR w tego typu złączach.

wykładniczo zanikającą gęstość stanów o różnych symetriach,  $\Delta_1$ ,  $\Delta_5$  itd., w barierze MgO(001) między dwoma elektrodami Co. Kluczowym punktem jest to, że przynajmniej dla idealnych granic międzywarstwowych, wykład-

niczo zanikająca funkcja falowa określonej symetrii jest sprzężona do funkcji Blocha o tej samej symetrii na poziomie Fermiego elektrod. Dla elektrod Co symetria  $\Delta_1$  jest dobrze reprezentowana na poziomie Fermiego dla elektronów o spinie większościowym i słabo dla elektronów o spinie mniejszościowym. W konsekwencji, dobre połączenie słabo zanikającego kanału  $\Delta_1$  z obydwo elektrodami może być osiągnięte tylko w ich równoległej konfiguracji, co tłumaczy bardzo dużą wartość efektu TMR. Inne typy barier mogą wybierać symetrie inne niż  $\Delta_1$  wybierana przez MgO. Na przykład, bariera  $\text{SrTiO}_3$  wybiera głównie stany o symetrii  $\Delta_5$ , które są sprzężone do stanów o spinie mniejszościowym w kobaltcie [37]. To tłumaczy ujemną polaryzację efektywną kobaltu, jaką zaobserwowaliśmy w MTJ z barierą  $\text{SrTiO}_3$  [38]. To w końcu pokazuje, że nie ma samoistnej polaryzacji spinowej w przewodnikach magnetycznych. Efektywna polaryzacja spinowa wybranego przewodnika magnetycznego w złączach tunelowych zależy od symetrii wybranej przez barierę i w zależności od bariery może być dodatnia lub ujemna, duża lub mała. W ten sam sposób polaryzacja spinowa przewodnictwa metalicznego silnie zależy od spinowej zależności procesów rozpraszania na domieszkach, jak pokazano na rys. 1b.

Istnieją inne obiecujące możliwości otrzymania dużego TMR i w wielu przypadkach eksperymenty są aktualnie prowadzone przez Agnès Barthélémy (w znacznie większym stopniu niż przeze mnie) w laboratorium CNRS/Thales. Po pierwsze, przetestowaliśmy materiały ferromagnetyczne, które były przewidziane jako ferromagnetyki półmetaliczne, tj. metaliczne dla jednego kierunku spinu i nieprzewodzące dla drugiego, innymi słowy spolaryzowane spinowo w 100%. Bardzo duża polaryzacja (95%) i rekordowa wartość TMR (1800%) została otrzymana przez naszego doktoranta Martina Bowena z elektrodami  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$  [39], ale temperatura Curie tego typu manganitu (około 350 K) jest zbyt niska dla zastosowań. Z ostatnich doświadczeń przeprowadzonych w Japonii wynika, że ferromagnetyki z rodziny stopów Heuslera również wykazują duży TMR o wartości 90% w temperaturze pokojowej [40]. Inną interesującą koncepcją, którą teraz badamy, jest filtrowanie spinów przez tunelowanie przez warstwę izolatora ferromagnetycznego [41,42]. Można to przedstawić jako tunelowanie elektronów przez barierę, której wysokość zależy od spinu, jeśli dno pasma przewodnictwa jest rozszczepione spinowo, co prowadzi do transmisji zależnej od spinu (filtrowanie spinu). Duży stopień filtrowania spinu został stwierdzony w niskich temperaturach dla bariery EuS [41] w MIT i Eindhoven. Niedawno otrzymano obiecujące wyniki z ferromagnetykami nieprzewodzącymi o dużo wyższej temperaturze Curie, np. w pracy [42]. Niektóre z barier magnetycznych, które ostatnio przebadaliśmy, są również ferroelektryczne, tak że MTJ mają ciekawą własność czterostanowej wartości oporu odpowiadającej konfiguracjom magnetycznym P i AP oraz dwóm orientacjom polaryzacji ferroelektrycznej [43], jak pokazano na rys. 9.

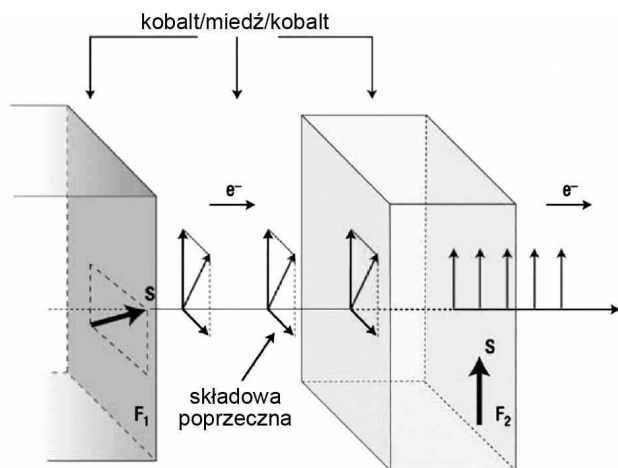


Rys. 9. Czterostanowa wartość oporu złącza tunelowego złożonego z biferroicznej bariery tunelowej ( $\text{La}_{0.1}\text{Bi}_{0.9}\text{MnO}_3$ ) między ferromagnetyczną elektrodą  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$  i niemagnetyczną elektrodą ze złota. Stany 1 do 4 odpowiadają magnetycznym (strzałki jasne) i elektrycznym (strzałki ciemne) polaryzacjom po prawej stronie rysunku. Z pracy [43].

## Przełączanie magnetyczne i generacja mikrofal przez transfer spinu

Badania zjawisk transferu spinu są jednym z najbardziej obiecujących nowych kierunków w dzisiejszej spintronice i również ważnym obszarem badawczym w naszym laboratorium CNRS/Thales. W doświadczeniach dotyczących transferu spinu manipuluje się momentem magnetycznym obiektu magnetycznego bez stosowania zewnętrznego pola magnetycznego, a tylko przez transfer spinowego momentu pędu ze spinowo spolaryzowanego prądu. Koncepcja ta, która została wprowadzona przez Johna Slonczewskiego [44] i znajduje się również w pracach Bergera [45], jest zilustrowana na rys. 10. Jak zaznaczono w opisie rysunku, transfer poprzecznego prądu spinowego do swobodnej warstwy magnetycznej F2 może być opisany poprzez moment siły działający na jej moment magnetyczny. Moment siły może spowodować nieodwracalne przełączenie momentu magnetycznego albo – w drugim obszarze i najczęściej w obecności pola magnetycznego – generuje precesję momentu magnetycznego w mikrofalowym zakresie częstotliwości.

Pierwszy dowód, że transfer spinu może faktycznie działać, został podany przez Tsoi i innych [46] w doświadczeniu dotyczącym wstrzykiwania spinu przez kontakt punktowy, ale pełne zrozumienie efektu stało się możliwe później [47,48], na podstawie wyników pomiarów wykonanych dla trójwarstw metalicznych uformowanych w postaci nanokolumny (rys. 11a). Na rysunkach 11b–c pokazują przykłady naszych wyników doświadczalnych dotyczących nieodwracalnego przełączania w obszarze słabych pól magnetycznych dla metalicznych nanokolumn i złączy tunelowych z elektrodami z półprzewodnika ferromagnetycznego  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ . Dla nanokolumn metalicznych lub złączy tunelowych z elektrodami z ferromagnetycznych metali przejściowych, np. Co lub Fe, gęstość prądu potrzebna do przełączenia jest rzędu  $10^6$ – $10^7$  A/cm<sup>2</sup>, co jest ciągle za dużo z punktu widzenia zastosowań. Ważnym

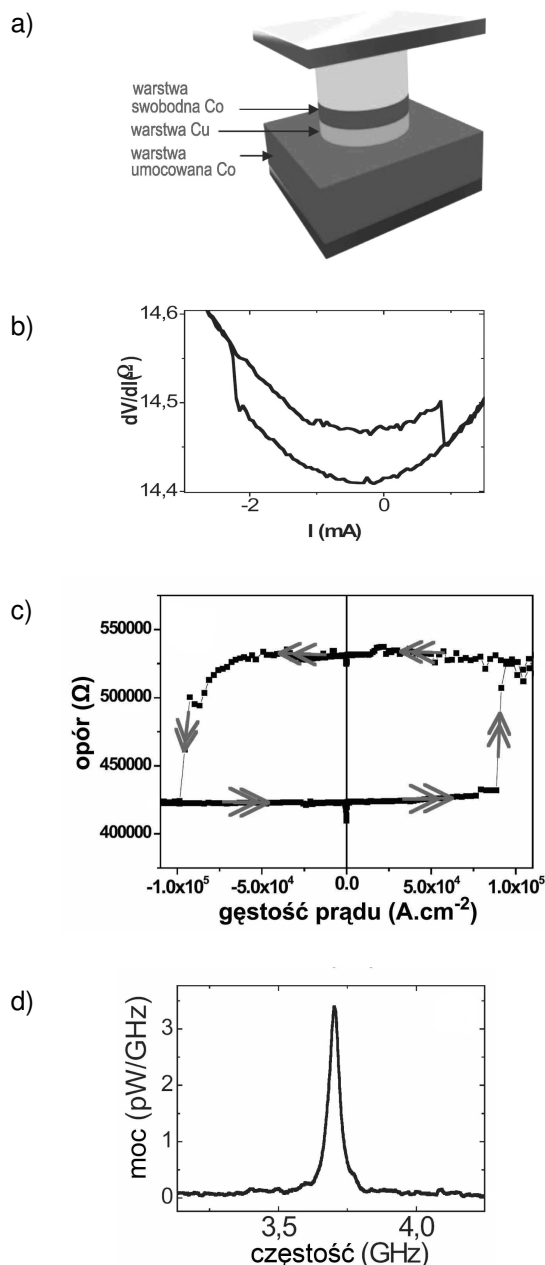


Rys. 10. Ilustracja koncepcji transferu spinu, wprowadzonej przez Johna Slonczewskiego [44] w 1996 r. Prąd jest spinowo spolaryzowany przez pierwszą warstwę  $F_1$  z magnetyzacją pod pewnym kątem względem osi namagnesowania drugiej warstwy  $F_2$ . Jeśli prąd ten przechodzi przez warstwę  $F_2$ , oddziaływanie wymienne ustawia jego polaryzację spinową wzdłuż osi namagnesowania. Ponieważ oddziaływanie wymienne zachowuje całkowity spin, poprzeczna polaryzacja spinowa stracona przez prąd spinowy jest przekazana całkowitemu momentowi spinowemu warstwy  $F_2$ . To może doprowadzić do przełączenia magnetycznego warstwy  $F_2$  albo, zależnie od warunków eksperymentalnych, do oscylacji magnetycznych o częstościach w zakresie mikrofalowym. Rysunek pochodzi z pracy [17].

wyzwaniem jest redukcja tej gęstości. Czas przełączania mierzony był przez inne grupy i okazało się, że może on sięgać 100 ps, co jest atrakcyjne z punktu widzenia przełączania pamięci MRAM. Dla złączy tunelowych z rys. 11c gęstość prądu przełączania wynosi tylko  $10^5$  A/cm<sup>2</sup> i jest o dwa rzędy wielkości mniejsza aniżeli dla nanokolumn metalicznych. Wynika to z faktu, że mniejsza liczba pojedynczych spinów jest potrzebna do odwrócenia mniejszego momentu magnetycznego rozrzedzonych materiałów magnetycznych.

W obecności odpowiednio silnego pola magnetycznego, obszar nieodwracalnego przełączania magnetyzacji warstwy swobodnej w strukturze trójwarstwowej zostaje zastąpiony przez obszar stacjonarnych precesji magnetyzacji warstwy swobodnej, podtrzymywanych przez moment siły wynikający z transferu spinu [51]. Ponieważ kąt między magnetyzacjami obydwu warstw magnetycznych zmienia się periodycznie w czasie precesji, opór trójwarstwy również oscyluje w czasie, co generuje oscylacje napięcia o częstościach w zakresie mikrofalowym. W innych warunkach transfer spinu można wykorzystać do generacji periodycznego ruchu tzw. wirów magnetycznych.

Zjawiska transferu spinu generują wiele problemów natury teoretycznej. Wyznaczenie momentu siły w wyniku transferu spinu związane jest z rozwiązaniem równań transportu spinu [52–55], podczas gdy opis przełączania magnetycznego lub precesji magnetyzacji obejmuje problemy dynamiki nieliniowej [52]. Wszystkie te problemy



Rys. 11. Doświadczenia dotyczące przełączania magnetycznego i generacji mikrofal indukowanych przez transfer spinu z prądu elektrycznego w nanostrukturach trójwarstwowych. a) Schemat trójwarstwowej nanokolumny magnetycznej. b) Indukowane prądem przełączanie między konfiguracją równoległą i antyrównoległą w strukturze Co/Cu/Co [48]. Przełączanie między równoległą i antyrównoległą orientacją magnetyzacji obydwu warstw magnetycznych trójwarstwy jest obserwowane jako nieodwracalne skoki oporu przy krytycznych wartościach prądu. Krytyczna gęstość prądu jest rzędu  $10^7$  A/cm<sup>2</sup>. c) Przełączanie poprzez transfer spinu w złączy tunelowym uformowanym w kształcie nanokolumny i złożonym z elektrod z półprzewodnika ferromagnetycznego GaMnAs przedzielonych tunelową barierą InGaAs [49]. Prąd krytyczny jest około sto razy mniejszy aniżeli dla struktury Py/Cu/Py (Py = permaloj). Podobne rezultaty zostały otrzymane w pracy Hayakawy i innych [50]. d) Typowe widmo struktury Co/Cu/Py [56].

są ze sobą sprzężone; na przykład, niektóre z naszych ostatnich wyników pokazują, że można uzyskać całkowicie inną dynamikę (z precesją bez pola magnetycznego, co jest interesujące ze względu na zastosowania) przez wprowadzenie silnie różniących się czasów relaksacji spinu w obu warstwach magnetycznych trójwarstwy w celu modyfikacji zależności kątowej indukowanego prądem momentu siły [56].

Zjawiska transferu spinu niewątpliwie znajdują ważne zastosowania. Przełączanie przez transfer spinu będzie wykorzystane w nowej generacji pamięci MRAM i będzie korzystne z punktu widzenia dokładności adresowania i małego zużycia energii. Generacja precesji w zakresie mikrofalowym doprowadzi do powstania oscylatorów wykorzystujących transfer spinu (STO, ang. Spin Transfer Oscillator). Jedną z głównych własności STO jest ich zdolność do szybkiej modulacji ich częstości za pomocą prądu stałego. Mogą one również mieć bardzo dużą dobroć. Ich słabym punktem jest niska moc (w obszarze mikrofal) pojedynczego STO w układzie nanokolumn metalicznych lub złączy tunelowych. Rozwiązaniem jest synchronizacja wielu takich oscylatorów. Możliwość synchronizacji została już zademonstrowana dla dwóch nanokontaktów indukujących wzbudzenia w tej samej warstwie magnetycznej [57,58]. W naszym laboratorium prowadzimy prace teoretyczne i doświadczalne dotyczące samosynchronizacji układu STO połączonych elektrycznie poprzez zmienny prąd o częstości radiowej, jaki one indukują [59].

## Spintronika półprzewodnikowa oraz spintronika molekularna

Spintronika oparta na półprzewodnikach [60,61] budzi szerokie zainteresowanie, może bowiem połączyć możliwości półprzewodników (sterowanie prądem przez napięcie bramkujące, połączenie z optyką itd.) z możliwościami materiałów magnetycznych (sterowanie prądem przez manipulowanie spinem, trwałość itd.). Wydaje się na przykład możliwe połączenie własności przechowywania, detekcji, przetwarzania i przesyłania informacji w jednym chipie, który mógłby zastąpić kilka elementów. Zaproponowano też nowe elementy, jak na przykład spinowy tranzystor polowy (spinowy FET, ang. Field Effect Transistor), oparty na transporcie spinu w kanale półprzewodnikowym między spinowo spolaryzowanymi elektrodami z kontrolą transmisji spinu poprzez napięcie bramkujące [62]. Niektóre półprzewodniki niemagnetyczne mają zdecydowaną przewagę nad metalami jeśli chodzi o czas koherencji spinowej i propagację spinowej polaryzacji na duże odległości [60,61]. Jednakże, jak będzie omówione niżej, problem spinowego tranzystora polowego ciągle nie jest rozwiązany.

Spintronika półprzewodnikowa rozwija się obecnie w kilku kierunkach.

1) Pierwszy kierunek obejmuje struktury hybrydowe łączące metale ferromagnetyczne z półprzewodnikami niemagnetycznymi. Jak wspomniano w części dotyczącej akumulacji spinowej, Schmidt i inni [24] zauważyli problem niedopasowania przewodności w procesie wstrzyki-

wania spinowo spolaryzowanego prądu z metalu magnetycznego do półprzewodnika. Problem ten został rozwiązany teoretycznie [25,26] i dzisiaj wiadomo, że wstrzykiwanie/wydzielanie spinowo spolaryzowanego prądu do/z półprzewodnika może być osiągnięte przez zależny od spinu opór połączenia, na przykład poprzez złącze tunelowe. Wstrzykiwanie/wydzielanie przez kontakt tunelowy zostało potwierdzone w diodach spinowych i eksperymentach magnetooptycznych [60,61,63].

2) Inna droga rozwoju spintroniki półprzewodnikowej polega na poszukiwaniu półprzewodników ferromagnetycznych. Ferromagnetyczny półprzewodnik  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  (gdzie  $x$  wynosi kilka procent) został odkryty przez grupę Ohno [64] w Sendai w 1996 r. i od tego czasu potwierdzono jego wiele interesujących własności, mianowicie możliwość sterowania własnościami ferromagnetycznymi za pomocą napięcia bramki, jak również duży efekt TMR i TAMR (Tunelowy Magnetoopór Anizotropowy). Jednakże jego temperatura Curie wynosi zaledwie 170 K, znacznie mniej od temperatury pokojowej, co wyklucza większość możliwości praktycznego wykorzystania. Wprawdzie ogłoszono znalezienie kilku półprzewodników ferromagnetycznych w temperaturze pokojowej, ale sytuacja na tym polu jest w dalszym ciągu niejasna.

3) Obecnie aktywnie prowadzone są badania w ramach trzeciej drogi wykorzystującej spinowo spolaryzowany prąd indukowany oddziaływaniem spinowo-orbitalnym, mianowicie spinowy efekt Halla (SHE, ang. Spin Hall Effect), efekt Rashby lub efekt Dresselhaus. Na przykład, w spinowym efekcie Halla oddziaływanie spinowo-orbitalne odchyła strumień elektronów ze spinem w górę i w dół w przeciwnych stronach, indukując poprzeczny prąd spinowy, nawet w przewodniku niemagnetycznym. Można to wykorzystać do wytwarzania prądu spinowego w strukturach złożonych tylko z przewodników niemagnetycznych. Zjawisko SHE może też występować w metalach niemagnetycznych [68,69] i tutaj też prowadzi się szerokie badania. Wspomnę, że już w latach siedemdziesiątych znalazłem bardzo duży SHE w miedzi, indukowany przez rezonansowe rozpraszanie na domieszkach niemagnetycznych w wyniku rozszczepienia poziomów energetycznych przez oddziaływanie spinowo-orbitalne [70].

