

# POSTĘPY FIZYKI

TOM **51** ZESZYT **4** ROK **2000**



DWUMIESIĘCZNIK  
POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO



**GLENN SEABORG**

*TRANSMUTACJE, UKŁADY PODKRYTYCZNE I ENERGIA  
FIZYKA ODDZIAŁYWAŃ ELEMENTARNYCH  
POCIERANIE I ŚCIERANIE*

---

---

## POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

---

---

### ZARZĄD GŁÓWNY

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

### REDAKTORZY NACZELNI CZASOPISM PTF

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

### PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW PTF

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

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

---

---

## POSTĘPY FIZYKI

---

---

### RADA REDAKCYJNA

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

### KOMITET REDAKCYJNY

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

### KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

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

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

---

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

---

# Transmutacje, układy podkrytyczne i energia\*

Stefan Taczanowski

Wydział Fizyki i Techniki Jądrowej, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

---

## Transmutations, subcritical systems and energy

*Abstract:* An emerging technology of Accelerator-Driven Subcritical Systems (ADSS) for nuclear transmutations is presented, as compared to the existing critical nuclear energy systems. The higher safety of subcritical ones (owed to the improbability of uncontrolled criticality) is suggested as the basic indication of their superiority over critical ones. Just that property allows for application of ADSS to destruction of nuclear waste (mainly transuranics) i.e. to achieving a closed fuel cycle. Summarising, the presented concept might facilitate social acceptance and deployment of nuclear energy.

---

### 1. Wprowadzenie

Dobiegający końca wiek XX charakteryzował stały wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną – najbardziej przetworzony i uniwersalny typ energii. Nikt nie wątpi w nieuchronne zwielokrotnienie zużycia energii elektrycznej przez 4/5 ludności świata żyjących w krajach rozwijających się. Również w krajach rozwiniętych, pomimo zahamowania wzrostu zużycia energii w ogóle (dzięki rozpowszechnianiu jej oszczędzania), obserwuje się nadal stały wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną. Mimo odkrywania nowych złóż dzięki coraz doskonalszym metodom rozpoznania geologicznego, coraz bardziej realna staje się perspektywa wyczerpania łatwo dostępnych zasobów węglowodorowych paliw organicznych. Przy wciąż jeszcze dość niskich cenach pierwotnych nośników energii, wobec stałego wzrostu ich zużycia (np. gazu ziemnego od 1960 r. średnio 4% rocznie w skali globalnej) groźba szokowego i trwałego wzrostu ich cen staje się coraz bliż-

sza. Trend ten ani ceny nie są bowiem na dalszą metę do utrzymania [1]. Obecny poziom rozwoju technologicznego odnawialnych źródeł energii nie stwarza nadziei, że wkrótce zastąpią one w istotnym stopniu kopalne paliwa organiczne, choć należy się spodziewać wzrostu ich udziału w bilansie nośników pierwotnych stosowanych do produkcji energii elektrycznej. Warto ponadto pamiętać, że hydroenergia, technologia fotoelektryczna, spalanie biomasy itp. też – wbrew pozorom – stwarzają zagrożenia i wpływają na środowisko naturalne. W związku z tym w chwili obecnej jedyną dojrzałą technologią mogącą sprostać powyższemu wyzwaniu w skali globalnej jest energetyka jądrowa. Jednak jej rozwój napotyka na ostry opór społeczny, wynikający z obaw przed zagrożeniami towarzyszącymi eksploatacji reaktorów jądrowych: 1) niekontrolowaną nadkrytycznością, 2) odpadami promieniotwórczymi o dużej aktywności i długim okresie połowicznego rozpadu.

Ad 1. Bez wnikania w szczegóły techniczne można powiedzieć, że intuicyjną miarą bezpie-

---

\*Wykład plenarny wygłoszony na XXXV Zjeździe Fizyków Polskich w Białymstoku we wrześniu 1999 r.



czeństwa w tym względzie jest stopień oddalenia układu od stanu nadkrytyczności na neutronach natychmiastowych [2]. W tych warunkach bowiem wszelkie sterowanie układem jest wykluczone wobec tempa narastania rozszczepień, wyprzedzających jakąkolwiek interwencję. To oddalenie od nadkrytyczności w układach krytycznych zapewniają neutrony opóźnione, a jego miarą jest ich procentowy udział,  $\beta$ , specyficzny dla każdego nuklidu. Większy margines bezpieczeństwa można zapewnić jedynie w układach podkrytycznych, których stacjonarny charakter pracy jest uwarunkowany obecnością zewnętrznego źródła neutronów, uzupełniającego ich deficyt w każdym pokoleniu.

Ad 2. Silna radiotoksyczność zużytego paliwa jądrowego powoduje, że rozwiązanie zagadnienia jego unieszkodliwiania staje się warunkiem koniecznym zaakceptowania energetyki jądrowej w jakiegokolwiek postaci. Jednak problem ten stopniowo narasta. Energetyka cywilna na świecie zużywa rocznie ponad 10 tys. t paliw jądrowych. Do roku 2000 przewidywano nagromadzenie łącznie ok. 200 tys. ton odpadów zawierających blisko 4 tys. ton nuklidów rozszczepialnych, wobec ponad tysiąca ton pozostających w broniach jądrowych. Ilość odpadów z przemysłu obronnego (głównie zubożony lub mało „wypalony” uran) ocenia się na (0,4–1) Mt [3]. Zagadnienie odpadów nie zostało dotychczas rozwiązane w sposób niesporny.

Zużyte paliwo z obecnie funkcjonujących reaktorów energetycznych jest bądź składowane na terenie elektrowni, bądź gromadzone w tymczasowych instalacjach przechowywania w wybranych ośrodkach. Dotychczas jako główną metodę unieszkodliwiania zużytego paliwa jądrowego proponuje się składowanie nieodwracalne. Właściwości składowiska (jego konstrukcja i położenie) miałyby gwarantować retencję substancji radioaktywnych przez miliony lat, co wystarczałoby do samoistnego rozpadu nawet długożyciowych izotopów promieniotwórczych. Skala czasowa skutecznego funkcjonowania takiego składowiska dyskwalifikuje rozwiązania o charakterze inżynierskim i zmusza do stosowania formacji geologicznych. Koncepcja ta, wiążąca się z wielkimi nakładami, zakłada wydrążenie odpowiednich sztolni na głębokości co najmniej kilkaset metrów w stabilnych sejsmicznie, nieprzepuszczalnych i odpor-

nych na erozję strukturach geologicznych, z przeznaczeniem na specjalnie zaprojektowane pojemniki z odpadami jądrowymi. Ponieważ rozwiązanie to nie oznacza fizycznego unicestwienia materiałów rozszczepialnych, musi zakładać również stałe (praktycznie wieczne) i kosztowne nadzorowanie składowiska, które mogłoby być wykorzystane (potajemnie bądź jawnie) jako kopalnia plutonu.

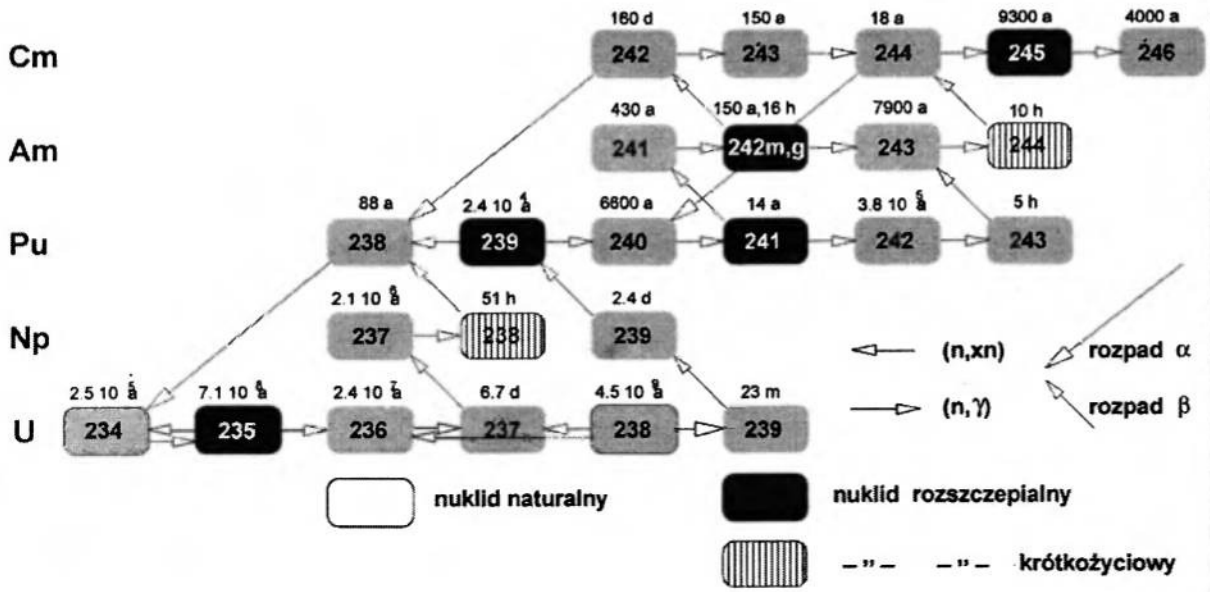
Jednak idea pozbawienia przyszłych pokoleń możliwości wykorzystania olbrzymich zasobów energii (200 MeV w 1 atomie oznacza ok. 2500 MW · rok w 1 tonie) zawartej w aktynowcach w zużytym paliwie i odpadach pochodzenia wojskowego może budzić poważne wątpliwości. Zawartość energii pozostawianej w globalnie zużywanym paliwie wynosi rocznie ok.  $8 \times 10^{20}$  J, czyli około dwa razy więcej niż obecne roczne zużycie przez całą ludność Ziemi [4], a energia zawarta w zgromadzonych dotychczas odpadach wystarczałaby na pokrycie całkowitego zapotrzebowania ludzkości przez kilkaset lat. Zawartość energii pozostającej w paliwie zużywanym w elektrowni jądrowej o mocy 2 GW<sub>e1</sub> pokryłaby roczne zużycie energii w Polsce [2].

Akceptację energii jądrowej może ułatwić perspektywa wykorzystania zamkniętego jądrowego cyklu paliwowego. Pożądanym sposobem rozwiązania kwestii odpadów jest ich konsekwentny recykling, także z uwagi na wydzielanie wielkich ilości energii, towarzyszące definitywnemu unieszkodliwianiu aktynowców w procesach rozszczepienia. Na skalę przemysłową częściowo zamknięty cykl paliwowy jest od dawna realizowany we Francji w postaci pozyskiwania – ze zużytego paliwa – plutonu do tworzenia paliwa typu MOX (Mixed OXide – UO<sub>2</sub> + PuO<sub>2</sub>). Umożliwienie (bezpiecznego) wykorzystania energii zawartej w odpadach jest postępowaniem bardziej odpowiedzialnym wobec przyszłych pokoleń niż ich nieodwracalne składowanie.

## 2. Zjawiska fizyczne w paliwach jądrowych

Trajektorie powstawania i rozpadów aktynowców w jądrowym cyklu paliwowym ilustruje rys. 1. Obraz ten pokazuje, że eksploatację paliwa cechuje różnorodność procesów jądrowych prowadzących do pojawienia się sporej liczby nuklidów. Ich zawartość w paliwie uranowym i MOX o typowym stopniu wypalenia przedstawia tab. 1 [5,6].





Rys. 1. Trajektorie głównych przemian jądrowych w cyklu U-Pu [2].

Tabela 1. Wypalone paliwo jądrowe (główne składniki promieniotwórcze/1 GW<sub>el</sub> · rok).

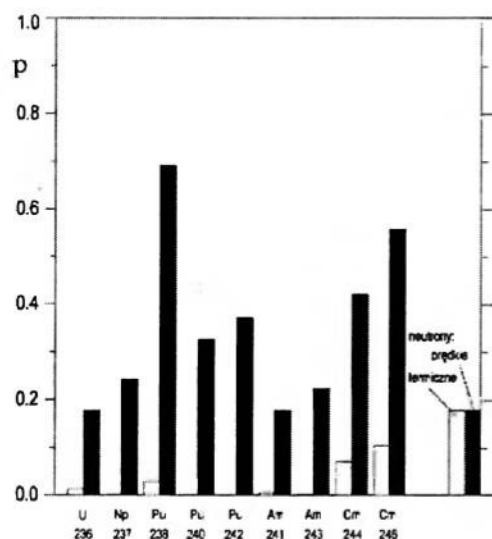
Aktynowce				Produkty rozszczepienia <sup>235</sup> U		
Nuklid	T <sub>1/2</sub> (lata)	m (kg)		Nuklid	T <sub>1/2</sub> (lata)	m (kg)
		U( <sup>235</sup> U)O <sub>2</sub>	MOX*			
<sup>235</sup> U	7,0×10 <sup>8</sup>	280	20	<sup>85</sup> Kr	10,8	0,4
<sup>236</sup> U	2,3×10 <sup>7</sup>	120	10	<sup>90</sup> Sr	10,8	14
<sup>238</sup> U	4,5×10 <sup>9</sup>	2,8×10 <sup>4</sup>	2,7×10 <sup>4</sup>	<sup>137</sup> Cs	30	32
<sup>237</sup> Np	2,1×10 <sup>6</sup>	15	10	<sup>151</sup> Sm	93	0,3
<sup>238</sup> Pu	88	6 ( 2%)	18 ( 3,5%)	<sup>93</sup> Zr	1,5×10 <sup>6</sup>	23
<sup>239</sup> Pu	2,4×10 <sup>4</sup>	170 (57%)	240 (47,5%)	<sup>99</sup> Tc	2,1×10 <sup>5</sup>	25
<sup>240</sup> Pu	6600	70 (23%)	140 (28%)	<sup>107</sup> Pd	6,5×10 <sup>6</sup>	7
<sup>241</sup> Pu	14	40 (13%)	55 (11%)	<sup>129</sup> I	1,6×10 <sup>7</sup>	6
<sup>242</sup> Pu	3,8×10 <sup>5</sup>	15 ( 5%)	50 (10%)	<sup>135</sup> Cs	2 ×10 <sup>6</sup>	10
<sup>241</sup> Am	430	7	28			
<sup>242<sup>m</sup></sup> Am	141	0,1	0,2			
<sup>243</sup> Am	7370	3	25			
<sup>244</sup> Cm	18	0,7	15			
<sup>245</sup> Cm	8500	0,1	3			

\* wartości przybliżone dla paliwa MOX

Należy zwrócić uwagę na fakt, że w wypalonym paliwie MOX jest znacznie więcej tzw. rzadkich aktynowców (Np, Am, Cm – MA, od ang. minor actinides) niż w paliwie uranowym, w którym przeważają nieparzyste izotopy Pu, ulega-

jące rozszczepieniu pod wpływem neutronów termicznych. Wskutek tego w zwykłych reaktorach lekkowodnych recykling plutonu prowadziłyby nieuchronnie (przez kolejne wychwyty neutronów, tab. 1 i rys. 2) do transmutacji dużej części Pu

w szczególności toksyczne transplutonowce [2]. Materiały te, odznaczające się znikomym ułamkiem neutronów opóźnionych (tab. 2), wykazują ponadto dodatkowo próżniowe (czyli towarzyszące rozrzedzaniu moderatora) współczynniki reaktywności [7], nie nadają się więc ze względów bezpieczeństwa na paliwo w układach krytycznych.



Rys. 2. Prawdopodobieństwo rozszczepienia  $p = \sigma_f / \sigma_a$  ( $\sigma_f$  – przekrój czynny na rozszczepienie,  $\sigma_a$  – przekrój czynny na absorpcję neutronu) niektórych aktywności w wyniku absorpcji neutronów (termicznych albo prędkich).

Tabela 2. Parametry rozszczepieniowe wybranych aktywności [8,9] (procent neutronów opóźnionych  $\beta$ , liczba neutronów/rozszczenie  $\nu$ ); <sup>t</sup> – neutrony termiczne, \* – neutrony prędkie.

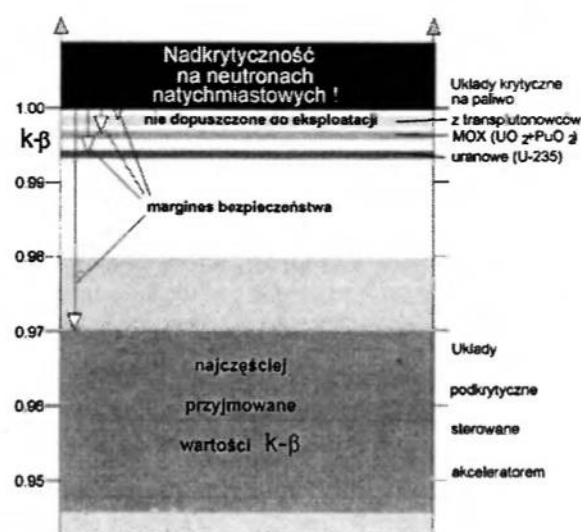
Nuklid	$\beta$ (%)	$\nu$
<sup>232</sup> Th	2,4*	2,2*
<sup>235</sup> U	0,7 <sup>t</sup>	2,42 <sup>t</sup>
<sup>238</sup> U	1,7*	2,6*
<sup>239</sup> Pu	0,26 <sup>t</sup>	2,87 <sup>t</sup>
<sup>241</sup> Pu	0,55 <sup>t</sup>	2,9 <sup>t</sup>
<sup>241</sup> Am	0,12*	3,4*
<sup>242m</sup> Am	0,18 <sup>t</sup>	3,3 <sup>t</sup>
<sup>243</sup> Am	0,23*	3,5*
<sup>244</sup> Cm	0,13 <sup>t</sup>	3,3 <sup>t</sup>
<sup>245</sup> Cm	0,16 <sup>t</sup>	3,6 <sup>t</sup>

Na takim tle pojawia się koncepcja zastosowania – zarówno do produkcji energii elektrycznej, jak i neutralizacji odpadów promieniotwórczych –

układów podkrytycznych sterowanych akceleratorem jako wysokowydajnym źródłem neutronów.

### 3. Własności układów podkrytycznych

Podstawową zaletą układów podkrytycznych jest istotnie wyższy poziom bezpieczeństwa ich działania dzięki znacznie większemu oddaleniu układu od stanu nadkrytyczności na neutronach natychmiastowych. Własność ta [2] zobrażowana jest na rys. 3. Stanowi ona fundamentalną róż-

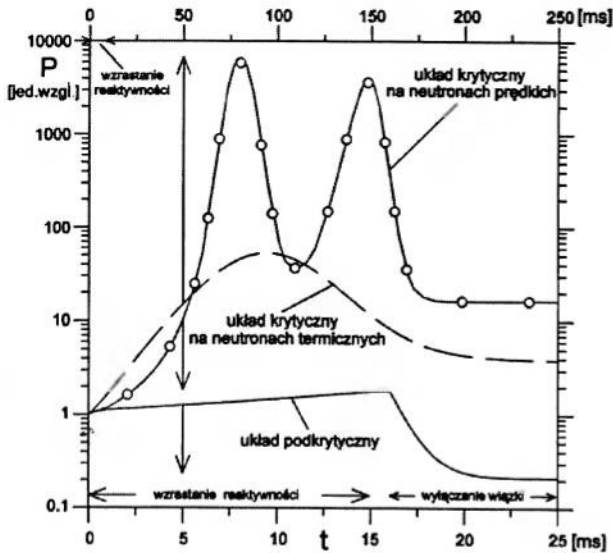


Rys. 3. Margines bezpieczeństwa układów krytycznych i podkrytycznych;  $k$  – współczynnik mnożenia neutronów.

nicę w porównaniu ze zwykłymi reaktorami jądrowymi działającymi z założenia w stanie krytycznym, gdyż reaktywność ujemna, zapewniająca ok. 10-krotnie większe oddalenie układu od nadkrytyczności na neutronach natychmiastowych, praktycznie ją wyklucza. Zalety bezpieczeństwa układów podkrytycznych w porównaniu z krytycznymi ilustruje (rys. 4) symulacja komputerowa [10] ich zachowania w warunkach nagłego wzrostu reaktywności.

W obliczeniach przyjmuje się zazwyczaj liniowy wzrost reaktywności w ciągu kilkunastu ms [11]. Odpowiadać to może np. „wystrzeleniu” prętów sterowniczych z reaktora, które w układach krytycznych prowadzi już po kilku ms do nadkrytyczności na neutronach natychmiastowych, pociągającej za sobą nagły wzrost mocy o kilka rzędów wielkości. Ten efekt owocuje z kolei szybkim (adiabatycznym) ogrzaniem paliwa i wzrostem temperatury, który wywołuje dop-

plerowskie poszerzenie linii rezonansowych wychwytu neutronów, równie gwałtownie tłumiące ich strumień w układzie. To działające z zaledwie kilkumilisekundowym opóźnieniem ujemne sprzężenie zwrotne jest jednak szybko skompensowane przez trwający nadal (do zakończenia „wystrzelenia”) wzrost współczynnika mnożenia neutronów. Ostatecznie proces kończy się ponownym stłumieniem mocy i jej (chwilowym) ustaleniem na podwyższonym poziomie [11].



Rys. 4. Zależność mocy  $P$  układów krytycznych i podkrytycznych od czasu, w wyniku wzrostu reaktywności; pionowe strzałki pokazują skalę czasu, w której wykreślone są dane zależności.

W przyjętych tu skrajnych warunkach wydzielona energia jest znaczna – w układzie na neutronach prędkich nastąpi uszkodzenie paliwa skutkiem wzrostu temperatury, przekraczającego 2000 K. Natomiast wyraźnie łagodniejszy wzrost mocy wykazują układy krytyczne na neutronach termicznych, w których czas życia pokolenia neutronów bywa kilkaset razy dłuższy. Jednocześnie należy zauważyć, że za to zwiększanie mocy trwa tu znacznie dłużej niż czas wzrostu reaktywności. Ten nieunikniony efekt wynika z bezwładności cieplnej układu, która w przypadku niższego tempa wydzielania energii w istotnym stopniu opóźnia zadziałanie dopplerowskiego ujemnego sprzężenia zwrotnego. Ponieważ jednak dopplerowskie współczynniki temperaturowe reaktywności są nieporównanie wyższe dla układów termicznych (dzięki większemu znaczeniu obszaru rezo-

nansowego przy miękkim widmie), do zahamowania wzrostu mocy wystarcza znacznie mniejszy wzrost temperatury (tu o ok. 400 K). Ponadto warto sobie uświadomić, z czym należy się liczyć w obu układach krytycznych po upływie czasu, po którym niemożliwa dotąd interwencja mechaniczna w układzie staje się realna (tj. po  $> 0,1$  s dla reaktorów prędkich [12], a po czasie kilka razy dłuższym dla termicznych, rys. 4). Przede wszystkim – nie można wtedy mówić o wyżej wspomnianej stabilizacji mocy, ponieważ układy pozostają nadkrytyczne (choć na neutronach opóźnionych). W razie braku interwencji (wprowadzenia reaktywności ujemnej dzięki np. wsunięciu prętów awaryjnych) oznacza to dalszy powolny wzrost mocy z jednoczesnym podnoszeniem temperatury chłodziwa/moderatora i całego układu (w wyniku przewodnictwa cieplnego). Niezależnie od działania zabezpieczeń technicznych pojawia się teraz drugi efekt ujemnego sprzężenia zwrotnego w następstwie „rozrzedzenia” chłodziwa/moderatora skutkiem rozszerzalności cieplnej, osłabiającego proces spowalniania neutronów w układach termicznych, a wzmacniającego proces ucieczki neutronów w układach na neutronach prędkich. Mechanizm ten sprowadza w końcu oba układy do stanu podkrytyczności i samoczynnego ostatecznego wyłączenia. Reaktor RBMK (grafitowy, chłodzony wodą) w Czarnobylu niestety wykazywał pod tym względem dodatkowo sprzężenie zwrotne, ponieważ ubytek wody skutkiem wrzenia nie mógł osłabić spowalniania neutronów w graficie, a zmniejszył ich straty w wodzie. Reakcję łańcuchową zakończyło więc dopiero zwiększenie ucieczki neutronów z rdzenia odsłoniętego w następstwie wybuchu.

Natomiast zachowanie układu podkrytycznego sterowanego akceleratorem nie stwarza w tych samych okolicznościach żadnych zagrożeń.

Trwający kilkanaście ms wzrost mocy wynosi zaledwie kilkadziesiąt procent (wzrost temperatury – kilka stopni), a szybkie wyłączenie prądu wiązki zapewnia zmniejszenie mocy w ciągu następnych milisekund do ułamka wartości pierwotnej (rys. 4). W razie potrzeby zupełne wyłączenie układu można uzyskać przez wprowadzenie prętów pochłaniających, niezbędnych ze względów bezpieczeństwa i używanych do planowych wyłączeń, których obecność muszą zakładać wszystkie projekty.



Z powyższych rozważań wynika wniosek, że jedynie układy podkrytyczne obiecują możliwość bezpiecznej utylizacji jako paliwa także transplutonowców, pomimo ich niekorzystnych własności, zatem otwierają drogę do praktycznie zamkniętego cyklu paliwowego.

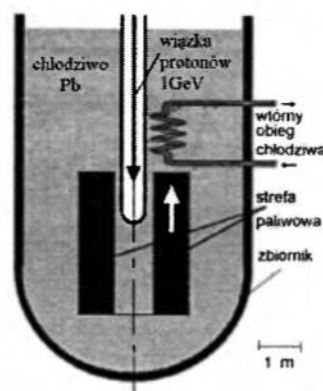
#### 4. Układy do transmutacji

Największe szanse pełnienia roli zewnętrznego źródła neutronów ma tarcza akceleratora protonów o energii rzędu 1 GeV. W pierwszym etapie procesu oddziaływania wysokoenergetycznej cząstki z jądrem wywołuje ona w nim kaskadę wewnętrzną, wybijając pewną liczbę prędkich cząstek, głównie nukleonów, oraz znacznie rzadziej piony i lekkie jądra – deuterony, cząstki  $\alpha$ , trytony itp. Energia pierwotnego protonu (przede wszystkim), a także wyemitowanych cząstek wtórnych jest wystarczająco duża, by wywołać podobne oddziaływania w kolejnych napotkanych jądrach tarczy, tworząc kaskadę międzyjądrową. Dochodzi nawet do rozszczepienia jąder potocznie (tj. wobec bardzo wysokiego progu reakcji) uznawanych za nierozszczepialne, np. ołowiu. Łączna liczba wyemitowanych neutronów (poprzedzających reakcję łańcuchową) na jeden proton o energii 1 GeV w tarczy z ciężkiego pierwiastka, np. Pb, sięga 30. Zastosowanie akceleratora powinno ułatwić też sterowanie systemem, sprowadzające się do regulacji natężenia prądu wiązki, co może pozwolić na rezygnację ze stosowania pochłaniających neutrony prętów sterujących oraz kompensacyjnych, a tym samym umożliwić bardziej efektywną gospodarkę neutronami. W tym miejscu należy podkreślić, że o własnościach układu niewątpliwie decydują jednak procesy w zakresie niskich energii ( $< 20$  MeV), w których wydziela się ponad 99% energii w układzie i blisko 99,9% całkowitej liczby neutronów.

Pierwsza propozycja zastosowania neutronów spalacyjnych z akceleratorów do transmutacji aktywnych rodnych w rozszczepialne, autorstwa E.O. Lawrence'a, liczy sobie ponad pół wieku. Powstały na tej zasadzie projekt MTA produkcji Pu dla celów wojskowych wkrótce zarzucono na skutek odkrycia bogatych złóż rudy uranowej. Natomiast odrodzenie zainteresowania urządzeniami spalacyjnymi, tym razem już z przeznaczeniem do produkcji energii w celach cywilnych, nastąpiło

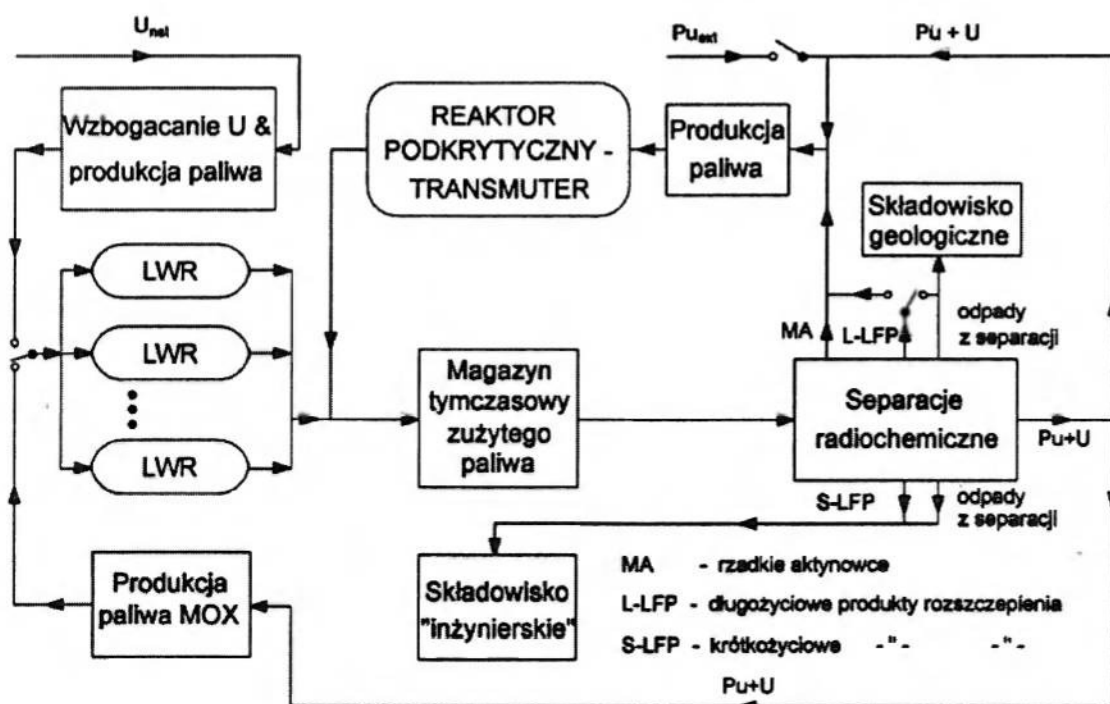
w drugiej połowie lat siedemdziesiątych jako skutek skokowego wzrostu cen paliw (w tym uranu) w wyniku kryzysu naftowego. Obecnie głównym celem transmutacji staje się unieszkodliwianie odpadów z energetyki jądrowej, a rozgłos metoda ta zawdzięcza C. Rubbii, zaangażowanemu w te badania od wczesnych lat 90. [13,14].