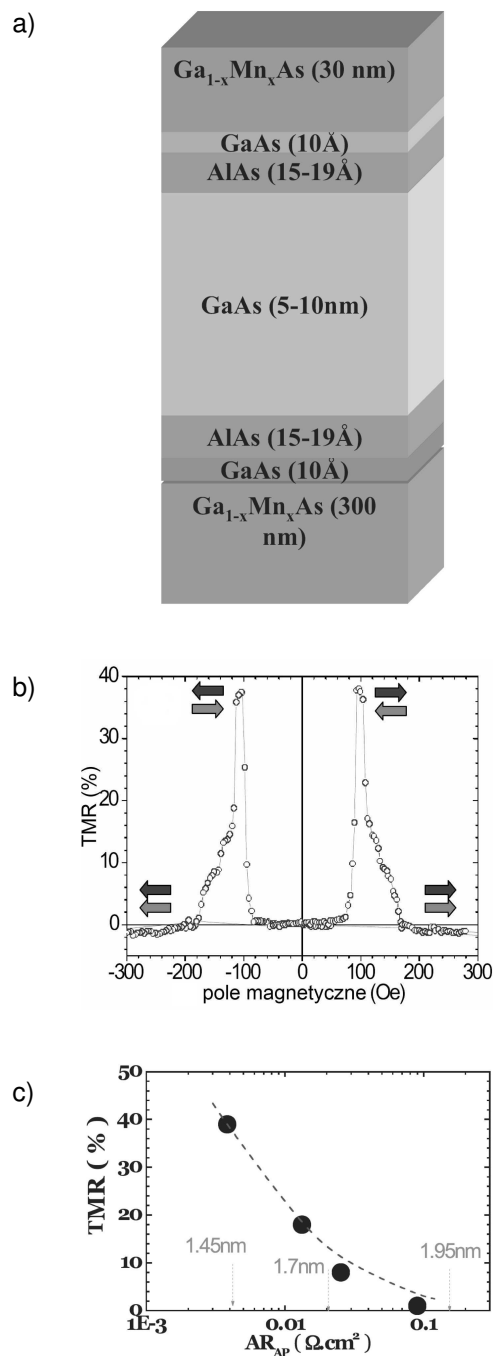
Kilka grup próbowało wykorzystać potencjalne możliwości spintroniki półprzewodnikowej przez eksperymentalną weryfikację koncepcji opisanego wyżej spinowego tranzystora polowego [62]. Zarówno metale ferromagnetyczne, jak i ferromagnetyczne półprzewodniki zostały użyte jako elektrody, ale rezultaty były mizerne. W niedawnym artykule przeglądowym Jonker i Flatté [60] zauważyli, że w konfiguracji magnetycznej elektrod równoległej i antyrównoległej nie zaobserwowano nigdy różnicy oporów większej niż 1%, tj.  $(R_{\text{AP}} - R_{\text{P}})/R_{\text{P}} > 1\%$ , przynajmniej dla struktur płaskich. Ostatnio zaproponowaliśmy [23], że można to wytłumaczyć w ramach modelu [26], który opracowałem wspólnie z Henri Jaffrèssem do opisu transportu spinu między elektrodami spolaryzowanymi spinowo. Zarówno w reżimie dyfuzyjnym, jak i balistycznym silna różnica między przewodnością w oby-

dwu konfiguracjach może być uzyskana jedynie wtedy, gdy opór granicy między półprzewodnikiem i elektrodą źródłową lub drenem jest nie tylko zależny od spinu, ale również jego wartość wybrana jest z dość wąskiego zakresu. Opory te muszą być większe aniżeli pierwsza wartość progowa dla wstrzykiwania/wydzielania spinu z/do metalicznej elektrody źródłowej/drenu i mniejsze niż druga wartość progowa zapewniająca czas obecności elektronu krótszy od czasu życia spinu. Dla struktur pionowych z małą odległością między elektrodą źródłową i drenem powyższy warunek może być spełniony stosunkowo łatwo i można uzyskać względnie dużą wartość magnetooporu, jak pokazują wyniki przedstawione na rys. 12. Z rysunku 12c wynika jednak, że magnetoopór szybko spada, jeśli opór barier tunelowych przekracza pewną wartość progową. Można to wytłumaczyć przez wzrost czasu pobytu elektronu ponad czas życia spinu. Alternatywnie, magnetoopór również spada do zera, jeśli wzrost temperatury skracza czas życia spinu i zwiększa stosunek czasu pobytu elektronu do czasu życia spinu. Okazuje się, że dla większości doświadczeń przeprowadzonych w strukturach płaskich część trudności pochodzi od zbyt dużego oporu połączenia, co prowadzi do zbyt krótkiego czasu pobytu elektronu. Min i inni [72] doszli do podobnego wniosku w przypadku struktur wykorzystujących krzem i zaproponowali ciekawe rozwiązanie obniżenia oporu połączenia poprzez dobór pracy wyjścia drenu i elektrody źródłowej.

Ostatnio wyłania się nowy kierunek spintroniki, spintronika molekularna (rys. 13). Bardzo duże efekty typu GMR i TMR zostały przewidziane w obliczeniach teoretycznych, zwłaszcza dla cząsteczek węgla, w których oczekuje się długiego czasu życia spinu ze względu na słabe oddziaływania spinowo-orbitalne. W ostatnich latach opublikowano obiecujące wyniki doświadczalne dotyczące transportu spinu w nanorurkach węglowych [73,74]. W szczególności, moja niedawna publikacja [74] powstała we współpracy z grupą w Cambridge dotyczącą nanorurki węglowej między elektrodami ferromagnetycznymi z metalicznego manganitu  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$  pokazała, że względna różnica między oporem w konfiguracji równoległej i antyrównoległej może przekraczać 60–70%. Jest to znacznie więcej niż można uzyskać, wykorzystując kanał półprzewodnikowy. Można to wytłumaczyć nie tylko długim czasem życia spinu elektronów w nanorurkach węglowych, ale również ich krótkim czasem pobytu związanym z ich dużą prędkością Fermiego (zdecydowana przewaga nad półprzewodnikami). W obszarze tym prowadzi się intensywne badania, w szczególności obiecujące wydają się elementy oparte na grafenie.

## Wnioski

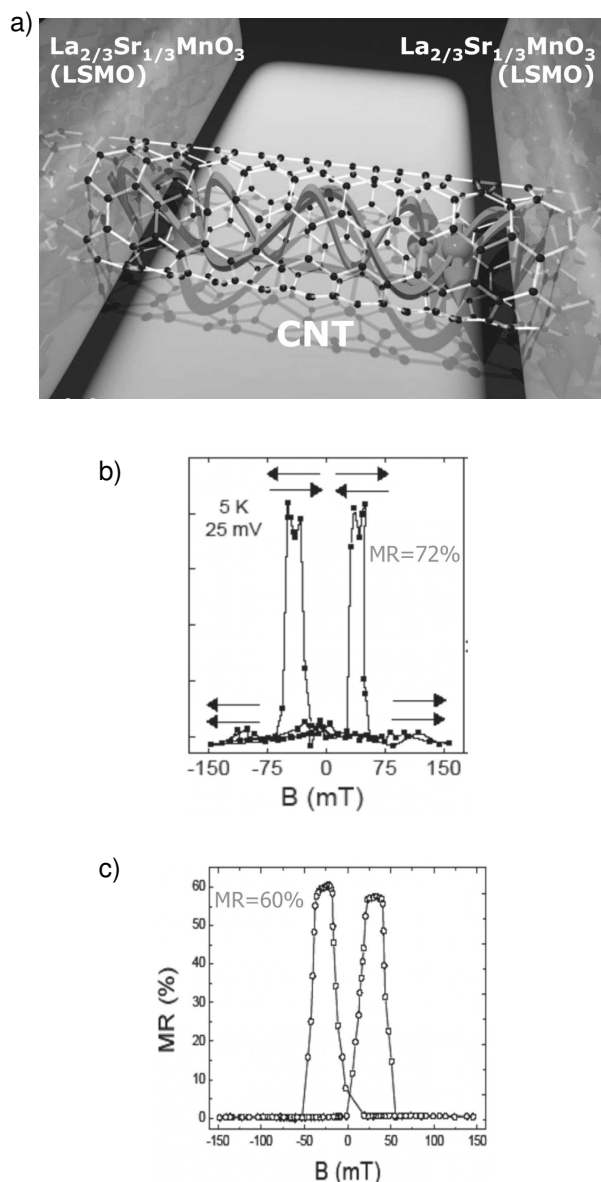
W czasie mniej niż dwudziestu lat mogliśmy obserwować, jak spintronika prowadzi do znacznego zwiększenia pojemności naszych twardych dysków, rozszerza technikę dysków na układy przenośne, jak kamery czy odtwarzacze multimedialne, wkracza do przemysłu samochodowego i do technologii biomedycznych, a dzięki efektom TMR i transferu spinu gotowa jest do wejścia do



Rys. 12. Spintronika półprzewodnikowa ilustrowana wynikami doświadczalnymi [23,71] otrzymanymi dla struktur składających się z warstwy GaAs oddzielonej od elektrod GaMnAs barierami tunelowymi AlAs (a). b) Krzywa magnetooporu dla temperatury 4,2 K pokazująca różnicę oporu 40% między równoległą i antyrównoległą konfiguracją magnetyczną elektrod. c) Stosunek  $MR$  w zależności od oporu barier tunelowych.

pamięci RAM naszych komputerów czy mikrofalowych emiterów naszych telefonów komórkowych. Dzisiejsze badania nad zjawiskami transferu spinu, materiałami multiferroicznymi, spintroniką półprzewodnikową i spintroniką molekularną otwierają fascynujący zakres badań i są jednocześnie obiecujące dla wielu zastosowań. Inną perspek-





Rys. 13. Spintronika molekularna: a) Wizja artystyczna transportu spinowego przez nanorurkę węglową między elektrodami magnetycznymi (dzięki uprzejmości T. Kontosa). b) i c): Wyniki doświadczalne dotyczące magnetooporu [74] nanorurki między dwiema elektrodami z ferromagnetycznego tlenku metalicznego  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$  w temperaturze 4,2 K. W konfiguracji elektrod równoległej (silne pole magnetyczne) i antyrównoległej (maksima) uzyskano opory różniące się o 72 i 60%.

tywą, poza zakresem tego wykładu, powinno być wykorzystanie prawdziwie kwantowej natury spinu i jego długiego czasu koherencji w układach o ograniczonej geometrii do obliczeń kwantowych stanowiących jeszcze bardziej rewolucyjne rozwiązanie. Spintronika powinna odegrać ważną rolę w nauce i technice obecnego stulecia.

Tłumaczył Józef Barnaś  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
Poznań

## Literatura

- [1] M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988).
- [2] G. Binash, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn, *Phys. Rev. B* **39**, 4828 (1989).
- [3] F. Mott, *Proc. Roy. Soc. A* **153**, 699 (1936).
- [4] A. Fert, I. A. Campbell, *Phys. Rev. Lett.* **21**, 1190 (1968); *J. Physique* **32**, C1 (1971); *J. Phys. F* **6**, 849 (1976).
- [5] B. Loegel, F. Gautier, *J. Phys. Chem. Sol.* **32**, 2723 (1971).
- [6] P. Grünberg, R. Schreiber, Y. Young, M.B. Brodsky, H. Sowers, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2442 (1986).
- [7] R.E. Camley, J. Barnaś, *Phys. Rev. Lett.* **63**, 664 (1989).
- [8] P.M. Levy, S. Zhang, A. Fert, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 1643 (1990).
- [9] S.S.P. Parkin, N. More, K.P. Roche, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 2304 (1990).
- [10] T. Shinjo, H. Yamamoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* **59**, 3061 (1990).
- [11] C. Dupas, P. Beauvillain, C. Chappert, C. Chappert, J.P. Renard, F. Trigui, P. Veillet, E. Velu, D. Renard, *J. Appl. Phys.* **67**, 5680 (1990).
- [12] D.H. Mosca, F. Petroff, A. Fert, P.A. Schroeder, W.P. Pratt, R. Loloee, *J. Magn. Magn. Mater.* **94**, L1 (1991).
- [13] S.S.P. Parkin, R. Bhadra, K.P. Roche, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2152 (1991).
- [14] B. Dieny, V.S. Speriosu, S.S.P. Parkin, B.A. Gurney, D.R. Wilhoit, D. Mauri, *Phys. Rev. B* **43**, 1297 (1991).
- [15] P. Grünberg, „Magnetic field sensor with ferromagnetic thin layers having magnetically antiparallel polarized components”, US patent 4 949 039 (1990).
- [16] S.S.P. Parkin, w: *Spin dependent transport in magnetic nanostructures*, red. S. Maekawa, T. Shinjo (Taylor and Francis, 2002), s. 237.
- [17] C. Chappert, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, *Nature Mater.* **6**, 813 (2007).
- [18] P.P. Freitas, H. Ferreira, D. Graham, L. Clarke, M. Amaral, V. Martins, L. Fonseca, J.S. Cabral, *Europhys. News* **34**, zesz. 6, 225 (2003).
- [19] W.P. Pratt i in., *Phys. Rev. Lett.* **66**, 3060 (1991); J. Bass, W.P. Pratt, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 274 (1999).
- [20] L. Piraux, J.-M. George, C. Leroy, R. Legras, A. Fert, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 2484 (1994); A. Fert, L. Piraux, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 338 (1999).
- [21] T. Valet, A. Fert, *Phys. Rev. B* **48**, 7099 (1993).
- [22] Z.G. Yu, M.E. Flatté, *Phys. Rev. B* **66**, 201202 (2002).
- [23] A. Fert, J.M. George, H. Jaffrès, R. Mattana, *IEEE Trans. Electron Devices* **54**, 921 (2007).
- [24] G. Schmidt i in., *Phys. Rev. B* **62**, 4790 (2000).
- [25] E.I. Rashba, *Phys. Rev. B* **62**, 16267 (2000).
- [26] A. Fert, H. Jaffrès, *Phys. Rev. B* **64**, 184420 (2001).
- [27] M. Jullière, *Phys. Lett.* **54A**, 225 (1975).
- [28] J.S. Moodera, L.R. Kinder, T.M. Wong, R. Meservey, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 3273 (1995).
- [29] T. Miyazaki, N. Tezuka, *J. Magn. Magn. Mater.* **139**, 231 (1995).
- [30] M. Bowen, V. Cros, F. Petroff, A. Fert, A. Cebollada, F. Briones, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 1655 (2001).
- [31] S. Yuasa i in., *Nature Mater.* **3**, 868 (2004).
- [32] S.S.P. Parkin i in., *Nature Mater.* **3**, 862 (2004).
- [33] Y.M. Lee, J. Hayakawa, S. Ikeda, F. Matsukura, H. Ohno, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 212507 (2007).

- [34] J. Mathon, A. Umerski, *Phys. Rev. B* **60**, 1117 (1999).
- [35] Ph. Mavropoulos, N. Papanikolaou, Ph. Dederichs, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 1088 (2000).
- [36] X.G. Zhang, W.H. Butler, *Phys. Rev. B* **70**, 173407 (2004).
- [37] J.P. Velev i in., *Phys. Rev. Lett.* **95**, 216601 (2005); M. Bowen i in., *Phys. Rev. B* **73**, 140408 (2006).
- [38] J.M. De Teresa, A. Barthélémy, A. Fert, J.P. Contour, F. Montaigne, A. Vaures, *Science* **286**, 507 (1999).
- [39] M. Bowen, M. Bibes, A. Barthélémy, J.P. Contour, A. Anane, Y. Lemaitre, A. Fert, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 233 (2003).
- [40] T. Ishikawa i in., *Appl. Phys. Lett.* **89**, 192505 (2006).
- [41] P. Leclair, J.K. Ha, J.M. Swagten, J.T. Kohlhepp, C.H. Van de Vin, W.J.M. de Jonge, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 625 (2002).
- [42] A.V. Ramos i in., *Appl. Phys. Lett.* **91**, 122107 (2007).
- [43] M. Gajek, M. Bibes, S. Fusil, K. Bouzehouane, J. Fontcuberta, A. Barthélémy, A. Fert, *Nature Mater.* **6**, 296 (2007).
- [44] J.C. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.* **159**, L1 (1996).
- [45] L. Berger, *Phys. Rev. B* **54**, 9353 (1996).
- [46] M. Tsoi, A.G.M. Jansen, J. Bass, W.C. Chiang, V. Tsoi, M. Seck, P. Wyder, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 4281 (1998).
- [47] J.A. Katine i in., *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3149 (2000).
- [48] J. Grollier, V. Cros, A. Hanzic, J.M. George, H. Jaffrès, A. Fert, G. Faini, J. Ben Youssef, H. Le Gall, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 3663 (2001); J. Grollier, rozprawa doktorska (Université Paris-Sud, 2003).
- [49] M. Elsen, O. Boulle, J.M. George, H. Jaffrès, V. Cros, A. Fert, A. Lemaitre, R. Giraud, G. Faini, *Phys. Rev. B* **73**, 035303 (2006).
- [50] J. Hayakawa i in., *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, Part 2, L1267 (2005).
- [51] W.H. Rippart i in., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 027201 (2004).
- [52] M.D. Stiles, J. Miltat, w: *Spin Dynamics in Confined Magnetic Structures III*, red. B. Hillebrands, A. Thiaville (Springer, Berlin 2006).
- [53] J.C. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.* **247**, 324 (2002).
- [54] A.A. Kovalev, A. Brattas, G.E.W. Bauer, *Phys. Rev. B* **66**, 224424 (2002).
- [55] J. Barnaś, A. Fert, M. Gmitra, I. Weymann, V.K. Dugaev, *Phys. Rev. B* **72**, 024426 (2005).
- [56] O. Boulle, V. Cros, J. Grollier, L.G. Pereira, C. Deranlot, F. Petroff, G. Faini, J. Barnaś, A. Fert, *Nature Phys.* **3**, 492 (2007); O. Boulle, rozprawa doktorska (Université Paris-Sud, 2006).
- [57] S. Kaka i in., *Nature* **437**, 389 (2005).
- [58] F.B. Mancoff i in., *Nature* **437**, 393 (2005).
- [59] J. Grollier, V. Cros, A. Fert, *Phys. Rev. B* **73**, 060409(R) (2006).
- [60] B.T. Jonker, M.E. Flatté, w: *Nanomagnetism*, red. D.L. Mills, J.A.C. Bland (Elsevier, 2006), s. 227.
- [61] D.D. Awschalom, M.E. Flatté, *Nature Phys.* **3**, 153 (2007).
- [62] S. Datta, B. Das, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 665 (1990).
- [63] J. Stephens i in., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 097602 (2004).
- [64] H. Ohno i in., *Appl. Phys. Lett.* **69**, 363 (1996).
- [65] Y. Kato, R.C. Myers, A.C. Gossard, D.D. Awschalom, *Science* **306**, 1910 (2004).
- [66] S. Zhang, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 393 (2000).
- [67] M. Koenig, S. Wiedmann, C. Bruene, A. Roth, H. Buhmann, L.W. Molenkamp, X.L. Qi, S.-C. Zhang, *Science* **318**, 766 (2007).
- [68] L. Vila, T. Kjimura, Y. Otani, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 226604 (2007).
- [69] T. Seki i in., *Nature Mater.* **7**, 125 (2008).
- [70] A. Fert, A. Friederich, A. Hamzic, *J. Magn. Magn. Mater.* **24**, 231 (1981).
- [71] R. Mattana, J.M. George, H. Jaffrès, F. Nguyen Van Dau, A. Fert, B. Lépine, A. Guivarch, G. Jézéquel, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 166601, (2003).
- [72] B.C. Min, K. Motohashi, C. Lodder, R. Jansen, *Nature Mater.* **5**, 817 (2006).
- [73] A. Cottet, T. Kontos, S. Sahoo, H.T. Man, W. Belzig, C. Bruder, C. Schönenberger, *Semicond. Sci. Technol.* **21**, 578 (2006).
- [74] L.E. Hueso, J.M. Pruneda, V. Ferrari, G. Burnell, J.P. Valdes-Herrera, B.D. Simmons, P.B. Littlewood, E. Artacho, A. Fert, N.D. Mathur, *Nature* **445**, 410 (2007).

# Matematyka i fizyka\*

Peter D. Lax

*Courant Institute, New York University, New York, USA*

---

## Mathematics and physics

---

Matematyka i fizyka to różne przedsięwzięcia – fizyka poszukuje praw przyrody, a matematyka stara się wymyślać własne struktury i dowodzić swoich twierdzeń. Oczywiście te struktury nie biorą się z powietrza, lecz są związane – między innymi – z potrzebami fizyki.

W tym wykładzie omówię wiele przypadków, w których matematycy przyszli fizyce z pomocą, a także uderzające przykłady sytuacji, w których fizycy podpowiedzieli matematykom nowe zagadnienia i tematy badań. Wiele z nich wiąże się z ich zastosowaniem w praktyce.

Związek matematyki z fizyką to naturalny temat Wykładu im. Gibbsa – co najmniej dwa wcześniejsze wykłady, Freemana Dysona i Edwarda Wittena, były już temu poświęcone.

Zacznę od pięciu słynnych cytatów.

- Przyroda nie tylko sugeruje nam zadania, podpowiada też ich rozwiązania (Henri Poincaré).
- Ludzki umysł nie wymyślił dotąd lepszego urządzenia do oszczędzania pracy niż algebra (J. Willard Gibbs).
- Nie zostałem matematykiem, ponieważ w matematyce jest tyle pięknych i trudnych zadań, że można się nimi zajmować bez końca i nie znaleźć czasu na wyszukiwanie pytania głównego (Albert Einstein).
- Cudowna użyteczność języka matematyki do formułowania praw fizyki jest niezwykłym darem, którego nie rozumiemy i na który nie zasłużyliśmy (Eugene Wigner).
- Matematyka jest banalna, lecz w naszym zawodzie nie można się bez niej obejść (Richard Feynman).

Podejrzewam, że wielu matematyków nie zgadza się z Einsteinem – przecież pytanie główne to zawsze właśnie to, nad którym właśnie pracujemy.

Większość przykładów, którymi się posłużę, pochodzi z wieków XIX i XX, lecz zacznę od kilku jeszcze starszych. Po pierwsze, Archimedes, jeden największych uczonych starożytności, był również wielkim matematykiem.

Przeskakując kilka stuleci, dochodzimy do Galileusza, który był przede wszystkim fizykiem, prowadził obserwacje i doświadczenia, lecz bardzo przy tym cenił

matematykę. Pisał: „Wielka księga przyrody leży przed nami szeroko otwarta, zawierając w sobie prawdziwy obraz świata. (...) Aby jednak móc ją czytać, musimy najpierw nauczyć się języka, jakim jest napisana, oraz znaków jej alfabetu. (...) Jest to język matematyki, a znakami jej alfabetu są trójkąty, okręgi i inne figury geometryczne”.

Dziś dodalibyśmy pewnie do tej listy znaków pochodną i całkę.

Kepler, wielki uczony współczesny Galileuszowi, jako pierwszy poprawnie opisał prawa rządzące ruchem planet. Nie tylko prawidłowo ustalił, że torami planet są elipsy, w których ognisku znajduje się Słońce, lecz odkrył również prawo stałej prędkości polowej oraz związek rozmiaru orbity z okresem jej obiegu. Prawa te odegrały kluczową rolę w potwierdzeniu newtonowskich praw ruchu i grawitacji.

Kepler był nie tylko fizykiem, lecz i wybitnym matematykiem. Miał ciekawe poglądy na teorię objętości. Wysłunięta przez niego hipoteza o najgęstszym upakowaniu kul w przestrzeni trójwymiarowej jest ciągle przedmiotem badań.

Dwa największe wynalazki czasów Galileusza i Keplera to teleskop, który zrewolucjonizował obserwacje astronomiczne, oraz logarytmy dziesiętne, wymyślone przez Briggsa i niezależnie przez Burgiego, współpracownika Keplera, które zrewolucjonizowały obliczenia naukowe. Kepler natychmiast się zorientował, że użycie logarytmów pozwoli zmniejszyć liczbę mnożeń i dzieleni, a więc i szanse błędów numerycznych.

Znany historyk Otto Neugebauer napisał w swej książce o Keplerze, że „liczba elementarnych błędów obliczeń jest w dziełach Keplera olbrzymia”. O dziwo, wyniki końcowe są zawsze poprawne.

Młodzi słuchacze nie zdają sobie pewnie sprawy z tego, jak ważne były swego czasu logarytmy dziesiętne. Wiele podręczników matematyki sprzed roku 1950 zawierało jako dodatek tablice logarytmów. Żaden szanujący się inżynier nie rozstawał się nigdy z suwakiem logarymicznym. Pozwala to zrozumieć dziwny skądinąd fakt, że jeszcze do niedawna większość kalkulatorów kieszonko-

---

\*Artykuł opublikowany w *Bulletin of the American Mathematical Society* **45**, zes. 1 (2008) został przetłumaczony za zgodą Autora i Wydawcy. [Translated with permission. Copyright © 2007 American Mathematical Society]. Jest on oparty na Wykładzie im. Gibbsa wygłoszonym przez Autora na Wspólnym Zjeździe Amerykańskich Towarzystw Matematycznych w Nowym Orleanie w 2007 r.

wych miała wbudowany program do obliczania logarytmów dziesiętnych.

Ambicja Keplera sięgała dalej niż prosty opis ruchu planet. Jak pisał, „Moim celem jest wykazanie, że machina niebieska nie jest pochodzącym od Boga organizmem, lecz jest rodzajem mechanizmu zegarowego, w tym sensie, że wszystkie ruchy ciał są wywołane jedną, bardzo prostą działającą między ciałami siłą magnetyczną, tak jak w mechanizmie zegara o wszystkim decyduje jeden ciężarek”.

Kepler był jednocześnie pierwszym uczonym współczesnym i ostatnim uczonym średniowiecznym. Jego poglądy naukowe zabarwione były mistycyzmem, co bardzo trafnie opisał Arthur Koestler w książce *Lunacy*.

Keplerowska koncepcja układu słonecznego jako mechanizmu zegarowego została dopracowana do końca przez Newtona, największego fizyka i matematyka wszech czasów. Euler, niemal równie wielki matematyk, był też wybitnym fizykiem – 250 lat temu sformułował równania opisujące przepływ płynów, zarówno ściśliwych, jak i nieściśliwych. W dalszej części wykładu opiszę sposoby ich rozwiązania, osiągnięte przy tym sukcesy i napotkane trudności.

W XIX w. zawody matematyka i fizyka zaczęły się od siebie nieco różnić, ale wciąż zachowały wiele cech wspólnych. Dwaj najwięksi matematycy tego stulecia, Gauss i Riemann, bardzo się też interesowali fizyką; na cześć Gaussa jednostkę indukcji magnetycznej nazwano gausem.

Ponad jedną trzecią publikacji Riemanna dotyczy fizyki – to on pierwszy zasugerował, że składowe natężenia pola elektrycznego spełniają równanie falowe. Jego najważniejszym dokonaniem naukowym jest stworzenie podstaw teorii rozchodzenia się fal w ściśliwych gazach. Wprowadzone przez niego pojęcia – niezmienniki Riemanna, zagadnienie początkowe Riemanna, prawo rozchodzenia się fal uderzeniowych – są nadal podstawowymi elementami tej teorii. Warto jednak przypomnieć, że Riemann zakładał izentropowy charakter przepływu, co prowadziło do niezachowania energii fal uderzeniowych. Prawidłowe równania podali Rankine i Hugoniot.

Większość znanych matematyków francuskich pierwszej połowy XIX w. – Lagrange, Laplace, Fourier, Poisson, Cauchy, Liouville – wykazywała głębokie zainteresowanie fizyką i wniosła do niej znaczny wkład. Wśród Brytyjczyków podział na matematyków i fizyków był jeszcze bardziej nieostry – Green, Airy, Stokes, William Thomson, Irlandczyk Hamilton, lord Rayleigh – mogą być równie dobrze nazwani jednymi lub drugimi. Rayleigh był pierwszym matematykiem uhonorowanym Nagrodą Nobla – dostał ją z fizyki za pracę chemiczną: odkrycie argonu.

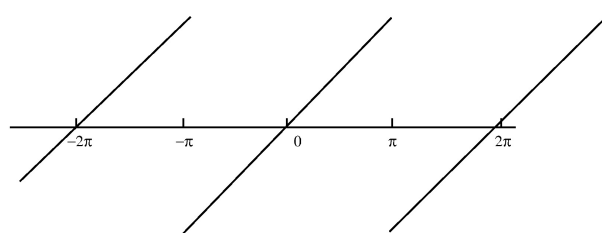
Największym fizykiem XIX w. był Maxwell, który miał bardzo staranne wykształcenie matematyczne. Sformułował równania rządzące rozchodzeniem się fal elektromagnetycznych, znane dziś jako równania Maxwella. Zauważył, że prędkość rozchodzenia się tych fal, wyznaczona na podstawie zawartych w teorii stałych fizycznych, jest bardzo bliska zmierzonej wartości prędkości światła. Wyciągnął więc wniosek, że światło jest falą elektromagnetyczną. Było to cokolwiek niespodziewane, gdyż – jak

podkreślił Maxwell – doświadczenia, w których zmierzono prędkość światła, nie były w żaden sposób związane z elektrycznością ani magnetyzmem, a w pomiarach stałych elektrycznych i magnetycznych wcale nie korzystano ze światła „poza użyciem go do oświetlenia przyrządów”.

Drugim wielkim dziełem Maxwella jest teoria kinetyczna gazów. Wraz z dwoma innymi wielkimi fizykami XIX w. – Boltzmannem i Gibbssem – stworzył mechanikę statystyczną, w której matematyka gra bardzo ważną rolę. Ponieważ mój wykład nosi imię Gibbsa, opiszę teraz wkład Gibbsa do matematyki.

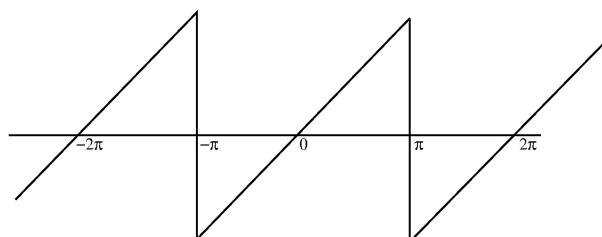
Najważniejszy z nich dotyczy cech szeregów Fouriera. Początek tej historii jest bardzo szczególny. Otóż Albert Michelson (którego prace na temat prędkości światła odegrały ważną rolę przy powstaniu szczególnej teorii względności) napisał w 1898 r. krótką notatkę w *Nature* o tym, jak szereg funkcji nieciągłych może dążyć do funkcji ciągłej. Podał przykład funkcji  $f(x)$  równej  $x$  w przedziale  $-\pi < x < \pi$  oraz przedłużonej okresowo (z okresem równym  $2\pi$ ) na całą oś rzeczywistą i zastanawiał się, czy może być ona granicą sum częściowych szeregu Fouriera.

Gibbs dostrzegł, że Michelson pomylił pojęcia wykresu granicy i granicy wykresów funkcji przybliżonych. W notatce z *Nature* (z 29 grudnia 1898 r.) podkreślił, że wykres granicy sum cząstkowych szeregu Fouriera funkcji  $f$  składa się z nieskończonej liczby odcinków o nachyleniu  $45^\circ$  (rys. 1), a granica wykresów zawiera – prócz



Rys. 1.

tych odcinków o nachyleniu  $45^\circ$  – odcinki pionowe łączące końce odcinków pochyłych w punktach nieciągłości funkcji (rys. 2). W kolejnej notatce z *Nature* (z 27 kwietnia



Rys. 2.

1899 r.) Gibbs pisze:

„Przepraszam za wynikający z nieuwagi błąd, jaki popełniłem, opisując granicę rodziny krzywych zdefinio-

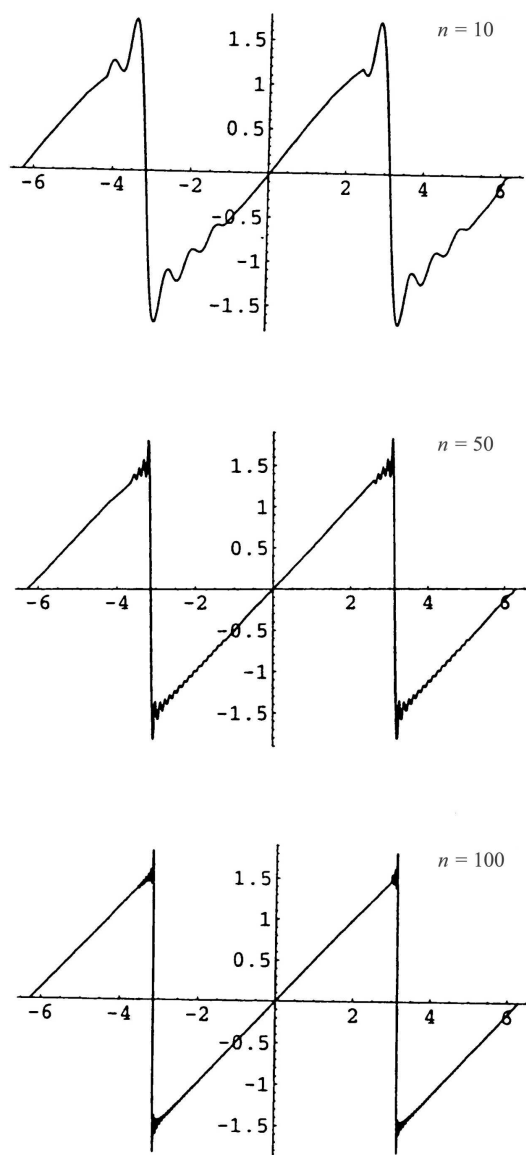
wanych równaniem

$$y = 2(\sin x - (1/2)\sin 2x + \dots + (1/n)\sin nx)$$

linią łamaną złożoną z odcinków na przemian pochyłych i pionowych. Odcinki pochyłe zostały podane prawidłowo, natomiast odcinki pionowe, które oś  $x$  dzieli na połowy, sięgają poza punkty wspólne z odcinkami pochyłymi; całkowita długość odcinków pionowych jest równa 4 razy całka oznaczona z  $(\sin u/u)du$ .

To jest wszystko, co Gibbs opublikował na ten temat.

Rysunek 3 przedstawia wykresy  $n$ -tych sum cząstkowych dla  $n = 10, 50$  i  $100$ . Jak widać coraz wyraźniej



Rys. 3.

dla coraz większych  $n$ , części pionowe wykresów sięgają wyżej i niżej niż odpowiednie części ukośne. To zjawisko Gibbsa jest źródłem dużych błędów przy wyznaczaniu rozwiązań równań różniczkowych cząstkowych tzw. metodą spektralną (przy czym oblicza się sumy cząstkowe

szeregu Fouriera), gdy rozwiązania te zawierają nieciągłości. Jak wykazał David Gottlieb ze współpracownikami, błędy te można na szczęście usunąć w końcowej fazie obliczeń.

Gibbs wniósł też istotny wkład do matematyki, rozwijając nowoczesną analizę wektorową. Jego wykłady z tej dziedziny nie zostały nigdy opublikowane, ale były dostatecznie popularne w postaci notatek do wykładów, aby wywołać krytykę starej gwardii wykładowców, którzy do nauczania algebry wektorowej wykorzystywali kwaterniony.

Wyjaśnijmy, o co chodziło. Dla dwóch wektorów w przestrzeni trójwymiarowej

$$X = (x, y, z) \quad \text{ i } \quad U = (u, v, w),$$

można wprowadzić kwaterniony o zerowej części rzeczywistej,  $ix + jy + kz$  oraz  $iu + jv + kw$ , których iloczyn kwaternionowy wynosi  $-s + ip + jq + kr$ . Liczba  $s$  jest równa iloczynowi skalarnemu wektorów  $X$  i  $U$ , a wektor  $(p, q, r)$  – ich iloczynowi wektorowemu  $X \times U$ .

Gibbs uważał, że kwaterniony nie mają związku z analizą wektorową i czuł się w obowiązku bronić się przed atakami. W notatce z *Nature* (43, 511 (1891)) pisał:

„Krótki fragment przedmowy do III wydania *Kwaternionów* prof. Taita, na który ostatnio zwróciłem uwagę, wymaga mojej odpowiedzi. Oto ten fragment:

»Nawet prof. Willard Gibbs musi być uznany za jednego z tych, którzy opóźniają rozwój algebry kwaternionów, jako autor tekstu o analizie wektorowej, hermafrodytycznego potwora, mieszanki notacji Hamiltona i Grassmanna«.

Autor jak widać zakłada, że niestosowanie kwaternionów przy analizie wektorowej to wielki błąd. Jeśli tak jest, to jest to bardzo ważna prawda, jeśli jednak byłoby inaczej, to wymaga to stanowczej odpowiedzi, zwłaszcza z uwagi na wielki autorytet autora tej tezy. Jego krytycyzm odnosi się w szczególności do notacji, uważam jednak, że problem leży raczej w pojęciach, do których notacja się odnosi. Gdyby mój błąd sprowadzał się do różnic w notacji, nazwanie mojej pracy potworną byłoby mniej na miejscu niż nazwanie jej formy prostacką».

W dalszym ciągu Gibbs przedstawia pełne werwy uzasadnienie swego przedstawienia analizy wektorowej. Na tym się jednak nie skończyło – dwa lata później Gibbs znów uznał za konieczne napisanie nowej notatki w *Nature* (48, 364 (1893)), a w niej:

„W pracy »Innowacje w teorii wektorów«, której streszczenie ukazało się w *Nature* (47, 590 (1893)), prof. C.G. Knott przedstawia pogląd, że kwaterniony dają jedyną właściwą podstawę analizy wektorowej, uzasadniając to przede wszystkim wadami i brakami, jakie dostrzegł w mojej broszurze *Elementy analizy wektorowej*, przez co nadaje tym wadom powagę, jakiej chyba bez tego nie miały.

Zarzut, który najbardziej zasługuje na odpowiedź, polega na tym, że »rozwijając notację diadyczną, prof. Gibbs jest zmuszony do wprowadzenia kwaternionów, co stoi w logicznej sprzeczności z jego własnym poglądem«.

W dalszym ciągu Gibbs obala – bardzo uprzejmie – argumenty prof. C.G. Knotta.

Mechanika statystyczna prowadziła w XX w. podwójne życie, podając się zarówno za część matematyki, jak i fizyki. Na przykład, Hilbert zajmował się wyprowadzeniem równań dynamiki gazów z równania Boltzmann. To podwójne życie pełne było sukcesów. Oto kilka przykładów.

Dążąc do uzasadnienia równości średnich względem czasu i średnich po przestrzeni fazowej, Boltzmann sformułował hipotezę ergodyczną. W roku 1931 von Neumann i G.D. Birkhoff udowodnili swoje wersje twierdzenia ergodycznego. Okazały się one bardzo ważne w wielu działach analizy; von Neumann uważał swój dowód za jedno ze swoich największych osiągnięć. Jednak Jack Schwartz w dowcipnym artykule „Zgubny wpływ matematyki na nauki przyrodnicze” dowodzi z dużym przekonaniem, że twierdzenia ergodyczne nie mają żadnego związku z mechaniką statystyczną.

Podkreśla, że oba twierdzenia ergodyczne zawierają założenie, że przepływ jest „metrycznie przechodni”, co oznacza, że przestrzeń fazowa nie da się podzielić na dwie nietrywialne części, między którymi nie ma przepływu fazowego. Założenie to bardzo trudno sprawdzić – w szczególności nigdy go nie sprawdzono dla przepływów, które są istotne w mechanice statystycznej. Być może założenie to jest więc w tym przypadku niespełnione.