W literaturze można znaleźć wiele koncepcji układów podkrytycznych do transmutacji z produkcją energii. Z konieczności ograniczymy się do przykładu. Ideę podkrytycznego urządzenia do transmutacji na neutronach prędkich [14] przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Schemat sterowanego akceleratorem zestawu podkrytycznego do transmutacji.

Proponuje się wiele wariantów systemów energetyki jądrowej z wykorzystaniem układów podkrytycznych sterowanych akceleratorami, których różnicowanie wynika głównie z odmiennych założeń odnośnych rozwiązań szczegółowych. Można bowiem albo stawiać bardziej dalekosiężne zadanie projektowania samowystarczalnego systemu jądrowego o zamkniętym cyklu paliwowym, albo np. ograniczać się do opracowania technologii niszczenia odpadów istniejących, których globalna ilość będzie narastać jeszcze przez wiele dziesiątek lat. Przykład (rys. 6) symbiotycznego układu: reaktory lekkowodne (LWR) – podkrytyczny transmuter, ilustrujący możliwości wyboru różnych wariantów przedstawia m.in. alternatywne przepływy materiałów. Wybrano tu koncepcję zakładającą współpracę z układami krytycznymi, wychodząc z założenia, że opcja wspomagająca istniejącą energetykę jądrową dla praktycznego zamknięcia cyklu paliwowego ma największe szanse realizacji w najbliższej przyszłości.



Rys. 6. Symbiotyczny układ energetyki jądrowej z układem podkrytycznym (cykl U-Pu).

W jej ramach można wyróżnić dwa skrajne warianty: 1) wypalanie Pu i MA (np. nagromadzonych wcześniej) bez odtwarzania paliwa; 2) rozwojowy – o samowystarczalności paliwowej (ściśle biorąc, zakładającej uzupełnianie wypalanych aktynowców w systemie jedynie uranem naturalnym, zubożonym lub torem), ograniczony do zużycia wyłącznie paliwa wytwarzanego w systemie.

Między tymi biegunami należy dopuścić mnogość opcji pośrednich o ograniczonych dostawach plutonu spoza systemu lub uzupełnianie własnej produkcji zwykłym paliwem uranowym. Podstawą takiej klasyfikacji jest wyraźnie odmienny bilans neutronów w tych przypadkach, od którego m.in. zależy liczba reaktorów lekkowodnych w symbiozie z układem podkrytycznym. Przy dostawach Pu z zewnątrz nie ma konieczności odtwarzania zużytych nuklidów rozszczepialnych (przy mniej optymistycznej ocenie przyszłości energii jądrowej wyłącznym celem może być ich „wypalanie”). Można wtedy poświęcić pewną liczbę neutronów również na unieszkodliwianie długo żyjących produktów rozszczepień (drogą transmutacji w nuklidy trwałe), a także zaakceptować „zmiękczone” widmo, pozwalające zmniejszyć wsad materiałów rozszczepialnych. Warto też zauważyć,

że przewidywanie jeszcze przez wiele dekad niskich cen uranu nie daje przesłanek dla przyjęcia skrajnego wariantu rozwojowego, tym bardziej, że przy próbach transmutacji (notabene endoenergetycznych) także produktów rozszczepień należy się liczyć z trudnościami zbilansowania neutronów również w układach na neutronach prędkich. Uzupełnianie jedynie uranem naturalnym – zamiast wzbogaconym – wsadu aktynowców w układzie wobec znikomej zawartości  $^{235}\text{U}$  nie ma tu większego znaczenia.

Zasadniczy przewidywany przepływ materiałów odbywałby się według następującego schematu. Reaktory lekkowodne LWR mogą być zaopatrywane w oba rodzaje paliw – uranowe oraz MOX. Po kampanii paliwowej U i Pu są wydzielane ze zużytego paliwa dla odtworzenia paliwa MOX, a rzadkie aktynowce są oddzielane z pozostałości od produktów rozszczepienia. Pluton można poddać recyklingowi w widmie termicznym co najwyżej dwukrotnie (z powodu wypalania izotopów  $^{239}\text{Pu}$  i  $^{241}\text{Pu}$ ). Następnie musi być on „odświeżony” w widmie „twardym” (w układzie podkrytycznym), w którym towarzyszą mu: Am i Cm oraz (ewentualnie) część Np, dla którego alternatywą może być recykling jako składnika paliwa MOX w LWR-ach. Zregenerowany Pu wraca

pod postacią paliwa MOX do LWR-ów. Kojarzenie  $^{237}\text{Np}$  z Pu dzięki reakcji  $(n,\gamma)$  daje mieszaninę izotopów o podwyższonej zawartości  $^{238}\text{Pu}$ , którego rola zasługuje na wzmiankę. Jego duża moc cieplna (ok. 0,6 kW/kg) skutecznie utrudnia wykorzystanie Pu dla celów militarnych już od zawartości  $\geq 5\%$  [15]. Natomiast wydajne zasilanie całego systemu także uranem wzbogaconym umożliwia transmutacje również długo żyjących produktów rozszczepienia. Wzrasta przy tym ilość odpadów z procesu wzbogacania (U zubożony + produkty rozpadu). Bardziej racjonalne wydaje się więc ostateczne składowanie produktów rozszczepienia w formacjach geologicznych (zresztą łatwiejsze niż aktynowców). Jednak ostateczny wybór konkretnej koncepcji w tej chwili byłby przedwczesny; wykraczałby on poza ramy nauki czy techniki, ponieważ jest sprawą polityczną, jak zresztą każda decyzja dotycząca postępowania z istotnymi ilościami materiałów rozszczepialnych.

## 5. Problemy badawcze

Problemy transmutacji jądrowych często nie odpowiadają potocznym wyobrażeniom. W ich interdyscyplinarnym charakterze priorytet należy do fizyki reaktorów, na której spoczywa fundamentalne opracowanie koncepcji układu i oceny jego bezpieczeństwa, stawianie pytań pod adresem specjalistów innych dziedzin itp. Ponadto wydaje się, że wobec dotychczasowego braku motywacji do badań układów podkrytycznych nie wszystkie ich własności poznano w zadowalającym stopniu [16]. Trzeba wziąć pod uwagę problemy radiochemii, zwłaszcza rozwinięcie metod separacji, bez których zamknięty cykl paliwowy jest nie do pomyslenia. Z kolei zadaniem specjalistów technologii akceleratorowej staje się zapewnienie maksymalnej niezawodności, wysokiej sprawności tego urządzenia i odpowiedniego formowania wiązki o wymaganej mocy. W końcu pojawiają się zagadnienia materiałowe, zdominowane przez kwestie kompatybilności materiałów (m.in. korozja) w warunkach znacznych uszkodzeń radiacyjnych.

Jednocześnie należy podkreślić, że determinanty ekonomiczne i społeczne przedsięwzięć o charakterze ściśle użytkowym na skalę przemysłową wymagają znacznie dokładniejszej znajomości

całości kształtu procesów niż badania z zakresu czystej nauki.

Zatem nie wszystkie trudności są już rozwiązane. Świadom ryzyka wzbudzenia wątpliwości odnośnie do idei transmutacji w układach sterowanych akceleratorem, autor pragnie zasygnalizować je zgodnie z własnym rozeznaniami. Układy podkrytyczne nie mogły uniknąć wszystkich wad układów krytycznych. Problemy związane z wydzielaniem ciepła powyłaczeniowego (z rozpadów  $\beta$  i  $\gamma$  produktów rozszczepienia) pozostają takie same jak w reaktorach krytycznych. Wykluczenie niebezpieczeństwa uszkodzenia elementów paliwowych jest możliwe przez stosowanie układu typu basenowego z ciekłym ołowiem lub eutektyką Pb-Bi jako chłodziwem (wzorowanego na istniejących rosyjskich jednostkach napędowych łodzi podwodnych). Jednocześnie znane są problemy kompatybilności materiałowej agresywnych chemicznie ciekłych metali i paliwa oraz materiałów konstrukcyjnych. Z kolei w ramach SDI (Strategic Defense Initiative, tj. amerykańskiego programu strategicznego obrony przeciwrakietowej, tzw. wojen gwiazdnych) rozwijano projekt stosowania wiązek cząstek naładowanych do niszczenia obiektów w przestrzeni kosmicznej. Efektem tych prac było rozwiązanie umożliwiające uzyskanie wiązki protonów o energii ok. 1 GeV i natężeniu prądu przekraczającym 100 mA. Nie ma jednak informacji o przystosowaniu tych urządzeń do pracy ciągłej, zbyt cennej dla celów wojskowych, a wymaganej od elementów systemu energetycznego. Także istniejące akceleratory badawcze pomimo dużej ogólnej niezawodności są dalekie od zadowalającej stabilności wiązki, absolutnie niezbędnej przy produkcji energii elektrycznej. Ponadto byłoby błędem zakładanie, że realne jest dokonywanie radiochemicznej separacji z dokładnością stuprocentową skutecznością. Współczynniki rozdziału, choć znacznie przekraczające 0,99 (według niektórych prac nawet 0,9995), nie gwarantują zerowych koncentracji we frakcjach odpadowych, co oznacza, że obecnie można oczekiwać łącznego zmniejszenia ilości odpadów aktynowców o ponad dwa rzędy wielkości, ale nie do zera.

Niemniej jednak zarysowane problemy są do pokonania, nie dotyczą bowiem zagadnień fundamentalnych, a ich rozwiązanie sprowadza się jedynie do osiągnięcia etapu dojrzałości technologicznej. Warto zauważyć, że wstrzymanie wprowadze-



nia energetyki jądrowej w Polsce daje wystarczająco dużo czasu na doskonalenie metod transmutacji.

## 6. Podsumowanie

Sterowane akceleratorem układy podkrytyczne do transmutacji nuklidów promieniotwórczych z produkcją energii stanowią przyszłościowy wariant energetyki jądrowej. Pozwalają na skrócenie czasu zagrożenia silnie toksycznymi odpadami z energetyki jądrowej, a dzięki działaniu w stanie podkrytycznym umożliwiają bezpieczne wykorzystanie energii pozostałej w odpadach. Praktycznie zamknięty cykl paliwowy ( $< 0,01$  odpadów) o samowystarczalności paliwowej zapewnia redukcję skali, a tym samym kosztów składowania odpadów w formacjach geologicznych.

Opracowanie to wykonane zostało przy wsparciu KBN w ramach zadania SPR 4.2.

## Literatura

- [1] S. Taczanowski, W. Pohorecki, *Arch. Energetyki* 1-2, 3 (1998).
- [2] S. Taczanowski, *Postępy Techniki Jądrowej* 41, z. 4, 37 (1998).
- [3] G. Baumgartel, K.-L. Huppert, E. Merz, *Brennstoff aus der Asche* (Verlag Girardet, 1984).
- [4] S. Taczanowski, „A Partitioning-Free Transmutation Concept of Nuclear Waste Reduction”, Technical Committee Meeting, Vienna, Nov. 1995, IAEA *TECDOC 916*, 137 (1996).
- [5] K. Abrahams i in., „Transmutation of Nuclear Waste in Nuclear Reactors”, IV Eur. Conf. on Management and Disposal of Radioactive Waste, March 1996, *EUR 17543 EN* (1997), s. 71.
- [6] H. Yoshida i in., „A strategic study of the partitioning and transmutation system”, *Proc. Int. Conf. Emerging Nucl. Energy Syst. ICENES '93*, Chiba, Japan, Sept. 1993 (World Scientific, 1994), s. 463.
- [7] M. Salvatores i in., „Role of Accelerator-Driven Systems in Waste Incineration Scenarios”, *GLOBAL '97, Int. Conf. on Future Nuclear Systems*, Yokohama, Oct. 1997, s. 561.
- [8] *JENDL-3 library*, JAERI, Telnet, iaeands/iaeand.or.at (1999).
- [9] J. Blachot i in., *Ann. Nucl. Energy* 24, 4891 (1997).
- [10] S. Taczanowski, praca nieopublikowana.
- [11] H. Rief, H. Takahashi, „Safety and Control of Accelerator-Driven Subcritical Systems”, *Proc. I Int. Conf. on Accel.-Driven Transmutation Technol. and Appl.*, Las Vegas, July 1994 (1995), s. 159.
- [12] H. Takahashi, „The use of accelerator in nuclear energy”, *Proc. Int. Conf. Emerging Nucl. Energy Syst. ICENES '93*, Chiba, Japan, Sept. 1993 (World Scientific, 1994), s. 393.
- [13] F. Carminati i in., „An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator” (1993), CERN/AT/93-47 (ET).
- [14] C. Rubbia, „High Gain Energy Amplifier Operated with Fast Neutrons”, *Proc. I Int. Conf. on Accel.-Driven Transmutation Technol. and Appl.*, Las Vegas, July 1994 (1995), s. 44.
- [15] J.V. Massey, A. Schneider, *Nucl. Techn.* 56, 55 (1982).
- [16] S. Taczanowski, „Neutronic Optimization of Accelerator-driven Subcritical Systems for Transmutation”, *Proc. of ICENES '96*, Tel Aviv, June 1998, s. 777.

# Fizyka oddziaływań elementarnych po powstaniu ich teorii\*

Zygmunt Ajduk, Stefan Pokorski

*Instytut Fizyki Teoretycznej, Uniwersytet Warszawski*

---

## Physics of elementary interactions after formulation of their theory

*Abstract:* Current and future research directions in the physics of elementary interactions are presented on the basis of their present theory.

---

### 1. Wstęp

Zbliża się koniec wieku i kończy się pierwsze stulecie przyznawania Nagród Nobla w dziedzinie fizyki. Minęło także sto lat od odkrycia w 1896 r. promieniotwórczości (Nagroda Nobla 1903 dla A. Becquerela, P. Curie i M. Skłodowskiej-Curie) i od odkrycia w 1897 r. pierwszej cząstki elementarnej – elektronu (J.J. Thomson, Nagroda Nobla 1906). Nietrudno sprawdzić, że ok. 30% Nagród Nobla (z 93 dotychczas przyznanych) dotyczy teoretycznych, doświadczalnych i aparaturowych odkryć w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych. Nie uwzględniamy w tym rachunku Nagród za odkrycia związane z mechaniką kwantową, które razem z teorią względności stworzyły podstawy opisu teoretycznego w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych. Mijający wiek był świadkiem rewolucyjnych odkryć i przyniósł zasadniczy postęp w naszym rozumieniu mikroskopowej struktury otaczającego nas świata.

Początek stulecia to trudności maxwellowskiej elektrodynamiki klasycznej przy wyjaśnianiu promieniowania atomów, trudności z widmem

promieniowania ciał doskonale czarnych i dyskusja nad naturą światła. Problemy te znajdują swoje ostateczne rozwiązanie w latach dwudziestych wraz ze sformułowaniem mechaniki kwantowej, która całkowicie zmienia nasze rozumienie mikroskopowej struktury materii. Na początku lat trzydziestych okazało się, że promieniotwórczość stanowi przejaw dwóch nowych typów oddziaływań: oddziaływań silnych odpowiedzialnych za rozpad  $\alpha$  i oddziaływań słabych odpowiedzialnych za rozpad  $\beta$ . Lista oddziaływań elementarnych obserwowanych w ziemskich doświadczeniach objęła, poza elektromagnetyzmem i grawitacją, także oddziaływania słabe oraz silne i pozostaje taka do dziś. Przy końcu wieku osiągnęliśmy pełne zrozumienie tych dwóch nowych typów oddziaływań. Można śmiało powiedzieć, że zamknięty został pewien rozdział w badaniach podstaw struktury materii.

Na obecny stan naszej wiedzy o oddziaływaniach elementarnych składa się klasyczna teoria grawitacji i kwantowa teoria oddziaływań silnych, słabych i elektromagnetycznych, czyli Teoria Standardowa (powszechnie nadal nazywana

---

\* Artykuł oparty na referacie wygłoszonym przez Stefana Pokorskiego w Warszawie na posiedzeniu Rady Naukowej Instytutu Problemów Jądrowych dnia 21 grudnia 1999 r. i na konwersatorium im. Jerzego Pniewskiego dnia 20 marca 2000 r.

Modelem Standardowym). Teoria Standardowa wykorzystuje język kwantowej teorii pola. Podstawą fizyczną kwantowej teorii pola jest dualizm korpuskularno-falowy przekształcony w dualizm materii i oddziaływań. U podstaw kwantowego obrazu oddziaływania elementarnego leży pojęcie lokalnych symetrii cechowania oraz pojęcie próżni, czyli stanu podstawowego, którego wybór może prowadzić do naruszenia tej symetrii. Zasadniczą cechą Teorii Standardowej jest jej renormalizowalność.

## 2. Teoria Standardowa

Pierwszy składnik Teorii Standardowej stanowi zuniifikowana teoria oddziaływań elektrosłabych. Obecnie wiemy już, że poprawnie tłumaczy ona wszystkie zjawiska elektromagnetyczne i słabe do energii 100 GeV. Badania nad oddziaływaniami słabymi rozpoczęły się od analizy rozpadu  $\beta$ . W 1930 r. Wolfgang Pauli wysunął hipotezę istnienia neutrina, a w latach 1933–34 Enrico Fermi przedstawił fenomenologiczną teorię rozpadu  $\beta$ . Idea unifikacji pojawia się w latach 50. (J. Schwinger 1957, S. Glashow 1958). Jednocześnie następuje dalszy postęp w fenomenologicznym opisie oddziaływań słabych (T.D. Lee, C.N. Yang, R.P. Feynman, M. Gell-Mann, R. Marshak, E. Sudarshan, N. Cabibbo). C.N. Yang i R. Mills, wzorując się na elektrodynamice, tworzą uogólnioną teorię pól z symetrią cechowania. Nierenormalizowalność teorii Fermiego i dążenie do stworzenia teorii renormalizowalnej prowadzi nas do ostatniego, czysto teoretycznego kroku – postulatu, że zuniifikowana teoria oddziaływań elektrosłabych jest teorią z naruszoną spontanicznie (poprzez mechanizm Higgsa) symetrią cechowania.

Przypomnijmy, że Nagrodą Nobla z fizyki w 1999 r. uhonorowani zostali Martinus Veltman i Gerardus 't Hooft z Uniwersytetu w Utrechcie za prace z lat 1968–72 (w tym czasie 't Hooft był doktorantem Veltmana), w których dokonali pełnego wyjaśnienia struktury matematycznej teorii opisującej w jednolity sposób oddziaływania elektromagnetyczne i słabe, a mianowicie pokazali jej renormalizowalność. Oznaczało to możliwość obliczania poprawek kwantowych w tej teorii, a tym samym jej precyzyjne sprawdzanie w doświadczeniach. Była to trzecia Nagroda Nobla bezpośred-

nio związana ze zuniifikowaną teorią oddziaływań elektrosłabych. Poprzednie dwie otrzymali S. Glashow, A. Salam i S. Weinberg (1979) za sformułowanie w latach 1959–68 podstaw teoretycznych zuniifikowanego opisu oddziaływań elektrosłabych (w tym za przewidzenie istnienia prądów neutralnych) oraz C. Rubbia i S. Van der Meer (1984) za doświadczalne odkrycie bozonów W i Z.

Czym jest unifikacja elektrosłaba? Z punktu widzenia mechaniki kwantowej na istnienie pola elektromagnetycznego można spojrzeć jako na konsekwencję żądania niezmienniczości opisu stanu elektronu względem dowolnej zmiany fazy jego funkcji falowej  $\psi(x) \rightarrow e^{ie\theta(x)/\hbar}\psi(x)$  niezależnie w każdym punkcie  $x$  czasoprzestrzeni. Przekształcenie takie nazywamy lokalnym przekształceniem cechowania. Swobodny ruch elektronu opisany równaniem Diraca nie ma tej właściwości i zezwala tylko na dowolną fazę stałą w całej przestrzeni. Dodanie oddziaływania elektromagnetycznego opisanego potencjałem elektromagnetycznym  $A_\mu(x)$ , który przy zmianie fazy przekształca się zgodnie ze wzorem  $A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) - \partial\theta(x)/\partial x^\mu$ , zapewnia, że równanie Diraca  $(i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu - mc)\psi(x) = e\gamma^\mu A_\mu\psi(x)$  dla cząstki o ładunku  $e$  w takim polu jest niezmiennicze względem lokalnych przekształceń cechowania. Niezmienniczość względem tych przekształceń jest podstawą renormalizowalności elektrodynamiki kwantowej: przewidywania dla wszystkich zjawisk elektromagnetycznych można wyrazić w funkcji mierzonych mas i ładunków elektrycznych (podstawy matematyczne elektrodynamiki kwantowej w postaci renormalizowalnej kwantowej teorii pola sformułowane zostały przez R.P. Feynmana, J. Schwingera i S. Tomonagę (Nagroda Nobla 1965)).

Unifikacja oddziaływań słabych i elektromagnetycznych nie może zniszczyć sukcesów elektrodynamiki kwantowej, która ma się stać częścią ogólniejszej teorii. Dwa podstawowe kroki w kierunku unifikacji elektrosłabej to:

1. Postulat lokalnej symetrii cechowania związanej z istnieniem ładunków oddziaływań słabych, czyli słabego izospinu  $T_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  (operatory  $T_i$  spełniają związki komutacyjne  $[T_i, T_j] = i\epsilon_{ijk}T_k$ ) i jednoczesne włączenie do pełnej grupy przekształceń symetrii  $U_{em}(1)$  (związanej z zachowaniem ładunku elektrycznego) poprzez zdefiniowanie słabego hiperładunku  $Y = Q - T_3$ , który, jak



się okazuje, jest przemienny z operatorami izospinu  $T_i$ . Żądanie symetrii cechowania względem pełnej grupy przekształceń  $SU(2) \times U_Y(1)$  prowadzi do istnienia czterech bozonów  $W^\pm$ ,  $W^0$ ,  $B$ . Foton jest kombinacją liniową bozonów  $W^0$  i  $B$ , druga liniowo niezależna kombinacja tych bozonów to fizyczna cząstka  $Z^0$ .

2. Postulat głoszący, że próżnia (stan podstawowy układu oddziałującego elektroslabo) jest nieskończonym rezerwuarem cząstek skalarnych obojętnych elektrycznie, ale naładowanych słabo. Oddziaływanie tych cząstek z bozonami  $W^\pm$  i  $Z^0$  nadaje im masy efektywne. Foton, który oddziałuje wyłącznie z ładunkiem elektrycznym, pozostaje bezmasowy, gdyż te cząstki skalarne nie niosą ładunku elektrycznego. Opisany mechanizm nosi nazwę mechanizmu Higgsa i, w bardziej technicznym języku, jest odpowiedzialny za spontaniczne naruszenie symetrii  $SU(2) \times U_Y(1)$ . Ścisłą symetrią pozostaje jedynie podgrupa  $U_{em}(1)$ , której generator  $Q$  spełnia związek  $Q = T_3 + Y$ . Konsekwencją mechanizmu Higgsa jest istnienie cząstki skalarnej, zwanej cząstką Higgsa, której poszukiwania doświadczalne wciąż trwają.

Drugą częścią Modelu Standardowego jest chromodynamika kwantowa, podstawowa teoria oddziaływań silnych, która podobnie jak teoria oddziaływań elektroslabych jest kwantową teorią pól z lokalną symetrią cechowania. Krokami milowymi w badaniu oddziaływań silnych były: odkrycie neutronu przez J. Chadwicka (Nagroda Nobla 1935), hipoteza Yukawy o nośniku sił jądrowych (Nagroda Nobla 1949) i jej doświadczalne potwierdzenie przez C. Powella dzięki odkryciu pionu (Nagroda Nobla 1950). Prawdziwym przełomem było odkrycie złożonej, kwarkowo-gluonowej struktury hadronów. W tym kontekście wymienić należy sformułowanie przez M. Gell-Manna (Nagroda Nobla 1969) i G. Zweiga hipotezy o budowie kwarkowej hadronów i jej potwierdzenie w doświadczeniach głęboko nieelastycznego rozpraszania elektronów w SLAC-u (Nagroda Nobla 1990 dla J. Friedmana, H. Kendalla i R. Taylora). Ostateczne zrozumienie podstaw oddziaływań silnych i sformułowanie chromodynamiki kwantowej opiera się na co najmniej dwóch dodatkowych odkryciach teoretycznych inspirowanych przez fakty doświadczalne. Są to: odkrycie nowej liczby kwantowej, koloru (O. Greenberg i inni) i hipoteza związanej z nią nowej,

ściślej lokalnej symetrii cechowania dla oddziaływań kwarków i gluonów, a także odkrycie, że taka teoria jest asymptotycznie swobodna, czyli oddziaływanie między kwarkami i gluonami zanika w zderzeniach z bardzo dużymi przekazami pędu. Asymptotyczna swoboda tych oddziaływań jest ich podstawową cechą potwierdzoną doświadczalnie. Można przewidywać, że następna, prawdopodobnie ostatnia, Nagroda Nobla za odkrycia związane z Teorią Standardową przypadnie D. Grossowi, H. Politzerowi i F. Wilczkowi właśnie za odkrycie asymptotycznej swobody chromodynamiki kwantowej.

### 3. Unifikacja

Fundamentalną cechą teorii opisujących oddziaływania elektromagnetyczne, a obecnie także elektromagnetyczne i słabe, jest unifikacja podstawowych praw fizyki. Idea unifikacji jest nie tylko niezwykle atrakcyjna ze względów poznawczych, ale okazała się jak dotąd niezwykle trafna i poprawna w stosunku do oddziaływań fundamentalnych. Atrakcyjność poznawcza tej idei jest oczywista: w procesie poznania chcielibyśmy wyjaśnić możliwie dużo różnorodnych zjawisk za pomocą możliwie małej liczby głębszych zasad. Jej trafność sprawdziła się już dwukrotnie. Zjawiska elektryczne i magnetyczne okazały się przejawem tych samych praw fizyki, ujętych w teorię elektromagnetyczną Maxwella. Przypomnijmy podstawowe fakty w procesie dochodzenia do tej teorii. Naukowa analiza zjawisk elektrycznych i magnetycznych rozpoczęła się w drugiej połowie XVIII w. od odkrycia prawa zachowania ładunku elektrycznego (B. Franklin 1750) oraz praw Coulomba dla ładunków elektrycznych (1785) i biegunów magnetycznych (1788) oraz prądu elektrycznego (L. Galvani 1786). W 1820 r. H. Oersted, A. Ampère, J. Biot i F. Savart odkryli i zbadali magnetyczne oddziaływanie prądu elektrycznego, a w 1831 r. M. Faraday odkrył indukcję elektromagnetyczną. W ten sposób ujawniło się ściśle powiązanie zjawisk elektrycznych i magnetycznych. W 1834 r. M. Faraday wprowadził pojęcie pola elektromagnetycznego i linii sił pola, a w latach 1860–65 J.C. Maxwell stworzył teorię pola elektromagnetycznego. W równaniach pola Maxwell dodał nowy człon, zwany prądem przesunięcia, który prowadził do równań falowych i dwóch waż-

nych przewidywań teorii Maxwella: istnienia fal elektromagnetycznych i elektromagnetycznej natury światła. Teoria Maxwella została w pełni zaakceptowana dopiero po odkryciu fal elektromagnetycznych przez H. Hertza w 1888 r.

Historia powtórzyła się całkiem niedawno: pozornie zupełnie różne oddziaływania słabe i elektromagnetyczne okazały się znowu przejawem tych samych podstawowych praw fizyki, ujętych tym razem w postaci zunifikowanej teorii oddziaływań elektroślabych. Te dwa oddziaływania wyglądają różnie tylko przy energiach  $E \ll 100$  GeV, ale nawet wtedy można je rozpatrywać oddzielnie tylko w pewnym przybliżeniu. Pomiar momentu magnetycznego mionu w Brookhaven ma być wystarczająco dokładny, aby zobaczyć wpływ oddziaływań słabych na jego wartość. Z punktu widzenia teorii zunifikowanej, dla procesów zachodzących przy niskich energiach, oddziaływania słabe są poprawką do oddziaływań elektromagnetycznych (poprawką nierenormalizowalną – będzie dokładniej o tym mowa w następnym rozdziale), która jest rzędu  $E/M_W c^2$ , gdzie  $M_W$  – masa bozonu W. W procesach wysokoenergetycznych przy energiach  $E \geq M_W$  zanika podstawowa różnica między „siłą” oddziaływań elektromagnetycznych przenoszonych przez foton o masie zerowej i słabych przenoszonych przez cząstki o masie rzędu  $M_W$ , czyli  $\sim 100$  GeV/ $c^2$ . W języku kwantowej teorii pola oznacza to, że stałe sprzężenia dla obu typów oddziaływań są podobne.