Z drugiej strony Schwartz argumentuje, że z warunku ergodyczności (jeśli byłby spełniony) wynikałaby równość średnich względem czasu i średnich po przestrzeni fazowej dla wszystkich funkcji ciągłych w tej przestrzeni. To znacznie więcej niż nam trzeba – w mechanice statystycznej nie interesują nas wszystkie funkcje ciągłe, lecz tylko takie, które mają znaczenie w termodynamice. Są to funkcje bardzo szczególne, o dużym stopniu symetrii, i równość średnich względem czasu i średnich po przestrzeni fazowej wynika z ich szczególnej postaci.

Uderzający przykład pomocy, jakiej matematyka udzieliła mechanice statystycznej, ma swe źródło w badaniach Onsagera nad modelem Isinga. Onsager wykazał, że funkcja korelacji w dwuwymiarowej sieci  $N \times N$  spinów Isinga jest dana wyznacznikiem macierzy Toeplitza  $N \times N$ , przy czym ważna jest jej wartość w granicy termodynamicznej, tzn. dla  $N \rightarrow \infty$ . Jeden z kolegów Onsagera na Yale University, Shizuo Kakutani, wiedział, że największym na świecie ekspertem od wyznaczników macierzy Toeplitza jest Gabor Szegő ze Stanfordu. Przekazał mu problem Onsagera i Szegő istotnie wyznaczył wymaganą wartość asymptotyczną, publikując swą pracę w 1952 r. pt. „O pewnych formach hermitowskich związanych z szeregiem Fouriera funkcji dodatnich”. Artykuł Barry’ego McCoya w *Dzielałach zebranych Szegő* zawiera pasjonujący opis oddziaływania matematyki z fizyką w tym zakresie.

Bardzo świeżym przykładem podwójnego życia mechaniki statystycznej jest ewolucja stochastyczna Loewnera, wykorzystywana w dwuwymiarowych modelach fizyki statystycznej. Za prace nad nią Gregory Lawler, Oded Schramm i Wendelin Werner otrzymali w 2006 r. Na-

grode Polyi, a Wendelin Werner także Medal Fieldsa. Co ciekawe, Loewner wymyślił swoje równanie różniczkowe opisujące deformacje jednoparametrowych map konforemnych jako narzędzie do badania hipotezy Bieberbacha, co jest zagadnieniem bardzo ezoterycznym. Udało mu się dowieść, że wartość bezwzględna trzeciego współczynnika Taylora funkcji jednowartościowych nie przekracza trzech. Równanie różniczkowe Loewnera odgrywa też ważną rolę w dowodzie tej hipotezy dla wszystkich współczynników Taylora, podanym przez de Brangesa. Niezły przykład „niedorzecznej skuteczności matematyki w naukach fizycznych”, prawda?

W XX w. fizyką wstrząsnęła cała seria rewolucyjnych przemian, które miały też wielki wpływ na matematykę. Ogólna teoria względności Einsteina to jedna z tych nowych teorii; we wstępie do swojej podstawowej pracy na ten temat Einstein dziękuje Minkowskiemu, a także Gaussowi, Riemannowi, Christoffelowi, Ricciemu i Levi Civici za stworzenie podstaw, na których mógł zbudować swą teorię. Astrofizyczne konsekwencje ogólnej teorii względności wynikają ze szczególnych rozwiązań równań Einsteina. Ogólna teoria istnienia rozwiązań jest dziś polem aktywnych badań – zobacz np. niedawną pracę Demetriosa Christodoulou i Sergiu Klainermana.

Największym przewrotem w fizyce było powstanie mechaniki kwantowej, która przyciągnęła uwagę wielu matematyków: Hermanna Weyla, von Neumanna, Friedrichsa, a później Kato, Freemana Dysona i wielu innych. To Weyl pomógł Schrödingerowi obliczyć wartości własne jego operatora dla atomu wodoru – ich zgodność z położeniami linii widmowych wodoru była istotnym elementem potwierdzenia słuszności teorii Schrödingera.

Friedrichs powiedział mi kiedyś, że w latach sześćdziesiątych spotkał się przypadkowo z Heisenbergiem. Korzystając z okazji, w imieniu wszystkich matematyków podziękował Heisenbergowi za stworzenie dziedziny, dzięki której powstały tak piękne działy matematyki. Heisenberg zgodził się, że tak właśnie było. Friedrichs dodał następnie, że matematyka spłaciła – przynajmniej częściowo – zaciągnięty wówczas dług. Heisenberg nie bardzo chyba wiedział, co Friedrichs miał na myśli, więc ten dodał, że to właśnie matematyk – von Neumann – wyjaśnił różnicę między operatorem samosprężonym a zaledwie symetrycznym. „A co to za różnica?” – odparł Heisenberg.

Eugene Wigner, wybitny fizyk i bliski przyjaciel von Neumanna jeszcze z czasów liceum, był przez całe życie zakochany w matematyce, do której wniósł istotny wkład. W pracach z zakresu mechaniki kwantowej korzystał z teorii grup, co doprowadziło do ciekawych zagadnień reprezentacji grup. Inną z jego owocnych idei był opis widma bardzo złożonych układów kwantowych za pomocą analizy statystycznych właściwości widma macierzy losowych. Macierze losowe są dziś pasjonującą dziedziną badań, związaną z wieloma pozornie niezależnymi od siebie tematami.

Zdumiewający związek macierzy losowych z teorią liczb stwierdzono w latach siedemdziesiątych XX w. Hugh Montgomery miał wtedy w Institute for Advanced Study



w Princeton wykład o swej hipotezie na temat rozkładu nietrywialnych zer funkcji  $\zeta$  Riemanna. Dyson zauważył wówczas, że ten rozkład jest taki sam jak rozkład kolejnych wartości własnych macierzy losowych.

Pod wpływem tego odkrycia Andrew Odlycko zbadał numerycznie rozkład odległości pomiędzy zerami funkcji  $\zeta$ . Stwierdził, że w zakresie pierwszych 70 mln zer poza pierwszymi  $10^{20}$  zerami ich rozkład jest niemal doskonale zgodny z rozkładem wartości własnych macierzy losowych (patrz rys. 4 i 5)! Na początku XX w. Hilbert i Polya zaproponowali metodę uzasadnienia hipotezy Riemanna przez stwierdzenie, że zera funkcji  $\zeta$  są zgodne z wartościami własnymi operatora postaci  $(1/2)I + iS$ , gdzie  $S$  jest operatorem samosprężonym. Fakt, że losowy operator samosprężony może mieć taką właściwość, był całkowicie niespodziewany.

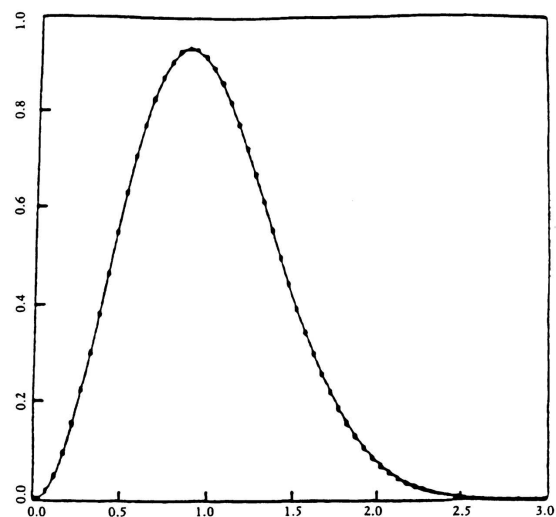
Wróć teraz do dynamiki płynów, dziedziny, której korzenie stanowią prace Eulera sprzed 250 lat oraz Naviera i Stokesa sprzed 150 lat. Pierwszy dowód istnienia rozwiązań zagadnienia początkowego dla tych równań przedstawił w 1934 r. Jean Leray dla przepływu nieściśliwego płynu Naviera–Stokesa w przypadku dwuwymiarowym. Znacznie gorzej przedstawia się sprawa w przypadku trójwymiarowym – znaleziono rozwiązania, które spełniają równania tylko w sensie uogólnionym, a ich jednoznaczność nie jest pewna. W ciągu następnych 70 lat dokonany został w tym względzie pewien postęp, ale bardzo umiarkowany. Uważa się, że problem nie jest natury czysto technicznej, lecz wiąże się z głębokim brakiem zrozumienia turbulencji.

Dla płynów ściśliwych teoria istnieje tylko w zarysie. W 1965 r. Jim Glimm zdołał wykazać, że dla dużej klasy równań jednej zmiennej, w tym równania Eulera dla przepływu płynu ściśliwego, zagadnienie początkowe ma rozwiązanie dla dowolnych wartości czasu o ile dane nie przybierają zbyt dużych wartości. Rozwiązania te zawierają nieciągłości typu fal uderzeniowych. Jednoznaczne równanie fizyczne jest wyznaczone przez warunek entropii.

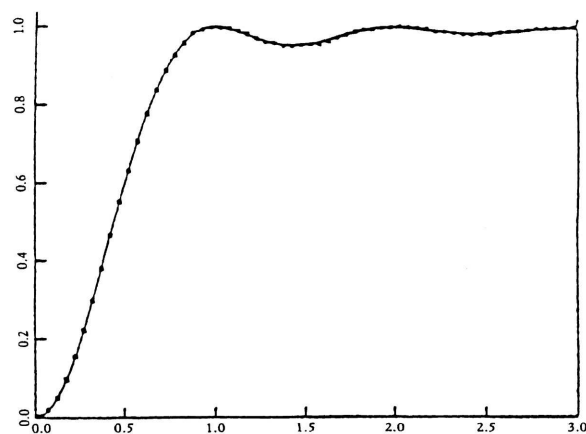
Tworzenie się fal uderzeniowych prowadzi do znacznej utraty informacji. Bardzo ciekawym zagadnieniem jest oszacowanie ilościowej utraty informacji dla płynu ściśliwego – jak dotąd, niewiele na ten temat wiadomo.

Nie znamy rozwiązania zagadnienia początkowego dla przepływu płynu ściśliwego w dwóch wymiarach, gdy powstają fale uderzeniowe, nie mówiąc już o przypadku trójwymiarowym. Można to nazwać naukowym skandalem, ale i wyzwaniem. Istnieje wprawdzie dobry opis stacjonarnego opływu ciał w dwóch wymiarach pod warunkiem, że prędkość przepływu nie jest naddźwiękowa, lecz w przypadku naddźwiękowym powstają fale uderzeniowe, a wraz z nimi – trudności teoretyczne.

To, że nie możemy udowodnić istnienia przepływów płynu ściśliwego dla określonych wartości początkowych, nie oznacza, że nie możemy ich obliczyć. Obliczenia, najmłodszy członek rodziny matematyki i fizyki, od narodzin pokazywały, że potrafią wiele. Rzeczywiście, mają imponujące dokonania. Na przykład, wszystkie samoloty wpro-



Rys. 4. Rozkład odstępów sąsiednich zer funkcji  $\zeta$  dla 70 mln zer poza pierwszymi  $10^{20}$  zerami w funkcji parametru  $\mu_1$  dla gaussowskiego zespołu macierzy unitarynych



Rys. 5. Korelacja par zer funkcji  $\zeta$  dla  $8 \cdot 10^6$  zer w pobliżu  $10^{20}$  zera w funkcji hipotetycznej gęstości dla gaussowskiego zespołu macierzy unitarynych  $1 - (\sin \pi x / \pi x)^2$

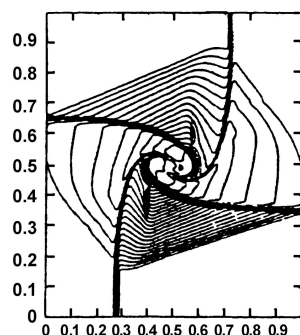
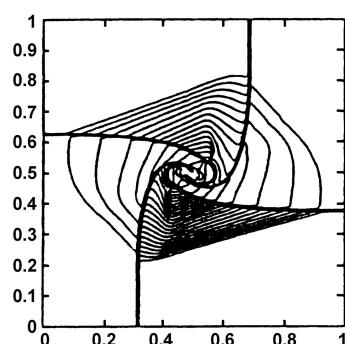
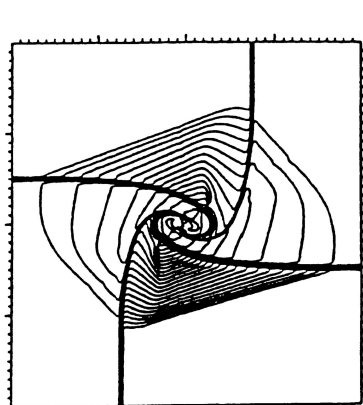
wadzone do użytku w ciągu ostatnich 10 lat, zaprojektowano przy użyciu komputerów. Można wyznaczyć numerycznie cechy przepływu powietrza wokół trójwymiarowego projektu samolotu przy założonej prędkości i obliczyć siłę nośną oraz opór aerodynamiczny. Zmieniając kształt pojazdu, powtarza się obliczenia, dążąc do zwiększenia siły nośnej i zmniejszenia oporu. Dopiero wtedy, gdy wyniki obliczeń są zadowalające, buduje się model pojazdu i testuje jego cechy w tunelu aerodynamicznym, by sprawdzić poprawność obliczeń.

W jakim stopniu można wierzyć wynikom obliczeń numerycznych, gdy nie potrafimy dać ścisłego dowodu, że odpowiedni proces jest zbieżny i że badany przepływ istnieje? Wykonanie za każdym razem doświadczenia fizycznego nie wchodzi w grę. Są jednak inne metody sprawdzenia wiarygodności obliczeń numerycznych – wystar-

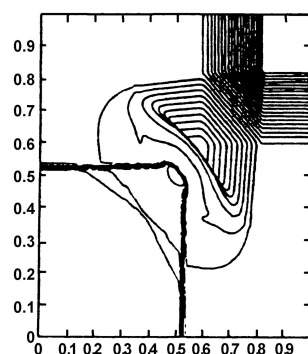
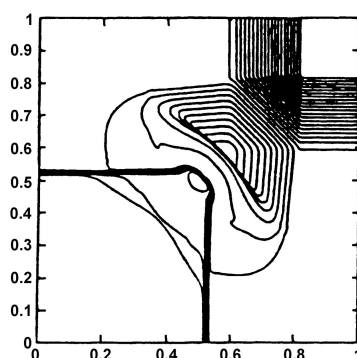
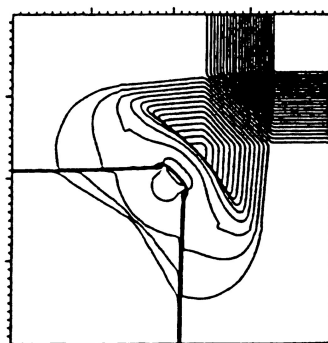
czy wykonać obliczenia różnymi metodami numerycznymi i porównać otrzymane wyniki. Jeśli są one ze sobą zgodne w rozsądnym stopniu, to w podobnym stopniu możemy ufać wynikom obliczeń.

Na rysunkach 6–11 przedstawiono przykład takiej procedury dla standardowego zagadnienia testowego – zagadnienia początkowego Riemanna w dwuwymiarowej dynamice gazu. Obliczenia wykonano w ten sposób, że

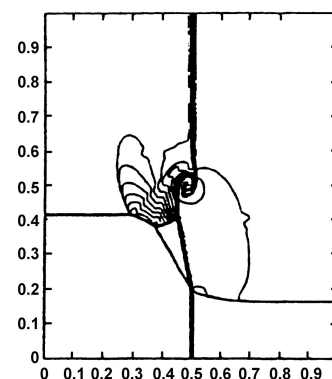
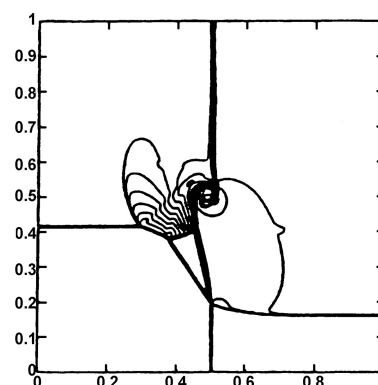
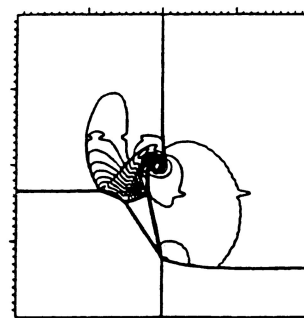
w czterech ćwiartkach płaszczyzny  $xy$  założono cztery różne stany stałe. Jest to najprostsze zagadnienie początkowe, lecz rozwiązanie okazuje się zadziwiająco skomplikowane. Na rysunkach podano linie stałej gęstości dla rozwiązania sześciu zagadnień Riemanna. Są to wyniki otrzymane przez trzy różne zespoły trzema różnymi metodami. Wyniki są zgodne w niezwykłym stopniu, nawet w najdrobniejszych szczegółach.



Rys. 6.



Rys. 7.



Rys. 8.

W roku 2007 mija 50 lat od śmierci von Neumanna, niewątpliwie jednego z największych i najbardziej wpływowych naukowców pierwszej połowy XX w. Wspomnieliśmy już o jego największych osiągnięciach z zakresu matematyki i fizyki. Był twórcą teorii gier, podstawowego narzędzia ekonomii. Był też jednym z wynalazców nowoczesnych komputerów, a także – co jest mniej znane –

jednym z twórców nowoczesnych metod komputerowych, w tym metod obliczeniowych dynamiki płynów.

Podczas II wojny światowej, gdy pracował w Los Alamos, von Neumann doszedł do wniosku, że metody analityczne nie wystarczą do budowy nowoczesnej broni i że jedyną metodą badania odpowiednich zagadnień matematycznych jest dyskretyzacja równań ciągłych i rozwiązanie

otrzymanych układów skończonej liczby równań metodami analizy numerycznej. Narzędziami niezbędnymi do skutecznego wykonania takich obliczeń są szybkie, programowalne komputery elektroniczne, pojemne układy przechowywania danych, języki programowania, metody dyskretyzacji równań różniczkowych cząstkowych i zróżnicowane algorytmy szybkiego rozwiązania zdyskretyzowanych równań. Pracy nad takimi narzędziami poświęcił von Neumann najwięcej energii w ciągu 10 ostatnich lat życia. Doskonale zdawał sobie sprawę z tego, że metody obliczeniowe mogą zrewolucjonizować nie tylko projektowanie nowych rodzajów broni, lecz i rozwiązywanie wielkiej mnogości zagadnień z zakresu nauki i techniki. Szczególnie intrygowały go zagadnienia badania klimatu i prognozowania pogody.

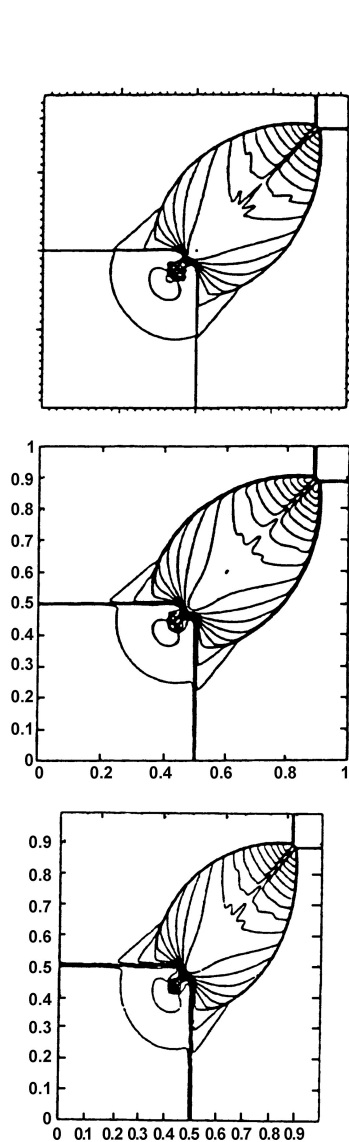
Był też świadom tego, że obliczenia to nie tylko potężne narzędzie do uzyskiwania – niejako siłą – odpowie-

dzi na konkretne pytania. Wykład wygłoszony w 1945 r. w Montrealu zakończył stwierdzeniem, że „w dziedzinie równań różniczkowych cząstkowych, a także w innych działach, w których badania są dziś trudne lub całkiem niemożliwe, bardzo szybkie komputery dostarczą nam wskazówek heurystycznych, umożliwiających prawdziwy postęp we wszystkich działach matematyki”.

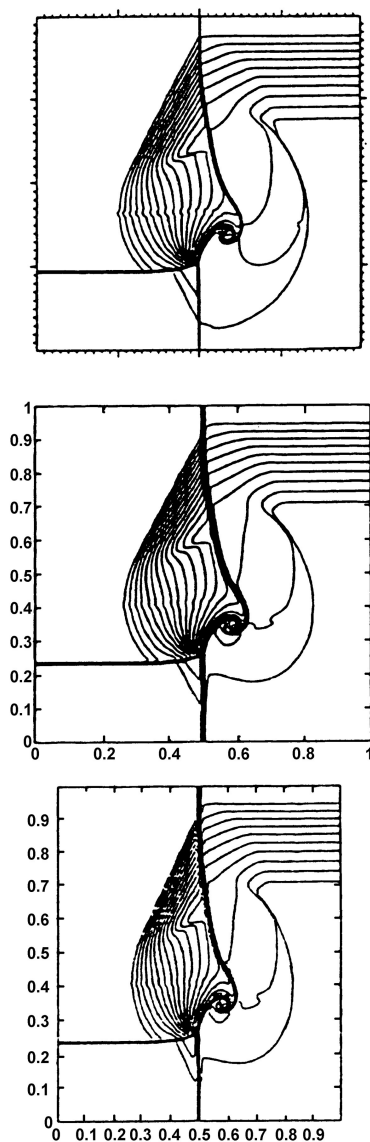
Właśnie w ten sposób doświadczenia numeryczne Kruskala i Zabusky’ego wskazały na pełną całkowalność równania Kortewega–de Vriesa. Nie ulega wątpliwości, że doświadczenia komputerowe staną się codziennością w większości badań matematycznych. Podobnie jak to, że matematyka i fizyka będą nadal pobudzać się wzajemnie.

Tłumaczył *Miroslaw Łukaszewski*

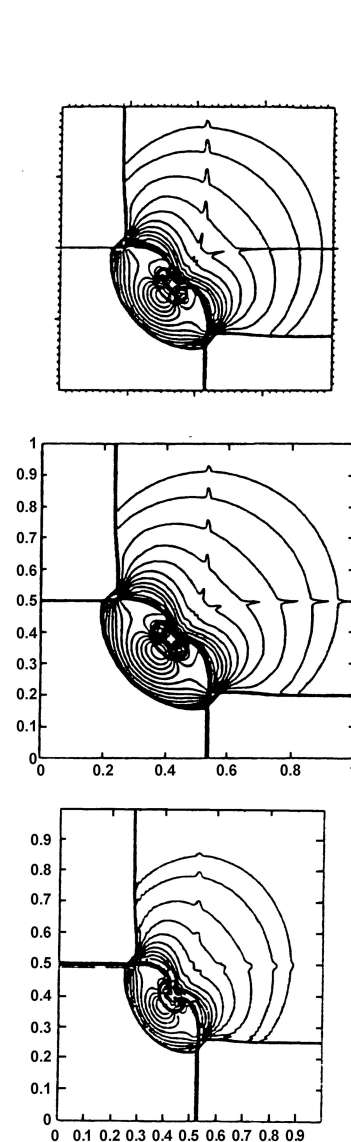
Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego  
Warszawa



Rys. 9.



Rys. 10.



Rys. 11.

## Literatura

- G.D. Birkhoff, „What is the ergodic theorem?“, *Amer. Math. Monthly* **49**, 222 (1942).
- L. Boltzmann, *Wissenschaftliche Abhandlungen* (Chelsea Pub. Co., New York 1968).
- D. Christodoulou, S. Klainerman, *The Global Nonlinear Stability of the Minkowski Space* (Princeton University Press, Princeton, NJ 1993).
- L. de Branges, „A proof of the Bieberbach conjecture“, *Acta Math.* **154**, 137 (1985).
- F. Dyson, „Statistical theory of the energy levels of complex systems I, II, III“, *J. Math. Physics* **3**, 140 (1962).
- F. Dyson, „Missed opportunities“, *Bull. Amer. Math. Soc.* **78**, 635 (1972).
- J.W. Gibbs, *The Collected Works of J. Willard Gibbs* (Longman's, Green and Co., 1931).
- J. Glimm, „Solutions in the large for nonlinear hyperbolic systems of equations“, *CPAM* **18**, 697 (1965).
- D. Gottlieb, C.-W. Shu, „On the Gibbs phenomenon and its resolution“, *SIAM Review* **39**, 644 (1997).
- E. Hewitt, R.E. Hewitt, „The Gibbs–Wilbraham phenomenon: an episode in Fourier analysis“, *Archive for History of Exact Sciences* **21**, 129 (1979).
- D. Hilbert, „Begründung der kinetischen Gastheorie“, *Math. Ann.* **72**, 562 (1912).
- S. Hou, X.-D. Liu, „Solutions of multi-dimensional hyperbolic systems of conservation laws by square entropy condition satisfying discontinuous Galerkin method“, *J. Sci. Computing* **31**, 127 (2007).
- A. Koestler, *The Sleepwalkers* (Penguin Books, 1959).
- J. Leray, „Sur le mouvement d'un fluide visqueux emplissant l'espace“, *Acta Math.* **63**, 193 (1934).
- X.D. Liu, P.D. Lax, „Solution of two-dimensional Riemann problems of gas dynamics by positive schemes“, *SIAM J. Sci. Comp.* **19**, 319 (1998).
- C. Loewner, „Untersuchungen über schlichte konforme Abbildungen des Einheitskreises I“, *Math. Ann.* **89**, 103 (1923).
- J.C. Maxwell, „A dynamical theory of the electromagnetic field“, *Phil. Trans. Royal Soc. London* **155**, 459 (1865); *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* (Scottish Acad. Press, 1982), s. 526.
- B.M. McCoy, „Introductory Remarks to Szegő's Paper »On Certain Hermitean Forms Associated with the Fourier Series of a Positive Function«“, w: *Gabor Szegő Collected Papers*, red. R. Askey, t. 1 (Birkhäuser, 1982), s. 47.
- O. Neugebauer, „Notes on Kepler“, *CPAM* **14**, 593 (1961).
- A. Odlyzko, „On the distribution of the spacing between the zeros of the  $\zeta$  function“, *Math. Comp.* **48**, 273 (1989).
- L. Onsager, „Statistical hydrodynamics“, *Nuovo Cimento Suppl.* **6**, 261 (1949).
- B. Riemann, „Über die Fortpflanzung ebener Luftwellen von endlicher Schwingungsweite“, *Collected Papers* (Springer Verlag, 1990), s. 188.
- E. Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics* (Blackie and Son Ltd., London 1928).
- C.W. Schultz-Rinne, J.P. Collins, H.M. Glaz, „Numerical solution of the Riemann problem for two-dimensional gas dynamics“, *SIAM J. Sci. Comp.* **14**, 1394 (1993).
- J. Schwartz, „The pernicious influence of mathematics on science“, w: *Logic, Methodology and Philosophy of Science*, red. E. Nagel, P. Suppes, A. Tarski (Stanford University Press, 1962).
- G. Szegő, „On certain Hermitean forms associated with Fourier series of a positive function“, *Comm. Sem. Math. Univ. Lund*, Tome Supplémentaire, Festschrift Marcel Riesz, Lund 1952, s. 228; *Gabor Szegő Collected Papers*, red. E. Askey, t. 3 (Birkhäuser, 1982), s. 270.
- J. von Neumann, „Proof of the Quasi-ergodic Hypothesis“, *NAS Proc.* **186**, 70 (1932); *Collected Works*, t. I (Pergamon Press, 1961).
- J. von Neumann, „Mathematische Begründung der Quantenmechanik“, *Goett. Nach.* (1927), s. 1; *Collected Works*, t. I (Pergamon Press, 1961).
- J. von Neumann, A.W. Burke, H.H. Goldstine, „Preliminary Discussion of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument“, *Collected Works*, t. V (Pergamon Press, 1963).
- W. Werner, „Random planar curves and Schramm–Loewner evolutions“, w: *Lectures on Probability Theory and Statistics*, Lecture Notes in Math., t. 1840 (Springer Verlag, 2004), s. 107.
- E. Wigner, „On the statistical distribution of the width and spacing of nuclear resonance levels“, *Proc. Cambridge Phil. Soc.* **47**, 790 (1951).
- E. Wigner, „Random Matrices in Physics“, *SIAM Review* **9**, 1 (1967).
- H. Wilbraham, „On certain periodic functions“, *Cambridge Dublin Math. J.* **3**, 198 (1848).
- E. Witten, „Magic, Mystery and Matrix“, w: *Mathematics: Frontiers and Perspectives*, red. V. Arnold, M. Atiyah, P. Lax, B. Mazur (Amer. Math. Soc., Providence, RI 2000), s. 343.

PETER DAVID LAX – matematyk amerykański, emerytowany profesor Uniwersytetu Nowojorskiego. Węgier z pochodzenia (ur. w 1926 r. w Budapeszcie), od roku 1941 mieszka w USA. Doktorat z matematyki uzyskał na Uniwersytecie Nowojorskim (1949), gdzie pracował od 1951 r. w Instytucie Couranta (w latach 1972–80 dyrektor tego Instytutu). Przez wiele lat związany także z Los Alamos Laboratory. Laureat wielu nagród naukowych, m.in. Nagrody Norberta Wienera (1975), Nagrody Wolfa (1987) oraz Nagrody Abela (2005). Tę ostatnią otrzymał za przełomowy wkład w teorię i zastosowania równań różniczkowych cząstkowych. Wielkie znaczenie miały też jego prace nad solitonami, entropią i falami uderzeniowymi. Autor wielu podręczników analizy funkcjonalnej, algebry liniowej, rachunku różniczkowego i równań różniczkowych cząstkowych.



## Konferencja ENAM '08

W dniach 7–13 września 2008 r. odbyła się w Rynie na Mazurach międzynarodowa konferencja na temat egzotycznych nuklidów i mas atomowych – ENAM '08. Badania nuklidów egzotycznych stanowią jeden z głównych nurtów współczesnej fizyki jądrowej. Przypomnijmy: egzotycznymi nazywamy krótkożyciowe nuklidy dalekie od ścieżki trwałości beta i nuklidy bardzo ciężkie. W Polsce ta tematyka jest uprawiana głównie przez fizyków z Krakowa, Lublina, Łodzi i Warszawy.

Nuklidom egzotycznym poświęcona była seria międzynarodowych konferencji „On Nuclides far from Stability”, z których pierwsza zorganizowana została w Lysekil (Szwecja) w 1966 r. Wcześniej, w Moguncji (RFN) w 1956 r., odbyła się pierwsza z konferencji poświęconych masom atomowym. Z biegiem czasu pomiary mas w coraz większym stopniu dotyczyły także nuklidów egzotycznych. Na początku lat dziewięćdziesiątych postanowiono obie serie konferencji połączyć.

Pierwsze spotkanie nowej serii, nazwanej ENAM (od Exotic Nuclei and Atomic Masses), zorganizowane zostało we Francji w 1995 r. Następne odbyły się w USA (1998), Finlandii (2001) i znowu USA (2004). O zorganizowanie kolejnej konferencji ubiegali się fizycy z Kanady, Polski i Włoch. Międzynarodowe gremium wybrało Polskę. Przygotowanie konferencji powierzono Markowi Pfütznerowi (Uniwersytet Warszawski). Organizacja konferencji była firmowana przez Uniwersytet Warszawski i Instytut Problemów Jądrowych. Lokalnym Komitetem Organizacyjnym kierował Marek Karny (UW). Konferencję zaplanowano na wrzesień 2008 r.

Tradycją konferencji „far from stability”, a później ENAM, było organizowanie spotkań w miejscach pięknych krajobrazowo i dalekich od dużych miast. Tym razem wybór padł na zamek w Rynie, na Mazurach. Zamek ten, zbudowany przez Krzyżaków w końcu XIV w., został ostatnio przerobiony na hotel, który – jak się okazało – bardzo dobrze nadaje się do organizowania dużych konferencji.

W ENAM '08 uczestniczyło 220 fizyków z 26 krajów. Tematyka konferencji, podana tu w nieco innym ujęciu niż w programie konferencji, obejmowała hasła: masy nuklidów, struktura i promieniotwórczość jąder, pierwiastki ciężkie, astrofizyka jądrowa, oddziaływania fundamentalne, momenty i promienie jąder, wiązki radioaktywne i reakcje jądrowe, techniki eksperymentu. Obrady wypełniły 5 dni, od poniedziałku 8 do piątku 12 września. Tylko część jednego popołudnia była przeznaczona na wycieczkę statkiem. Referaty trwały 25 lub 15 minut; po każdym z nich 5 minut przeznaczono na dyskusję. Ponadto, treści wybranych plakatów były zwięźle sygnalizowane w pięciominutowych wystąpieniach, bez czasu na dyskusję.

Przedstawione wyniki należy ocenić jako bogate, różnorodne, interesujące i ważne. Podamy kilka przykładów.

Wiele referatów i plakatów poświęconych było precyzyjnym pomiarom mas krótkożyciowych nuklidów przy

zastosowaniu pułapek jonowych. W tej dziedzinie, od ENAM '04, nastąpił ogromny postęp. Godne uwagi wyniki zostały uzyskane m.in. w instytucie GSI w Darmstadtzie (RFN), przy zastosowaniu urządzenia SHIPTRAP, tj. pułapki jonowej umieszczonej za separatorem produktów reakcji o nazwie SHIP. J. Bock i in. zmierzili m.in. masę skrajnie egzotycznego nuklidu  $^{147}\text{Tm}$ , który w stosunku do trwałego izotopu tulu-169 ma deficyt 22 neutronów. Na mapie nuklidów leży on poza linią odpadania protonu. Rozpada się na drodze emisji protonu ze stanu podstawowego z okresem połowicznego zaniku 0,6 s. Pomiar masy z dokładnością  $\pm 10 \text{ keV}/c^2$ , tj. błędem względnym  $7 \cdot 10^{-8}$ , jest w tym przypadku osiągnięciem znakomitym. Wiele wartościowych wyników uzyskano przy zastosowaniu pułapek w innych ośrodkach, np. w cyklotronowym laboratorium Uniwersytetu w Jyväskylä (Finlandia).

Prace nad zastosowaniem pułapek Penninga do dokładnego pomiaru mas egzotycznych nuklidów podjęli w latach osiemdziesiątych fizycy niemieccy związani z programem ISOLDE w CERN-ie. Pionierzy – H.-J. Kluge, F. Hertfurth i G. Bollen – zostali wyróżnieni prestiżową nagrodą IUPAP-u, którą wręczono im w czasie konferencji w Rynie. Laureaci wygłosili referaty na temat historii stosowania pułapek do badania nuklidów egzotycznych, aspektów technicznych pomiarów mas i perspektyw na przyszłość. W trakcie konferencji wręczono również nagrody im. Zdzisława Szymańskiego, przyznawane przez dziekana Wydziału Fizyki UW za osiągnięcia w badaniach struktury jąder. W edycji międzynarodowej laureatem został Benoit Gall ze Strasburga, a w edycji krajowej – Adam Klimkiewicz z UJ w Krakowie. Obaj wygłosili referaty.

Wyróżniona praca doktorska Klimkiewicza jest przykładem zastosowania wiązek radioaktywnych (eksperyment w GSI) do badania wzbudzeń elektromagnetycznych jąder bardzo dalekich od stabilności.

Z prac poświęconych promieniotwórczości na wyróżnienie zasługuje niewątpliwie drugi etap badania rozpadu dwuprotonowego jądra  $^{45}\text{Fe}$ . Ten proces został odkryty przez Marka Pfütznera i in. w 2002 r., jednak bez obserwacji pary protonów. Dzięki współpracy zespołu Wojciecha Dominika (UW) z zespołem Pfütznera powstał niezwykle wyrafinowany detektor gazowy, który został wykorzystany w eksperymencie w Uniwersytecie Stanu Michigan (USA). Dla około 100 przypadków zaobserwowane zostały tory par protonowych. Zmierzony został rozkład kątowy protonów, co pozwoliło na wnikięcie w istotę procesu. Wyniki w świetnym referacie przedstawił Zenon Janas.

Miło nam stwierdzić w tym miejscu, że wkład naukowy polskich fizyków, tych, którzy pracują w Polsce i tych działających w ośrodkach zagranicznych, był w czasie ENAM '08 bardzo poważny i wyraźnie widoczny.

Jako przykład pełnej sesji omówimy krótko sesję pierwiastków ciężkich. W sesji tej przedstawionych zostało pięć referatów. W pierwszym z nich Yu.Ts. Oganessian (Dubna, Rosja) omówił prace nad syntezą i badaniem własności jąder superciężkich, prowadzone w Laboratorium

Reakcji Jądrowych im. G.N. Florowa Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych w Dubnej. W Laboratorium tym zostało wytworzonych w ostatnich latach pięć najcięższych pierwiastków o liczbie atomowej  $Z = 113-118$  (z wyjątkiem  $Z = 117$ ), które nie mają jeszcze nazwy. Trudność z otrzymaniem pierwiastka 117 pochodzi głównie z trudności wytworzenia tarczy. Przy używanych w Dubnej pociskach wapnia-48 o  $Z = 20$  (za pomocą których zostało w Dubnej wytworzonych ponad 30 nowych nuklidów superciężkich) tarcza powinna być zbudowana z berkelu ( $Z = 97$ ). Wytworzenie dostatecznej ilości materiału tego ciężkiego, promieniotwórczego pierwiastka, w dużym, wysokostrumieniowym reaktorze wymaga około roku pracy i łączy się z kosztem około dwóch milionów dolarów USA. Reaktory takie istnieją tylko w USA i Rosji. Jest możliwe jednak, że mimo tych kosztów tarcza taka zostanie wytworzona wspólnym wysiłkiem fizyków rosyjskich (Dubna) i amerykańskich (Livermore) i podjęta będzie próba syntezy pierwiastka 117.

Drugim wykładowcą tej sesji był Andreas Türler, kierownik monachijskiej grupy radiochemicznej w Garching. Referat swój poświęcił on omówieniu chemicznych metod identyfikacji wytworzonego pierwiastka superciężkiego. Dokonał tego na przykładzie pierwiastka 112, najcięższego z tych, które zostały zidentyfikowane w ten sposób. Metody chemiczne są bardzo ważnymi metodami identyfikacji pierwiastków, alternatywnymi do metod fizycznych.

Trzeci wykład, poświęcony rodzącej się właśnie spektroskopii  $\gamma$  najcięższych jąder, wygłosił Rolf-Dietmar Herzberg (Liverpool, Anglia). Spektroskopia ta, połączona ze

spektroskopią  $\alpha$ , pozwoli na znacznie dokładniejsze poznanie własności tych jąder niż uprawiana dotychczas sama spektroskopia  $\alpha$ .