Na przedstawionych przykładach unifikacji można prześledzić wzajemną rolę badań doświadczalnych i teoretycznych w procesie dochodzenia do ostatecznej syntezy. Refleksja taka jest interesująca z dwóch powodów. Po pierwsze przypomina, że fizyka jest nauką racjonalno-empiryczną i współlistnienie obu tych składników jest niezbędne w procesie syntezy. Po drugie, nadaje pewną perspektywę spojrzeniu na obecny stan badań w fizyce oddziaływań fundamentalnych. Można także dostrzec pewne analogie w dochodzeniu do tych zunifikowanych praw przyrody. Najpierw doświadczenie dostarcza informacji, które są przetwarzane w fenomenologiczne modele teoretyczne. Następnie zainteresowanie teorii koncentruje się na niespójnościach teoretycznych tych modeli (w przypadku teorii przedmaxwellowskiej była to niezgodność z zasadą zachowania

ładunku elektrycznego, w przypadku teorii Fermiego – jej nierenormalizowalność) i dążenie do ominięcia tych trudności teoretycznych, a często także do większej symetrii teorii, doprowadza w końcu do postulatów teoretycznych, które wykraczają daleko poza potrzeby istniejących faktów empirycznych i prowadzą do przewidzenia nowych zjawisk fizycznych. Teoria Maxwella przewidywała istnienie fal elektromagnetycznych. Zunifikowana teoria elektroślaba przewidywała istnienie prądów neutralnych, bozonów W i Z, kwarków c i t oraz bozonu Higgsa. I wreszcie następuje trzecia faza – współpraca doświadczenia i teorii przy precyzyjnym sprawdzaniu teorii.

Fascynujące pozostaje pytanie, czy wszystkie siły opisywane przez Teorię Standardową (elektroślabe i silne) są przejawem jednego oddziaływania, zunifikowanego przy bardzo wysokich energiach. Hipoteza ta nosi nazwę Wielkiej Unifikacji i wykracza daleko poza Teorię Standardową. Wrócimy do niej w ostatnim rozdziale.

#### 4. Renormalizowalność i efektywne teorie pola

Można zadać pytanie, dlaczego trzeba było kilkudziesięciu lat, żeby w pełni zrozumieć naturę oddziaływań słabych i silnych. Przecież takie procesy jak rozpad  $\beta$  czy rozpad  $\alpha$  charakteryzują się skalą energii rzędu MeV, od dawna osiągalnych w warunkach laboratoryjnych. Można by więc sądzić, że procesy te mogły być szczegółowo przebadane i zrozumiane już dawno. Okazuje się jednak, że tak nie jest. Kluczem do zrozumienia tych zjawisk, zachodzących nawet spontanicznie (promieniotwórczość), są procesy zachodzące przy znacznie wyższych energiach. Inaczej mówiąc, do zrozumienia struktury materii na odległościach rzędu  $10^{-13}$  cm trzeba było ją zrozumieć na odległościach rzędu  $10^{-16}$  cm. To z kolei wymaga olbrzymich energii zderzeń, osiągalnych dopiero od niedawna w akceleratorach. Takie powiązanie świata lekkiego ze światem ciężkim, zaskakujące na poziomie fizyki klasycznej, ma swoje głębokie źródło w kwantowej naturze budowy materii. W układach kwantowych obowiązuje zasada nieoznaczoności energii i czasu. Najbardziej znanym przykładem tego związku jest związek czasu życia stanu rezonansowego z jego szerokością. W kwantowej teorii pola przejawem zasady nieoznaczoności jest

fakt, że wymiana stanów wirtualnych bardzo ciężkich cząstek z reguły wpływa na oddziaływania cząstek lekkich przy energiach  $E$  dużo niższych od skali mas  $M$  cząstek wirtualnych. Tym samym fizyka na bardzo małych odległościach wpływa na zjawiska zachodzące na odległościach dużo większych.

W tej sytuacji narzuca się natychmiast pytanie odwrotne: skoro stwierdziliśmy, że zjawiska zachodzące przy bardzo różnych skalach energii (na bardzo różnych odległościach) są wzajemnie ze sobą powiązane, to co jest odpowiedzialne za fakt, że jednak udaje się nam zrozumieć strukturę materii w pewnych etapach znaczących skalami energii dostępnej w oddziaływaniu. Jest to właściwy moment, żeby poświęcić trochę miejsca renormalizowalnym i efektywnym teoriom pola.

Opis współzależności fizyki przy różnych skalach energii upraszcza się w istotny sposób, gdy zjawiska zachodzące w pewnym obszarze energii  $E \ll Mc^2$  można zrozumieć w języku renormalizowalnej kwantowej teorii pola. Podstawową cechą teorii renormalizowalnej jest fakt, że dominujące efekty nieznannej fizyki przy  $Mc^2 \gg E$  można „ukryć” w skończonej liczbie swobodnych, wyznaczonych z doświadczenia parametrów teorii. Przewidywania teorii można podać z dowolną w zasadzie dokładnością w funkcji tych parametrów. Nie znaczy to oczywiście, że teoria taka jest ściśle prawdziwa. Pominięta przez tę teorię nieznaną fizyką przy skali  $M$  ma prawo przejawiać się w rozbieżności rzędu  $E/Mc^2$  przewidywań teorii z doświadczeniem. Zależnie od skali  $E$  i  $M$  efekty takie można odkryć dopiero przy odpowiedniej precyzji doświadczenia i obliczeń w teorii renormalizowalnej. Podstawową zaletą teorii renormalizowalnej jest więc fakt, że potrafi z bardzo dobrym przybliżeniem opisać zjawiska zachodzące w pewnym zakresie energii. Z drugiej strony, sformułowanie teorii renormalizowalnej jest pewnym etapem, który trudno przekroczyć w penetracji struktury materii, gdyż albo wymaga to energii  $E \sim Mc^2$ , albo dokładności rzędu  $E/Mc^2$ . Interesującym przykładem jest elektrodynamika kwantowa, która jest teorią renormalizowalną i jednocześnie przybliżeniem niskoenergetycznym pełnej teorii elektroslabej. Bliższe spojrzenie na ich wzajemną relację ułatwi nam dyskusję współczesnych kierunków badań. Jednym z najbardziej spektakularnych sukcesów elektrodynamiki kwantowej jest

zgodność momentu magnetycznego mionu z przewidywaniami teorii. Jeśli jednak spojrzymy na elektrodynamikę kwantową jako na teorię efektywną, to nowa fizyka (w tym wypadku oddziaływania słabe) może dać dodatkowy nierenormalizowalny wkład do momentu magnetycznego mionu. Dopiero w obecnych doświadczeniach w Brookhaven ten moment ma być zmierzony z dokładnością wystarczającą do odkrycia takiej nierenormalizowalnej poprawki, jeśli  $M \sim M_W$ . Doświadczenia te odkryłyby więc, badając wyłącznie procesy elektromagnetyczne, istnienie nowej fizyki przy skali  $M \sim M_W$ , nawet gdybyśmy nie znali jeszcze teorii oddziaływań elektroslabych i nie osiągnęli wcześniej w laboratoriach energii  $E \sim M_W c^2$ . Oczywiście, teoria elektroslaba powstała znacznie wcześniej niż możliwości odpowiednio precyzyjnego pomiaru momentu magnetycznego mionu. Stało się to dzięki temu, że te potencjalne (z historycznego punktu widzenia) poprawki do elektrodynamiki kwantowej przejawiają się w przyrodzie także poprzez pozornie odmienny typ oddziaływań (nie zachowują się pewne liczby kwantowe, zachowywane w sposób „przypadkowy” w oddziaływaniach elektromagnetycznych), a mianowicie poprzez oddziaływania słabe, których efektywna teoria niskoenergetyczna (teoria Fermiego) jest nierenormalizowalna. Żądanie renormalizowalności doprowadziło do powstania teorii Glashowa–Salama–Weinberga oddziaływań elektroslabych.

## 5. Co przyniesie wiek XXI?

Wiek XIX przyniósł unifikację elektryczności i magnetyzmu. Wiek XX przyniósł unifikację elektroslabą. Co przyniesie wiek XXI? Czy pełną unifikację oddziaływań łącznie z silnymi? Łącznie z grawitacyjnymi? Są to bardzo atrakcyjne idee. Zamknięty rozdział nie oznacza końca badań nad oddziaływaniami fundamentalnymi. Zamykanie jednego rozdziału jest równoczesne z otwieraniem nowego. W ostatnich 15–20 latach równolegle do coraz bardziej precyzyjnego sprawdzania Teorii Standardowej (badania doświadczalne i teoretyczne) prowadzone są badania traktujące tę teorię jako teorię efektywną, która opisuje w bardzo dobrym przybliżeniu oddziaływanie elementarne przy skali energii poniżej 100 GeV, ale wymaga zanurzenia w jeszcze bardziej fundamen-



talnej teorii. Główny nurt badań oddziaływań elementarnych przesunął się wyraźnie w tym kierunku.

Jak już wspomnieliśmy wielokrotnie, Teoria Standardowa jest teorią renormalizowalną. Dlatego ewentualne obserwowalne efekty pochodzące od nowych, nieznanych skal  $M$  (np. od skali Wielkiej Unifikacji) mogą być co najwyżej rzędu  $E/Mc^2$  i na poziomie Teorii Standardowej pojawiałyby się jako nierenormalizowalne poprawki do tej teorii (podobnie jak poprawki od oddziaływań słabych do momentu magnetycznego mionu w elektrodynamice kwantowej). Poprawki takie mogą naruszać (i prawdopodobnie naruszają) obowiązujące dla znanych oddziaływań elementarnych prawa zachowania niektórych liczb kwantowych. Odkrycie efektów tego rodzaju i tym samym nowej skali  $M$  wymaga więc zwiększenia precyzji doświadczeń dla procesów dozwolonych przez Teorię Standardową lub (co może być łatwiejsze) zaobserwowanie procesów zabronionych przez Teorię Standardową, takich jak rozpad protonu przewidywany przez teorie Wielkiej Unifikacji czy rozpad  $\mu \rightarrow e\gamma$ . Intensywne badania doświadczalne dały dotąd jeden spektakularny wynik. W ciągu ostatnich dwóch lat potwierdzono w przekonujący sposób, że naruszone jest zachowanie liczby leptonowej i że neutrino, cząstki bezmasowe w Teorii Standardowej, mają masę. Najbardziej obecnie przekonująca interpretacja teoretyczna tego faktu to przyjęcie, że masy neutrino są najprawdopodobniej niskoenergetycznym odbiciem fizyki przy skalach  $M \sim 10^{13-15} \text{ GeV}/c^2$ , czyli rzędu skali Wielkiej Unifikacji. Trudno przecenić fundamentalność tego odkrycia.

Równolegle prowadzone są badania teoretyczne, w których istotną rolę odgrywają teorie Wielkiej Unifikacji i badania nad hipotetyczną nową symetrią przyrody, zwaną supersymetrią, zgodnie z którą każdej cząstce o spinie półłukowym (całkowitym) towarzyszy cząstka supersymetryczna o spinie całkowitym (odpowiednio półłukowym) i takich samych pozostałych liczbach kwantowych. Oczekuje się, że masa supersymetrycznych partnerów znanych cząstek jest nieco poza zasięgiem obecnych akceleratorów i dlatego nie zostały one jeszcze odkryte. Idea Wielkiej Unifikacji opiera się na obserwacji, że w ramach Teorii Standardowej stałe sprzężenia („siły”) oddziaływań silnych i słabych zbliżają się do siebie przy

bardzo wysokich energiach rzędu  $10^{15-16} \text{ GeV}$ . Efekt ten jest szczególnie uderzający w teorii opartej na supersymetrycznym rozszerzeniu Teorii Standardowej. Badania teoretyczne koncentrują się także na pewnych potencjalnych problemach teorii, w której zanurzona byłaby Teoria Standardowa. Chodzi o to, że trochę podobnie do problemu nierenormalizowalności teorii Fermiego, który doprowadził do powstania Teorii Standardowej, w głębszej teorii potencjalnie istnieje problem hierarchii skal. Przy istnieniu ogromnych skal  $M$  bardzo trudno jest zrozumieć fakt, że hierarchia  $M_W \ll M$  jest stabilna względem poprawek kwantowych w takiej teorii. Innymi słowy, problemu nie ma, jeśli  $M_W$  traktuje się jako parametr doświadczalny. Problem pojawia się, gdy Teorię Standardową zanurzy się w bardziej fundamentalnej teorii, opisującej jednocześnie fizykę przy skali  $M$ . Żądanie uniknięcia problemu hierarchii jest istotnym ograniczeniem dla takich teorii i doprowadziło do powstania pewnych nowych koncepcji teoretycznych, z których najbardziej atrakcyjne jest wspomniane już supersymetryczne uogólnienie Teorii Standardowej. Innymi bardzo ważnymi elementami stymulującymi badania teoretyczne są próby włączenia oddziaływań grawitacyjnych do „ostatecznej” teorii oddziaływań elementarnych, Teorii Wszystkiego, i przekonanie, że teoria taka powinna być teorią skończoną, czyli pozbawioną rozbieżności i nie wymagającą renormalizacji. Oznacza to prawdopodobnie konieczność odejścia od języka kwantowej teorii pola. Bardzo intensywne badania teoretyczne prowadzone są nad teorią superstrun, która być może spełni te warunki.

Fizyka oddziaływań elementarnych przy skalach energii wyższych od obecnie dostępnych w akceleratorach czy nawet tak ogromnych, jak skala Wielkiej Unifikacji, ma fundamentalny związek z kosmologią i astrofizyką. Poszukiwane bardziej fundamentalne prawa fizyki zadecydowały o rozwoju Wszechświata po Wielkim Wybuchu i o strukturze Wszechświata obserwowanego obecnie. Wszechświat jest więc naturalnym laboratorium dla fizyki przy ogromnych skalach energii. Istnieją co najmniej cztery podstawowe problemy ściśle łączące fizykę oddziaływań elementarnych z kosmologią, a mianowicie znikanie (lub małość) stałej kosmologicznej, inflacyjny rozwój Wszechświata tuż po Wielkim Wybuchu, silna

przewaga materii nad antymaterią (baryogeneza) i wreszcie istnienie we Wszechświecie ciemnej (czyli nie oddziałującej elektromagnetycznie) materii, która prawdopodobnie daje dominujący (ok. 90%) wkład do masy Wszechświata. Każda z teorii pretendujących do opisu fizyki wykraczającej poza Teorię Standardową musi ustosunkować się do tych pytań i najczęściej oferuje konkretne przewidywania. Jednym z najbardziej konkretnych i intensywnie badanych doświadczalnie przewidywań jest hipoteza, że najbliższy supersymetryczny partner znanych cząstek (WIMP – weakly interacting massive particle) jest głównym składnikiem ciemnej materii. Możliwy, choć obecnie mniej prawdopodobny, jest także istotny wkład neutrin.

Czy mamy wystarczająco dużo przesłanek, by nowe koncepcje wykraczające poza Teorię Standardową okazały się prawdziwe? Czy jesteśmy w fazie przedmaxwellowskiej, czy raczej przedfa-

radayowskiej? Czy jesteśmy bliscy dalszej syntezy, czy raczej znowu na początku drogi? Jak ułoży się wzajemna relacja między doświadczeniem i teorią? Czy doświadczenie potwierdzi którąś z obecnych koncepcji, czy raczej wskaże zupełnie nowy kierunek? Akcelerator LHC powinien dać odpowiedź na te pytania. Poszukiwanie cząstki (cząstek?) Higgsa i cząstek supersymetrycznych to główne kierunki planowanych tam badań. Pamiętajmy także o poszukiwaniu procesów zabronionych przez Teorię Standardową, np.  $\mu \rightarrow e\gamma$ ,  $p \rightarrow X$  (tj. rozpad protonu), które mogą okazać się, po masie neutrin, kolejnym niskoenergetycznym śladem fizyki na bardzo małych odległościach, i o związku fizyki oddziaływań elementarnych z kosmologią.

Dziękujemy Andrzejowi K. Wróblewskiemu za interesujące uwagi dotyczące historii badań oddziaływań elementarnych.

# Pocieranie i ścieranie\*

Georg Hähner, Nicholas Spencer

*Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Szwajcaria*

---

## Rubbing and scrubbing

*Abstract:* Though simply expressed, the laws of friction encapsulate a host of microscopic and nanoscopic phenomena whose elucidation has become one of the most fascinating pursuits in applied physics.

---

### 1. Wstęp

„Zakład Pocierania i Ścierania” – tak nazywali niektórzy złośliwi koledzy fizycy laboratorium tarcia, smarowania i zużycia prowadzone przez Dawida Tabora w Cavendish Laboratory w Cambridge w Anglii ok. 40 lat temu. Ale karta się odwróciła. Trybologia, jak nazwał swoją dyscyplinę Tabor<sup>1</sup> (od greckiego słowa *tribos*, co znaczy „tarcie, pocieranie”) spotyka się z poważaniem – a nawet jest modna – na wydziałach fizyki na całym świecie. A Tabor, który został cieszącym się uznaniem seniorem tego rozkwitającego sektora badań, jest często wymieniany w bibliografii na pierwszej pozycji najbardziej liczących się publikacji poświęconych trybofizyce [1].

Chociaż Tabor wprowadził fizykę do trybologii w latach pięćdziesiątych, początki tej dziedziny można odnaleźć w inżynierii już 5000 lat temu w okresie neolitu. Duncan Dowson w swojej wspaniałej historii trybologii [2] opisuje wczesne zastosowanie łożysk w zawiasach drzwi w wioskach asyryjskich ponad 4000 lat przed narodzeniem Chrystusa. W pracy Dowsona można znaleźć też malowidło z grobowca egipskiego pokazujące pierwszego zarejestrowanego trybologa wle-

wającego ciecz (olej, wodę czy mleko? – archeolodzy nie mają tu pewności) pod płozy wykonane z drewna, na których niewolnicy ciągną ogromny posąg. Obraz ten stopniowo stał się głównym motywem graficznym wykładów oraz artykułów przeglądowych z trybologii, a pokusa załączenia go w tym opracowaniu (rys. 1) była tak silna, że autorzy nie mogli się jej oprzeć [2,3].

### 2. Prawa tarcia

Chociaż już Arystoteles stwierdził istnienie tarcia, to dopiero Leonardo da Vinci wykorzystał swoje nadzwyczajne zdolności także w zakresie trybologii sprawiając, że pod koniec XV w. tarcie zostało opisane w sposób naukowy.

Leonardo, będąc pierwszym w historii, który sformułował prawa tarcia, przeprowadził także pierwsze doświadczenie, będące obecnie standardowym eksperymentem uniwersyteckim, polegającym na badaniu tarcia ciał ślizgających się po równi pochyłej. On pierwszy trudził się nad zrozumieniem zużycia, poznaniem efektów smarowania oraz zajmował się konstrukcją łożysk. Chyba najbardziej znaczącymi odkryciami trybologicznymi Leonarda są jego dwa spostrzeżenia, że siła tar-

---

\* Artykuł, opublikowany w *Physics Today* 51, nr 9, 22 (1998), został przetłumaczony za zgodą Autorów i Wydawcy [Translated with permission. Copyright ©1998 by American Institute of Physics] (przyp. Red.).

<sup>1</sup> Termin „trybologia” (tribology) wprowadził Peter Jost w Anglii w 1966 r. D. Tabor używał terminu „trybofizyka” (tribo-physics) (przyp. tłum.).

cia jest: 1) niezależna od konturowej powierzchni styku, 2) zależna od składowej normalnej siły, przyłożonej do ślizgającego się ciała. Leonardo uogólnił drugie spostrzeżenie, wprowadzając definicję, jak to nazwał, współczynnika tarcia – określając go jako stosunek siły tarcia do obciążenia normalnego  $N$ . Nazwane później prawami tarcia, te doświadczalne spostrzeżenia Leonarda są słuszne w wielu różnych okolicznościach.



Rys. 1. Pierwszy odnotowany historycznie trybolog wlewający ciekły materiał smarny pod płozy sań użytych do przewiezienia posągu Ti (ok. 2400 roku przed Chrystusem) [2,3].

Ciekawe, że większość pism Leonarda dotyczących tarcia nie ujrzała światła dziennego przed rokiem 1960, co wyjaśnia, dlaczego osobą, z którą częściej wiąże się prawa tarcia, jest Guillaume Amontons, który pod koniec XVII w. badał niezależnie tarcie zarówno na sucho, jak i przy smarowaniu.

Obserwacje Amontonsa dotyczące tarcia, przedstawione Królewskiej Akademii Nauk w Paryżu w raporcie datowanym dnia 19 grudnia 1699 r., były następujące:

— opór spowodowany tarcielem wzrasta lub maleje proporcjonalnie do wzrastającego lub zmniejszającego się nacisku (obciążenia), natomiast nie zależy od wzrastającej lub zmniejszającej się powierzchni tarcia;

— opór spowodowany tarcielem jest mniej więcej taki sam dla żelaza, ołowiu, miedzi i drewna

w dowolnej kombinacji materiałowej, jeśli powierzchnie trące pokryte są tłuszczem wieprzowym;

— opór ten jest w przybliżeniu równy jednej trzeciej obciążenia [2].

Pierwsze spostrzeżenie Amontonsa dało podstawę do sformułowania tego, co jest znane obecnie jako prawa tarcia Amontonsa: 1) siła tarcia jest wprost proporcjonalna do przyłożonego obciążenia, 2) siła tarcia jest niezależna od konturowej powierzchni styku.

Te dwa niezwykle proste prawa doświadczalne są słuszne dla znacznego zbioru warunków ślizgania, zarówno przy smarowaniu, jak i przy pracy na sucho.

Następne prawo przypisuje się Charles'owi Augustinowi Coulombowi [4], który był całkowicie świadom jego ograniczeń. Prawo to jest następujące: 3) tarcie kinetyczne (dynamiczne) jest niezależne od prędkości ślizgania.

Rozróżnienie przez Coulomba współczynników tarcia statycznego (spoczynkowego) i kinetycznego jest niezwykle użyteczne. (Tarcie statyczne jest zawsze większe niż kinetyczne, po prostu ze względów energetycznych: gdy dwa ciała zatrzymują się, układ zajmuje minimum potencjału w polu dużych sił zależnych od czasu. Układ musi być wyprowadzony z tego stanu, aby możliwy był następnie ruch względny jego elementów).

Cenna była sugestia Coulomba, że tarcie ma dwie składowe: pierwsza zależy od obciążenia (pierwsze prawo Amontonsa), a druga, zwykle o mniejszej wartości, jest powodowana adhezją. Model Coulomba nabrał istotnego znaczenia w ostatnim czasie, gdyż w skali nanometrów składnik wynikający z adhezji zaczyna dominować.

### 3. Mechanizmy tarcia i adhezja

Chociaż prawa tarcia są empiryczne, duży wysiłek włożono w zrozumienie ich podstawowych mechanizmów.

Obecnie w większości teorii tarcia przyjmuje się, że wytrzymałość na ścinanie (siła oporów ruchu podzielona przez powierzchnię styku) jest wielkością stałą, z czego wynika, że siła tarcia jest proporcjonalna do rzeczywistej powierzchni styku. Jest to zgodne z drugim prawem Amontonsa; po zsumowaniu wszystkich obszarów styku



– wynikających z kontaktu pojedynczych mikronierówności – otrzymuje się rzeczywistą powierzchnię styku, a stąd siłę tarcia. Podczas gdy współczynnik tarcia według definicji Amontonsa zmienia się nieznacznie dla różnych materiałów (co sprawiło, że przez pewien okres czasu sądzono, iż jest on całkowicie niezależny od materiału trącego i wynosi ok. 0,3), to wytrzymałość na ścinanie może zmieniać się o kilka rzędów wielkości dla różnych materiałów (por. tab. 1). Taki efekt jest skutkiem zależności tarcia zarówno od wytrzymałości na ścinanie (mała dla indu, duża dla stali), jak i rzeczywistej powierzchni styku (duża dla indu, mała dla stali).

Tabela 1. Wartości współczynnika tarcia i wytrzymałości na ścinanie przy ślizganiu się elementu stalowego po elemencie wykonanym z różnych materiałów.

Materiał	Współczynnik tarcia ( $\mu$ ) <sup>a</sup>	Wytrzymałość na ścinanie wyznaczona z pomiarów tarcia (G/mm <sup>2</sup> ) [1]
Ind	2	325
Ołów	1,2	1600
Miedź	0,8	28 000
Kulka stalowa	0,8	140 000

<sup>a</sup> I.M. Hutchings, *Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials* (CRC Press, Boca Raton 1992).

Wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych w laboratorium Tabora świadczą o liniowej zależności między obciążeniem i rzeczywistą powierzchnią styku. Badacze mierzyli przewodność elektryczną (przy założeniu, że jest ona miarą rzeczywistej powierzchni styku) szperei adhezyjnych dwóch powierzchni metali jako funkcję przykładanego obciążenia normalnego [1].

Mechanika kontaktu zajmuje się tym zagadnieniem od strony teoretycznej. W latach sześćdziesiątych Jim Greenwood (Uniwersytet w Cambridge) i współpracownicy wykazali, że pod obciążeniem powodującym całkowicie plastyczne odkształcenie powierzchnia styku jest proporcjonalna do obciążenia, a więc i siły tarcia dla pojedynczego styku dwóch kul lub dla szeregu podobnych kul o tej samej wysokości czaszy kulistej. Dla styku sprężystego pionierska teoria Heinricha Hertza przewiduje nieliniową (o wykładniku dwie trzecie) zależność między obciążeniem i obszarem

kontaktu, a więc i siłą tarcia. Współczynnik tarcia nie powinien więc być niezależny od obciążenia.

Zagadnienie udziału odkształcenia plastycznego w odkształceniu całkowitym zostało rozwiązane po uwzględnieniu rozkładu wysokości mikronierówności. Greenwood wykazał, że przy rozkładzie wykładniczym zależność rzeczywistej powierzchni styku od obciążenia jest liniowa – niezależnie od tego, czy jest to kontakt plastyczny, czy sprężysty. Zgadza się to całkowicie z drugim prawem Amontonsa. W przypadku gausowskiego rozkładu wysokości mikronierówności, który często występuje dla powierzchni spotykanych w praktyce inżynierskiej, zależność powierzchni styku od obciążenia jest bardzo bliska liniowej.

Dla niektórych tryboukładów wytrzymałość na ścinanie wzrasta przy wzroście obciążenia, co wskazuje, że także inne, dodatkowe mechanizmy wpływają na wartość siły tarcia. Odchylenia od prostych praw tarcia obserwowano na przykład w układach metal-metal, w których może wystąpić zgrzanie tarciove i silny wzrost składowej adhezyjnej. Liniowa zależność między obciążeniem i siłą tarcia, chociaż jest ciągle najczęściej słuszna i stosowana, wymaga czasem uwzględnienia wpływu adhezji – co było już opisane przez Coulomba.

Odchylenia od drugiego prawa tarcia Amontonsa obserwowano często dla polimerowych par trących, a ogólniej dla materiałów o własnościach lepkosprężystych. Jednym z takich materiałów jest guma.

Opony samochodowe muszą charakteryzować się małym tarcie tocznym i dużym tarcie na poślizg. Kontakt pomiędzy takimi materiałami a bardziej od nich sztywnymi (tj. między gumą a nawierzchnią drogi) jest zwykle głównie sprężysty, a własności tarciove różnią się znacznie od własności wykazywanych przez inne skojarzenia. Współczynnik tarcia zmienia się znacznie w funkcji obciążenia, temperatury i prędkości ślizgania, dlatego też żadna jego konkretna wartość nie może opisać tarciovego zachowania się takiego materiału. W przypadku materiałów takich jak guma główne mechanizmy dyssypacji energii to odkształcenie i adhezja.

Stwierdzenie, że tarcie może występować nawet przy obciążeniu zerowym oznacza, że jest ono wywołane przez ścinanie szperei adhezyjnych, co

w przypadku styku metal-metal oznacza występowanie zużycia. Tarcie i zużycie są zwykle niezależne od siebie; dla wielu skojarzeń ciał zużycie może być duże, a tarcie małe (kreda na tablicy, ołówek na papierze), dla innych zaś zużycie małe, a tarcie duże (hamulce). Badania nanotrybologiczne wykazały, że nawet duże tarcie może w ogóle nie powodować zużycia.

Zależność między adhezją i tarcieniem nie jest do końca wyjaśniona. Podejrzewano, że siła tarcia zależy od siły adhezji (analogicznie jak od przyłożonego obciążenia), ale ostatnio Jacob Israelachvili (Uniwersytet Kalifornijski w Santa Barbara) i jego współpracownicy wykazali doświadczalnie, że dla niektórych trybukładów tarcie zależy od nieodwracalnego składnika adhezji – tj. od histerezy adhezyjnej – a nie od samej adhezji.

Dla wyjaśnienia tego faktu zaproponowali oni zastosowanie modelu termodynamicznego [5]. Dla powierzchni nie adherujących siła tarcia może być wyrażona poprzez pracę niezbędną do zamknięcia cząsteczek, np. smaru, pomiędzy powierzchniami. Za dyssypację energii podczas ślizgania jest wtedy odpowiedzialna nieodwracalna praca ściskania. W tym modelu pojęcie powierzchni styku jest więc dyskusyjne.