Dwa ostatnie krótkie referaty tej sesji były tylko wprowadzeniem do wyników przedstawionych na plakatach.

Z wielu innych referatów konferencji, na uwagę zasługuje m.in. wystąpienie J. Hardy'ego z Uniwersytetu Teksaskiego, w którym pokazał, jak poważny jest wkład fizyki jądrowej do wykazania unitarności macierzy Cabbibo-Kobayashi-Maskawy. Interesujący był także referat H. Schatza poświęcony egzotycznym nuklidom w Kosmosie. Oczywiście, nie sposób wymienić tu wszystkie wystąpienia godne uwagi. Podsumowania konferencji dokonał Witold Nazarewicz. Teksty referatów będą dostępne w specjalnym zeszycie *European Physical Journal*.

Mimo modernizacji zamku w Rynie, związki tego gmachu z historią były wyraźnie wyczuwalne. Dobrze się stało, że organizatorzy zaprosili Michała Targowskiego, historyka z Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, do wygłoszenia w drugim dniu konferencji, wieczorem, wykładu na temat historii ziemi mazurskiej i zamku w Rynie.

Bardzo dobra organizacja konferencji i jej wysoki poziom naukowy spotkały się z powszechnym uznaniem. Organizatorom należą się podziękowania i gratulacje.

*Adam Sobiczewski*

Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana  
Warszawa

*Jan Żylicz*

Instytut Fizyki Doświadczalnej  
Uniwersytet Warszawski

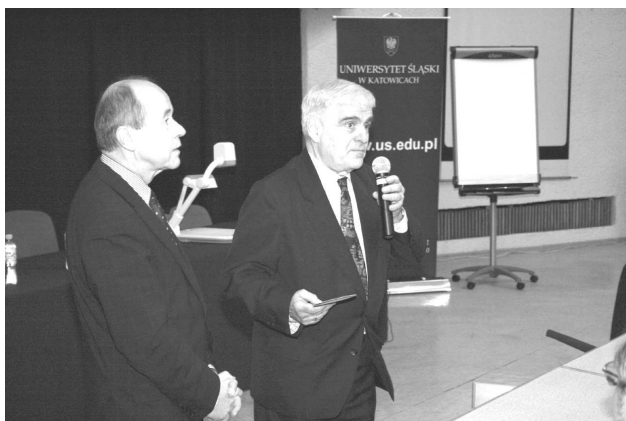
## Oblicza fizyki – między fascynacją a niepokojem Rola fizyki w rozwoju naszej cywilizacji i kultury Czwarta dyskusja panelowa oraz Tezy do dyskusji

12 grudnia 2008 r. w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach odbyła się czwarta coroczna dyskusja panelowa na powyższy temat. Miałem zaszczyt już po raz czwarty być przewodniczącym jej Komitetu Organizacyjnego. Pierwsza taka dyskusja odbyła się w roku 2005, następne w latach 2006, 2007 i 2008. Sprawozdania z trzech poprzednich zamieszczone są w *PF* 57, 83 (2006), 58, 184 (2007) i 59, 178 (2008).

Czwarta dyskusja panelowa miała swój temat przewodni „Fizyka – biologia – filozofia”, ale oczywiście – jak zwykle – nie obyło się bez różnych innych kontrapunktów tematycznych. Celem była – podobnie jak w trzech poprzednich dyskusjach – kolejna próba ukazania przedstawicielom innych nauk oraz sztuk, a także całemu społeczeństwu oraz władzom, roli fizyki jako fundamentu naszej cywilizacji i kultury. Chcieliśmy ukazać rozmaite oblicza fizyki, która nie tylko fascynuje, lecz także może wywoływać niepokój. Prócz tego wciąż pragniemy zasypać przynajmniej częściowo rów pojęciowy między fizykami a resztą społeczeństwa

wynikający m.in. z tego, że społeczeństwo jest wciąż za mało świadome znaczenia i osiągnięć fizyki oraz tego, jak głęboko nasze życie i egzystencja są zanurzone w morzu pojęć fizyki i urządzeń technicznych wytworzonych w oparciu o jej idee. Fizyka jest właściwie kamieniem węgielnym naszej cywilizacji i kultury. Kształtuje ona nasz pogląd na świat. Dzięki fizyce poznajemy Naturę, począwszy od skali cząstek elementarnych a skończywszy na skali Wszechświata. Nauki techniczne są w istocie zastosowaniami fizyki, nauki zaś przyrodnicze są po prostu jej działami. Dotyczy to w szczególności medycyny, wszystkie bowiem procesy biologiczne znajdują prawidłowe wyjaśnienie w kategoriach pojęć i praw fizyki. Przewiduje się, że w XXI stuleciu fizyka nadal będzie siłą sprawczą rozwoju naukowego, technicznego i ekonomicznego w skali świata. Jej wkład będzie istotny dla rozwiązania takich globalnych i fundamentalnych problemów, jak: produkcja i składowanie energii oraz nowe jej źródła, nowe materiały, w szczególności te otrzymane przy użyciu nanotechnologii, tech-





Andrzej Kowalczyk – Prorektor ds. Nauki i Współpracy z Gospodarką UŚ (z lewej) i Jerzy Warczewski – Przewodniczący Komitetu Organizacyjnego (fot. Agnieszka Sikora)

nika przekazu informacji klasycznej i kwantowej, transport, zmiany klimatu, ochrona środowiska i ochrona zdrowia społeczeństwa, budowa genomu i proteomu. Trzeba sobie wreszcie zdać sprawę, że w dzisiejszych czasach człowiek kulturalny to nie tylko człowiek, który zna literaturę, muzykę, malarstwo i inne sztuki, lecz także człowiek, który zna fundamentalne prawa fizyki i umie je wytłumaczyć innym. Proponowany punkt wyjścia do dyskusji – oczywiście w żadnym wypadku nie ograniczający inwencji uczestników – stanowiły jak zwykle: po pierwsze jej temat, a prócz tego tezy mojego autorstwa (nieco zmienione i uzupełnione w porównaniu do ich pierwotnej wersji z pierwszych trzech dyskusji) oraz rezolucja Graz Forum on Physics and Society, której jestem współautorem oraz sygnatariuszem (patrz [www.wyp2005.at](http://www.wyp2005.at), zakładka Graz Forum Physics and Society, wybrać resolution).

Program dyskusji był podzielony na cztery sesje. W Sesji I, zatytułowanej „Medycyna, biologia, mózg i umysł”, już z pierwszego wykładu „Rozwój chirurgii szczękowo-twarzowej na przestrzeni wieków” powstała Wielka Medycyna. Przedstawił go prof. Tadeusz Cieślik (Kierownik Katedry i Kliniki Chirurgii Czaszkowo-Szczękowo-Twarzowej, Śląski Uniwersytet Medyczny). „Potrójna” chirurgia czaszkowo-szczękowo-twarzowa należy do najtrudniejszych rodzajów chirurgii. Wykład dotyczył podwójnego jej wcielenia, tj. chirurgii szczękowo-twarzowej. Trzeba sobie zdać sprawę z tego, że wszystko to dzieje się w czasie. Na przykład, wspomnijmy tu terapię chirurgiczną raka żuchwy, czyli szkliviaka. Otóż podczas operacji najpierw usuwa się zdegenerowaną tkankę żuchwy, a potem przy tej samej narkozie wycina się pacjentowi kawałek kości biodrowej i wszczepia w miejsce usuniętej tkanki. Zwykle umacnia się ten przeszczep za pomocą specjalnej blaszki ze stopu z pamięcią kształtu. Taki zabieg operacyjny należy do technik odtwórczej chirurgii twarzoczaszki. Innym przykładem takiej chirurgii jest implantacja całego uzębienia.

Następnie wykład „Czym różni się biologia od fizyki i co z tego wynika?” przedstawił prof. Andrzej Elżanowski (Kierownik Zakładu Zoologii Kręgowców, Instytut Zoologii,

Uniwersytet Wrocławski). Część biologii odpowiadająca na pytania „jak” jest zastosowaniem fizyki, ponieważ rozmaite procesy biologiczne, w tym fizjologiczne, a także działanie rozmaitych narządów, np. serca, dają się opisać i wyjaśnić, przynajmniej do pewnego stopnia, za pomocą praw fizyki. Prawa te opisują także reakcje chemiczne zachodzące w organizmach, ponieważ reakcje te na poziomie molekularnym są także zjawiskami fizycznymi. Jednak inna część biologii, biologia ewolucyjna odpowiadająca na pytania „dlaczego”, do wyjaśniania historycznych przemian organizmów nazywanych ewolucją posługuje się biologicznym prawem systemowym, jakim jest dobór naturalny. Metodologicznie ta część biologii zbliża się według Autora do niektórych dziedzin tradycyjnie zaliczanych do nauk humanistycznych i jest obca fizyce.



Wykłada Tadeusz Cieślik, siedzą od lewej: 1. rząd – ks. Jerzy Knappik (Wiedeń), 2. rząd – Wiesław Kamiński, Tadeusz Sławek, 3. rząd – Krzysztof Wieczorek (UŚ), Jerzy Łuczka (UŚ), Jadwiga Horodecka, Ryszard Horodecki, 4. rząd – Jerzy Jaroś (UŚ), Andrzej Elżanowski, 5. rząd – Artur Starczewski (UŚ), 6. rząd – Karol Pasterny (UŚ), Zygmunt Gburski (UŚ) (fot. Agnieszka Sikora)

Ostatni w tej sesji wykład „Symulacje mózgu: skąd przybywamy, kim jesteśmy, dokąd idziemy?” przedstawił prof. Wiesław Kamiński (dotychczasowy Rektor Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Kierownik Zakładu Układów Złożonych i Neurodynamiki, Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki, UMCS, Lublin) dając przegląd symulacji jednego z najbardziej złożonych układów we Wszechświecie, jakim jest mózg homo sapiens. Symulacje te, wykraczając poza li tylko modele struktury, stawiają w nowym świetle fundamentalne kwestie istoty umysłu zdolnego nie tylko do formułowania pytań, takich jak te w tytule wykładu pochodzące od Paula Gauguina, ale i nienasyconego w poszukiwaniu odpowiedzi na pytania o swoje pochodzenie, zakorzenienie i przyszłość.

Sesja II, zatytułowana „Struktura materii, komunikacja kwantowa, neutrino – nosiciele informacji o ewolucji Wszechświata” ukazała już zupełnie inny świat. Na początek prof. Stefan Pokorski (Kierownik Katedry Teorii Cząstek i Oddziaływań Elementarnych, Instytut Fizyki Teore-

tycznej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski) w wykładzie „LHC – początek nowego rozdziału w badaniu struktury materii i historii Wszechświata” przedstawił jako gigantyczny krok naprzód w kontekście historii badań oddziaływań elementarnych i ich znaczenia dla rozwoju naszej cywilizacji i kultury niezwykłą maszyną budowaną przez ostatnie 25 lat w CERN-ie: Large Hadron Collider (LHC) – Wielki Zderzacz Hadronowy. Ma ona posłużyć ludzkości do wydarcia Przyrodzie niezwykłych tajemnic. Chodzi tu z jednej strony o te oczekiwane, tj. o odkrycie pola Higgsa będącego przyczyną istnienia masy, o znalezienie przykładów istnienia supersymetrii, czyli symetrii między takimi fundamentalnymi składnikami materii jak bozony i fermiony, czy wreszcie o znalezienie wyższych wymiarów przestrzennych. Z drugiej zaś strony chodzi tu także o możliwość zaobserwowania zupełnie nowych, nieoczekiwanych zjawisk.

Drugi mówca w tej sesji prof. Paweł Horodecki (Katedra Fizyki Teoretycznej i Informatyki Kwantowej, Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechnika Gdańska) w wykładzie „Osobliwy świat kwantowej komunikacji” wprowadził nas w świat bitów kwantowych, teleportacji oraz kryptografii kwantowej. Przybliżył fenomen stanów splątanych i ich nietypowych zachowań jako źródła osobliwości komunikacji kwantowej.



Siedzą od lewej: 1. rząd – Tadeusz Sławek, 2. rząd – Jadwiga Horodecka, Ryszard Horodecki, Andrzej Zięba (AGH), 3. rząd – Andrzej Elżanowski, Iwona Elżanowska, Stefan Kruszewski (UMK) (fot. Agnieszka Sikora)

Ostatni mówca w tej sesji prof. Jan Kisiel (Zakład Fizyki Jądrowej, Instytut Fizyki, Uniwersytet Śląski) w wykładzie „Tajemnice neutrino” mówił o tych chyba najdziwniejszych cząstkach elementarnych. Usłyszeliśmy o ich pochodzeniu, naturze, rodzajach i właściwościach, oraz o tym, że neutrino przynoszą – w zależności od tego skąd przybywają – informacje o ewolucji Wszechświata, począwszy niemal od Wielkiego Wybuchu, a także informacje o reakcjach jądrowych zachodzących wewnątrz gwiazd, w szczególności wewnątrz Słońca, i wreszcie informacje o podobnych reakcjach zachodzących w jądrze Ziemi. Usłyszeliśmy również o metodach detekcji (bardzo trudnej zresztą) tych niezwykłych cząstek.

Sesję III noszącą tytuł „Poezja w fizyce, nauka i Natura, muza astronomii” rozpoczął niecodziennym wystąpieniem „Przestrzeń między Naturą a słowem” prof. Ryszard Horodecki (Dyrektor Krajowego Centrum Informatyki Kwantowej, Kierownik Zakładu Optyki i Informacji Kwantowej, Instytut Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki, Uniwersytet Gdański). Tegoroczny laureat Nagrody FNP w obszarze nauk ścisłych i autor również kilku tomików poezji inspirowanej fizyką, tym razem opowiedział o tych swoich poetyckich doświadczeniach. Przestrzeń między Naturą a słowem jest dla niego wypełniona poezją. Co więcej, tak jak fizyka inspirowała jego wyobraźnię poetycką, tak poezja inspirowała go jako badacza Natury.

Następny wykład „Czy współczesna nauka dociera do Natury?” wygłosił ks. prof. Janusz Mączka SDB (Katedra Filozofii Przyrody, Wydział Filozoficzny, Papieska Akademia Teologiczna, Kraków). Filozof, teolog i fizyk w jednej osobie próbuje odpowiedzieć na fundamentalne pytanie postawione w tytule swojego wykładu, przy czym używa pojęcia „Natura” w znaczeniu „istota rzeczy”. Dawne (np. newtonowskie) pojęcie „filozofii naturalnej” jest możliwe do uchwycenia również w dzisiejszych warunkach. Warunki te ustawiane są zarówno przez filozofię, jak i przez naukę. W tym przypadku np. badanie „istoty rzeczy” może być rozumiane jako badanie struktury matematycznej zjawiska czy procesu fizycznego. Podejście to może nie daje poczucia rozwiązania uniwersalnego i ostatecznego, ale przynajmniej mocno trzyma się realizmu ontologicznego i poznawczego.

Dr Stanisław Bajtlik (Centrum Astronomiczne Mikołaja Kopernika, Warszawa) miał mieć wykład „Dlaczego astronomia ma swoją muzę, a inne nauki nie?”. Laureat tegorocznej Nagrody im. Krzysztofa Ernsta, tj. nagrody Polskiego Towarzystwa Fizycznego za popularyzację nauki, skoncentrował się na wielowiekowych więzach astronomii z naszą cywilizacją i kulturą. Nawiązał do proklamowanego przez ONZ Światowego Roku Astronomii 2009. To właśnie w tym roku będziemy obchodzić 400-lecie użycia pierwszy raz przez Galileusza lunety astronomicznej. Z wykładu można było dowiedzieć się również, jaką muzę ma astronomia, oraz poznać odpowiedź na pytanie postawione w tytule wykładu. Dr Bajtlik w ostatniej chwili musiał odwołać z przyczyn obiektywnych swój przyjazd do Katowic.

Sesja IV zatytułowana „Matematyczność przyrody, matematyka, filozofia” miała się zacząć wykładem „O matematyczności przyrody”, którego autorem jest prof. Andrzej Staruszkiewicz (dotychczasowy Kierownik Zakładu Teorii Względności i Astrofizyki, emerytowany profesor fizyki, Instytut Fizyki, Uniwersytet Jagielloński). Chodzi tu o fakt, że wszystkie prawa fizyki mają formę matematyczną. Stwierdzenie to samo w sobie jest (fundamentalnym) prawem fizyki. To właśnie na tej podstawie możemy mówić o matematyczności przyrody. Prof. Staruszkiewicz był zmuszony w ostatniej chwili odwołać z przyczyn obiektywnych swój przyjazd.

Wykład „Osobliwe twory matematyczne” wygłosił prof. Jerzy Mioduszewski (emerytowany profesor matematyki, Instytut Matematyki, Uniwersytet Śląski). Usłyszeli-

śmy rozważania o specyficznych konstrukcjach myślowych, które są wprawdzie wewnętrznymi pojęciami matematyki (np. pierwiastek z minus jeden, punkty w nieskończoności, kontinuum matematyczne), ale które sprawiają uwolnienie pewnych procesów myślowych prowadzących do rozwinięcia kompletnych i użytecznych teorii mających także znaczenie dla nauk przyrodniczych.

Ostatni w tej sesji – i w całej konferencji – wykład zatytułowany „Jak może realizować się w przyszłości związek filozofii z fizyką?” wygłosił prof. Wiesław Szumski (emerytowany profesor filozofii, Instytut Filozofii, Uniwersytet Śląski). Zauważył on, że od pewnego czasu związek filozofii z fizyką ulega stopniowemu osłabieniu z różnych przyczyn. Wprawdzie fizyka może rozwijać się bez filozofii, która z pewnością nie stanowi przesłanki dla rozwoju fizyki, ale pośrednio wpływa na jej rozwój poprzez uwarunkowania kulturowe. Natomiast filozofia niespekulatywna powinna uwzględniać odkrycia fizyki. Autor poświęcił wykład głównie uzasadnieniu hipotezy, że obie te dziedziny wiedzy będą rozwijać się coraz bardziej niezależnie od siebie.

Niezwykle ciekawa i bogata dyskusja podsumowująca trwała prawie dwie godziny i stanowiła ukoronowanie całej konferencji. Dyskusję tę prowadzili: prof. Ryszard Horodecki (wspomniany wyżej) i prof. Tadeusz Sławek (były Rektor Uniwersytetu Śląskiego, filolog polski i angielski, poeta, filozof, Kierownik Katedry Literatury Porównawczej, Wydział Filologiczny, Uniwersytet Śląski).

Podobnie jak podczas pierwszych trzech, tak i w tej dyskusji wzięło udział wielu znakomitych przedstawicieli nauk przyrodniczych i matematycznych, nauk humanistycznych, w tym nauk filozoficznych i teologicznych, artystów oraz przedstawicieli nauk technicznych, wszystkich w liczbie około 350 osób. Pragnę dodać, że cała konferencja, tj. cała Czwarta Dyskusja Panelowa była filmowana w sposób profesjonalny, zamierzamy bowiem wydać kompletne materiały z tej Dyskusji w postaci płyt DVD.

Poniżej przedstawiam mojego autorstwa Tezy do Dyskusji Panelowej, z których jasno wynika fundamentalna i uniwersalna rola fizyki w rozwoju naszej cywilizacji i kultury.

**Tezy Dyskusji** (poniższe 12 tez oraz towarzyszące im szczegółowe hasła nie stanowią listy zamkniętej)

1) Definicja cywilizacji i kultury. Cywilizacja jako kultura materialna. Kultura jako cywilizacja ducha. Na czym polega ich rozwój? Bliskość obu tych pojęć.