#### 4. Smarowanie

W praktyce przemysłowej najważniejszym zagadnieniem trybologicznym jest zmniejszenie współczynnika tarcia – a więc i traconej energii – oraz uniknięcie zużycia.

Zużycie jest naturalnym skutkiem oddziaływania dwóch powierzchni poruszających się względem siebie. Materiały smarne lub ich cienkie warstwy znajdujące się między powierzchniami elementów trących mogą spowodować, że ścinanie zachodzi wewnątrz smaru – tj. między warstwami cieczy, co określa opory ruchu. Jeśli powierzchnie pokryte są cienką warstwą smaru, obszar kontaktu warstw smaru zwiększa się przy wzroście obciążenia aż do wystąpienia ścinania i poślizgu w obszarze warstwy smarnej. Wprowadzenie ciekłej warstwy smarnej pomiędzy elementy przemieszczające się względem siebie rozwiązuje znaczną liczbę problemów trybologicznych.

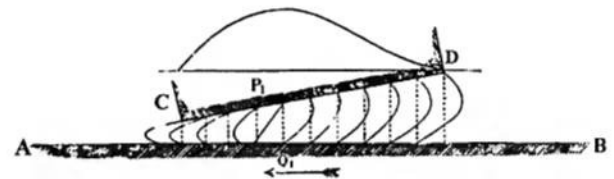
Chociaż materiały smarne stosowano już od bardzo dawna (jak widać na rys. 1), to dopiero od połowy XIX w. – po zbudowaniu kolei żela-

znych, wzrosło wykorzystanie maszyn wymagających smarowania i wytworzeniu pierwszych olejów mineralnych – smarowanie znalazło się w obszarze pierwszoplanowych badań trybologicznych.

W tym okresie pierwszych badań smarowania wiele ważnych doświadczeń przeprowadził Beauchamp Tower [6], który odkrył, że otwór wykonany w górnej części panewki łożyska ślizgowego (gdzie czop walcowy współpracuje z panewką walcową) staje się źródłem fontanny olejowej, gdy czop zaczyna wirować w panewce. W tym czasie olej był wprowadzany do łożyska właśnie przez otwór wywiercony w górnej części panewki, a więc – wg wyników badań Towera – w całkowicie niewłaściwym miejscu! Tower wyznaczał też rozkład ciśnienia wokół czopa, zarówno w kierunku promieniowym, jak i osiowym.

Prace Towera stworzyły podstawy doświadczalne dla późniejszych badań teoretycznych Osborne'a Reynoldsa, który w 1886 r. opublikował swoje słynne równanie dotyczące smarowania hydrodynamicznego, wiążące ciśnienie oleju, prędkość ślizgania, grubość warstwy smarnej i lepkość oleju [7]. Równanie Reynoldsa, które jest podstawą naszego współczesnego rozumienia smarowania hydrodynamicznego, ujmuje ilościowo wyniki badań Towera.

Najbardziej istotne w ujęciu Reynoldsa było pojawianie się klina smarnego, w którym grubość warstwy oleju zmniejsza się w kierunku ruchu (rys. 2). Klin wywołuje powstanie ciśnienia w warstwie oleju, zdolnego do przeniesienia obciążenia zewnętrznego.

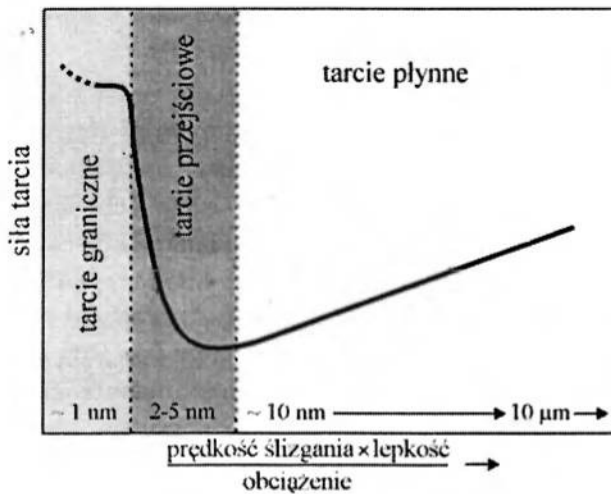


Rys. 2. Schemat Osborne'a Reynoldsa pokazujący działanie materiałów smarnych na nierównoległe ustawioną do podłoża powierzchnię elementu będącego w ruchu względnym. Olejowy klin smarny powoduje pojawienie się ciśnienia zdolnego do przeniesienia obciążenia zewnętrznego [7].

Na początku XX w. Richard Stribeck opublikował wyniki starannie przeprowadzonych badań doświadczalnych dotyczących łożysk ślizgowych [8]. Tower już kilkadziesiąt lat wcześniej za-

uważył, że wartość siły tarcia w łożysku ślizgowym osiąga minimum, a następnie wzrasta przy wzroście prędkości ślizgania, przy względnie małym wpływie obciążenia. Rozszerzając prace Towera, Stribeck wykazał systematyczną zależność współczynnika tarcia dla różnych obciążeń od prędkości poślizgu.

Charakterystyki siły tarcia w funkcji prędkości ślizgania, znane obecnie jako krzywe Stribeck (rys. 3), dla małej prędkości wykazują bardzo słabą zależność od obciążenia. Przy wzrastającej prędkości ślizgania siła tarcia zmniejsza się gwałtownie do minimum – minimalnej wartości siły tarcia Stribeck – a następnie powoli wzrasta. Istnienie minimum jest ważne. Oddziela ono korzystny bezzużyciowy obszar pracy łożyska (przy dużych prędkościach) od obszaru, w którym może występować duże zużycie, a ponadto obciążenie zewnętrzne nie jest całkowicie zrównoważone przez ciśnienie hydrodynamiczne w warstwie oleju.



Rys. 3. Krzywa Stribeck pokazująca zależność siły tarcia od prędkości ślizgania, lepkości oleju i obciążenia zewnętrznego. Pokazano także grubość warstwy smarnej w trzech obszarach tarcia (J. Israelachvili, *Molecular Adhesion and Tribology* (University of Lausanne, 1994)).

W obszarze dużych prędkości ślizgania (na prawo od minimum na krzywej Stribeck) występuje smarowanie hydrodynamiczne lub elastohydrodynamiczne. W tym ostatnim przypadku, przy ruchu względnym elementów nie tylko pojawia się ciśnieniowy klin smarnej, lecz także występuje ich odkształcenie sprężyste. Taki efekt występuje najczęściej w parach tących o niekonforemnym styku (gdy stykają się np. kula z kulą – przyp. tłum.)

lub przy bardzo dużych obciążeniach. Przy bardzo małych prędkościach ślizgania (na lewo od minimum na krzywej Stribeck) tryboukład pracuje w obszarze tzw. tarcia granicznego – co występuje w maszynach lub przyrządach, w których elementy przemieszczają się względem siebie z bardzo małą prędkością, na przykład w zegarkach, lub gdy obciążenia są bardzo duże – np. przy skrawaniu metali. W tym obszarze, zaadsorbowane cząsteczki smaru mogą odgrywać decydującą rolę w ograniczeniu bezpośredniego styku elementów i zmniejszeniu zużycia.

Już Reynolds zauważył, że zużycie może występować jako skutek kontaktu metalicznego, zanim utworzy się warstwa smarna rozdzielająca trące powierzchnie. W miarę jak urządzenia mechaniczne stawały się coraz bardziej złożone w ciągu następnych pięćdziesięciu lat po odkryciu Reynoldsa, problem zużycia w okresie rozruchu lub podczas pracy przy bardzo dużych naciskach stawał się coraz bardziej istotny.

Wysiłek podjęty celem poprawienia własności smarnych olejów polegał na coraz szerszym stosowaniu małych ilości specjalnych dodatków do oleju. Już w latach dwudziestych stosowanie w samochodach przekładni śrubowych stożkowych (przekładnia łącząca wał napędowy z tylną osią) wymagało zastosowania dodatków olejowych (zwykle kwasów tłuszczowych), dobrze adsorbowanych przez powierzchnie metalowe, nie dopuszczających do bezpośredniego styku metal-metal przy małych prędkościach i dużych obciążeniach.

Bardziej złożone dodatki przeciwzużyciowe, wytrzymujące bardzo duże naciski, wprowadzone zostały w drugiej połowie XX w. Takie dodatki, jak chlorowane węglowodory lub związki zawierające metal, fosfor lub siarkę, reagują z materiałami elementów tących na ich powierzchni przy bardzo dużych naciskach, wytwarzając produkty o małej wytrzymałości na ścinanie przy kontrolowanym procesie korozyjnym.

Właściwie wszystkie dodatki smarnościowe i zużyciowe opracowano empirycznie zanim nauka o powierzchni materiałów zdołała w ciągu ostatnich 30 lat tak się rozwinąć, że możliwe stało się poznanie ich działania na poziomie molekularnym. Andrew Gellman (Carnegie Mellon University) badał wpływ obecności warstwy submonomolekularnej (etanolu) na tarcie mierzone pomiędzy siarczkowanymi dyfuzyjnie po-



jedynczymi kryształami niklu w warunkach wysokiej próżni [9]. Ciekawe, że współczynnik tarcia zmniejsza się monotonicznie w miarę wzrostu stopnia pokrycia i ustala się przy obecności zaledwie jednej warstwy atomowej.

Wilfred Tysoe (Uniwersytet stanu Wisconsin w Milwaukee) badał nie stosowane już obecnie węglowodory chlorowane, które są bardzo efektywnymi dodatkami mogącymi pracować przy bardzo dużych naciskach na powierzchnie stalowe. Wykazał on, że efektywność niektórych dodatków z tej grupy zmniejsza się dramatycznie przy osiągnięciu temperatury topnienia chlorku żelaza (940 K), co wskazuje na pojawianie się  $\text{FeCl}_2$ , zabezpieczającego powierzchnie trące w ekstremalnych warunkach.

Pojawienie się kolei żelaznych było oczywiście ważnym stymulatorem rozwoju techniki smarowniczej. W pierwszych pociągach rosyjskich powszechne było stosowanie do smarowania łożysk tłuszczu zwierzęcego (smalcu), podczas gdy w tym czasie na Zachodzie stosowano już prawie powszechnie olej mineralny. Przed badaniami łożysk przez Towera i wynikłymi z nich modyfikacjami konstrukcyjnymi dla zmniejszenia strat oleju, bardziej lepki tłuszcz zwierzęcy był atrakcyjną alternatywą. Nieszczęśliwą konsekwencją stosowania tłuszczu zwierzęcego było wykradanie go przez głodnych chłopów, którzy prawdopodobnie zjadali go, wkładając między dwie kromki chleba. Władze kolejowe w Rosji zareagowały na to dodając do smaru sadzę. Spowodowało to nie tylko bezużyteczność smalcu dla chłopów, co wyeliminowało kradzieże, lecz dzięki zawartości grafitu w sadzy poprawiła ona znacznie i nieoczekiwanie skuteczność smarowania.

Mamy tu przypadek materiału smarnego, który działa w ten sposób, że na powierzchniach trących w obszarze styku pojawia się warstwa o małej wytrzymałości na ścinanie – w tym przypadku bardzo słabo ze sobą związane warstwy grafitu, które mogą łatwo ślizgać się po sobie.

Mieszanka sadzy i smalcu była jednym z pierwszych zastosowań smaru stałego. Grafit i inne smary stałe (takie jak dwusiarczek molibdenu i azotek boru) są obecnie często stosowane, zarówno jako dodatki do olejów, jak i samodzielnie, gdy użycie olejów nie jest wskazane, na przykład w urządzeniach kosmicznych.

## 5. Trybologia dzisiaj

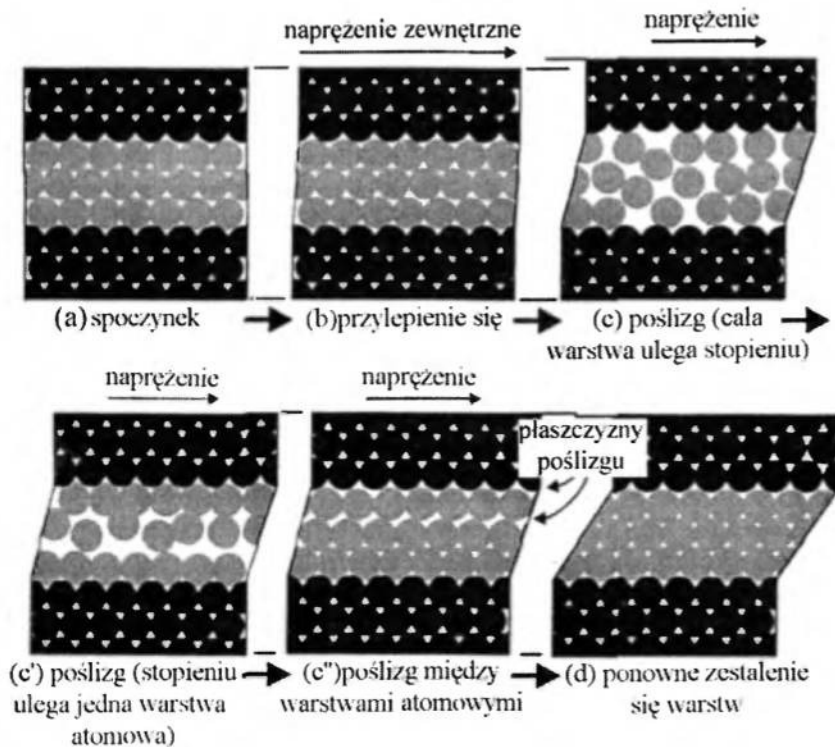
Wynalezienie skaningowego mikroskopu tunelowego przez Gerda Binniga oraz Heinricha Rohrera we wczesnych latach osiemdziesiątych, a następnie zbudowanie mikroskopu sił atomowych [10,11], nieoczekiwanie umożliwiło trybologii wejście w nowy okres badań podstawowych.

Mikroskop sił atomowych z możliwością pomiaru siły stycznej (tarcia) (Lateral Force Microscope – LFM) pozwolił po raz pierwszy na monitorowanie sił działających w obszarze pojedynczej mikronierówności w czasie ślizgania (patrz Dodatek). Siły te, nie większe od kilku nanoniutonów i o nanometrowym zasięgu oddziaływania, decydują o tarciovym zachowaniu się stykających się ze sobą powierzchni. Na podstawie badań przeprowadzonych przy użyciu LFM w ciągu ostatniej dekady stało się jasne, że w obszarze nanoświata dwuskładnikowy, adhezyjny model tarcia zaproponowany przez Coulomba jest bardziej użyteczny niż prosty, jednoskładnikowy (mechaniczny) model Amontonsa, gdyż adhezja zaczyna dominować przy bardzo małych obciążeniach.

Chociaż ciągle dyskutuje się podstawowe przyczyny tarcia, jest oczywiste, że w procesie tarcia występują zarówno efekty mechaniczne, jak i chemiczne. Zastosowanie LFM umożliwiło stwierdzenie konieczności doceniania efektów chemicznych, dobrze rozpoznawalnych przy użyciu LFM dla tryboukładów bardzo trudno dostępnych przy zastosowaniu innych metod analizy powierzchni (por. Dodatek). W ciągu ostatnich kilku lat przedstawiono w publikacjach wiele wyników badań trybologicznych ukazujących także oddziaływanie chemiczne.

Szczególnie interesujące wyniki badań, odnoszące się do atomowo gładkich i czystych powierzchni badanych przy użyciu LFM, dotyczą zjawiska stick-slip – szybkich mikroruchów start-stop, którego takie efekty jak piszczenie hamulców, skrzypienie drzwi i dźwięki wydawane przez struny skrzypiec są dobrze znane w obszarze makroświata (więcej na temat zjawiska stick-slip można przeczytać w *Physics Today*, wrzesień 1997 r., s. 17). Okazuje się, że zjawisko stick-slip występuje nie tylko w makroświecie, lecz także w skali atomowej, gdy igła LFM przemieszcza się z jednej studni potencjału do następnej, ślizgając się po powierzchni trącej. Ponieważ w czasie





Rys. 4. Porządkowanie molekularne zachodzące w bardzo cienkiej warstwie zbudowanej z prostego łańcucha cząsteczek znajdujących się między powierzchniami dwóch ciał stałych w czasie poślizgu (ścianania) [13].

fazy stick (przyklepnięcie się) dwie współpracujące powierzchnie znajdują się w spoczynku, zjawisko stick-slip można rozpatrywać jako ciągłą sekwencję stanów, w których występuje tylko tarcie statyczne.

Wykorzystując wyniki badań uzyskane przy użyciu przyrządu do pomiaru sił oddziaływań powierzchniowych [12], w którym stosuje się do badań płaskie z dokładnością atomową powierzchnie miki doprowadzane do styku z subnanometrową precyzją przy wykorzystaniu metod interferencyjnych, Israelachvili zasugerował interesujący mechanizm wyjaśniający zjawisko stick-slip występujące w parach smarowanych. W modelu Israelachvilego (rys. 4) przyczyną wystąpienia zjawiska stick-slip są przejścia uporządkowanie-nieuporządkowanie na poziomie molekularnym, zachodzące w cienkiej warstwie cieczy. Bardzo rozgałęzione makrocząsteczki, które są zbyt splątane, aby utworzyć uporządkowane struktury na powierzchni, dają łatwiejszy poślizg, jeśli smarują powierzchnie jako cienkie warstwy molekularne [13].

Chociaż model ten może objaśnić zjawisko stick-slip w określonych warunkach smarowania,

jest oczywiste, że ma na nie wpływ także wiele innych mechanizmów. W praktyce inżynierskiej zjawiska stick-slip obserwuje się tylko wtedy, gdy krzywa Stribecka nachylona jest tak, że przy wzroście prędkości ślizgania zmniejsza się wartość współczynnika tarcia.

## 6. Mikroskopowe modelowanie tarcia

Znaczny wysiłek włożono w modelowanie zjawisk tarcia, ale całkowite mikroskopowe wyjaśnienie procesów zachodzących w obszarze tarcia nie zostało osiągnięte. Jednym z powodów takiego stanu rzeczy jest to, że zastosowanie mechaniki ośrodków ciągłych nie jest możliwe przy bardzo małych rozmiarach elementów i odległościach między nimi. W dodatku własności mechaniczne materiałów silnie zależą od wielkości próbki, a ponieważ obszary kontaktu mogą być bardzo małe, demonstrowane zachowanie się mechaniczne może znacznie odbiegać od własności materiału badanego w dużej objętości.

Eksperymenty nanotrybologiczne doprowadziły do wielu symulacji, a ich wyniki z kolei do dalszych eksperymentów, ponieważ zarówno w do-

świadczeniu, jak i w symulacji liczba cząstek jest w pewnych przypadkach dostatecznie mała, tak że można porównać wyniki obu metod.

Uzi Landman (Georgia Institute of Technology) i jego współpracownicy intensywnie pracowali nad modelem kontaktu pojedynczych mikronierówności stosując metody dynamiki molekularnej. Stwierdzili oni, że porządkowanie molekularne i procesy powstawania cienkich warstw zachodzą w materiałach smarnych zamkniętych między przemieszczającymi się z dużymi prędkościami względnie niejednakowymi topograficznie powierzchniami ciał stałych. Obserwowali oni także korelację tych procesów z oscylacjami siły tarcia, a także tworzenie zmiennych stanów sprężysto-plastycznych materiału smarnego wskutek zamykania go między przemieszczającymi się względem siebie mikronierównościami.

Jednym z podstawowych zagadnień trybologii jest pytanie, w jaki sposób rozpraszana jest energia w czasie procesów tarcia. W przypadku tarcia bezzużyciowego dobrymi kandydatami na czynniki odbierające energię są fonony oraz zjawiska elektryczne [14], lecz dotychczas ich rola nie jest w pełni poznana. Wyniki ostatnich badań sugerują, że obydwa mechanizmy mogą przyczyniać się do dyssypacji energii; zależnie od tryboukładu jeden z nich może być dominujący.

Wyjaśnienie roli fononów było jednym z celów eksperymentu nanotrybologicznego przeprowadzonego przez Jacqueline Krim (obecnie w North Carolina State University) i współpracowników, którzy używając mikrowagi kwarcowej (Quartz Crystal Microbalance – QCM) zmierzili siły przy ruchu monowarstwy kryptonu na powierzchni złota [14]. Stwierdzili, że warstwa ciekła wykazuje większe tarcie niż warstwa stała. Zwykle do smarowania używa się warstw ciekłych, w których występuje ścinanie. W przypadku eksperymentu z użyciem QCM tarcie determinują oddziaływania na granicy faz ciało stałe-ciecz, co było rezultatem nieoczekiwanym. Mark Robbins (Johns Hopkins University) i współpracownicy potwierdzili ten wynik stosując symulację komputerową. W przypadku kryptonu ślizgającego się po złocie za dyssypację energii odpowiedzialne są prawie całkowicie fonony.

Całkiem niedawno w zespole J. Krim zastoso-

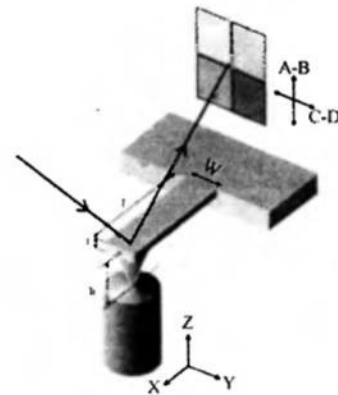
w postaci podłoża wykonanego z ołowiu o grubości 150 nm i ślizgającej się na nim warstwy azotu o grubości 1–2 warstw atomowych. Po ochłodzeniu ołowiu poniżej temperatury przejścia w stan nadprzewodnictwa tarcie pomiędzy ołowiem i stałym azotem zmniejszyło się o połowę. Wydaje się, że jest to pierwsze eksperymentalne potwierdzenie roli elektronów przewodnictwa w procesie tarcia. W tym przypadku decydującą rolę w dyssypacji energii odgrywają chyba zjawiska elektryczne [15].

## 7. Trybologia jutro

Trybologia stała się uznaną dziedziną badań nie tylko dla inżynierów, lecz także dla chemików oraz fizyków teoretyków i eksperymentatorów. Przy wykorzystaniu potężnych możliwości dynamiki molekularnej, mikroskopii igłowej (tunelowej i sił atomowych, w szczególności z możliwością pomiaru sił stycznych (tarcia)), oraz nauki o powierzchni materiałów, perspektywy znacznie lepszego poznania podstaw tarcia, smarowania i zużycia rysują się w bardzo różowych barwach.

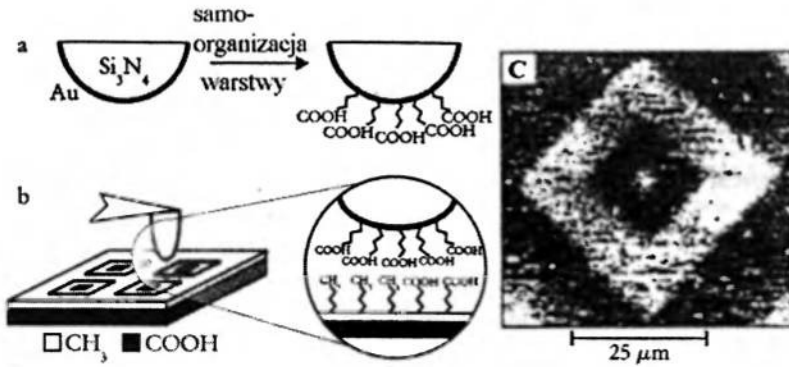
### Dodatek

#### Tarciowe obrazowanie budowy chemicznej metodą LFM (mikroskopii sił atomowych stycznych do powierzchni)

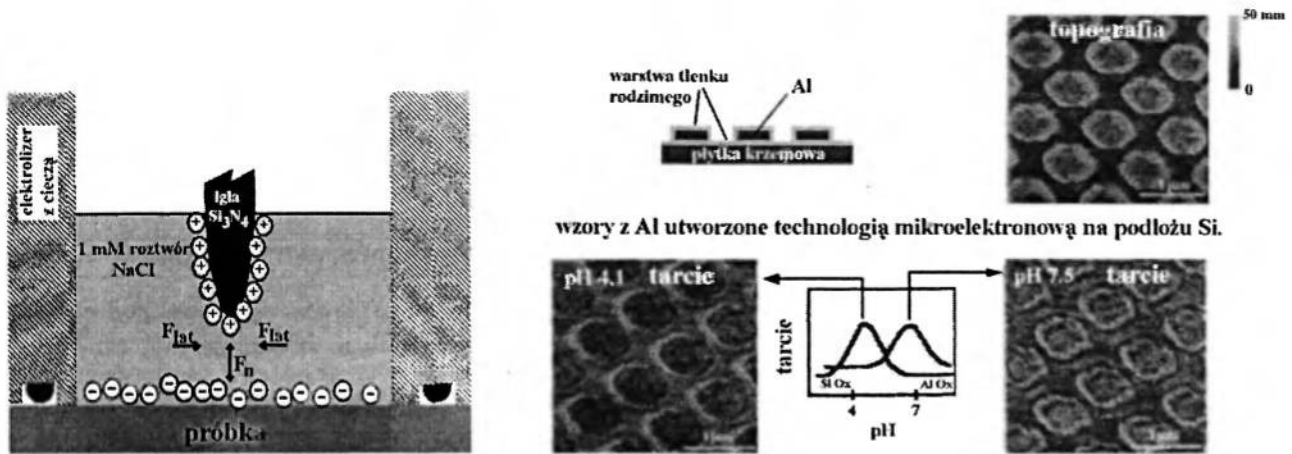


Rys. D1.

**Mikroskop sił atomowych stycznych do powierzchni (LFM) (rys. D1).** Próbką, zamocowaną w skanerze piezoelektrycznym, jest przemieszczana pod ostro zakończoną igłą, przymocowaną do końca belki sprężystej. Wiązka laserowa odbija się od górnej powierzchni belki sprężystej i trafia do fotodiody cze-



Rys. D2.



Rys. D3.

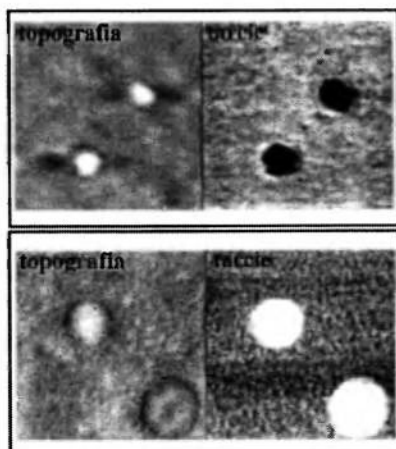
ropolowej, tak że możliwe jest mierzenie siły normalnej lub topografii powierzchni (przesunięcie pionowe wiązki w kierunku A-B) oraz siły stycznej (tarcia) (przesunięcie poziome wiązki w kierunku C-D). Wielkości mierzone, przetworzone w systemie komputerowym i przedstawione w układzie współrzędnych  $(x, y)$  umożliwiają uzyskanie mapy topografii powierzchni oraz zmienności siły tarcia na obszarze skanowanym ([11], artykuł Overneya i Meyera).

**Wykrywanie zmian na końcu igły (rys. D2).** Mikroskop sił atomowych można wykorzystać do rozróżniania budowy chemicznej powierzchni. W tym przypadku warstwa samoorganizująca się (Self-Assembled Monolayer – SAM) grup karboksylowych (COOH) pokrywa koniec igły mikroskopu sił atomowych (a), którą następnie potarto po naniesionych metodą fotolitograficzną obszarach dwóch różnych SAM – zakończonych grupą COOH lub metylową ( $\text{CH}_3$ ) (b). Gdy igła podlega różnym oddziaływaniom siłowym, zależnym od budowy chemicznej poszczególnych obszarów COOH- i  $\text{CH}_3$ -, uzyskuje się różne wartości współczynnika tarcia (c) (C.D. Frisbie i in., *Science* 265, 2071 (1994)).

**Rozróżnianie pH (rys. D3).** Powierzchnie utleniające się (wliczając także powierzchnię igły mikroskopu sił atomowych) przy kontakcie z elektrolitem elektryzują się zależnie od wartości pH elektrolitu. Wartość pH, przy której ładunek zmienia się z dodatniego na ujemny zależy od budowy chemicznej tlenku. Ponieważ oddziaływanie ładunków elektrycznych między igłą i próbką ma wpływ na tarcie mierzone przy użyciu mikroskopu sił atomowych, obraz rozkładu siły tarcia dla badanej powierzchni tlenku wieloskładnikowego będzie się zmieniał zależnie od wartości pH elektrolitu i badanych tlenków (G. Hähner i in., *Tribology Letters* 3, 359 (1997)).

**Obrazowanie budowy polimerów z wykorzystaniem tarcia (rys. D4).** Na rysunkach przedstawiono obrazy topografii (na lewo) oraz siły tarcia (na prawo) dla odlanych wirowo próbek polimerowych będących mieszką polistyrenu z polimetakrylanem metylu (PS/PMMA 1:10). Obrazy te uzyskano pokrywając igłę mikroskopu złotem (obrazy górne) lub dwutlenkiem krzemu (obrazy dolne) i prowadząc badania w obecności fluorowanej dekaliny. Odwrócenie kontrastu na obrazach tarcia wynika z różnic w oddzia-

ływaniach pomiędzy polarnymi (w przypadku dwutlenku krzemu) i niepolarnymi (dla złota) powierzchniami igły oraz polarnym (PMMA) i niepolarnym (PS) materiałami polimerowymi. Rola fluorowanej dekaliny



Rys. D4.

sprowadza się do zwiększenia składowej Londona siły van der Waalsa ze względu na jej mały współczynnik załamania (Feldman i in., *Langmuir* 14, 373 (1998)).

Tłumaczył Zygmunt Rymuza

Instytut Mikromechaniki i Fotoniki PW  
Warszawa

### Literatura

- [1] F.P. Bowden, D. Tabor, *The Fundamentals and Lubrication of Solids* (Clarendon Press, Oxford, England 1985).
- [2] D. Dowson, *History of Tribology* (Longman, London 1979).
- [3] G. Steindorff, *Das Grab des Ti* (Hinrichs, Leipzig 1913).
- [4] C.A. Coulomb, *Mem. Math. Phys.* 10, 161 (1785).
- [5] *Micro/Nanotribology and Its Applications*, red. B. Bhushan (Kluwer, Dordrecht, The Netherlands 1997). Użyteczny zbiór artykułów dotyczących mikro-

i nanotrybologii.

- [6] B. Tower, *Proc. Inst. Mech. Engr.*, November 1983, s. 632; B. Tower, *Proc. Inst. Mech. Engr.*, January 1985, s. 58.
- [7] O. Reynolds, *Philos. Trans. R. Soc.* 177, 157 (1886).
- [8] R. Stribeck, *Z. Ver. dt. Ing.* 46, 1341 (1902); 46, 1432 (1902); 46, 1463 (1902).
- [9] C. McFadden, C. Soto, N.D. Spencer, *Tribology International* 30, 881 (1997).
- [10] G. Binnig, C.F. Quate, C. Gerber, *Phys. Rev. Lett.* 56, 930 (1986).
- [11] C.M. Mate, R. Erlandsson, G.M. McClelland, S. Chiang, *Phys. Rev. Lett.* 59, 1942 (1987); R. Overney, E. Meyer, *MRS Bull.* 18, 26 (1993).
- [12] D. Leckband, *Nature* 376, 617 (1995); G. Luengo, F.-J. Schmitt, R. Hill, J. Israelachvili, *Macromolecules* 30, 2482 (1997).
- [13] *Fundamentals of Friction*, red I.L. Singer, H.M. Pollock (Kluwer, Dordrecht, The Netherlands 1992).
- [14] *Physics of Sliding Friction*, red. B.N.J. Persson, E. Tosatti (Kluwer, Dordrecht, The Netherlands 1996).
- [15] A. Dayo, W. Alnasrallah, J. Krim, *Phys. Rev. Lett.* 80, 1690 (1998).

### Literatura uzupełniająca

Istnieje obecnie wiele ogólnych podręczników poświęconych trybologii. Można polecić szczególnie: G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor, *Engineering Tribology* (Elsevier, Amsterdam 1993) oraz I.M. Hutchings, *Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials* (CRC Press, Boca Raton 1992). Ujęcie matematyczne można znaleźć w książce: J.A. Williams, *Engineering Tribology* (Oxford University Press, Oxford 1994).

**Przyp. tłumacza:** Dobrze przedstawienie trybologii oraz mikro/nanotrybologii zawierają dwie nowe monografie: B. Bhushan, *Principles and Applications of Tribology* (J. Wiley, Chichester 1999) oraz *Handbook of Micro/Nanotribology*, red. B. Bhushan, wyd. 2 (CRC Press, Boca Raton 1999). W języku polskim można polecić podręcznik: Z. Lawrowski, *Tribologia* (PWN, Warszawa 1993).



# Międzynarodowe organizacje fizyki medycznej i inżynierii biomedycznej\*

Oskar A. Chomicki\*\*

*Międzynarodowa Organizacja Fizyki Medycznej*

---

## International organizations of medical physics and biomedical engineering

*Abstract:* A short account of the structure and activities of international organizations devoted to medical physics and biomedical engineering against the background of main fields of research and practical applications to health care is given.

---

### 1. Powstanie, struktura i cele organizacji międzynarodowych

Wiodącą międzynarodową organizacją fizyki medycznej i inżynierii biomedycznej jest Międzynarodowa Unia Nauk Fizycznych i Inżynierskich w Medycynie (International Union for Physical and Engineering Sciences in Medicine – IUPESM), stanowiąca światową sieć obejmującą przeszło 40 000 fizyków i inżynierów w ok. 100 krajach, zadaniem których jest działanie na rzecz poprawy stanu zdrowotnego ludności, przede wszystkim pacjentów i osób niepełnosprawnych, przy wykorzystaniu metod fizyki i nauk inżynierskich.

W skład IUPESM wchodzi dwie niezależne organizacje: Międzynarodowa Organizacja Fizyki Medycznej (International Organisation for Medical Physics – IOMP) oraz Międzynarodowa Federacja Inżynierii Medycznej i Biologicznej (International Federation for Medical and Biological Engineering – IFMBE).

IOMP powstała w styczniu 1962 r. Prezesem-założycielem był Sven Benner, zaś sekretarzem generalnym John Mallard. W myśl statutu każdy kraj może wstąpić do nowo powstałej organizacji poprzez krajową organizację fizyki medycznej. Polska została zaproszona do wstąpienia poprzez Ministerstwo Spraw Zagranicznych, które zwróciło się z kolei do Ministerstwa Zdrowia, a to spowodowało, że powstał Komitet Założycielski Polskiego Towarzystwa Fizyki Medycznej (PTFM), w którym rolę animatora odegrał autor tego artykułu. PTFM oficjalnie weszło w skład IOMP we wrześniu 1995 r. podczas jej pierwszego kongresu w Harrogate (Anglia), na którym na prezesa wybrano V. Mayneorda.

Cele IOMP nie zmieniły się od tego czasu i są następujące: 1) organizuje ona międzynarodową współpracę w dziedzinie fizyki medycznej i wspiera wymianę informacji pomiędzy różnymi działami fizyki medycznej oraz między fizyką medyczną a innymi naukami pokrewnymi, 2) przyczynia się do postępu i rozwoju fizyki medycznej

---

\*Rozszerzona wersja referatu wygłoszonego na XXXV Zjeździe Fizyków Polskich w Białymstoku we wrześniu 1999 r.

\*\*Autor jest prezesem Międzynarodowej Organizacji Fizyki Medycznej (IOMP); mieszka w Warszawie (przyp. Red.).

we wszystkich jej aspektach, 3) udziela rad i pomocy przy tworzeniu Krajowych Komitetów Fizyki Medycznej w tych krajach, które nie posiadają jeszcze własnych organizacji fizyki medycznej.

Jeżeli chodzi o inżynierię medyczną czy biomedyczną, to trzeba przyznać, że Międzynarodowa Federacja Inżynierii Medycznej i Biologicznej (IFMBE) powstała wcześniej niż IOMP, a mianowicie podczas I Kongresu Inżynierii Medycznej w Paryżu w 1959 r. IFMBE i IOMP organizowały oddzielnie swoje kongresy aż do czasu Kongresu w Jerozolimie w 1979 r., kiedy to, po uprzednich rozmowach i uzgodnieniach, postanowiono odbyć wspólnie Kongres Światowy. Od tego czasu wszystkie kongresy organizowano wspólnie co trzy lata w następujących miejscowościach: Ottawie, Jerozolimie, Hamburgu, Helsinkach, San Antonio, Kyoto, Rio de Janeiro oraz Nicei. Kongres zwany „milenijnym” odbędzie się w lipcu 2000 r. w Chicago.

Równocześnie zarówno IOMP jak IFMBE postanowiły ubiegać się o członkostwo w Międzynarodowej Radzie Unii Naukowych (International Council of Scientific Unions – ICSU). W tym celu stworzono organizację nadrzędną, łączącą w sobie IOMP i IFMBE, a mianowicie wspomnianą na początku artykułu IUPESM, dzięki której starania o uzyskanie statusu członka rzeczywistego ICSU uwieńczone zostały sukcesem dopiero we wrześniu 1999 r. W dalszym ciągu artykułu zajmiemy się dokładniej omówieniem działalności IUPESM, jako działalności charakterystycznej dla obu organizacji.

## 2. Zakres działalności fizyki i inżynierii biomedycznej

Trzeba przyznać, że zarówno działalność, jak i zakres tematyczny fizyki medycznej lub inżynierii biomedycznej nie są znane zbyt dobrze ani społeczeństwu, ani rządowi czy też innym stowarzyszeniom lub organizacjom naukowym. W *Encyclopaedia Britannica* (jak i w wielu innych encyklopediach) nie można znaleźć oddzielnego hasła czy artykułu poświęconego fizyce medycznej. Wśród fizyków doświadczalnych i teoretycznych działających w zakresie tzw. fizyki czystej pakuje jeszcze ciągle opinia o względnie niskiej pozycji nauk stosowanych, a więc i fizyki medycz-

nej. Tymczasem wystarczy powiedzieć, że w Japonii połowa wszystkich akceleratorów pracuje dla potrzeb medycyny, zaś G.N. Hounsfield uzyskał Nagrodę Nobla w 1979 r. jako fizyk medyczny. O znaczeniu i rozwoju fizyki medycznej najlepiej świadczy zawartość pism takich jak *Medical Physics* (USA), jak również podana na początku artykułu liczba fizyków i inżynierów medycznych na świecie.

A zatem celem zapoznania Czytelników choćby pobieżnie z dziedzinami, w których fizyka medyczna i inżynieria biomedyczna odgrywają ważną rolę lub znajdują szerokie zastosowanie, przedstawimy poniżej szereg najważniejszych problemów, które najlepiej tłumaczą wprowadzenie i stosowanie terminu „fizyk medyczny” lub „inżynier biomedyczny”.

Historycznie rzecz biorąc jednym z pierwszych zastosowań fizyki w medycynie było użycie kilkaset lat temu wahadła do pomiaru tętna serca. Od przeszło stu lat lekarze stosują przyrząd zwany stetoskopem służący, jak wszyscy wiedzą, do przekazywania dźwięków w klatce piersiowej czy w sercu do ucha badającego lekarza. Inne popularne przyrządy to termometr do pomiaru temperatury ciała lub manometr do pomiaru ciśnienia tętniczego. Wreszcie cała mikrobiologia istnieje dzięki wynalezieniu mikroskopu. Z drugiej zaś strony, szyna ortopedyczna stosowana w złamaniach stanowi najprostszy przykład wynalazku z dziedziny bioinżynierii. Metoda elektrokardiografii (EKG) jest powszechnie stosowana już od 1887 r. Nowa era zastosowań fizyki powstała w momencie odkrycia radu i promieni rentgenowskich.

Obecnie dziedziny działalności fizyków i inżynierów można podzielić na zastosowania diagnostyczne, terapeutyczne oraz te, które służą całemu społeczeństwu niezależnie od jego stanu zdrowotnego, jak np. ochrona przed promieniowaniem.

W dziedzinie diagnostyki *in vivo* najbardziej rozpowszechnione są w dalszym ciągu metody klasycznej radiodiagnostyki za pomocą promieniowania rentgenowskiego czy też nowoczesne metody rentgenodiagnostyki z wykorzystaniem tomografów pozwalających na obrazowanie całego ciała lub poszczególnych jego organów poprzez uzyskiwanie obrazów poprzecznych. Od wielu lat w zakresie tzw. medycyny nuklearnej stosuje się również bardzo szeroki wachlarz sztucz-

nych radioizotopów do badań funkcjonalnych lub tomograficznych z użyciem radionuklidów emitujących promieniowanie gamma, elektrony lub pozytony oraz aparatury zwanej scyntygrafami lub tomografami. W tym względzie fizyka medyczna zajmuje się nie tylko pomiarami i ich interpretacją, ale również projektowaniem i produkcją nowych radionuklidów dopasowanych do określonych celów medycznych. Najnowsze nieinwazyjne metody diagnostyczne wykorzystują zjawisko rezonansu magnetycznego, co pozwala na wyeliminowanie zagrożeń związanych z podawaniem pacjentom radionuklidów.

Postępy w dziedzinie radioimmunologii pozwoliły również na wprowadzenie diagnostyki *in vitro*, która posługuje się aparaturą wykorzystującą ciekłe scyntylatory i/lub radiochromatografię.

Dzięki rozwojowi ultrasonografii medycyna otrzymała od fizyków skuteczne narzędzie bezinwazyjnego badania nie tylko kształtu organów wewnętrznych ciała, ale również wielu funkcji, takich jak np. przepływ krwi w żyłach i tętnicach kończyn i szyi. Ultrasonografia pozwala również na bardziej szczegółowe niż elektrokardiografia badanie serca. Aparatura audiologiczna pozwala na ocenę słuchu, zaś w okulistyce stymulacja oka (a więc i mózgu) za pomocą impulsów świetlnych o zmiennym kształcie umożliwia zbadanie dysfunkcji przewodzenia impulsów wzrokowych. Badania fotobiologiczne prowadzone są na pacjentach z chorobami skóry wywołanymi światłem słonecznym. Stosując słabe promieniowanie rentgenowskie lub promienie gamma można skutecznie ocenić masę kostną, a więc i zawartość pierwiastków takich jak wapń lub magnez, co pozwala na ocenę stopnia zaawansowania niezwykle rozpowszechnionej (zwłaszcza u kobiet po menopauzie) choroby zwanej osteoporozą. Badania zjawiska snu u osób z zaburzeniami oddychania (tzw. bezdech) umożliwiają nie tylko ocenę stopnia zaawansowania choroby, ale także zastosowanie dość skomplikowanej aparatury terapeutycznej przypominającej... aparaty do nurkowania. Natomiast u pacjentów cierpiących na mimowolne oddawanie moczu pomiar ciśnienia i przepływu w pęcherzu moczowym pozwala na zastosowanie skutecznej terapii. W zakresie bioinżynierii układu ruchu, istnieje wiele nieinwazyjnych metod oceny krzywizny kręgosłupa u pacjentów ze

skoliozą czy też wszelkich zaburzeń układu kostnego za pomocą symulacji komputerowej.

Do diagnostyki pojętej ogólnie należy niezwykle ważny dział, którego zadaniem jest ocena jakości i działania aparatury (ang. quality assurance). We wszystkich wspomnianych wyżej dziedzinach diagnostyki stosowane są setki (a nawet tysiące) aparatów, od których sprawnego funkcjonowania zależą wyniki badań, a więc w rezultacie poprawna diagnoza i przyjęty sposób leczenia. W zasadzie wszystkie aparaty rentgenowskie, tomografy radioizotopowe i urządzenia ultrasonograficzne powinny być poddawane stałej kontroli. W tym zakresie trudno przecenić odpowiedzialność fizyków i inżynierów medycznych.

Jeżeli chodzi o leczenie, to fizyka medyczna odgrywa pierwszoplanową rolę w radioterapii, w której planuje się sposób naświetlania guzów nowotworowych, a przede wszystkim zaś opracowuje nowe metody leczenia wykorzystujące w wysokim stopniu akceleratory przyspieszające cząstki, począwszy od elektronów a skończywszy na ciężkich jonach. Trudno sobie dziś pomyśleć rozwój radioterapii bez wiodącej roli fizyków medycznych. Inną dziedziną zastosowań fizyki w medycynie (okulistyka, chirurgia itp.) jest wykorzystanie laserów o szerokim widmie promieniowania i mocy. Inżynieria biomedyczna odgrywa ogromną rolę w zakresie projektowania i produkcji rozruszników (stymulatorów) serca, sztucznych kończyn i przeszczepów, jak również wszelkich urządzeń stosowanych przy rehabilitacji osób niepełnosprawnych.

Wreszcie, wprowadzane na szeroką skalę we wszystkich dziedzinach medycyny komputery wymagają ścisłej współpracy z fizykami i inżynierami medycznymi.

Jeżeli chodzi o zagadnienia ogólnospołeczne, takie jak ochrona przed promieniowaniem, to w tym zakresie fizyka i inżynieria medyczna odgrywa rolę wiodącą zarówno na poziomie szpitali czy ośrodków zdrowia, jak i na poziomie instytucji rządowych lub samorządowych odpowiedzialnych za promieniowanie (urzędy atomistyki czy stacje sanitarno-epidemiologiczne).

### 3. Działalność IUPESM

Jak wspomniano, IUPESM organizuje światowe kongresy. Rolą i zadaniem jej jest również

subsydiowanie udziału w tych kongresach osób z krajów rozwijających się i tzw. nowych demokracji (Europa Środkowo-Wschodnia). Przykładowo: w ostatnim kongresie w Nicei wzięło udział ok. 2500 uczestników z 70 krajów, którzy przedstawili w formie ustnej lub na plakatach 2400 referatów. W Chicago w 2000 r. spodziewany jest udział 8000 fizyków i inżynierów medycznych!

Regionalne i lokalne spotkania, kursy szkoleniowe lub specjalistyczne sympozja w liczbie od 8 do 12 rocznie w różnych częściach świata (ostatnio w Meksyku, na Cyprze, w Egipcie, Zimbabwie, Estonii, Indiach, Grecji i Hiszpanii) są również finansowo i kadrowo wspierane przez IUPESM.

Wszystkie trzy organizacje, a więc IUPESM, IOMP i IFMBE, posiadają zespoły robocze pod nazwą Komitetów. Istnieje Komitet Naukowy, Komitet Oświaty i Szkolenia, Komitet Krajów Rozwijających się itp. Wiele czasopism naukowych, np. *Medical Physics* (USA), *Physics in Medicine and Biology* (W. Brytania), jest oficjalnymi organami IUPESM. Obecnie IUPESM przechodzi na elektroniczne techniki przekazu informacji. I tak rozpoczęto już opracowywanie ogólnoświatowego podręcznika fizyki medycznej (*Global On-line Medical Physics Textbook*) dla studentów i naukowców w krajach rozwijających się. Równocześnie planuje się opracowanie Encyklopedii Inżynierii Biomedycznej (*An On-line Biomedical Engineering Encyclopaedia*). Więcej wiadomości na ten temat można uzyskać na stronie internetowej: [www.wc2000.org/](http://www.wc2000.org/).

Jak wspomniano wyżej, w skład IUPESM wchodzi Komitet Krajów Rozwijających się, który, chcąc zwiększyć wymianę informacji jak również umożliwić przekazywanie nieodpłatnie sprzętu krajom rozwijającym się, od kilku lat wydaje dwa razy w roku Biuletyn zawierający artykuły przeznaczone dla fizyków i inżynierów w tych krajach lub przez nich pisane. Równocześnie IOMP wydaje i rozpowszechnia na całym świecie półrocznik pt. *Medical Physics World* w liczbie 10 tys. egzemplarzy oraz przesyła książki i inne publikacje do założonych i sponsorowanych przez siebie 82 bibliotek w 55 krajach.

Jeżeli chodzi o przyszłość, IUPESM postanowiła zająć się trzema programami mającymi szczególne znaczenie dla rozwoju i popularyzacji fizyki i inżynierii medycznej. Są to: 1) kształcenie i zawodowe szkolenie ciągłe w perspektywie XXI w., 2) światowa sieć informacji biomedycznej ze szczególnym uwzględnieniem potrzeb krajów rozwijających się i nowych demokracji, 3) rozwój metod oceny technik medycznych, takich jak ultrasonografia, radioterapia, mammografia itp.

Na zakończenie tego krótkiego przeglądu należy z uznaniem podkreślić inicjatywę organizatorów XXXV Zjazdu Fizyków Polskich (który odbył się w dniach 20–23 września 1999 r. w Białymstoku), by po raz pierwszy w Polsce fizyce medycznej poświęcić jedną z jego sesji naukowych. W ramach tej sesji wygłoszono referat przedstawiający strukturę i działalność międzynarodowych organizacji fizyki i inżynierii medycznej.



# Glenn Theodore Seaborg (1912 – 1999)

Albert Ghiorso\*, Darleane C. Hoffman\*\*

*University of California, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA*

Adam Sobiczewski

*Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana, Warszawa*

## 1. Wstęp

Glenn Theodore Seaborg był wybitnym chemikiem i fizykiem mijającego wieku, szczególnie w zakresie najcięższych pierwiastków. Stworzył pojęcie aktynowców, co odegrało istotną rolę w identyfikacji syntetyzowanych sztucznie pierwiastków transuranowych. Był *spiritus movens* tej syntezy prowadzonej w USA i wziął bezpośredni udział w wytworzeniu 10 z nich. Opracował chemię plutonu oraz metodę jego wytwarzania i wydzielania na dużą skalę, co odegrało istotną rolę w budowie bomby atomowej i w konsekwencji w przyspieszeniu zakończenia II wojny światowej.

Seaborg bardzo wcześnie zrozumiał, jakie możliwości, ale i zagrożenia, stwarzają odkrycia w zakresie fizyki i chemii jądrowej i jakie wobec tego wyzwania stawiają one przed ludzkością. Zaangażował się w pełni w sprawę, by możliwie dobrze możliwości te wykorzystać, a możliwie skutecznie uniknąć zagrożeń. Robił to zarówno prowadząc badania własności najcięższych pierwiast-

ków, w szczególności ich rozszczepialnych izotopów, podejmując się udziału w pracach nad budową bomby atomowej (Manhattan Project), jak i pełniąc (w latach 1961–71) funkcję przewodniczącego Komisji Energii Atomowej USA czy też funkcję doradcy, głównie w sprawach energii jądrowej, kolejnych 10 prezydentów USA.

To pełne i wielostronne zaangażowanie w sprawy badania najcięższych pierwiastków i w sprawy wykorzystania ich własności, a przede wszystkim energii otrzymywanej z nich, sprawia, że życie jego jest w dużym stopniu odbiciem rozwoju tych zagadnień w ciągu XX wieku. I na ten związek chcielibyśmy przede wszystkim zwrócić uwagę Czytelników, szkicując w tym artykule sylwetkę Seaborga i nie pretendując w żadnym razie do pełnego omówienia jego działalności i osiągnięć. Wymagałoby to bowiem napisania pewnie kilku książek.

Książka czy książki o Seaborgu z pewnością powstaną. Tymczasem możemy zwrócić uwagę Czytelnika na dwa artykuły wspomnieniowe o nim [1,2].

\*Dr Albert Ghiorso był od 1942 r. jednym z najbliższych współpracowników i przyjaciół prof. Seaborga. W szczególności dokonał wspólnie z nim syntezy 9 nowych pierwiastków chemicznych (przyp. Red.).

\*\*Prof. Darleane Christian Hoffman nawiązała bliskie kontakty naukowe z prof. Seaborgiem w roku 1971, kiedy podjęła udaną próbę znalezienia śladowych ilości plutonu-244 w naturze. Kontakty te zacieśniły się od 1978 r., kiedy rozpoczęła eksperymenty radiochemiczne w Berkeley, i stały się szczególnie bliskie od roku 1984, gdy przeniosła się z Los Alamos (gdzie kierowała Oddziałem Chemii i Chemii Jądrowej), obejmując stanowisko profesora chemii na Wydziale Chemicznym Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley oraz kierownictwo zespołu chemii jądrowej i radiochemii pierwiastków ciężkich w Lawrence Berkeley Laboratory. Były to obowiązki, które do tego czasu pełnił prof. Seaborg (przyp. Red.).

## 2. Szkic biograficzny

Glenn T. Seaborg urodził się 19 kwietnia 1912 r. w Ishpeming w stanie Michigan. Jego przodkowie pochodzili ze Szwecji. Studia w zakresie chemii ukończył w 1934 r. na Uniwersytecie Kalifornijskim w Los Angeles, a stopień doktora otrzymał w 1937 r. na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley, z którym to Uniwersytetem związał się już na całe życie. Początkowo był asystentem (1937–39), potem wykładowcą (1939–41), a następnie (od 1941 r.) docentem (assistant professor) i od 1945 r. – profesorem zwyczajnym (full professor) tego Uniwersytetu.

W 1942 r., gdy Stany Zjednoczone były już zaangażowane w wojnę, Seaborg otrzymał urlop na Uniwersytecie i przyłączył się do projektu Manhattan, pracując nad zagadnieniem uzyskania dużej ilości rozszczepialnego izotopu  $^{239}\text{Pu}$  w specjalnie utworzonym do tego celu laboratorium (Metallurgical Laboratory) na terenie Uniwersytetu w Chicago. Spędził tam okres od kwietnia 1942 r. do maja 1946 r. W laboratorium tym jeden z nas (A.G.) rozpoczął pracę w grupie Seaborga latem 1942 r. i od tamtego czasu pozostał bliskim jego współpracownikiem do końca jego życia [1].

Wielką pasją Seaborga była synteza pierwiastków transuranowych. Wziął bezpośredni udział w wytworzeniu 10 nowych pierwiastków, z których najlżejszym był pluton ( $Z = 94$ ), a najcięższym pierwiastek o liczbie atomowej  $Z = 106$ , nazwany później jego imieniem (seaborg). Był także współautorem syntezy izotopu  $^{267}110$  pierwiastka 110 [3]. Izotopy  $^{269}110$  i  $^{271}110$  zostały otrzymane w instytucie GSI w Darmstadcie, a izotop  $^{273}110$  – w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej. Cokolwiek przyszło mu robić, synteza nigdy nie wychodziła poza krąg jego zainteresowań i uwagi.

Bardzo intensywnie udzielał się w pracach organizacyjnych w najogólniejszym znaczeniu tego słowa. W latach 1958–61 był rektorem Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley, w latach 1961–71 pełnił niezwykle obciążającą, bo też i niezwykle ważną i odpowiedzialną funkcję przewodniczącego Komisji Energii Atomowej USA. Praktycznie cały ten czas spędził w Waszyngtonie. Pełnił też obowiązki doradcy, głównie w sprawach energii jądrowej i kontroli zbrojeń jądrowych, dziesięciu kolej-

nych prezydentów USA. Działał również w Amerykańskim Towarzystwie Chemicznym. W roku 1976 był jego prezesem.

Jest autorem ponad 400 artykułów naukowych, wielu książek i 43 patentów. Wiele sił poświęcił różnorodnej dydaktyce, był promotorem kilkudziesięciu prac doktorskich. Zorganizował wiele konferencji, w tym pierwszą konferencję poświęconą pierwiastkom superciężkim, która odbyła się w Houston w 1969 r. Dużo czasu poświęcił opracowywaniu, wraz ze współautorami, tablic nuklidów, podających główne ich własności. Pierwszych pięć ich wydań ukazało się w latach 1940–58 w *Reviews of Modern Physics*. Już te 5 wydań tablic, o bardzo szybko rosnących rozmiarach, dobrze ilustruje dynamikę rozwoju badań jądrowych i jednocześnie rosnący rozmiar prac związanych z ich opracowywaniem. Później, przejęte przez innych autorów, rozrosły się one do rozmiarów oddzielnych książek. Najnowsza z nich (1996 r.) stanowi dwa grube tomy. Są to książki o niezwykle użyteczności dla fizyków jądrowych i znajdują się na biurku bardzo wielu z nich.

Lubił sport i w młodości uprawiał go dość intensywnie. Później nadal interesował się nim i starał się go rozwijać wśród młodzieży akademickiej.

O tych kilku wybranych kierunkach działalności Seaborga chcielibyśmy opowiedzieć w dalszej części artykułu, bo są one ściśle związane z rozwojem nauk jądrowych mijającego wieku i są w dużej mierze ilustracją tego rozwoju, szczególnie w zakresie pierwiastków najcięższych. Jednocześnie jednak bynajmniej nie wyczerpują one pełnej działalności tego istnego giganta pracy i zaangażowania.

Seaborg był aktywny niemal do końca swojego długiego życia. Kryzys przyszedł dnia 24 sierpnia 1998 r. podczas Zjazdu Amerykańskiego Towarzystwa Chemicznego w Bostonie, w którym brał udział. Doznał wtedy wylewu krwi do mózgu, po którym już nie można było nawiązać z nim kontaktu. Zmarł 25 lutego 1999 r. w swoim domu w Lafayette k. Berkeley.

## 3. Największa pasja

Wydaje się niewątpliwe, że największą pasją Seaborga była synteza pierwiastków transuranowych. W Stanach Zjednoczonych historia tej syntezy rozpoczęła się w roku 1940 od udanej próby

wytworzenia neptunu ( $Z = 93$ ), pierwszego pierwiastka transuranowego [4–7]. W Europie próby takie, prowadzone od 1934 r., nie dały rezultatu (patrz np. [7]), choć zaowocowały ważnym odkryciem zjawiska rozszczepienia jądrowego przez Hahna i Strassmanna w 1938 r. Syntezy neptunu ( $^{239}\text{Np}$ ) dokonali w Berkeley E.M. McMillan, który od 1939 r. prowadził na Uniwersytecie w Berkeley badania nad świeżo odkrytym rozszczepieniem, i P.H. Abelson, który do badań tych się dołączył. Bezpośrednio po odkryciu neptunu McMillan przystąpił do prac nad syntezą plutonu ( $Z = 94$ ). Prace te musiał jednak przerwać, gdyż został odwołany do MIT (Massachusetts Institute of Technology) do pracy nad radarem, ważnej ze względu na sprawę obronności. Seaborg, zainteresowany syntezą i rozumiejąc ważność także tej sprawy, poprosił McMillana o pozwolenie kontynuowania jego badań nad syntezą plutonu. Wkrótce wspólnie z A.C. Wahlem i J.W. Kennedym otrzymali ten pierwiastek (1940 r.) i zidentyfikowali go chemicznie w lutym 1941 r. Potem przyszły: ameryk i kiur (1944), berkel (1949), kaliforn (1950), einstein (1952), ferm (1953), mendelew (1955), nobel (1958) i seaborg (1974) [4–7]. W syntezie wszystkich tych 10 pierwiastków, począwszy od plutonu a kończąc na seaborgu, Seaborg odegrał istotną rolę i jest tych odkryć współautorem.