2) Czym jest fizyka? Przedmiot fizyki. Hierarchia praw fizyki. Fundamentalne prawa fizyki. Teoria i eksperyment. Eksperymenty myślowe. Kanon (współczesnej) wiedzy fizycznej. Niekompatybilność dwóch fundamentalnych teorii: mechaniki kwantowej i ogólnej teorii względności. GPS – najbardziej zdumiewający przyrząd naszych czasów, którego działanie wymaga precyzyjnego zastosowania obu tych teorii, a także szczególnej teorii względności! Informacja i informatyka klasyczna oraz kwantowa! Nanotechnologia. Energia i energetyka. Przekaz wiedzy (fizycznej) jest tak samo ważny jak sama wiedza. W związku z tym właściwa dy-

daktyka na każdym szczeblu edukacji (popularyzacji) jest nie do przecenienia.

3) Etyczny wymiar zastosowań fizyki. Liczne idee i wynalazki fizyki mogą być użyte zarówno dla dobra człowieka jak też i dla jego zagłady, podobnie jak – jeden z najstarszych wynalazków – nóż może służyć nie tylko do krojenia chleba w celu podzielenia się nim z bliźnim, lecz także do wbicia bliźniemu w plecy. W poczynaniach zatem fizyków (i wszelkich uczonych) potrzebna jest etyka.

4) Fizyka a nauki przyrodnicze. Nauki przyrodnicze, w szczególności medycyna, jako działy fizyki. Tak pojęta fizyka stanowi najbardziej ogólną naukę o przyrodzie. Dwa aspekty medycyny: przyrodniczy i humanistyczny. Metody fizyczne badania genomu i proteomu. Metody fizyczne badania morfologii, skorupy i wnętrza Ziemi.

5) Fizyka a nauki techniczne. Fizyka fundamentem nauk technicznych. Nauki techniczne fundamentem naszej cywilizacji. Kultura przenika całą tę konstrukcję i wyrasta ponad nią.

6) Fizyka a kosmologia. Wielki Wybuch i ekspansja Wszechświata. Astrofizyka. Teoria kosmologicznej inflacji. Teoria strun i Wszechświat przed Wielkim Wybuchem. Wszechświaty równoległe. „Atomy” czasu i przestrzeni.

7) Fizyka a filozofia. Filozofia przyrody. Rola matematyki w opisie i rozumieniu przyrody. Człowiek jako podmiot i przedmiot fizyki (nauki). Ewolucjonizm teistyczny (kreacjonizm) i ateistyczny. Zdolności poznawcze człowieka a ewolucja. Zasada antropiczna i podobne koncepcje. Istniejący obiektywnie świat. Sześć cytatów (z wielu możliwych) jako punkty odniesienia: „Pierwsza mowa szatana do rodu ludzkiego zaczęła się najskromniej od słowa: dlaczego?” (Adam Mickiewicz), „Jest pięć tysięcy pytań gdzie, siedem tysięcy pytań jak i sto tysięcy pytań dlaczego” (Rudyard Kipling), „Dla nich, powiedziałem, prawda nie byłaby niczym innym, tylko cieniami obrazów” (Platon, *Rzeczpospolita*), „Jest tylko jedno dobro, mianowicie wiedza, i tylko jedno zło, mianowicie ignorancja” (Sokrates), „Tej małej części ignorancji, którą porządkujemy i klasyfikujemy, nadajemy imię wiedzy” (Ambrose Bierce), „Wiem, że nic nie wiem” (Sokrates).

8) Fizyka (nauka) a wiara (religia). Przedmiot fizyki i przedmiot wiary są różne. Dwa cytaty (z wielu możliwych) jako punkty odniesienia: „Nauka bez religii jest ułomna, religia zaś bez nauki ślepa” (Albert Einstein), „Wiara i rozum są jak dwa skrzydła, na których duch ludzki unosi się ku kontemplacji prawdy” (Jan Paweł II).

9) Fizyka a sztuka. Fizyka jako opis stanów Przyrody. Sztuka jako przedstawienie stanów Ducha. Symetria i jej łamanie w Przyrodzie i w Sztuce.

10) Uczony a artysta. Co ich łączy? Co ich odróżnia? Co mają sobie nawzajem do zaoferowania?

11) Różnice i podobieństwa sensu poszukiwań twórczych. Różnice i podobieństwa sensu poszukiwań twórczych w fizyce oraz innych naukach przyrodniczych, a także w naukach technicznych, w naukach humanistycznych i w sztuce.

12) Zastosowania aparatu myślowego fizyki w innych dziedzinach. Na przykład w socjologii, ekonomii (ekonofizyka), grach rynkowych etc.

Jerzy Warczewski  
Instytut Fizyki UŚ  
Katowice

## 50 teorii fizyki

Joanne Baker: *50 teorii fizyki, które powinienś znać*, przekład Katarzyna Surowiecka, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008, s. 248.

Recenzowana książka jest polskim tłumaczeniem drugiego tomu z serii „50 ideas of...” brytyjskiego wydawnictwa Quercus, w której wydano dotąd także tomy poświęcone matematyce, filozofii i zarządzaniu. W założeniu, seria ta ma przedstawiać podstawowe pojęcia różnych działów wiedzy dla niefachowych czytelników. Polskie wydanie ukazuje się już w półtora roku po brytyjskim. Nie jest to oczywiście pierwsza pozycja popularyzująca fizykę, ale chyba pierwsza, która obejmuje równocześnie i fizykę Hooke’a, Newtona, Bernoulliego, Huygensa czy Dopplera, i fizykę kwantową, teorie czasoprzestrzeni, jądra i cząstek, aż do teorii strun, inflacji, ciemnej materii i energii.

Na ostatniej stronie okładki możemy przeczytać „Książka zawiera 50 pasjonujących, świetnie napisanych esejów, które prezentują najważniejsze koncepcje w dziedzinach fizyki, słynne odkrycia naukowe i prawa fizyczne”. W ten sposób polski wydawca dezawuuje własną tłumaczkę, bo przecież „koncepcje” (oddające nieźle „ideas” z angielskiego tytułu), to nie to samo, co „teorie”. Niestety uważna lektura książki nasuwa wiele podobnych niepoehlebnych uwag.

Należy oczywiście pochwalić pomysł popularyzacji fizyki przez wydanie przystępnej, pozbawionej praktycznie wzorów prezentacji wielu pojęć i odkryć połączonej z notkami biograficznymi, interesującymi i/lub zabawnymi cytatai i tabelkami chronologicznymi, a przy tym opatrzonej indeksami. Osoba Autorki, doktora fizyki i redaktorki *Science* odpowiedzialnej za dział nauk o Ziemi i Kosmosie, wydawała się gwarancją rzetelności przedsięwzięcia. A jednak...

Wątpliwości budzi już układ i porządek tematów. Obawiam się, że rozpoczynanie popularnej książki od zasady Macha działa podobnie, jak (zdaniem większości wydawców) zaczynanie od wzoru: zmniejsza o połowę liczbę czytelników. Problem (nie)istnienia wyróżnionego układu odniesienia we Wszechświecie jest chyba zbyt trudny dla laików, a do tego ujęcie tematu jest raczej dyskusyjne.

Jednak znacznie poważniejsze zastrzeżenia dotyczą ścisłości wielu tekstów i pracy wydawnictwa. Już we wstępie Autorka każe nam uwierzyć, że każdy telefon komórkowy łączy się z satelitą, w eseju o teorii grawitacji Newtona brak jasnego stwierdzenia, że wynikają z niej wszystkie omówione wcześniej prawa Keplera, a dyskusja „równoważności masy i energii” jest bałamutna i myląca. Przy opisie efektu Dopplera Autorka sugeruje, że astronomowie analizują ten efekt dla „światła odbitego od planety krążącej dookoła odległej gwiazdy”, gdy w rzeczywistości rejestruje się te efekty oczywiście dla samej gwiazdy. Takich „wpadek” jest niestety w książce znacznie więcej, a ich ukoronowaniem jest uwaga o oddziaływaniu Higgsa, które „działa silniej na bozony W i Z niż na fotony, sprawiając, że wydają się one cięższe”. Czy Autorka naprawdę nie wie, że foton nie oddziałuje bezpośrednio z cząstką Higgsa (i dlatego ma zerową masę, a nie „wydaje się lżejszy”)?

Dla polskiego czytelnika szczególnie bolesne jest powtarzanie przez Autorkę bzdurnej (choć bardzo popularnej w krajach protestanckich) opowieści o tym, jak to „Kopernik nie ośmielił się opublikować swoich radykalnych teorii za życia, w obawie, że klóciłyby się z doktryną Kościoła, pozostawiając to swoim kolegom, którzy mieli to zrobić tuż przed jego śmiercią”. Ciekawe, kto w takim razie napisał krótki wykład teorii heliocentrycznej (sławny *Commentariolus*), znany dziesiątkom uczonych i kardynałów na dekady przed śmiercią Kopernika i z reguły bardzo przez nich chwalony (a potępiony przez... Martina Lutra). Szkoda, że Tłumaczka, która słusznie ujęła się w przypisie za pominiętym w eseju o ruchach Browna Smoluchowskim, nie uznała za stosowne wziąć też w obronę Kopernika.

Dodatkowym mankamentem książki jest korekta, a raczej jej brak. Już w spisie treści Heisenberg zmienia się w „Heinsenberga”, laureat Nobla J.J. Thomson jest czterokrotnie nazywany „Thompsonem”, a w tekście jest sporo innych (mniej dokuczliwych) literówek.

Podsumowując, należy wyrazić żal, że dobry pomysł został zrealizowany w tak niedoskonały sposób, a dodatkowo zepsuła go kiepska praca angielskiego (a także, niestety, polskiego) wydawcy.

Krzysztof Fiałkowski  
Instytut Fizyki UJ  
Kraków

## ■ Piotr Bogusławski

Urodził się w Warszawie w 1949 r. Wydział Fizyki UW ukończył w roku 1972. Pracę doktorską poświęconą oddziaływaniu elektron–fonon w półprzewodnikach wykonał pod kierunkiem prof. Włodzimierza Zawadzkiego. Po doktoracie rozpoczął pracę w Instytucie Fizyki PAN, gdzie pracuje do dziś. Od 1997 r. jest też profesorem (Adjunct Professor) na North Carolina State University w Raleigh, USA. Tytuł naukowy otrzymał 31 stycznia 2008 r.



Zdecydowana większość jego prac poświęcona jest teorii półprzewodników. Objęły one teorię ekranowania potencjałów krótkozasięgowych (współpraca z Jerzym Mycielskim), a także teorię rezonansu spinowego elektronów przewodnictwa. W 1983 r. wyjechał na dwuletni staż (Politechnika w Lozannie i ICPS w Trieście), w trakcie którego Alfonso Baldereschi wprowadził go w obliczenia własności ciał stałych w ramach teorii funkcjonału gęstości. Stanowią one jego warsztat pracy do dziś. W 1994 r. nawiązał współpracę z Jerzym Bernholcem z North Carolina State University.

Obliczenia z pierwszych zasad zastosował do badań struktury i stabilności stopów oraz własności defektów i domieszek w azotkach III–V oraz w związkach II–VI. Dotyczyły one: 1) powierzchni półprzewodników oraz procesów zachodzących na powierzchni w trakcie wzrostu epitaksjalnego, 2) efektu segregacji w półprzewodnikach, co prowadzi do niejednorodności składu chemicznego w warstwach stopów, a także do niejednorodności rozkładu domieszek w heterostrukturach, 3) elektrodyfuzji domieszek indukowanej spontaniczną polaryzacją elektryczną i polami piezoelektrycznymi w heterostrukturach zbudowanych z azotków III–V, 4) własności magnetycznych półprzewodników III–V zawierających jony metali przejściowych, np. GaAs z Mn.

Ostatnio zajmuje się magnetyzmem w ciałach stałych które – w odróżnieniu od standardowych układów magnetycznych – nie zawierają jonów metali przejściowych czy ziem rzadkich. Problem ten obejmuje stany spinowe defektów w półprzewodnikach i sprzężenia magnetyczne między defektami.

## ■ Piotr Bojarski

Urodził się w 1964 r. w Gdańsku. W roku 1988 ukończył studia z fizyki na UG i podjął pracę w Instytucie Fizyki Doświadczalnej UG w zespole prof. Alfonsa Kawskiego. W 1992 r. obronił pracę doktorską (promotor prof. Alfons Kawski), w której badał mechanizm transportu energii wzbudzenia w układach nieuporzędowanych.

W latach 1994–96 przebywał na stypendiach w Zakładzie Biofizyki na Uniwersytecie w Bremie oraz w Instytucie Biochemii Uniwersytetu w Baltimore. W tym okresie zajmował się głównie badaniami struktury i funkcji membran biologicznych metodami spektroskopii fluorescencyjnej oraz kontynuował badania nad przekazem energii głównie w lepkich roztworach i polimerach.

W 2001 r. na podstawie cyklu prac uzyskał stopień doktora habilitowanego na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. Tematyka habilitacji dotyczyła analizy stężonych układów fluoryzujących. W swoich pracach wykorzystuje zarówno stacjonarne jak i czasowo rozdzielcze techniki spektroskopii fluorescencyjnej, zaś analizę eksperymentów opiera o modele analityczne oraz symulacje Monte Carlo badanych procesów. Tytuł naukowy profesora otrzymał 23 lipca 2008 r.



Jest współtwórcą Regionalnego Laboratorium Kineki Luminescencji, wyposażonego w unikalną w Polsce aparaturę do pomiaru ewolucji czasowej widm emisji. Obecnie zajmuje się przekazywaniem energii i badaniem własności układów o kontrolowanym stopniu uporządkowania, matryc zol–żel, polipeptydów, nanowarstw. Współpracuje z kilkoma ośrodkami badawczymi za granicą i w kraju. Jest kierownikiem Zakładu Spektroskopii Molekularnej UG i prodziekanem. Wypromował jednego doktora, dwie dalsze prace są bardzo zaawansowane. Jest autorem ponad 70 publikacji w czasopismach z listy filadelfijskiej.

Żonaty (Iwona), ma jedno dziecko (Maksymilian). Interesuje się różnymi dyscyplinami sportu (niektóre uprawia), ma liczne hobby: gotowanie, piwowarstwo, fotografika. Lubi muzykę, szczególnie jazz.

## ■ Tadeusz Lesiak

Urodził się w Suchedniowie w 1962 r. W latach 1980–85 odbył studia w zakresie fizyki na Wydziale Matematyczno-Fizyczno-Chemicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego, specjalizując się w fizyce doświadczalnej wysokich energii. Od roku 1986 do dziś pracuje w Instytucie Fizyki Jądrowej w Krakowie. Tam też uzyskał stopień doktora w roku 1991, przygotowując rozprawę, dotyczącą poszukiwań radiacyjnego rozpadu kwarka pięknego do kwarka dziwnego. Jej promotorem był prof. Krzysztof Rybicki.

Po doktoracie prowadził badania we współpracy DELPHI (Instytut CERN pod Genewą), dotyczące własności barionów pięknych i powabnych. Prace te stały się tematem habilitacji, którą uzyskał w roku 2001 w IFJ. Równolegle prowadził także badania dotyczące dwufermionowych stanów końcowych, zawierających parę ciężkich kwarków, produkowanych w anihilacji elektron–pozyton.

W latach 2002–08 kontynuował badania w dziedzinie fizyki ciężkich kwarków, pracując we współpracy Belle (Instytut KEK w Japonii). Głównym tematem prac z tego okresu była spektroskopia barionów powabnych. Obecnie jest członkiem współpracy LHCb (CERN). Odbył szereg staży naukowych za granicą.

Od roku 2005 jest kierownikiem Międzynarodowego Studium Doktoranckiego przy IFJ PAN. Jest także pracownikiem Instytutu Fizyki Politechniki Krakowskiej. Tytuł naukowy profesora nauk fizycznych otrzymał 23 lipca 2008 r.



Zainteresowania pozanaukowe: turystyka, fotografia, muzyka klasyczna i rockowa, literatura fantastyczno-naukowa.

## ■ Tadeusz Wosiński

Urodził się w 1949 r. w Warszawie. Po ukończeniu Liceum im. Stefana Batorego odbył studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1967–72), a następnie studia doktoranckie w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie (1972–76) w zakresie fizyki ciała stałego. Od 1976 r. pracuje w IF PAN, gdzie obecnie kieruje Zespołem Fizyki Defektów Strukturalnych w Półprzewodnikach. W 1977 r. uzyskał stopień doktora na podstawie rozprawy „Wpływ orientacji spinów centrów dyslokacyjnych na rekombinację nośników prądu w krzemie” (promotor prof. Tadeusz Figiel-ski), wyróżnionej nagrodą Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Habilitował się w roku 1991, a tytuł naukowy profesora nauk fizycznych otrzymał 23 lipca 2008 r.



W latach 1978–87 odbył dwa długoterminowe staże naukowe na niemieckich uniwersytetach w Kolonii (stypendium DAAD) oraz w Getyndze (stypendium Fundacji Humboldta). W kolejnych latach wielokrotnie przebywał na krótszych pobytach badawczych w ośrodkach naukowych w Niemczech i we Francji. W latach 1999–2006 był członkiem Komitetu Krystalografii PAN.

Jego zainteresowania naukowe dotyczą badań właściwości elektronowych dyslokacji i innych defektów strukturalnych w kryształach i heterostrukturach ze związków półprzewodnikowych. Prowadził też badania zjawisk interferencji kwantowej elektronów w procesach tunelowania rezonansowego oraz rozpraszania na dyslokacjach, a także badania procesów relaksacji sieci krystalicznej w heterostrukturach półprzewodnikowych. Obecnie jego prace koncentrują się na badaniach zjawisk transportu elektronowego w niskowymiarowych strukturach z półprzewodników ferromagnetycznych. Jest autorem lub współautorem ponad 120 publikacji w recenzowanych czasopismach naukowych oraz wielu referatów na prestiżowych konferencjach międzynarodowych. Jego prace mają ponad 1000 cytowań w literaturze naukowej.

Ma żonę Krystynę (również fizyk, pracuje na Politechnice Warszawskiej) oraz trzy córki – najstarsza jest dziennikarką, a dwie młodsze studiują. Jego zainteresowania pozanaukowe to narciarstwo, żeglarsstwo oraz turystyka.



## ■ Tytuły profesorskie

15 grudnia 2008 r. Prezydent RP wręczył nominacje profesorskie. Tytuł naukowy profesora nauk fizycznych otrzymali: Marcin Wojciech Radny (University of Newcastle, Australia), Krzysztof Stasiewicz (Swedish Institute of Space Physics, Szwecja) oraz Jadwiga Tritt-Goc (Inst. Fizyki Molekularnej PAN, Poznań).

[www.prezydent.pl](http://www.prezydent.pl)

## ■ Nagrody FNP

Najwyższe polskie wyróżnienia naukowe – Nagrody Fundacji na rzecz Nauki Polskiej otrzymali w tym roku:

- ▶ w dziale nauk humanistycznych i społecznych – prof. Stanisław Mossakowski (Instytut Sztuki PAN, Warszawa) za wszechstronną, interdyscyplinarną monografię dotyczącą Kaplicy Zygmuntowskiej, czołowego zabytku sztuki polskiego i włoskiego Renesansu;
- ▶ w dziale nauk przyrodniczych i medycznych – prof. Jacek Oleksyn (Instytut Dendrologii PAN, Kórnik) za wkład w odkrycie uniwersalnych biogeograficznych zależności między cechami roślin istotnych dla zrozumienia procesów ekologicznych w skali globalnej;
- ▶ w dziale nauk ścisłych – prof. Ryszard Horodecki (Instytut Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki, Uniwersytet Gdański) za wkład w stworzenie podstaw informatyki kwantowej;
- ▶ w dziale nauk technicznych – prof. Andrzej Jajszczyk (Katedra Telekomunikacji, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków) za badania w zakresie teorii węzłów szybkich sieci telekomunikacyjnych stanowiących podstawę budowy internetu nowej generacji.