Jest godne uwagi, że prawie żadne zajęcia i obowiązki nie potrafiły odciągnąć go od prac nad syntezą transuranowców. Jedyne pełnienie funkcji przewodniczącego Komisji Energii Atomowej USA (1961–71), związane z koniecznością właściwie ciągłego przebywania w Waszyngtonie, nie pozwoliło mu na wzięcie udziału w pracach nad syntezą pierwiastków 103, 104 i 105, prowadzonych w Berkeley właśnie w tym okresie.

Obecnie, tak bardzo faworyzowane i rozwijane przez Seaborga w Berkeley prace nad syntezą pierwiastków transuranowych są kontynuowane i zaowocowały ostatnio otrzymaniem pierwiastków 116 i 118 oraz izotopu  $^{285}\text{114}$  pierwiastka 114 [8] (por. też [9]). Izotopy  $^{287,288,289}\text{114}$  tego pierwiastka zostały otrzymane w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej.

Należy jednak dodać, że oprócz wielu pierwiastków transuranowych, Seaborg jest współodkrywcą ponad 100 izotopów różnych pierwiastków z różnych obszarów układu okresowego, w tym

takich izotopów jak jod-131, żelazo-55, żelazo-59, kobalt-60, mangan-54 czy antymon-124, mających bardzo ważne zastosowanie w medycynie. Jest także współodkrywcą (1941 r.) ważnego dla energetyki (tj. dającego możliwość samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej) izotopu uranu:  $^{233}\text{U}$ . Jest to jeden spośród tylko trzech takich izotopów:  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  i  $^{239}\text{Pu}$ , w tym te dwa, które wytworzono sztucznie ( $^{233}\text{U}$  i  $^{239}\text{Pu}$ ) zostały otrzymane właśnie przez Seaborga ze współpracownikami. Wszystko to było naturalnie możliwe dzięki berkeleyowskiemu cyklotronom, zbudowanym przez E.O. Lawrence'a, dzięki czemu Berkeley było przez długie lata miejscem wyjątkowym w świecie. Seaborg uznawany był powszechnie za najefektywniejszego użytkownika tych cyklotronów. Umiał docenić możliwości, jakie dają, i zrobić z nich właściwy użytek.

Bardzo ważną również sprawą dla syntezy i identyfikacji najcięższych pierwiastków były odkrycia Seaborga w dziedzinie chemii tych pierwiastków.

#### 4. Aktynowce

Idea okresowości we własnościach pierwiastków chemicznych sformułowana została już w XIX w. i skryształizowała się w postaci układu okresowego, zaproponowanego przez Mendelejewa. Oprócz wprowadzenia ładu i przejrzystości we własnościach kilkudziesięciu znanych już wtedy pierwiastków, miał on tę wielką wartość praktyczną, że pozwalał przewidzieć własności pierwiastków jeszcze nie znanych, w szczególności tych, których wyraźnie brakowało w układzie (puste miejsca). Wkrótce został on opracowany tak, że przewidywał miejsce dla 92 pierwiastków. W środku lat 30. naszego wieku wszystkie one były już odkryte i zapełniły te miejsca, z wyjątkiem jedynie pierwiastków 43, 61, 85 i 87. Zdawano sobie jednak już wtedy sprawę, że brakujące pierwiastki muszą być promieniotwórcze, z czasami życia tak krótkimi, że nie mogły występować na Ziemi w koncentracjach, które pozwoliłyby je wtedy zaobserwować.

Stan układu Mendelejewa w latach 30., gdy przystępowano do syntezy nowych pierwiastków, podany jest na rys. 1, zaczerpniętym z pracy [5]. Według niego należało oczekiwać, że własności pierwiastków 93 i 94 będą zbliżone do własności



1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104

*lantanowce	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
-------------	----------	----------	----------	----------	----	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Rys. 1. Stan układu okresowego pierwiastków z lat trzydziestych, gdy przystępowano do syntezy nowych pierwiastków. Miejsca zacieniowane oznaczają pierwiastki jeszcze wtedy nie zaobserwowane.

odpowiednio renu i osmu. Tymczasem pierwiastki te, odkryte w Berkeley w 1940 r., wykazywały własności bardzo zbliżone do uranu, a nie renu i osmu. Przez najbliższe więc kilka lat uważano uran, neptun i pluton za „bliskich krewnych”, ale dokładna relacja między ich własnościami pozostawała niejasna. Sądzono także, że podobna sytuacja będzie z pierwiastkami 95 i 96 i że cała ta piątka tworzyć będzie jedną grupę „uranowców”. Myśl ta jednak była błędna i eksperymenty mające na celu odkrycie pierwiastków 95 i 96, przeprowadzone według niej, zawiodły. Wtedy właśnie (1944 r.) Seaborg wysunął hipotezę, że prawdopodobnie wszystkie znane pierwiastki cięższe od aktynu są źle umieszczone w układzie okresowym i że wszystkie one razem z aktynem mogą tworzyć grupę podobną do lantanowców. Już od lat 20. wiadomo było, że lantan i pierwiastki ziem rzadkich, razem zwane lantanowcami, są bardzo podobne chemicznie i umieszczano je w układzie okresowym poza jego główną częścią, jako osobny wiersz. Nowa koncepcja Seaborga oznaczała, że pierwiastki 95 i 96 powinny mieć niektóre własności wspólne z aktynem, a niektóre wspólne z ich odpowiednikami z ziem rzadkich: europem i gadolinem, szczególnie co się tyczy trudności utleniania powyżej stopnia III. Gdy eksperymenty nad syntezą pierwiastków 95 i 96 zaplanowano zgodnie z tą koncepcją, pierwiastki te wkrótce, jeszcze w tym samym roku 1944, zostały odkryte.

Wysunięcie idei aktynowców i następnie jej uzasadnienie było jednym z głównych osiągnięć

naukowych Seaborga. Przyczyniło się ono istotnie do odkrycia dalszych pierwiastków transuranowych (które były identyfikowane chemicznie) i poznania ich własności. Współczesna postać układu okresowego pierwiastków, ekstrapolowanego na podstawie przewidywań teoretycznych znacznie poza aktynowce, pokazana jest na rys. 2, zaczerpniętym z [5].

Historia badań chemicznych najcięższych pierwiastków oraz badania ostatnich lat przedstawione są np. w artykule [10].

## 5. Manhattan Project

Manhattan Project, przedsięwzięcie mające na celu budowę bomby atomowej, kojarzy się zwykle z Los Alamos. Los Alamos było rzeczywiście centralnym laboratorium, skupiającym największą grupę wybitnych naukowców, mających za cel skonstruowanie bomby atomowej.

Warto jednak pamiętać, że prace nad projektem odbywały się w wielu miejscach i że dla przedsięwzięcia tego pracowało bardzo wiele różnych instytucji. Jedną z nich był Uniwersytet w Chicago, a dokładniej utworzone na jego terenie w grudniu 1941 r. laboratorium o nazwie Metallurgical Laboratory (Met Lab), która to nazwa miała być myląca i ukrywać jego prawdziwe zadanie. (Zauważmy, że Los Alamos Laboratory zostało utworzone w styczniu 1943 r., a więc o ponad rok później). Dyrektorem Met Lab został znany fizyk, laureat Nagrody Nobla z 1927 r., Arthur H.



1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Ha	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
119	120	121	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168

lantanowce	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
------------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

aktynowce	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
-----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

superaktynowce	122	123	124	125	126							153
----------------	-----	-----	-----	-----	-----	--	--	--	--	--	--	-----

Rys. 2. Współczesny układ okresowy, uwzględniający także dalekie przewidywania teoretyczne. Zaciemnione są miejsca pierwiastków jeszcze nie obserwowanych.

Compton. Zadaniem Laboratorium było opracowanie metod wytwarzania plutonu w dużych ilościach, a także metod chemicznych wydzielenia go i oczyszczania na dużą skalę. Pamiętajmy, że świeżo odkryty pluton (przełom 1940 i 1941 r.) był w chwili zakładania Met Lab dostępny tylko w mikroskopijnych ilościach, niemożliwych do zważenia czy nawet zobaczenia go gołym okiem. Wiadomo już jednak było, że jego izotop  $^{239}\text{Pu}$  był materiałem rozszczepialnym, i to lepiej rozszczepialnym niż inny znany nuklid o tej własności:  $^{235}\text{U}$ . Nadawał się zatem do produkcji bomby atomowej. Współautorem obu ważnych wydarzeń w sprawie plutonu-239, tzn. jego odkrycia i stwierdzenia jego rozszczepialności, był Seaborg i nic dziwnego, że jemu powierzono zadanie zorganizowania i kierowanie grupą, która miała dokonać separacji chemicznej plutonu na dużą skalę.

On także miał największą wiedzę i doświadczenie w zakresie chemii plutonu. Początkowo prace odbywały się w mikroskali; była to ultramikrochemia plutonu, wystarczała jednak do poznania podstawowych własności chemicznych tego pierwiastka. Te mikroskopijne ilości plutonu otrzymywano przez naświetlanie uranu neutronami otrzymywanymi za pomocą cyklotronów

(bombardowanie berylu deutronami). W sierpniu 1942 r. udało się już zgromadzić próbkę, którą można było zobaczyć gołym okiem, a we wrześniu – próbkę, którą udało się już zważyć ( $2,27\ \mu\text{g}$ ). Do końca 1943 r. z materiału uzyskanego w cyklotronach udało się zgromadzić ok. 2 mg plutonu. Służył on do badań, które miały zdecydować o metodzie uzyskiwania go w dużych ilościach.

W sprawie wytwarzania plutonu na dużą skalę momentem przełomowym było uruchomienie przez zespół kierowany przez Fermiego, w ramach Met Lab, pierwszego na świecie reaktora jądrowego i pokazanie, że samopodtrzymująca się reakcja łańcuchowa może zachodzić. Było to w grudniu 1942 r. Reaktor Fermiego, a później większy reaktor doświadczalny, zbudowany w Laboratoriach w Clinton w stanie Tennessee (które po wojnie przekształciły się w znane obecnie w świecie Oak Ridge National Laboratory), dostarczyły wiele wiedzy i doświadczenia dla budowania dużych, przemysłowych reaktorów w Hanford w stanie Waszyngton. Pierwszy z nich rozpoczął pracę we wrześniu 1944 r. i już w grudniu tego samego roku dostarczył pierwszej partii materiału do separacji plutonu, prowadzonej w zlokalizowanych tam zakładach chemicznych.

Separacja ta była wielkim problemem. Koncentracja plutonu w stosunku do uranu i produktów jego rozszczepienia, zawartych w materiale, była rzędu  $10^{-7}$ , a sam materiał niezwykle radioaktywny. Pracę trzeba było prowadzić manipulatorami na odległość, spoza odpowiednich osłon, podobnie zresztą jak pracę z reaktorem. Ultramikrochemia (uprawiana z mikroskopową próbką uzyskaną w cyklotronach) była dziedziną nową i przeniesienie wiedzy zdobytej za jej pomocą na procesy w skali przemysłowej nie było rzeczą oczywistą. Trudności jednak zostały pokonane i pierwsza przesyłka plutonu do Los Alamos nastąpiła już w lutym 1945 r., 16 lipca odbyła się w Alamogordo w stanie Nowy Meksyk udana próba bomby plutonowej, a 9 sierpnia tego samego roku bomba taka została zrzucona na Nagasaki, kończąc II wojnę światową (bomba zrzucona na Hiroszimę zawierała uran-235).

Z powyższych danych widać, jak szybko postępowały prace. Dziś trudno wyobrazić sobie ich intensywność. Tydzień roboczy wynosił ok. 60 godzin, a konieczne spotkania i dyskusje odbywały się po pracy, w nocy. Prace, które zostały wykonane w ciągu kilku lat, w normalnych warunkach zajęłyby prawdopodobnie lat kilkadziesiąt. Poznana przez te kilka lat złożona chemia plutonu to wiedza porównywalna z tą, jaką dla uranu gromadzono przez ponad 150 lat od czasu jego odkrycia. Motywacja pośpiechu była oczywista – obawa, że Niemcy posiadają tę broń wcześniej. Przecież to niemieccy uczeni (Hahn i Strassmann, przy ważnym udziale Lise Meitner) odkryli na krótko przed wojną zjawisko rozszczepienia. Panowała opinia, że w tej dziedzinie uczeni niemieccy wyprzedzają inne kraje o 2 do 3 lat. Obawa wyprzedzenia przez Niemców powiększana zresztą była częstymi ich oświadczeniami, że mają nową, rozstrzygającą broń. Że nie była to ta broń, wyjaśniło się dopiero po wojnie.

Prace prowadzone w Met Lab zostały bardzo szczegółowo opisane w książce Seaborga [11]. Są to zapiski jego dziennika z lat 1939–46, opatrzone komentarzami i uzupełnieniami fizyka i dwóch historyków nauki z Uniwersytetu stanu Waszyngton.

Zrzucenie bomb na Hiroszimę i Nagasaki było dla wielu uczestników projektu Manhattan trudnym przeżyciem i problemem moralnym. Jest stosunkowo mało znane, że w Met Lab istniał 7-osobowy komitet (tzw. Komitet Francka,

do którego należeli m.in. Seaborg i Leo Szilard), który wystosował apel do prezydenta Trumana i dostarczył go do Waszyngtonu w czerwcu 1945 r., by bombę zrzucić na tereny niezamieszkałe, jedynie w celu demonstracji jej siły. Apel spotkał się jednak z krytyką wpływowych osób i bomby zostały zrzuczone. Sam Seaborg wyrażał później zrozumienie dla tej decyzji, która być może uratowała kilkaset tysięcy ludzi, którzy prawdopodobnie zginęliby, gdyby wojna potrwała dłużej i gdyby trzeba było dokonać inwazji Japonii. Decyzja ta pozwoliła też, w tak dramatyczny sposób, zademonstrować, czym jest ta broń, jak radykalnie zmienia sytuację świata i jak radykalnej zmiany wymaga w naszej świadomości i mentalności w sprawach rozwiązywania konfliktowych problemów tego świata. Wielu ludzi uważa, że bez tej demonstracji nie byłoby dostatecznej ostrożności wobec tej broni i losy świata mogłyby potoczyć się inaczej. Co do samych tych bomb, to Seaborg uważał, że po Hiroszimie zrzucenie drugiej bomby na Nagasaki nie było już potrzebne.

Na zakończenie tego rozdziału dodajmy może, jak doświadczenia wynikające z projektu Manhattan wykorzystano dla organizacji badań w USA po wojnie. Wielka skuteczność tego projektu pokazała, jak efektywne mogą być duże zespoły badawcze, zorganizowane siłami wielu uniwersytetów, skoncentrowane na dobrze określonych celach badawczych i istotnie wsparte finansowo przez budżet państwa. Na takiej wobec tego zasadzie postanowiono utworzyć zaraz po wojnie wiele takich środowiskowych i jednocześnie wspieranych przez budżet państwa (narodowych) instytutów badawczych. Przykładem jest Argonne National Laboratory (które powstało w lipcu 1946 r. z jednego z działów Met Lab), Oak Ridge National Laboratory (które powstało z Laboratoriów w Clinton w stanie Tennessee, zbudowanych dla potrzeb Manhattan Project), czy Brookhaven National Laboratory, założone we wrześniu 1946 r. Spełniając rolę centrów badawczych dla określonych części kraju, lokalizowane one były na ogół w pobliżu dużych miast (z dużymi uniwersytetami), będących naturalnym oparciem dla nich, jak Chicago (dla Argonne) czy Nowy Jork (dla Brookhaven). Znane dziś osiągnięcia tych ośrodków mówią, że idea była dobra. Przeniesiono też ją do Europy, gdzie zrealizowała się np. w postaci CERN-u (wielkim ośrodkiem utworzenia

CERN-u był Isidor I. Rabi, uczestnik Manhattan Project). W skali europejskiej jednak taka „środkowość” oznacza już z reguły ośrodek międzynarodowy.

## 6. Na styku z władzą i polityką

Po wojnie, niemal przez całe swoje dalsze życie, Seaborg podejmował różne obowiązki, które stawiały go w kręgu władzy. Były to różne funkcje doradcze dla kolejnych 10 prezydentów USA oraz pełniona przez ponad 10 lat funkcja przewodniczącego Komisji Energii Atomowej Stanów Zjednoczonych.

### 6.1. Przewodniczący Komisji Energii Atomowej

Funkcję tę powierzył Seaborgowi prezydent John F. Kennedy w styczniu 1961 r. Seaborg pełnił ją także za prezydentury Lyndona B. Johnsona i Richarda M. Nixona, aż do rezygnacji w sierpniu 1971 r. Była to funkcja bardzo absorbująca, wymagała prawie ciągłego przebywania w Waszyngtonie, wielu wyjazdów, negocjacji, udziału w naradach i konferencjach. Bardzo wiele uwagi i sił poświęcił Seaborg na tym stanowisku sprawom kontroli i ograniczenia zbrojeń jądrowych, nierozprzestrzeniania broni jądrowej i zakazu jej prób. Za największe osiągnięcie w tej dziedzinie uważał zawarcie w 1963 r. między USA, Zjednoczonym Królestwem i ZSRR układu o zakazie prób jądrowych w atmosferze, przestrzeni kosmicznej i pod wodą. Seaborg odegrał też kluczową rolę w negocjacjach traktatu o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej, zawartego w 1968 r., za prezydentury L.B. Johnsona. Wydarzenia związane z pełnieniem funkcji

przewodniczącego Komisji Energii Atomowej opisał Seaborg w trzech książkach [12–14], a podróże odbyte w tym czasie – w książce [15].

### 6.2. Doradca dziesięciu prezydentów

Funkcję doradcy kolejnych 10 prezydentów USA, od Franklina D. Roosevelta do George’a H.W. Busha, pełnił Seaborg w latach 1945–93, a więc w ciągu 48 lat. Były to głównie sprawy związane z energią jądrową i zagadnieniami zbrojeń jądrowych, ale także sprawy badań naukowych i kształcenia. W ostatnich latach życia lubił opowiadać na wykładach, referatach i pogadankach podczas różnych konferencji i spotkań o tej swojej roli doradcy. Bardzo żywo przedstawiane i bogato ilustrowane przezroczami, cieszyły się dużym powodzeniem. Proszono go o spisanie tych wspomnień. Zrobił to w książce [16].



Rys. 3. Seaborg (z lewej) z prezydentem Johnem F. Kennedym (16.02.1961).



Rys. 4. Seaborg relacjonujący prezydentowi George’owi Bushowi sprawę „zimnej fuzji” (Biały Dom, 14.04.1989).



Książki Seaborga mają szczególną wartość. Nie jest to bowiem odtworzenie minionych zdarzeń z pamięci, przecież zawodnej, ale oparte są one na bardzo dokładnych i szczegółowych, codziennych zapiskach, które prowadził przez całe swe dojrzałe życie. Mają więc walor dokumentu.

## 7. Nauczyciel

Nie mamy zamiaru omawiać tutaj szerzej działalności dydaktycznej Seaborga oraz jego działalności na rzecz nauczania. Chcemy zwrócić tylko uwagę, także przy tej okazji, na wszechstronność jego działań. Wiedział, że nauki nie można oddzielać od nauczania, nauczania zaś od działań organizacyjnych na jego rzecz. I tylko trudno jest łączyć to wszystko jednej osobie. Sam jednak starał się to robić. Zajęcia dydaktyczne na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley prowadził od chwili uzyskania doktoratu (1937), jedynie z przerwą na pracę w Manhattan Project

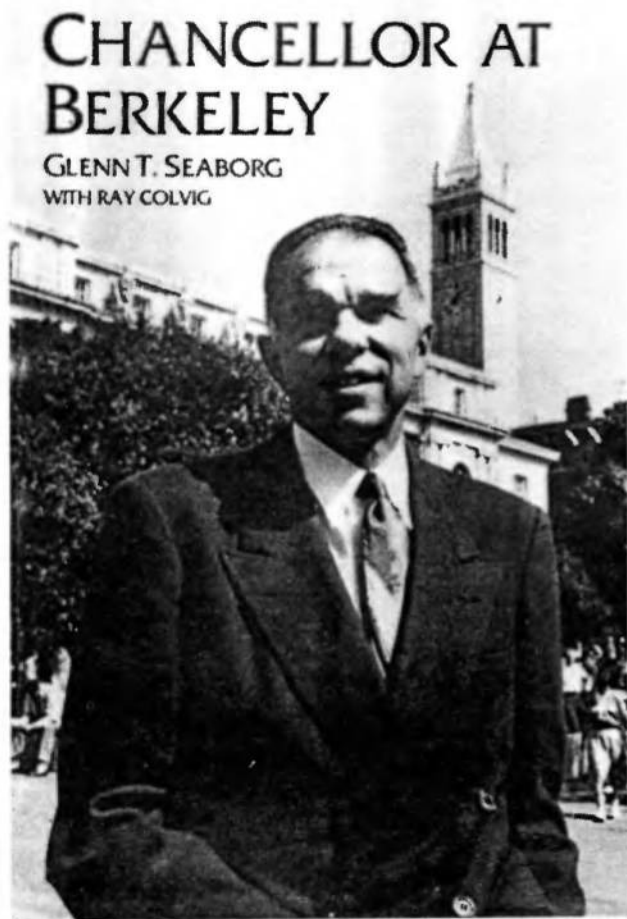
(1942–46) i działalność w Waszyngtonie jako przewodniczący Komisji Energii Atomowej (1961–71). Był promotorem ok. 65 prac doktorskich.

Na rzecz Uniwersytetu w Berkeley najintensywniej działał w latach 1958–61, gdy był jego rektorem (chancellor). Udało mu się wtedy zrealizować wiele ważnych programów. Okres ten opisał szczegółowo w książce [17]. Uniwersytet Kalifornijski w Berkeley założony został w 1868 r. (ma więc ponad 130 lat) i jest jednym z najbardziej znanych uniwersytetów amerykańskich. Wielu z jego pracowników otrzymało Nagrodę Nobla. Przypomnijmy może, że Czesław Miłosz, który dostał tę Nagrodę w 1980 r., był w latach 1961–78 profesorem tego Uniwersytetu. W samym okresie „rektorowania” Seaborga (2,5 roku) Nagrodą tą wyróżniono trzy osoby. Daje to orientację w poziomie Uniwersytetu. Dla orientacji w jego skali zaś podajmy, że w omawianym okresie (1958–61) budżet roczny Uniwersytetu wynosił 50 mln USD, liczba profesorów (faculty) – 1600, wszystkich pracowników (staff) – 6 tys., a studentów – 22 tys.

## 8. Związki z Polską

Nie były one liczne, miały jednak znaczenie. Seaborg odwiedził Polskę tylko raz (w 1967 r.), by wziąć udział w sympozjum poświęconym 100-leciu urodzin Marii Skłodowskiej-Curie. Sympozjum to zgromadziło wielu znakomitych fizyków i chemików. Oprócz naukowców polskich, wzięło w nim udział ok. 80 osób z 22 krajów świata, w tym tacy uczeni jak Aage Bohr, Keith A. Brueckner, Kazimierz Fajans (rys. 6), Georgij N. Florow, Ilja M. Frank, Maria Goeppert-Mayer, Robert Hofstadter, Piotr L. Kapica, Edwin M. McMillan, Cecil F. Powell, Glenn T. Seaborg, Leon Van Hove, Victor F. Weisskopf, John A. Wheeler i inni. Materiały tego sympozjum zostały wydane przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej w Wiedniu [18].

Seaborg wygłosił referat pt. „Perspektywy zastosowań nauk jądrowych”. Mówił tam, że w naszej wizji rozwoju jakiejś gałęzi nauki i jej zastosowań często wykazujemy dużo konserwatyizmu. I zdarza się to także ludziom znakomitym, najlepszym nawet specjalistom. Na przykład, lord Rutherford przemawiając w dniu 11 września 1933 r. do członków Brytyjskiego Stowarzysze-

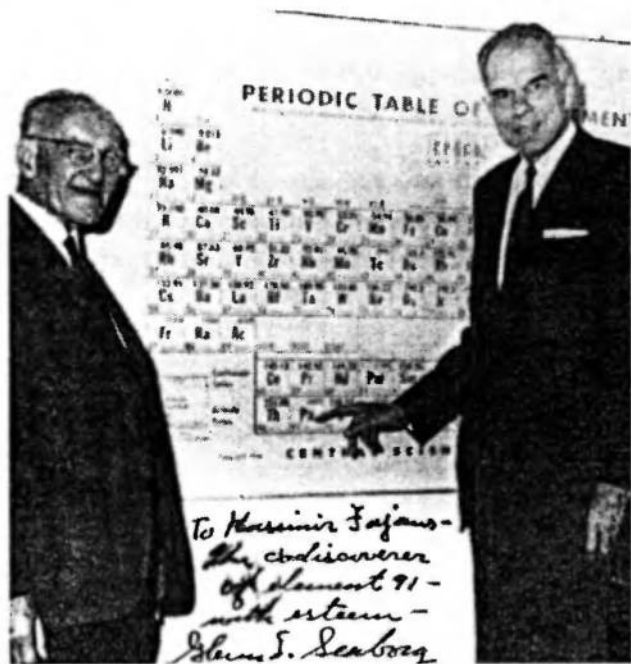


Rys. 5. Seaborg na terenie Uniwersytetu w Berkeley jako jego rektor (lata 1958–61).



nia na Rzecz Rozwoju Nauki powiedział na temat przemian jądrowych: „Ktokolwiek sądzi, że z tych przemian atomowych można będzie dostać energię, opowiada głupstwa”. Powiedział to

nie wypowiedział ich przewodniczący Amerykańskiej Komisji Energii Atomowej, instytucji decydującej w sprawach jądrowych w USA, a w znacznej mierze i na świecie. Wiadomo też było, że Seaborg wkłada ogromny wysiłek w sprawę ograniczenia i kontroli zbrojeń jądrowych na świecie oraz w sprawę pokojowego wykorzystania energii jądra. Nie było to więc przemówienie głołosłowne.



Rys. 6. Seaborg z urodzonym w Warszawie fizykochemikiem amerykańskim Kazimierzem Fajansem (z lewej), wskazujący palcem na protaktyn, którego Fajans był współodkrywcą (wspólnie z O. Göhringiem). Ze zbiorów prof. J. Hurwica.

W swojej dużej, dwutomowej książce [15], w której opisał 31 podróży, jakie odbył jako przewodniczący Komisji Energii Atomowej USA, umieścił także relację z Polski. Jest tam obszerny, dwudziestokilkustronicowy opis tego pobytu, ze szczegółowym omówieniem referatów, przeprowadzonych rozmów i złożonych wizyt. Opis jego wizyty w Instytucie Badań Jądrowych w Świerku jest być może jednym z najdokładniejszych opisów tego Instytutu w tamtym czasie. Píše, co robiono w poszczególnych działach, jakimi rozporządzano urządzeniami, kto nimi kierował (osoby te oprowadzały go). Dużo polskich nazw, nazwisk i imion poprawnie zapisanych. Odwiedził także Instytut Radiochemii Uniwersytetu Warszawskiego, oprowadzany przez prof. Mieczysława Taubego, w towarzystwie rektora Uniwersytetu prof. Stanisława Turskiego i Pełnomocnika Rządu ds. Wykorzystania Energii Jądrowej Wilhelma Billiga. Odwiedzając Muzeum Marii Skłodowskiej-Curie (rys. 7 i 8) nie omieszkiał podać, że oprowadzał go prof. Józef Hurwic (rys. 8), który to Muzeum założył (w 1967 r., właśnie na okazję 100-lecia urodzin uczonej) i który był wówczas prezesem Polskiego Towarzystwa Chemicznego. Opisując wizytę w Żelazowej Woli nie pominął tego, że grała Barbara Hesse-Bukowska. Widać tu rękę Seaborga – kronikarza i dokumentalisty, który prowadził dziennik od czternastego roku życia. Z takich sprawozdań można się czegoś dowiedzieć i mogą one być dokumentem na przyszłość.

zresztą w tej samej sali, w której poprzednio lord Kelvin twierdził, że atom jest niepodzielny. Nieodstrzeżenie, że możliwości tkwiące w jądrze atomowym mogą być wykorzystane dla dobra ludzkości w energetyce, rolnictwie, biologii, medycynie, archeologii, kosmonautyce i wielu innych dziedzinach, są takim właśnie konserwatyzmem. Podkreślał, że jest pilna potrzeba międzynarodowej solidarności, współpracy i wysiłku na rzecz użycia zdobytej wiedzy do przezwyciężenia obaw, podejrzliwości i ślepych emocji zrodzonych z uprzednich błędów i niewiedzy. Odwołał się tu do myśli Marii Skłodowskiej, że „niczego w życiu nie należy się bać – trzeba tylko starać się to poznać i zrozumieć”. Myśl tę przyjął niejako za motto swego wystąpienia i uznał, że przyszedł bardzo ważny czas, gdy trzeba więcej zrozumieć, by mniej się bać. Pamiętajmy bowiem, że był to rok 1967, okres zimnej wojny, gdy były duże obawy, w jakim kierunku pójdą badania jądrowe i ich zastosowania. Słowa te może nie miałyby większego znaczenia, gdyby

Dla Czytelnika polskiego może być ciekawe, co napisał o tej wizycie w raporcie dla prezydenta (Lyndona B. Johnsona). Oto wyjątki ([15], s. 739–40):

„Podczas pobytu w Polsce miałem możliwość zwiedzenia Instytutu Badań Jądrowych w Świerku pod Warszawą, a także Uniwersytetu Warszawskiego usytuowanego w samym mieście. Mam wrażenie, że Polska prowadzi niewielkie, ale bardzo ożywione i rozsądne badania oraz program rozwoju w dziedzinie jądrowej. Niektóre z ich prac

są szczególnie wybitne i przyniosą im niewątpliwie dalsze uznanie międzynarodowe w tej dziedzinie. Ich urzędzenia są bardzo dobrze wykorzystywane.

(...) Jestem przekonany, że mój udział w tym sympozjum był bardzo pożyteczny i wzmacnia jeszcze moje przekonania do Pana planu budowy mostów między Wschodem i Zachodem. Polska jest z pewnością przykładem kraju, który ma twarz zwróconą ku Zachodowi i pragnie znaleźć jakieś sposoby bliższego związania się z nami i z Europą Zachodnią”. Był to rok 1967.



Rys. 7. Przed Muzeum Marii Skłodowskiej-Curie w Warszawie. Od lewej: Wilhelm Billig, Seaborg i Albert Ghiorso (19.10.1967).

Udział Seaborga w sympozjum poświęconym 100-leciu urodzin Marii Skłodowskiej był jednym z wyrazów jego uznania dla jej osoby i dorobku. Uznanie to wyrażał zresztą niejednokrotnie. Na przykład, podczas uroczystości 15-lecia istnienia Lawrence Radiation Laboratory w Livermore (ośrodek jądrowy podobny w swym charakterze do Los Alamos, położony ok. 60 km od Berkeley), mówił ([19], s. 203): „Początki radiochemii – i, ogólniej, naszej wiedzy o jądrze –

można odnaleźć w odkryciu promieniotwórczości naturalnej przez Becquerela i we wczesnych pracach państwa Curie. Prace te, poczynając od 1896 r., otworzyły drogę do poznania jądra atomowego. Drogę do współczesnej radiochemii otworzyła przede wszystkim pani Curie, która w sposób pełen cierpliwości zastosowała metodę krystalizacji frakcyjnej do wydzielenia i identyfikacji bardzo małych ilości substancji radioaktywnej z dużych ilości blendy smolistej. W szczególności jej wspaniałe odkrycie, wydzielenie i przejrzyste podanie własności chemicznych radu, stanowi wzór, na który my, jej następcy, patrzymy z podziwem i nabożnym szacunkiem”.



Rys. 8. Seaborg w Muzeum Marii Skłodowskiej-Curie z założycielem tego Muzeum – prof. Józefem Hurwicem (z prawej) w dniu 19.10.1967 r. (ze zbiorów prof. J. Hurwica).

Uznanie swoje dla Marii Skłodowskiej-Curie i jej męża Piotra wyraził Seaborg w sposób najwyższy, proponując wraz ze współodkrywcami, a wśród nich jednym z nas (A.G.), nazwę curium (kiur) dla pierwiastka o liczbie atomowej  $Z = 96$ , odkrytego w 1944 r. Przypomnijmy wszystkich współautorów tego odkrycia: G.T. Seaborg, R.A. James, L.O. Morgan

i A. Ghiorso. Izotop  $^{242}\text{Cm}$  tego pierwiastka, o czasie połowicznego zaniku 162,9 dni, wytworzony został latem 1944 r. w Berkeley w reakcji



tzn. przez bombardowanie jąder plutonu-239 jonami helu-4 [20,21]. Jony helu przyspieszane były w berkeleyowskim cyklotronie o średnicy 60 cali. Wydzielenia i identyfikacji dokonano metodami chemicznymi w Met Lab w Chicago. W identyfikacji tego nowego pierwiastka decydujące było stwierdzenie obecności znanego wcześniej izotopu plutonu-238, jako produktu rozpadu  $\alpha$  nowo wytworzonego jądra  $^{242}\text{Cm}$ .

W roku 1974 Glenn Seaborg został wybrany na członka zagranicznego Polskiej Akademii Nauk (rys. 9). Jedną z jego książek (*Man-made transuranium elements* (1963)) została przetłumaczona (przez dra Edwarda Józefowicza) na język polski [4].



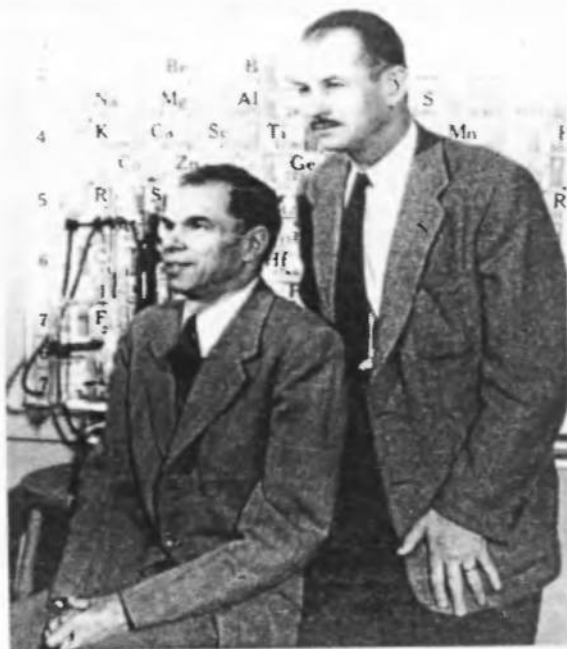
Rys. 9. Podczas uroczystości wręczenia Seaborgowi dyplomu członka zagranicznego PAN w dniu 18 kwietnia 1975 r. w jego gabinecie w Lawrence Berkeley Laboratory (LBL). Od lewej: Bogdan Parlewicz (z Polskiej Izby Handlu Zagranicznego w San Francisco), Jan Błocki (fizyk z Instytutu Badań Jądrowych w Świerku, pracujący czasowo w LBL), Witold Trąmpczyński (ambasador PRL w USA, wręczający dyplom), Danuta Błocka, Glenn T. Seaborg, Władysław J. Świątecki (polski teoretyk jądrowy, pracujący od wielu lat w LBL). Ze zbiorów prof. J. Błockiego.

## 9. Wyrazy uznania

Trudno byłoby wymienić wszystkie doktoraty honorowe (ok. 50) przyznane Seaborgowi przez

uczelnie na całym świecie oraz członkostwa różnych akademii. Zwróćmy uwagę tylko na niektóre wyróżnienia, dość szczególne.

Jednym z nich było niewątpliwie przyznanie mu (wspólnie z E.M. McMillanem) w 1951 r. Nagrody Nobla w dziedzinie chemii za badania pierwiastków transuranowych. Drugim ważnym wy-



Rys. 10. Seaborg (z lewej) z E.M. McMillanem wkrótce po otrzymaniu wiadomości o przyznaniu im Nagrody Nobla (1951 r.).

różnieniem było przyznanie mu w roku 1959 bardzo prestiżowej Nagrody im. Enrica Fermiego. Nagroda Fermiego została ustanowiona przez Komisję Energii Atomowej USA w roku 1954 (wkrótce po śmierci Fermiego) w celu uhonorowania ludzi, którzy wnieśli szczególny wkład do rozwoju, zastosowania i kontroli energii jądrowej. Wręczana była wspólnie przez prezydenta USA i przewodniczącego Komisji Energii Atomowej lub samego przewodniczącego w imieniu obu tych osób. W latach 1961–71, jak już pisaliśmy, przewodniczącym Komisji był Seaborg, on zatem wręczał tę Nagrodę w tych latach. Nagrodę Fermiego otrzymali tak wybitni uczeni, jak John von Neumann (1956), Eugene P. Wigner (1958), Hans A. Bethe (1961), Edward Teller (1962), Otto Hahn, Fritz Strassmann i Lise Meitner (wspólnie we troje w 1966 r.), John A. Wheeler (1968) i inni. Hahn, Strassmann i Meitner otrzymali ją za ba-



daniam, które doprowadziły do odkrycia rozszczepienia jądrowego. Na rys. 11 pokazujemy wręczenie tego wyróżnienia pani Lise Meitner w Cambridge, gdzie wtedy mieszkała i nie była już w stanie przybyć (miała już wtedy 88 lat) do Wiednia, siedziby Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, gdzie Nagroda wręczona została wspólnym z nią Hahnowi i Strassmannowi. Seaborg, który miał dla niej wielkie uznanie, pojechał więc do niej. Ostatnio imię jej uczczono na



Rys. 11. Wręczenie Nagrody im. Fermiego przez Seaborga pani Lise Meitner (Cambridge, 23.10.1966).

zwą pierwiastka 109 (meitner). Na rys. 12 pokazujemy wręczenie Nagrody im. Fermiego Johnowi A. Wheelerowi. Ci, co znają prace grawitacyjne



Rys. 12. Wręczenie Nagrody im. Fermiego Johnowi A. Wheelerowi. Od lewej: Seaborg, J.A. Wheeler i prezydent Lyndon B. Johnson (Biały Dom, Waszyngton, 2.12.1968).

i astrofizyczne Wheelera z lat późniejszych, mogą być zdziwieni uzasadnieniem Nagrody: „za pionierski wkład w zrozumienie rozszczepienia jądrowego i w rozwinięcie technologii reaktorów wytwarzających pluton, oraz za jego trwający przez lata wkład do wiedzy o jądrze”. Tak, tak, Wheeler rzeczywiście wniósł istotny wkład w te sprawy. Nad teorią rozszczepienia pracował zresztą wspólnie z Nielsem Bohrem jeszcze przed wojną. Można dodać przy okazji, że w środowisku fizyków panuje dość powszechne przekonanie, że Wheeler jest jedną z czołowych postaci, które jakoś wyjątkowo długo omija Nagroda Nobla, na którą zasługuje.

Dodajmy, że już za życia Seaborga utworzono w Livermore w 1991 r. instytut nazwany jego imieniem: The Glenn T. Seaborg Institute for Transactinium Science (pierwszym jego dyrektorem była jedna z autorów tego artykułu (D.C.H.)).

Wydarzeniem jednak absolutnie bezprecedensowym było zaproponowanie przez jednego z autorów tego artykułu (A.G.), jako głównego współodkrywcę pierwiastka 106, nazwy seaborg (seaborgium) dla uczczenia Glenna Seaborga już za jego życia. Pierwiastek 106 wytworzony został w 1974 r. i Seaborg należał do współautorów tego wydarzenia (pełną ich listę stanowi spis autorów pracy [22], donoszącej o tym odkryciu). Propozycję przedstawiono po wielu konsultacjach ze współodkrywcami pierwiastka 106 oraz wielu osobami ze środowiska fizyków i chemików. W środowiskach tych nie było wątpliwości, że Seaborg na takie uznanie zasługuje, niepewność była tylko, czy powinno się to zrobić za jego życia. Propozycja, przedstawiona w 1994 r., została zaaprobowana przez Amerykańskie Towarzystwo Chemiczne, ale odrzucona przez Międzynarodową Unię Chemii Czystej i Stosowanej (IUPAC). Przyjęcie tej propozycji przez IUPAC nastąpiło dopiero 3 lata później, w sierpniu 1997 r., i nazwa została nadana. Seaborg nie ukrywał, że dało mu to bardzo wiele satysfakcji, dużo więcej niż Nagroda Nobla (rys. 13).

## 10. Zakończenie

Już ten krótki szkic zorientował Czytelnika, jak duże i wielostronne są dokonania Seaborga. Ta jego wielostronność wiąże się z jego bar-



dzo kompleksowym, całościowym traktowaniem spraw. Uprawiał naukę, ale i przekazywał zdobytą wiedzę innym, a również interesował się zastosowaniem tej wiedzy i dbał, by szło ono we właściwym, pożądanym kierunku, szczególnie gdy chodziło o tak ważne sprawy jak energia jądrowa. W tych kwestiach musiał docierać do centrów decyzyjnych, do władzy. I robił to, poświęcając tym sprawom wiele lat życia. Był przy tym jednym z bardzo nielicznych, którzy potrafili po latach przebywania wśród władzy wrócić zarówno do nauki, jak i nauczania, gdy uznał, że jego misja „polityczna” jest już spełniona.



Rys. 13. Seaborg w swoim gabinecie w LBL w Berkeley wskazujący na pierwiastek 106 w układzie okresowym, nazwany jego imieniem (1994 r.).

Można postawić sobie pytanie, jakie cechy osobiste, a także i okoliczności, pozwoliły mu na to wszystko. Okoliczności są chyba oczywiste. Były to wyzwania wieku atomowego, które zmuszały do najwyższego wysiłku i którym wielu ludzi, nie tylko Seaborg, musiało stawić czoła. Seaborg jednak swoje zaangażowanie rozciągnął na długie lata poza Manhattan Project, odpowiadając na wciąż zmieniające się, ale wciąż jednakowo ważne wyzwania, mówiąc chyba bez przesady, dla losów całego świata.

A cechy osobiste? Wydaje się, że oprócz koniecznych uzdolnień dużą rolę odegrała tu jego wielka pracowitość, umiejętność koncentracji na

poszczególnych sprawach, systematyczność, konsekwencja i wytrwałość. Niemalą rolę odegrała tu także jego umiejętność współpracy z innymi, działania w zespołach, dobierania sobie właściwych współpracowników i szybkiego zamieniania tych niewłaściwych na innych. We współdziałaniu był otwarty na dyskusje, konstruktywny, a jednocześnie bardzo wymagający. Oddziaływał na innych swoim własnym przykładem. Zajmował ważne stanowiska, co zwiększało naturalnie możliwości działania.



Rys. 14. Dyskusja o pierwiastkach superciężkich podczas sympozjum zorganizowanego w Instytucie Ciężkich Jonów w Darmstadtzie (RFN) w listopadzie 1996 r. z okazji przejścia na emeryturę prof. Petera Armbrustera (jednej z głównych osób związanych z syntezą najcięższych pierwiastków). Od lewej: A. Sobiczewski, G.T. Seaborg i A. Ghiorso (12.11.1996).

Działanie jego było z reguły bardzo skuteczne. W dużej mierze może dlatego, że potrafił bardzo uważnie obserwować wydarzenia i podejmować działanie w odpowiedniej chwili, gdy było ono bardzo potrzebne, a jednocześnie możliwe. Na



Rys. 15. Współautorzy ostatniej książki Seaborga [6]. Od lewej: A. Ghiorso, D.C. Hoffman i G.T. Seaborg (1998 r.).

ogół nie działał „na zapas”, nie tracił czasu na takie działanie.

Do wszystkiego, co robił, był zawsze bardzo dobrze przygotowany. Widać to było we wszystkich jego artykułach, wykładach i wystąpieniach. Zwraca uwagę dokładność różnych szczegółów, które podawał. Niewątpliwą rolę odegrał tu fakt, że przez prawie całe życie prowadził dziennik, szczegółowo zapisując ważniejsze wydarzenia dnia, zarówno zawodowe, jak i prywatne. Także po latach, gdy opisywał różne zdarzenia, sprawy i ludzi w swoich licznych książkach, intensywnie korzystał z tych zapisków.



Rys. 16. G.T. Seaborg i D.C. Hoffman w dniu 24 sierpnia 1998 r. podczas Zjazdu Amerykańskiego Towarzystwa Chemicznego w Bostonie, na niewiele godzin przed nastąpieniem wylewu.

Za wszystko to można było Glenna Seaborga podziwiać, ale, co ważniejsze, można się było od niego bardzo wiele nauczyć.

### Literatura

[1] A. Ghiorso, *Phys. Today* **52**, nr 8, 77 (1999).

- [2] E. Rurarz, *Postępy Techniki Jądrowej* **42**, nr 3, 63 (1999).
- [3] A. Ghiorso i in., *Phys. Rev. C* **51**, R2293 (1995).
- [4] G.T. Seaborg, *Transuranowce – pierwiastki wytworzone przez człowieka* (PWN, Warszawa 1967).
- [5] G.T. Seaborg, W.D. Loveland, *The elements beyond uranium* (J. Wiley, New York 1990).
- [6] D.C. Hoffman, A. Ghiorso, G.T. Seaborg, *The transuranium people: The inside story* (Imperial College Press, London 1999).
- [7] A. Hrynkiewicz, A. Sobiczewski, *Postępy Fizyki* **45**, 111 (1999).
- [8] V. Ninov, K.E. Gregorich, W. Loveland, A. Ghiorso, D.C. Hoffman, D.M. Lee, H. Nitsche, W.J. Świątecki, U.W. Kirbach, C.A. Laue, J.L. Adams, J.B. Patin, D.A. Shangnessy, D.A. Strellis, P.A. Wilk, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1104 (1999).
- [9] A. Sobiczewski, *Postępy Fizyki* **50**, 264 (1999).
- [10] D.C. Hoffman, D.M. Lee, *J. Chem. Education* **76**, 331 (1999).
- [11] G.T. Seaborg, *The plutonium story: the journals of Professor G.T. Seaborg 1939–46*, red. R.L. Kathren, J.B. Gough, G.T. Benefiel (Battelle Press, Columbus 1994).
- [12] G.T. Seaborg, B.S. Loeb, *Kennedy, Khrushchev, and the test ban* (University of California Press, Berkeley 1981).
- [13] G.T. Seaborg, B.S. Loeb, *Stemming the tide: Arms control in the Johnson years* (D.C. Heath and Co., Lexington 1987).
- [14] G.T. Seaborg, B.S. Loeb, *The Atomic Energy Commission under Nixon: Adjusting to troubled times* (St. Martin's Press, New York 1993).
- [15] G.T. Seaborg, *Travels in the new world* (Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley 1977).
- [16] G.T. Seaborg, *A chemist in the White House: From the Manhattan Project to the end of the cold war* (American Chemical Society, Washington, DC 1998).
- [17] G.T. Seaborg, R. Colvig, *Chancellor at Berkeley* (Institute of Governmental Studies Press, University of California, Berkeley 1994).
- [18] *Maria Skłodowska-Curie Centenary Lectures* (Warsaw, Oct. 17–20, 1967) (IAEA, Vienna 1968).
- [19] G.T. Seaborg, *Nuclear milestones: A collection of speeches recognizing historic discoveries and landmarks of nuclear science* (W.H. Freeman and Co., San Francisco 1972).
- [20] G.T. Seaborg, *Chem. Eng. News* **29**, 2190 (1945).
- [21] A. Ghiorso, R.A. James, L.O. Morgan, G.T. Seaborg, *Phys. Rev.* **78**, 472 (1950).
- [22] A. Ghiorso, J.M. Nitschke, J.R. Alonso, C.T. Alonso, M. Nurmia, G.T. Seaborg, E.K. Hulet, R.W. Lougheed, *Phys. Rev. Lett.* **33**, 1490 (1974).

## ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

### XXIV Szkoła Fizyki Ferroelektryków

Instytut Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego organizuje od wielu lat szkoły na temat przemian fazowych i własności kryształów ferroicznych, tj. ferroelektryków i ferroelastyków. Szkoły odbywają się niemal corocznie. Początkowo brali w nich udział jedynie polscy uczestnicy (fizycy i chemicy), pracujący w tej dziedzinie, którzy przedstawiali prace wykonywane w ich laboratoriach. Z czasem w szkołach zaczęli uczestniczyć specjaliści zagraniczni jako zaproszeni wykładowcy i w związku z tym językiem oficjalnym stał się język angielski. Szkoły są doskonałym forum, na którym przedstawiane są najnowsze idee teoretyczne, metody badawcze i wyniki doświadczalne dotyczące przemian fazowych, własności ferroelektryków i ferroelastyków oraz własności struktury domenowej tych materiałów. Szkoły cieszą się dużym powodzeniem zarówno wśród doświadczonych naukowców, którzy przedstawiają tu swoje wyniki w postaci referatów, jak i wśród młodych naukowców, którzy mają niepowtarzalną okazję wysłuchania interesujących wykładów i zaprezentowania swoich wyników w postaci plakatów czy komunikatów. Możliwość bezpośrednich spotkań ze znanymi w tej dziedzinie specjalistami niejednokrotnie daje nowe bodźce i ukierunkowanie ich dalszej pracy naukowej. Wymiana doświadczeń i dyskusje naukowe podczas trwania tych szkół sprzyjają nawiązaniu kontaktów naukowych, które niejednokrotnie owocują nawiązaniem współpracy między naukowcami polskimi, a także z naukowcami zagranicznymi.

XXIV Szkoła Fizyki Ferroelektryków została zorganizowana przez Zakład Fizyki Dielektryków Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego przy współudziale Zakładu Krystalografii Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu i odbyła się w dniach 9–13 września 1999 r. w Jarnołtówku koło Głuchołaz. Obrady odbywały się w malowniczo położonym hotelu „Ziemowit”.

Wykład inauguracyjny pt. „Antyferromagnetyczne przejścia fazowe typu przesunięcia oraz porządek-nieporządek w monokryształach  $PbZrO_3$  i  $PbHfO_3$ ” wygłosił prof. Krystian Roleder z Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Była to znakomita prezentacja dyskusyjnych problemów dotyczących tych kryształów, a w szczególności wykazanie obecności zarówno cech charakterystycznych dla przemian typu przesunięcia, jak i przemian typu porządek-nieporządek. W czasie szkoły wygłoszono 23 referaty i komunikaty oraz zaprezentowano 36 plakatów na dwóch sesjach. Przedstawiane na wykładach i plakatach wyniki dotyczyły badań doświadczalnych i teoretycznych. Wykłady teoretyczne były tak dobrane, aby doświadczalnicy mogli wykorzystać przedstawione w nich modele do interpretacji swoich wyników. W czasie szkoły przedstawiono

różnorodne tematyki badawcze prowadzone w różnych krajach. Własności nowych grup materiałów wykazujących przemiany fazowe i własności ferroelektryczne omówili badacze z Poznania, Wrocławia i Tokio. Szczególnie interesujące są kryształy zawierające kationy pirydynowe oraz kryształy z wiązaniami wodorowymi typu  $N-H \cdots N$ . Badania faz niewspółmiernych przedstawione były przez naukowców z Ukrainy (Lwów) i Rosji (Moskwa). Własności fotorefrakcyjne kryształów i ich niektóre zastosowania przedstawili naukowcy z Francji (Metz), zaś wykorzystanie zjawiska deflekcji do badania przemian fazowych i wyznaczania dwójłomności kryształów ferroelastycznych – naukowcy z Polski (Wrocław) i Francji (Metz).

W szkole uczestniczyło 47 osób z Polski i 16 z zagranicy. Jak zwykle uczestnicy wyrażali bardzo pozytywne opinie o organizacji szkoły oraz znakomitej i przyjacielskiej atmosferze panującej od rozpoczęcia aż do zakończenia szkoły. Szkoła była finansowana przez Uniwersytet Wrocławski, Fundację dla Uniwersytetu Wrocławskiego, Komitet Badań Naukowych i Komitet Krystalografii.

*Zbigniew Czapl*

Instytut Fizyki Doświadczalnej UW  
Wrocław

### I Cracow–Clausthal Workshop

Idea organizowania w Krakowie dorocznych konferencji poświęconych podstawowym problemom fizyki kwantowej zrodziła się w wyniku wieloletnich owocnych kontaktów naukowych pomiędzy fizykami polskimi i niemieckimi, zgrupowanymi wokół tematyki naukowej prof. Heinza-Dietricha Doebnera, założyciela i wieloletniego dyrektora Instytutu Fizyki Matematycznej im. Arnolda Sommerfelda na Politechnice w Clausthal-Zellerfeld (Dolna Saksonia). Dotychczasowe spotkania dyskusyjne większych grup polskich i niemieckich naukowców odbywały się głównie w Niemczech, natomiast w Polsce organizowane były jedynie duże, wielotematyczne konferencje międzynarodowe, na których przedstawiano wyniki zakończonych etapów prac naukowych. Aktualny i fundamentalny charakter badań naukowych koordynowanych przez prof. Doebnera ujawnił konieczność zainicjowania serii roboczych spotkań, których celem byłoby zarówno możliwość prowadzenia szerokich i pogłębionych dyskusji nad nie rozwiązanymi problemami, jak i zaangażowanie w prace badawcze doktorantów i studentów uczelni polskich.

Spotkanie to – I Cracow–Clausthal Workshop on Tunnelling Effect and Other Fundamental Problems of Quantum Physics – które odbyło się w dniach 22–28 listopada 1999 r., było pierwszym z tego cyklu spotkań



roboczych; poświęcone było podstawowemu, a przy tym ciągle dalekiemu od rozwiązania problemowi fizyki kwantowej, jakim jest zjawisko tunelowania. Efekt ten znany jest bez mała od zarania mechaniki kwantowej i stanowi podstawę wyjaśnienia licznych zjawisk fizycznych z rozpadem jąder atomowych na czele. Przeprowadzone w ostatnich latach doświadczenia wskazują jednak, że znaczną dozą pewności, że proces tunelowania, a ogólniej propagacja fali podprogowej lub zanikającej (tzw. evanescent wave) scharakteryzowanej urojonym wektorem falowym, odbywa się z prędkością przewyższającą prędkość światła w danym ośrodku. Rezultat ten wymaga nowego spojrzenia tak na podstawy szczególnej teorii względności, jak i mechaniki kwantowej. Wielu fizyków nie wyklucza możliwości, że poprawne wyjaśnienie tego rodzaju zjawisk doprowadzi do nowej unifikacji tych teorii. Istnieją zatem poważne przesłanki do przypuszczeń, że na początku XXI w. zapoczątkowany zostanie nowy rozdział fizyki współczesnej, podobnie jak to się stało wskutek odkrycia mechaniki kwantowej i teorii względności na początku XX w.

Bezpośrednim celem konferencji było przedstawienie wyników doświadczeń dotyczących procesów, w których istotną rolę odgrywają fale podprogowe, oraz przedstawienie modeli teoretycznych zjawisk tego rodzaju, w szczególności modeli uogólniających teorię względności w sensie dopuszczenia w jej spójnym sformułowaniu prędkości ponadświetlnych. Do prac konferencji zaproszono 30 uczestników, w tym 13 przybyłych z zagranicy, i przedstawiono podczas niej 25 referatów, każdorazowo zakończonych obszerną dyskusją. Audytorium gromadziło ponad 50 słuchaczy – naukowców z krakowskich placówek badawczych oraz studentów. Na zakończenie konferencji jej uczestnicy przeprowadzili kilkogodzinny panelowy, stanowiący zarówno podsumowanie konferencji, jak też propozycję nowych zadań badawczych. Powstałe na podstawie referatów i uwzględniające dyskusję prace będą opublikowane jako osobny tom *Annalen der Physik* w roku 2000.

Konferencja zorganizowana została przez Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie przy współudziale Akademii Pedagogicznej w Krakowie oraz Politechniki w Clausthal-Zellerfeld (Niemcy), a jej koszty pokryte z dotacji Komitetu Badań Naukowych. Przy pozostających w dyspozycji środkach, sfinansowanie całości przedsięwzięcia było możliwe dzięki udostępnieniu przez Instytut Fizyki Jądrowej oraz Akademię Pedagogiczną własnej bazy noclegowej po znacznie obniżonych kosztach.

W celu koordynacji działań zmierzających do kontynuowania cyklu konferencji uczestnicy powołali stały komitet programowy w składzie: H.-D. Doebner (Clausthal), G.C. Hegerfeldt (Getynga), G. Rudolph (Lipsk),

G. Nimtz (Kolonja) ze strony niemieckiej oraz E. Kapuściak (Kraków), B. Mielnik (Warszawa), J. Rembieniński (Łódź) i A. Staruszkiewicz (Kraków), reprezentujący stronę polską. Zaproponowano poświęcenie następnej konferencji zagadnieniu czasu tunelowania, a w dalszej kolejności zasugerowano jako tematy przewodnie tzw. problem fazy w mechanice kwantowej oraz rolę i znaczenie niekanonicznych schematów kwantowania w opisie układów kwantowych, które nie mają analogii klasycznej.

*Edward Kapuściak, Andrzej Horzela*  
Instytut Fizyki Jądrowej  
Kraków

### 36. Zimowa Szkoła Fizyki Teoretycznej

W dniach od 11 do 19 lutego 2000 r. odbyła się w Łądku Zdroju 36. Zimowa „Karpacka” Szkoła Fizyki Teoretycznej zorganizowana przez Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Wrocławskiego (G. Kondrat, Z. Koza, K. Sznajd-Weron i A. Pękalski – dyrektor Szkoły). Tematem była „Egzotyczna fizyka statystyczna”, czyli zastosowania fizyki statystycznej w ekonomii, finansach, biologii, socjologii i organizacji ruchu drogowego. Dłuższe serie wykładów mieli H.E. Stanley (Boston, USA), J.-P. Bouchaud (Paryż, Francja), M. Ausloos (Liège, Belgia), M. Kurzyński (Poznań), S. Moss de Oliveira (Rio de Janeiro, Brazylia), S. Galam (Paryż) oraz A. Schadschneider i D. Stauffer (Kolonja, RFN). Oprócz serii wykładów wprowadzających do egzotycznej fizyki statystycznej odbywały się też krótsze seminaria dotyczące bardziej szczegółowych problemów.

Słuchaczami Szkoły byli młodzi (w większości) fizycy z wielu polskich ośrodków naukowych i z zagranicy (RFN, Włochy, Hiszpania, Słowacja, Czechy, Rosja, Izrael, Finlandia, Belgia) – łącznie ponad 60 osób. Większość słuchaczy nie miała specjalnego przygotowania w dziedzinach stanowiących tematykę Szkoły, jednak dzięki przyjętemu systemowi dłuższych wykładów wprowadzających, uzyskali oni dobrą orientację w egzotycznych (na razie!) zastosowaniach fizyki statystycznej.