Od lewej profesorowie: Mossakowski, Oleksyn, Jajszczyk i Horodecki

Podstawą przyznania tych wyróżnień są osiągnięcia naukowe uzyskane lub potwierdzone w okresie ostatnich 4 lat. Wręczenie Nagród odbyło się 5 grudnia 2008 r. na

Zamku Królewskim w Warszawie. Laureaci otrzymują symboliczne statuetki oraz po 200 tys. zł.

[www.fnp.org.pl](http://www.fnp.org.pl)

## ■ Z okazji święta UW

Z okazji święta Uniwersytetu Warszawskiego w roku 2008 Nagrodę indywidualną JM Rektora UW otrzymał za całokształt osiągnięć naukowych i dydaktycznych prof. Marcin Kubiak z Katedry Astrofizyki Obserwacyjnej Obserwatorium Astronomicznego UW.

[www.fuw.edu.pl](http://www.fuw.edu.pl)

## ■ Medal Diraca

Zgodnie z tradycją, w rocznicę urodzin P.A.M. Diraca, 8 sierpnia, Międzynarodowe Centrum Fizyki Teoretycznej (ICTP) w Trieście przyznało Medale jego imienia. W 2008 r. otrzymali je: Juan Martin Maldacena (Institute for Advanced Study, Princeton), Joseph Polchinski (Kavli Institute for Theoretical Physics, University of California, Santa Barbara) i Cumrun Vafa (Harvard University).

Trzej uczeni zostali wyróżnieni w uznaniu za swój fundamentalny wkład w różne stadia budowania teorii superstrun, który doprowadził do wniosku, że pięć różnych teorii superstrun w dziesięciowymiarowej czasoprzestrzeni jest manifestacją jeszcze nieodkrytej podstawowej teorii nazywanej teorią M.

[www.ictp.it](http://www.ictp.it)

B. W.

## ■ LVII Olimpiada Fizyczna

Zawody krajowej LVII Olimpiady Fizycznej odbywały się w roku szkolnym 2007/08, jak zwykle w trzech etapach. Ostatni, w Warszawie w kwietniu 2008 r., wyłonił 23 laureatów. Podajemy tu nazwiska laureatów (oraz ich nauczycieli) w kolejności zajętych miejsc:

- 1) Grzegorz Kępiasty (I LO im. Józefa Bema, Ostrołęka, III kl., nauczyciel – mgr Anna Maksimowska),
- 2) Robert Obryk (V LO im. Augusta Witkowskiego, Kraków, III kl., nauczyciel – dr Tomasz Zajęc),
- 3) Jacek Jendrej (II LO im. Unii Lubelskiej, Lublin, III kl., nauczyciel – mgr Beata Niewczas),
- 4) Piotr Godlewski (VI LO im. Jana Kochanowskiego, Radom, II kl., nauczyciel – mgr Marek Golka),
- 5) Łukasz Mazurek (XIV LO im. Stanisława Staszica, Warszawa, III kl., nauczyciel – mgr Stanisław Lipiński),
- 6) Maciej Pietrzak (XIV LO im. Stanisława Staszica, Warszawa, III kl., nauczyciel – mgr Robert Stasiak),
- 7) Grzegorz Gajda (I LO im. Mikołaja Kopernika, Łódź, II kl., nauczyciel – mgr Andrzej Sperka),
- 8) Andrzej Stasiak (I LO im. Mikołaja Kopernika, Łódź, III kl., nauczyciel – mgr Andrzej Sperka),
- 9) Witold Świątkowski (XIV LO im. Polonii Belgijskiej, Wrocław, III kl., nauczyciel – mgr Marian Bąk),
- 10) Patryk Drobiński (VI LO im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, Bydgoszcz, II kl., nauczyciel – mgr Piotr Malinowski),

- 11) Tomasz Boczkowski (VIII LO im. Adama Mickiewicza, Poznań, III kl., nauczyciel – mgr Halina Szalaty),
- 12) Łukasz Marszałek (I LO im. Mikołaja Kopernika, Krośno, III kl., nauczyciel – mgr Grzegorz Depczyński),
- 13) Łukasz Krakowiak (IV LO im. Tadeusza Kościuszki, Toruń, III kl., nauczyciel – dr Dariusz Graczyk),
- 14) Jakub Konieczny (V LO im. Augusta Witkowskiego, Kraków, III kl., nauczyciel – dr Tomasz Zając),
- 15) Piotr Szyperski (III LO im. Adama Mickiewicza, Wrocław, III kl., nauczyciel – mgr Paweł Zięba),
- 16) Karol Grzybowski (XIV LO im. Stanisława Staszica, Warszawa, III kl., nauczyciel – dr Elżbieta Zawistowska),
- 17) Aleksander Kubica (V LO, Bielsko Biała, III kl., nauczyciel – mgr Ewa Gajda),
- 18) Wiktor Pilewski (IV LO im. Tadeusza Kościuszki, Toruń, III kl., nauczyciel – dr Dariusz Graczyk),
- 19) Przemysław Bienias (I LO im. Mikołaja Kopernika, Łódź, III kl., nauczyciel – mgr Andrzej Sperka),
- 20) Marcin Dohnalik (V LO im. Augusta Witkowskiego, Kraków, III kl., nauczyciel – dr Dagmara Sokołowska),
- 21) Piotr Olejniczak (I LO im. Mikołaja Kopernika, Łódź, III kl., nauczyciel – mgr Piotr Mateja),
- 22) Dawid Pustułka (V LO im. Augusta Witkowskiego, Kraków, II kl., nauczyciel – mgr Ryszard Zapała),
- 23) Jan Wróblewski (II LO im. Andrzeja Frycza Modrzewskiego, Rybnik, III kl., nauczyciel – mgr Grzegorz Łopatka).

Gratulujemy!

[www.kgof.edu.pl](http://www.kgof.edu.pl)

## ■ Wykłady im. Lise Meitner

Austriackie Towarzystwo Fizyczne i Niemieckie Towarzystwo Fizyczne ustanowiły w 130. rocznicę urodzin Lise Meitner cykle wykładów jej imienia. Celem tej inicjatywy jest przyciągnięcie do fizyki większej niż dotychczas liczby kobiet oraz przedstawienie szerszej publiczności znaczących osiągnięć kobiet w naukach ścisłych i przyrodniczych.

Oficjalne otwarcia tego cyklu odbyły się 20 i 24 października 2008 r. w Wiedniu i w Berlinie. Wykład inauguracyjny na temat nanorurek węglowych miała Mildred Dresselhaus, dobrze znana fizykom ciała stałego wybitna fizyczka amerykańska, profesor MIT, w poprzednich latach prezes amerykańskiej Akademii Nauk oraz kierownik biura nauki Departamentu Energii USA.

Lise Meitner urodziła się w 1878 r. w Wiedniu, była jedną z pierwszych kobiet, które uzyskały doktorat na Uniwersytecie Wiedeńskim (1906 r.). Później ponad 30 lat prowadziła badania z fizyki w Berlinie, współpracowała z chemikiem Otto Hahnem. Jako Żydówka musiała uciekać z Niemiec. Dzięki pomocy Nielsa Bohra i kolegów fizyków dostała się do Szwecji, pracowała w instytucie, którego kierownikiem był Karl Manne Siegbahn. Prowadziła korespondencję naukową z Hahnem. To ona, wspólnie ze swoim siostrzeńcem Otto Frischem w grudniu 1939 r. podała właściwą interpretację zaobserwowanego przez Hahna efektu jako rozszczepienia jąder uranu. Za odkrycie rozszczepienia Hahn otrzymał w 1944 r. Nagrodę Nobla z chemii. Komitet Noblowski nie uwzględnił zasadniczego wkładu Meit-

ner, również późniejsze wnioski (m.in. Heisenberga i Lauego) o przyznanie jej Nagrody z fizyki nie odniosły skutku.

Lise Meitner zmarła w 1968 r. w Wielkiej Brytanii.

*Physik Journal* 7, nr 12 (2008)

B. W.

## ■ Trochę autonomii uniwersytetów francuskich

Dotychczas zarządzanie uniwersytetami we Francji było bardzo skomplikowane. Uczelnie podlegały decyzjom rządu oraz organizacji naukowych, jak CNRS. Wprawdzie już w ubiegłym roku parlament wyraził zgodę na wprowadzenie autonomii uniwersyteckiej, ale dopiero teraz rząd postanowił nadać ją dwudziestu czołowym uczelniom, wśród nich Paris 5, 6 i 7 i przyznać każdemu z nich po 250 tys. euro, co ma ułatwić im wprowadzenie zmian od początku roku 2009. Ma to poprawić sprawność zarządzania i sprzyjać większemu współzawodnictwu uniwersytetów.

Nadana autonomia oznacza, że teraz uczelnie będą w pełni zarządzać swoimi budżetami, co zapewni zupełną swobodę zatrudniania personelu, wyboru kierunków badań, systemu nauczania oraz zarządzania majątkiem. Valérie Pécresse, minister badań i edukacji, oświadczyła, że w ciągu następnych pięciu lat wszystkie uniwersytety zyskają autonomię. Nowe zasady mają dać większą władzę rektorom. Są jednak przeciwnicy takich zmian, obawiający się, że w nowym systemie pracownicy uniwersyteccy utracą stabilność posad.

*Phys. World* 21, nr 9 (2008)

B. W.

## ■ Konferencja Show Physics 2009

W dniach 31.03–4.04 2009 r. odbędzie się w Genewie doroczna konferencja sieci EuroPhysicsFun – Show Physics 2009. Celem jej jest zetknięcie ze sobą grup już oferujących pokazy z fizyki dla różnych audytoriów i ludzi, którzy pragną stworzyć własny „spektakl” fizyczny. Na program złożą się wykłady ekspertów w przekazywaniu nauki (w atrakcyjny sposób) z całej Europy i sesje doświadczalne służące wymianie pomysłów.

Konferencję organizuje grupa PhysicsScope. Rejestracja uczestników trwa do 1 lutego 2009 r., a więcej informacji można uzyskać na stronie [www.physiscscope.ch/ShowPhysics2009.html](http://www.physiscscope.ch/ShowPhysics2009.html).

M. S.

## ■ Physics

Amerykańskie Towarzystwo Fizyczne rozpoczęło wydawanie nowego, o powszechnym dostępie elektronicznym, czasopisma *Physics*. Wydawnictwo ukazuje się co tydzień i zawiera komentarze ekspertów dotyczące wybranych artykułów, artykuły przeglądowe z różnych dziedzin fizyki, krótkie podsumowania artykułów wybranych przez redaktorów *Physical Review* oraz *Physical Review Letters*. Adres czasopisma: <http://physics.aps.org>.

B. W.

## NOWE KSIĄŻKI

- N. David Mermin, *Czas na czas – klucz do teorii Einsteina*, z jęz. angielskiego tłum. Jerzy Przystawa; Prószyński i S-ka, Warszawa 2008, s. 206.
- Jack Repcheck, *Sekret Kopernika – jak zaczęła się rewolucja naukowa*, z jęz. angielskiego tłum. Przemysław Bandel; Dom Wydawniczy REBIS, Poznań 2008, s. 231.
- *Wiedza o środowisku kosmicznym*, red. Tadanori Ondow i Katsuhide Marubashi; z jęz. angielskiego tłum. Zbigniew Kłos, Jan Błęcki, Barbara Popielawska, Andrzej W. Wernik, Jan Hanasz, Roman Schreiber; Wyd. Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa 2007, s. 319.
- Daniel T. Larose, *Metody i modele eksploatacji danych*, z jęz. angielskiego tłum. Anna Wilbik; PWN, Warszawa 2008, s. 339.
- *Nanotechnologie*, red. Robert W. Kellsall, Ian W. Hamley, Mark Geoghegan, red. przekładu z jęz. angielskiego Krzysztof Kurzydłowski; PWN, Warszawa 2008, s. 469.
- Paul G. Higgs, Teresa K. Attwood, *Bioinformatyka i ewolucja molekularna*, red. przekładu z jęz. angielskiego Krzysztof Murzyn; PWN, Warszawa 2008, s. 531.
- Perla Kacman, *Kolaż kulinarny*, Wydawnictwo RM, Warszawa 2008, s. 108.
- Joanne Baker, *50 teorii fizyki, które powinieneś znać*, z jęz. angielskiego tłum. Katarzyna Surowiecka; PWN, Warszawa 2008, s. 248.

## POSTĘPY FIZYKI W INTERNECIE

<http://postepy.fuw.edu.pl>

- ARCHIWUM  
spisy treści wszystkich zeszytów
- ARTYKUŁY DO POBRANIA  
m.in. przekłady wykładów noblowskich (od roku 2001) oraz wykłady z ostatnich Zjazdów Fizyków Polskich
- MATERIAŁY DODATKOWE  
uzupełnienia niektórych artykułów

## WKRÓTCE W POSTĘPACH

- *Wykład noblowski Petera Grünberga*
- *Piotr Chankowski o naruszonych symetriach Teorii Standardowej, czyli Noblu 2008 dla Nambu, Kobayashiego i Maskawy*
- *Bertram Blank i Marek Pfützner o promieniotwórczości dwuprotonowej*

## PRENUMERATA

*Postępy Fizyki* można zaprenumerować w jeden z następujących sposobów.

► PRZEZ ODDZIAŁY PTF (tylko prenumerata krajowa dla członków PTF i studentów):

Cena rocznej prenumeraty krajowej w 2009 r. wynosi 48 zł. Dostawa *Postępów* odbywa się za pośrednictwem Oddziałów.

► PRZEZ ZARZĄD GŁÓWNY PTF (tylko prenumerata krajowa):

Wpłaty należy dokonać na konto Zarządu Głównego PTF: 19 1020 1097 0000 7802 0001 3128 (PKO BP IX O/Warszawa) lub w Biurze Zarządu Głównego PTF.

Cena rocznej prenumeraty krajowej w 2009 r. wynosi 60 zł. Dostawa *Postępów Fizyki* następuje drogą pocztową pod wskazany adres.

► PRZEZ PRZEDSIĘBIORSTWA KOLPORTAŻU PRASY:

RUCH (<http://www.prenumerata.ruch.com.pl>)

KOLPORTER (<http://sa.kolporter.com.pl>)

GARMOND PRESS (<http://www.garmond.com.pl>)

Cena rocznej prenumeraty krajowej w 2009 r. wynosi 72 zł.

Prenumerata ze zleceniem dostawy za granicę – patrz <http://www.ruch.pol.pl>.

Dostępne są również zeszyty archiwalne – prosimy o kontakt z redakcją.

## INFORMACJE DLA AUTORÓW

Artykuły powinny mieć charakter przeglądowy i być przystępne dla ogółu fizyków. Prace należy nadsyłać pod adresem redakcji. O przyjęciu pracy do druku decyduje komitet redakcyjny. Prac niezamówionych i niezakwalifikowanych do druku redakcja nie zwraca. Bardziej szczegółowe informacje na temat układu i sposobu przygotowania pracy znajdują się na stronie internetowej *Postępów Fizyki*.

## REKLAMA W POSTĘPACH FIZYKI

Zapraszamy – szczególnie przedstawicieli producentów aparatury oraz sprzętu i oprogramowania komputerowego, wydawców podręczników i książek naukowych oraz popularnonaukowych – do zamieszczania ogłoszeń reklamowych w *Postępach Fizyki*. Nasze czasopismo dociera do większości polskich fizyków, z których wielu decyduje o bieżących zakupach uczelni, instytutów i szkół. Zainteresowanych prosimy o kontakt z redakcją pod adresem: [postepy@fuw.edu.pl](mailto:postepy@fuw.edu.pl).

## POSTĘPY FIZYKI (ADVANCES IN PHYSICS)

Founded in 1949, published bimonthly in Polish with titles in English by the Polish Physical Society with a support of the Ministry of Science and Higher Education and the Physics Faculty of the Warsaw University.

### INFORMATION FOR SUBSCRIBERS

A subscription order can be sent through the local press distributor or directly to „RUCH” S.A. Oddział Krajowej Dystrybucji Prasy, ul. Jana Kazimierza 31/33, skrytka pocztowa 12, 00-958 Warszawa, Poland (for details see <http://www.ruch.pol.pl>).

# Ćwiczenie czyni mistrza



**NOWOŚĆ**

W każdej dziedzinie fizyki dokładne rozwiązanie dużej liczby zadań sprzyja lepszemu zrozumieniu teorii i pozwala osiągnąć większą sprawność w jej stosowaniu. Zbiór zawiera 222 zadania poświęcone tradycyjnym działom kwantowej teorii pola. Znajdziemy tu między innymi zadania dotyczące symetrii Lorentza i Poincarego, równań Kleina-Gordona, Eulera-Lagrange'a, Diraca, twierdzenia Noether, pola Diraca i pola elektromagnetycznego. Książka podzielona jest na dwie części. Krótkie wprowadzenia teoretyczne i treści zadań znajdziemy w pierwszej części, druga zaś zawiera szczegółowe rozwiązania zadań. Przytaczane rozwiązania zawierają dużo szczegółów rachunkowych, tak by czytelnik bez większego trudu mógł prześledzić rozwiązanie każdego problemu.

 WYDAWNICTWO NAUKOWE PWN

Zamów przez telefon: **0 801 33 33 88** (0,35 zł za 3 minuty) • Zamów przez Internet: **www.pwn.pl**



# XL

# ZJAZD FIZYKÓW POLSKICH



## KRAKÓW, 6-11 WRZEŚNIA 2009

Współorganizatorzy

Oddział Krakowski PTF, Akademia Górniczo-Hutnicza, Instytut Fizyki Jadrowej PAN, Politechnika Krakowska, Uniwersytet Jagielloński, Uniwersytet Pedagogiczny

Kontakt: XL ZJAZD FIZYKÓW POLSKICH, Oddział Krakowski PTF, Instytut Fizyki UJ, ul. Reymonta 4, PL-30059 Kraków;  
telefon: +48 12 663 56 84; fax: +48 12 633 84 94;

Małgorzata Nowina-Konopka (IFJ) — tel. 012 662 82 63; e-mail: malgorzata.nowina-konopka@ifj.edu.pl

Rejestracja i informacja: <http://www.ptf.agh.edu.pl/XL-zjazd/>; Anna Tylek — tel. 012 663 38 58 lub 012 663 38 29;

Joanna Hoszko — tel. 012 663 38 58 lub 012 663 38 29

### Komitet Honorowy:

Stanisław Kardynał Dziwisz  
Arcybiskup Metropolita Krakowski  
Prof. dr hab. Andrzej Białas  
Prezes Polskiej Akademii Umiejętności  
Prof. dr hab. Marek Jeżabek  
Dyrektor IFJ PAN w Krakowie  
Prof. dr hab. Michał Kleiber  
Prezes Polskiej Akademii Nauk  
Prof. dr hab. Maciej Kolwas  
President Elect of the European  
Physical Society  
Prof. dr hab. Karol Musiał  
JM Rektor Uniwersytetu Jagiellońskiego

### Komitet Programowy:

Marek Demiański UW  
Robert Gałązka IFPAN — przewodniczący  
Wojciech Gawlik UJ  
Ryszard Horodecki Uniw. Gdański  
Marek Kuś CFT PAN  
Roman Młenasz UAM Poznań  
Stefan Pokorski UW  
Maria Różańska IFJ Kraków  
Józef Szajd INTIBS PAN Wrocław  
Józef Szudy UMK Toruń  
Andrzej Twardowski UW  
Karol Wysokiński UMCS Lublin