Materiały Szkoły zostaną opublikowane jako osobny zeszyt czasopisma *Physica A*. Szkołę sponsorowały: Uniwersytet Wrocławski, Komitet Badań Naukowych, Bank Zachodni S.A. we Wrocławiu, Fundacja im. W.E. Heraeusów (RFN), Komitet Fizyki PAN oraz Kasa im. J. Miąnowskiego.

*Andrzej Pękalski*  
Instytut Fizyki Teoretycznej UW  
Wrocław



## Współczesna opowieść wigilijna

Robert Gilmore: *Współczesna opowieść wigilijna – Energia, czas i natura kwantów*, z jęz. angielskiego przełożyła Ewa Maydell, Wydawnictwo Prószyński i S-ka, Warszawa 2000, s. 217.

Kiedyś dawno temu, jeszcze jako uczeń szkoły średniej, czytałem książkę Gamowa *Mister Tompkins w krainie czarów*. Książka sprawiła na mnie duże wrażenie, dobrze to pamiętam. Czytając teraz książkę Gilmore'a *Współczesna opowieść wigilijna* miałem nieodparte wrażenie *déjà vu*. Gilmore stara się popularyzować współczesną fizykę, stosując ten sam chwyt co Gamow – zmienia skalę zjawisk, aby stały się one bardziej namacalne. Jako swojego bohatera Gamow stworzył postać Mister Tompkinsa. Gilmore postanowił wykorzystać *Opowieść wigilijną* Dickensa. Występuje więc Scrooge oraz duchy. W obu książkach główny bohater, Mister Tompkins u Gamowa czy Scrooge u Gilmore'a, poruszają się w dziwnych światach ze zmienionymi wartościami stałych fizycznych, a profesor u Gamowa czy duchy u Gilmore'a tłumaczą im odpowiednie zjawiska.

Pod względem literackim *Współczesna opowieść wigilijna* jest znacznie słabsza od oryginalnej *Opowieści wigilijnej*. No cóż, nie wystarczy być dobrym fizykiem, by mieć talent literacki Dickensa. Ale również prawa fizyczne omawiane przez Gilmore'a mają zupełnie inny wymiar niż głęboko ludzkie problemy poruszane przez Dickensa. Metoda ekspresji literackiej, tak udana w przypadku oryginału *Opowieści wigilijnej*, nie musi przecież sprawdzać się w popularyzacji fizyki.

Książka podzielona jest na trzy „wizyty”. Pierwsza dotyczy energii i entropii. O energii pisać najłatwiej – jest ona dość powszechna w życiu codziennym i wobec tego łatwa do przedstawienia popularnego. Nieco gorzej jest z entropią i kierunkiem zachodzenia procesów fizycznych. Można tu mieć wątpliwości, czy Autor zachował jasność wywodów, w sumie jednak tę część można uznać za udaną.

Wizyta druga dotyczy przebiegów czasowych, jak również podstaw szczególnej teorii względności. Teoria

względności omawiana jest w wielu popularnych tekstach, Gilmore nie wnosi nowych pomysłów popularyzatorskich. Sądzę, że jest to wdzięczny temat, dotyczy powszechnych pojęć, choć tak naprawdę bardzo trudny. Na pewną uwagę zasługuje omówienie elementów dynamiki nieliniowej i chaosu deterministycznego. Też jest to wdzięczny temat, choć równie trudny. Tę „wizytę” przeczytałem z zainteresowaniem.

Najmniej udana jest część trzecia, dotycząca fizyki kwantowej. Trudno się zresztą temu dziwić. Fizyka kwantów jest bardzo nieintuicyjna. Czy można przedstawić ją w popularny sposób i to jeszcze tak, by sprawić wrażenie, że jednak wszystko jest naturalne? Jeszcze nikomu się to nie udało. Czy czytelnicy zrozumieją zasady fizyki kwantowej na podstawie przygód Scrooge'a? Wątpię. Sądzę raczej, że będą oni po prostu znudzeni tymi przygodami. Nie mają one odniesienia do realiów ludzkiego życia i sprawiają wrażenie udziwniania świata.

Zawodowi fizycy zbyt mało uwagi poświęcają edukacji i popularyzacji nauki, a współczesna fizyka bardzo daleko odeszła od codziennego życia. W rezultacie większość społeczeństw odwróciła się od fizyki, uważając ją za niezrozumiałą, a zatem zbędną. Sądzę więc, że każda próba popularyzacji fizyki zasługuje na poparcie. Być może jestem zbyt krytyczny, a Robert Gilmore ze swoimi pomysłami odniesienia do wielkiej literatury trafi do pewnej grupy osób i zainteresuje ich współczesną fizyką? Serdecznie tego życzę.

Książka została wydana przez Wydawnictwo Prószyński i S-ka bardzo starannie, na ładnym papierze, w twardej okładce. Tłumaczenie Ewy Maydell jest poprawne, tekst czyta się gładko. Czekamy na zapowiedzianą kolejną książkę Gilmore'a *Alicja w krainie kwantów*, też w oczywisty sposób nawiązującą do wielkiej literatury angielskiej.

Jan Mostowski  
Instytut Fizyki PAN  
oraz Szkoła Nauk Ścisłych  
Warszawa

## PTF

**Andrzej K. Wróblewski**  
**laureatem Medalu Smoluchowskiego**

Polskie Towarzystwo Fizyczne nadało w 1999 r. Medal im. Mariana Smoluchowskiego profesorowi Andrzejowi Kajetanowi Wróblewskiemu. Stanowi to wyraz uznania dla jego osiągnięć naukowych oraz jego działań dla dobra nauki polskiej, a fizyki w szczególności.

Urodzony 7 sierpnia 1933 r. w Warszawie, studiował fizykę na Uniwersytecie Warszawskim (1951–55), tamże rozpoczął pracę (1954), doktoryzował się (1961) i habilitował (1964). Profesorem nadzwyczajnym został w 1971 r., zwyczajnym – w 1979 r. Prowadzi badania w zakresie fizyki cząstek elementarnych oraz historii i metodologii fizyki.

Do najważniejszych jego osiągnięć należy m.in. znalezienie opisu liczby cząstek produkowanych w zderzeniach wielkich energii, zwanego w literaturze światowej „zależnością Wróblewskiego”. Wprowadził do fizyki wielkość powszechnie używaną do opisu produkcji cząstek w zderzeniach wysokoenergetycznych, znaną obecnie pod nazwą „thrust” (pchnięcie). Jest autorem bądź współautorem ponad 150 publikacji naukowych oraz 6 książek (w tym podręcznika akademickiego *Wstęp do fizyki* wraz z J.A. Zakrzewskim). Odbył staż naukowy w Europejskim Laboratorium Fizyki Cząstek CERN w Genewie (1961–63), wykładał na wielu uniwersytetach europejskich i amerykańskich oraz przebywał jako profesor gość na Uniwersytecie stanu Washington w Seattle (USA), Uniwersytecie w Antwerpii (Belgia) i Uniwersytecie w Dortmundzie (Niemcy). Jako uznany autorytet naukowy w kraju i za granicą, wielokrotnie wygłaszał referaty na zaproszenie na prestiżowych konferencjach „rochesterskich”, a w roku 1996 zorganizował i przewodniczył takiej konferencji w Warszawie. W uznaniu jego zasług nadały mu doktoraty honorowe uniwersytety w Siegen (1980), Chapman (1990) i Glasgow (1992). Członkiem korespondentem Polskiej Akademii Nauk został wybrany w 1976 r., a rzeczywistym – w 1991 r. Jest członkiem Polskiej Akademii Umiejętności, Towarzystwa Naukowego Warszawskiego, Polskiego Towarzystwa Fizycznego i Polskiego Towarzystwa Astronomicznego. Jest też laureatem Nagrody im. Marii Skłodowskiej-Curie.

Pełnił wiele ważnych funkcji administracyjnych: wicedyrektor (1965–75) i dyrektor (1975–81) Instytutu Fizyki Doświadczalnej UW, dziekan Wydziału Fizyki UW, rektor Uniwersytetu Warszawskiego (1989–93). Wykazuje dużą aktywność w zakresie problematyki związanej z organizacją życia naukowego w Polsce i za granicą: był przewodniczącym Rady Nauki przy urzędzie

Prezydenta Lecha Wałęsy (1992–95), był przez dwie kadencje członkiem Komitetu Badań Naukowych (od 1994 r.), jego wiceprzewodniczącym (1997–2000), wchodził w skład Extended Scientific Council w Ośrodku Niemieckiego Synchrotronu Elektronowego DESY w Hamburgu (1992–99) oraz Scientific Policy Committee w Europejskim Laboratorium Fizyki Cząstek CERN (1994–99). W latach 1975–81 był przedstawicielem Polski w Komisji Cząstek i Pól Międzynarodowej Unii Fizyki Czystej i Stosowanej (IUPAP). Jest przewodniczącym Rady Redakcyjnej *Postępów Fizyki*. Przewodniczy Radzie Naukowej Instytutu Historii Nauki PAN i Radzie Naukowej Centrum Badań Kosmicznych PAN.

Ryszard Sosnowski

## Nominacje profesorskie

Tytuł naukowy profesora nauk fizycznych nadany przez Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej otrzymał w dniu 26 kwietnia 2000 r. Andrzej Udalski (UW).

Rzeczpospolita, 26 kwietnia 2000

## KBN

Na nową trzyletnią kadencję do Zespołu Nauk Matematycznych, Fizycznych i Astronomicznych (P-03) Komisji Badań Podstawowych KBN zostali wybrani: Kazimierz Stępień (astronomia, UW) – przewodniczący, Andrzej Białyński-Birula (matematyka, UW), Daniel Simson (matematyka, UMK), Łukasz A. Turski (fizyka, CFT PAN), Kacper Zalewski (fizyka, UJ).

[www.kbn.gov.pl](http://www.kbn.gov.pl)

## Nowi członkowie zagraniczni PAN

Polska Akademia Nauk dokonała wyboru nowych członków zagranicznych. Spośród fizyków zostali wybrani: Savo Bratos (Francja), Joseph H. Eberly (USA) i Jasp J.M. Franse (Holandia).

Savo Bratos (ur. 1926 r. w Trieście) jest profesorem Université Pierre et Marie Curie w Paryżu. Zajmuje się zastosowaniami mechaniki kwantowej do problemów chemicznych, fizyką cieczy, laserową spektroskopią femtosekundową bardzo szybkich procesów chemicznych w cieczach. Stworzył podstawy teoretyczne zjawisk zachodzących przy ultraszybkim oddziaływaniu promieniowania lasera w obszarze podczerwieni. Od kilkunastu lat utrzymuje żywe kontakty naukowe z ośrodkami polskimi (Wrocław, Kraków, Warszawa, Łódź, Poznań), w jego laboratorium odbywało się staże naukowe wielu polskich fizyków. Jest członkiem Słoweńskiej Akademii Nauk i Sztuk, Europejskiej Akademii Nauki, Sztuki i Literatury oraz Polskiej Akademii Umiejętności.

Joseph Eberly (ur. 1935 r.) jest profesorem Uniwersytetu w Rochester. Dziedziną jego działalności naukowej jest fizyka promieniowania elektromagnetycznego, optyka kwantowa i fizyka atomowa. Do jego najważniejszych osiągnięć można zaliczyć teoretyczne przewidzenie istnienia zjawiska spontanicznego zaniku i odżywiania, które obserwuje się podczas ewolucji atomu umieszczonego we wnętrzu rezonansowej. W ciągu ostatnich 3 lat jego prace były cytowane ok. 1000 razy. Jest założycielem i redaktorem pierwszego w pełni elektronicznego czasopisma *Optics Express*. Jest także autorem kilku książek, a jego monografia poświęcona rezonansowi optycznemu została przetłumaczona na język polski i uzupełniona przez Kazimierza Rządewskiego. Będąc uznanym autorytetem naukowym bierze udział w pracach wielu komisji zajmujących się organizacją badań, zarówno w USA jak i za granicą (m.in. był ekspertem Towarzystwa Maxa Plancka ds. przekształcenia instytutów optyki we wschodnich landach). Od trzydziestu kilku lat współpracuje z fizykami polskimi, z kilkunastoma opublikował 54 prace. W 1985 r. Polskie Towarzystwo Fizyczne nadało mu Medal Mariana Smoluchowskiego.

Jasp Franse (ur. 1937 r.) jest profesorem i rektorem Uniwersytetu Amsterdamskiego, autorem ponad 500 publikacji z różnych dziedzin fizyki ciała stałego. Do jego największych osiągnięć należy odkrycie zjawiska tłumienia fluktuacji spinowych  $UAl_2$  w silnych polach magnetycznych, odkrycie niekonwencjonalnego nadprzewodnictwa w ciężkofermionowym związku  $UPt_3$ , zbadanie efektów pola krystalicznego w międzymetalicznych związkach ziem rzadkich oraz w nadprzewodnikach wysokotemperaturowych zawierających jony ziem rzadkich. Kieruje dużymi programami europejskimi badań magnetyków oraz projektem budowy w Europie stanowiska do wytwarzania kwazistacjonarnych pól magnetycznych o natężeniu do 100 T (w programach tych uczestniczą także uczeni polscy). Współpracuje z fizykami polskimi (Kraków, Wrocław, Warszawa, Poznań), czego wynikiem są 92 wspólne publikacje. Jest honorowym profesorem Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN.

B. W.

## EPS

Europejskie Towarzystwo Fizyczne (EPS) przyznało w 1999 r. Nagrodę Hewletta Packarda Christianowi Glattliemu (Saclay, Francja) i Michaelowi Reznikowi (Technion, Izrael) za „rozwiniecie nowych metod pomiarów szumu w ciele stałym, co doprowadziło do zaobserwowania nośników z ułamkowym ładunkiem”; Nagrodę Fizyki Wysokich Energii otrzymał Gerardus 't Hooft (Uniwersytet w Utrechcie, Holandia) za „pionierski wkład do renormalizacji nieabelowych teorii z cechowaniem”. Jak wiadomo, 't Hooft otrzymał również w 1999 r. Nagrodę Nobla.

Z inicjatywy Komitetu Wykonawczego EPS powstał plan popularyzowania fizyki w szkołach. Mają powstać plakaty (a może nawet książka), przedstawia-

jące życie i prace słynnych europejskich fizyków żyjących w przeszłości. Plakaty będą udostępniane szkołom bezpłatnie. Krótkie biografie mają zawierać ciekawe fakty z życia uczonych i ich osiągnięcia naukowe. Odpowiedzialna za zebranie i redagowanie materiałów jest dr Swietłana Erlykin, rosyjska fizyczka, specjalistka w dziedzinie promieniowania kosmicznego. Wszystkie towarzystwa fizyczne w Europie były proszone o dostarczenie listy nazwisk fizyków, którzy pracowali w ich krajach, a w niektórych przypadkach nawet o gotowe biografie. Lista dotychczas zebranych danych jest dostępna pod: eneditor@univ-mulhouse.fr. Prezes EPS apeluje o jej sprawdzenie i ewentualne uzupełnianie.

*Europhys. News*, listopad/grudzień 1999

B. W.

## Nagroda Wolfa

Prestigious Nagrodę Wolfa otrzymali w tym roku Raymond Davis (USA) i Masatoshi Koshiha (Japonia) za to, że „ich obserwacje nieuchwytnych neutrin pochodzenia astrofizycznego otworzyły nowe możliwości badania obiektów astronomicznych, jak Słońce i wybuchające gwiazdy, a także badania podstawowych właściwości materii”.

Davis jest pionierem pomiarów neutrin słonecznych metodą radiochemiczną, Koshiha zaś pełnił funkcję głównego projektanta i konstruktora detektorów neutrin Kamiokande.

Nagroda wynosi 100 tys. USD i jest wręczana w Knessecie.

*CERN Courier* 40, nr 2 (2000)

B. W.

## Medal Holwecka

Medal Holwecka za rok 1999 otrzymał Oriol Bohigas (Inst. Fizyki Jądrowej, Orsay, Francja) za „pionierskie prace w dziedzinie chaosu kwantowego”.

Medal ten, ustanowiony dla upamiętnienia francuskiego fizyka Fernanda Holwecka zamordowanego w czasie wojny przez Niemców, jest przyznawany w latach nieparzystych przez brytyjski Instytut Fizyki fizykowi francuskiemu, a w latach parzystych przez Francuskie Towarzystwo Fizyczne fizykowi brytyjskiemu.

*Phys. Today* 53, nr 1 (2000)

B. W.

## Niemieckie medale

Niemieckie Towarzystwo Fizyczne nadało w 2000 r. swoje najwyższe odznaczenie za osiągnięcia w fizyce teoretycznej – Medal Maxa Plancka – Martinowi Lüscherowi (ur. w 1949 r.), profesorowi Uniwersytetu Hamburgskiego i ośrodka DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) za „ważny wkład do teorii cząstek elementarnych, szczególnie za analityczne i algorytmiczne rozwinięcie teorii z cechowaniem”.

Medal Sterna-Gerlacha, najwyższe odznaczenie Niemieckiego Towarzystwa Fizycznego za osiągnięcia w fizyce doświadczalnej, otrzymał w 2000 r. Theodor Hänsch



(ur. w 1941 r.), profesor Uniwersytetu Ludwiga Maximiliana w Monachium i Instytutu Maxa Plancka Optyki Kwantowej w Garching za „wybitne prace w dziedzinie spektroskopii laserowej i manipulowania swobodnymi atomami za pomocą laserów, pionierskie badania w dziedzinie precyzyjnej spektroskopii wodoru, chłodzenia laserowego i wkład do uzyskania kondensacji Bosego–Einsteina”.

*Phys. Bl.* 56, nr 3 (2000)

B. W.

### Nagroda Wydziału III PAN dla Konrada Banaszka

Nagrodę Wydziału III PAN za rok 1999 otrzymał dr Konrad Banaszek z Instytutu Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego. Nagroda została wręczona 6 grudnia 1999 r. Został on nagrodzony za cykl sześciu prac z optyki kwantowej. Prace te dotyczą problemu rekonstrukcji stanu kwantowego. Jak wiadomo, stan kwantowy (macierz gęstości) nawet bardzo prostych układów, np. pojedynczej cząstki, jest opisywany przez nieskończoną liczbę zmiennych. Wyznaczenie stanu kwantowego wymaga więc w zasadzie nieskończenie wielu pomiarów. Standardowe pomiary w fizyce kwantowej są ograniczone do wyznaczenia tylko niewielkiej liczby wielkości fizycznych, np. średniego położenia i dyspersji położenia cząstki. Od kilku lat prowadzone są prace nad pełną charakteryzacją stanu kwantowego, czyli wyznaczeniem pełnej macierzy. Oczywiście takie pomiary nie mogą wyznaczyć dokładnie całej macierzy gęstości, mogą jednak podać istotne jej elementy.

Zaproponowano kilka metod pełnego pomiaru stanu kwantowego; współautorem jednej z nich jest Konrad Banaszek. Wszystkie opierają się na zasadzie tomografii, czyli rekonstrukcji obiektów dwuwymiarowych (w tym przypadku funkcji Wignera charakteryzujących stan kwantowy) na podstawie wielu pomiarów obiektów jednowymiarowych (przekrojów funkcji Wignera).

Prace, za które Konrad Banaszek uzyskał Nagrodę Wydziału III PAN, dotyczą realistycznych pomiarów stanów kwantowych. Laureat jest współautorem doświadczenia, w którym zmierzono macierz gęstości stanu kwantowego pola elektromagnetycznego. Zainteresowało go więc, w jaki sposób błędy pomiarów przenoszą się na błędy wyznaczonej macierzy gęstości. Dotychczas we wszelkich rozważaniach teoretycznych dokonywano swobodnie przejścia pomiędzy różnymi przedstawieniami stanu kwantowego. Banaszek wykazał, że nie jest to na ogół możliwe, gdyż błędy statystyczne przenoszą się w sposób niekontrolowany przy zmianie reprezentacji. Stawia to w nowym świetle kwestię pomiarów stanów kwantowych oraz wnioski wyciągane z tych pomiarów. Nie muszą dodawać, że praca doświadczalna, w której Banaszek opisuje swoje wyniki pomiaru stanu pola elektromagnetycznego zawiera poprawną analizę błędów.

Pomiary stanów kwantowych nie są działalnością czysto akademicką. Tak zwana kryptografia kwantowa, czyli szyfrowanie i przesyłanie informacji z udziałem efek-

tów kwantowych, wykorzystuje szeroko idee i metody opracowane dla pomiarów stanów kwantowych. Niejako ubocznym wynikiem prac Banaszka jest propozycja nowego schematu przekazywania klucza do szyfrów.

Konrad Banaszek jest osobą niezwykle zdolną i pracowitą. Dał się poznać już jako uczeń szkoły średniej, gdy uczestniczył w warsztatach organizowanych przez Krajowy Fundusz na rzecz Dzieci. Jako student Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego korzystał ze stypendium programu Tempus oraz stypendium Europejskiego Towarzystwa Fizycznego. Jego praca doktorska, obroniona w 1999 roku, miała rozbudowaną część doświadczalną, co rzadko zdarza się wśród teoretyków. Jest też członkiem Komitetu Głównego Olimpiady Fizycznej.

Jan Mostowski

### Tablica upamiętniająca Wojciecha Rubinowicza

Staraniem warszawskich fizyków teoretyków na domu przy ul. Hożej 74, w którym od 1946 r. mieszkał wraz z rodziną Wojciech Rubinowicz (1889–1974) – profesor Uniwersytetu Warszawskiego, wybitny teoretyk – została wmurowana tablica.



Tablica na budynku przy Hożej 74 w Warszawie (fot. Janusz Rosiek).

W dniu 21 lutego 2000 r. odbyła się uroczystość odsłonięcia tablicy. Krótkie przemówienie przypominające osiągnięcia naukowe Rubinowicza wygłosił dyrektor Instytutu Fizyki Teoretycznej UW, prof. Stanisław G. Rohoziński, a samego odsłonięcia dokonali: dziekan Wydziału Fizyki UW prof. Katarzyna Chałasińska-Macukow i prorektor Politechniki Warszawskiej prof. Stanisław Bolkowski. Następnie pani Dziekan zaprosiła zebranych na nieformalne spotkanie na Hożej 69. Przy herbacie dawni uczniowie i współpracownicy prof. Rubinowicza wspominali swoje kontakty z nim.

Poniżej zamieszczamy przemówienie prof. Rohozińskiego i wspomnienie prof. Wojciecha Królikowskiego.

\*

Szanowni Państwo,  
Stoimy przed domem, w którym w latach 1946–74 przez ostatnią, warszawską tercję swego życia mieszkał

Profesor Wojciech Rubinowicz. Warszawa nie była jego rodzinnym miastem. Urodził się w Sadagórze na Bukowinie. Studiował na Uniwersytecie w Czerniowcach, gdzie doktoryzował się w 1914 r. Ten rok można umownie przyjąć za początek jego 60-letniej kariery naukowej. Wybuchła I wojna światowa. Czerniowce przechodziły z rąk do rąk i uniwersytet był zamknięty. To zapewne spowodowało, że Wojciech Rubinowicz, gdy tylko wypadki wojenne pozwoliły, wyjechał do Monachium. Rozprawa doktorska Rubinowicza dotyczyła teorii dyfrakcji fal. Nawiasem mówiąc, prof. Rubinowicz zajmował się teorią dyfrakcji przez całe życie i wniósł do niej bardzo istotny wkład. Nic więc dziwnego, że chciał współpracować z Arnoldem Sommerfeldem, profesorem fizyki teoretycznej na uniwersytecie w Monachium i autorem pracy „*Mathematische Theorie der Diffraction*”. Ale Sommerfeld był przecież później także autorem słynnej książki *Atombau und Spektrallinien* i jednym z twórców teorii kwantów. W latach 20. Rubinowicz dwukrotnie odwiedzał Kopenhagę i współpracował z drugim wielkim twórcą teorii kwantów – Nielsem Bohrem. Pewno pod ich wpływem sam zaczął zajmować się teorią kwantów i wniósł do niej bardzo poważny wkład, odkrywając reguły wyboru i polaryzacji dla promieniowania multipolowego emitowanego przy przejściach kwantowych w atomach. Wagę tych właśnie jego pionierskich prac dzisiaj na tej tablicy upamiętniamy. Profesor Rubinowicz zainicjował w Polsce badania z dziedziny teorii kwantów.

W okresie międzywojennym Wojciech Rubinowicz był krótko profesorem fizyki teoretycznej na uniwersytecie w Lublanie, a następnie profesorem Politechniki Lwowskiej. Na początku lat 30. został członkiem Polskiej Akademii Umiejętności. W 1937 r. objął katedrę fizyki teoretycznej na Uniwersytecie Jana Kazimierza we Lwowie. Potem przyszła II wojna światowa. Uniwersytet Jana Kazimierza stał się Uniwersytetem Iwana Franki, a po wkroczeniu Niemców do Lwowa przestał działać. Nastąpił okres tajnego nauczania na Uniwersytecie. Lwowski okres życia Wojciecha Rubinowicza dobiegł końca. W grudniu 1945 r. Profesor z rodziną wyjeżdża do Krakowa, a stamtąd do Warszawy. W marcu 1946 r. wprowadza się do tego właśnie uniwersyteckiego domu, przed którym jesteśmy, i obejmuje na Uniwersytecie Warszawskim Katedrę Mechaniki Teoretycznej, jedną z trzech katedr, z których został utworzony obecny Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego. Profesor był jednym z ojców – sukces ma wielu ojców – powojennej warszawskiej fizyki teoretycznej. Od niego wywodzą się dzisiejsze „kwantowe” kierunki badań, jak teoria cząstek elementarnych czy teoria jądra atomowego w naszym Instytucie, a także w obecnym Instytucie Problemów Jądrowych. Od niego wywodzi się kilka pokoleń optyków, głównie na Politechnice Warszawskiej i w Polskiej Akademii Nauk. Był członkiem Polskiej Akademii Nauk od chwili jej powstania. Jako jeden z największych autorytetów w naszym środowisku przez wiele lat prezesował Polskiemu Towarzystwu Fizycznemu i był jego członkiem honorowym. Jeszcze jedną drobną zasługę ma prof. Ru-

binowicz w naszym środowisku. Przedmiotem jego stałej troski był rozwój biblioteki w naszym Instytucie, która ma się stać obecnie centralną biblioteką fizyczną i która w sposób naturalny przyjęła jego imię.

Profesor Rubinowicz pracował naukowo do ostatnich dni swego życia i, będąc już na emeryturze, dołożył kilka bardzo istotnych wyników do teorii dyfrakcji. Zmarł 13 października 1974 r.

Stanisław G. Rohoziński

★

Z okazji naszej podniosłej i miłej uroczystości przy Hożej 74 starałem się przypomnieć sobie odległe czasy, gdy prof. Rubinowicz przybył ze Lwowa poprzez Kraków do Warszawy w 1946 r. i zamieszkał wraz z rodziną właśnie przy Hożej 74. Było to dla nas niezwykle szczęśliwym wydarzeniem, że związał się wówczas z fizyką warszawską, zmieniając przez to jakościowo jej status naukowy i dydaktyczny. Byłem wtedy studentem II roku fizyki UW i ujrzałem prof. Rubinowicza po raz pierwszy na wykładzie, już nie pamiętam, czy mechaniki klasycznej, czy kwantowej. Pamiętam natomiast wyraźnie moje ówczesne wrażenie, że po raz pierwszy w życiu słucham wykładu fizyki z pierwszej ręki.

Cechą charakterystyczną wykładów Rubinowicza była ich profesjonalność: dostarczały nie tylko wiadomości, ale też umiejętności posługiwania się warszatką badawczą. Profesor Rubinowicz jako nauczyciel fizyki teoretycznej był mistrzem rachunku analitycznego i w sali wykładowej, w ciszy jak makiem zasiał, przeprowadzał kredą na tablicy, bez notatek, kompletne rachunki efektów fizycznych, które dzięki tajemniczej projekcji psychologicznej stawały się jakby wspólnym osiągnięciem całej sali: zarówno wykładowcy jak i słuchaczy. Dziesięć lat później słuchałem w Zurychu wykładów Pauliego, który również przytaczał na tablicy kompletne rachunki. Używał on notatek, a mimo to częściej popełniał techniczne omyłki. Chciałbym dodać, że Rubinowicz, który okres swojej największej aktywności naukowej spędził w niemieckim obszarze językowym, był niezmiernie wrażliwy na temat poprawnej polszczyzny: nigdy nie używał terminów niemieckich, ale czasem nie trafiał na właściwy termin polski. Kiedyś np. dowiedzieliśmy się, że prof. Stark był zasłużonym spektrografem. Jeśli chodzi o stronę ideologiczną, to prof. Rubinowicz podkreślał w swoich wykładach rolę zasady korespondencji jako istoty mechaniki kwantowej. Przy tym podejściu dyskusja tzw. paradoksów mechaniki kwantowej nie jest bardzo ciekawa. Niedawno z zainteresowaniem przeczytałem dość ironiczne uwagi Gell-Manna o paradoksie Einsteina, Podolsky'ego i Rosena oraz o kocie Schrödingera (*The quark and the jaguar. Adventures in the simple and the complex*).

Profesor Rubinowicz, jako badacz i odkrywca, był człowiekiem czasu wielkiego przetoku w fizyce. Kulminacja jego twórczości badawczej przypada na lata między sformułowaniem warunków kwantowych Bohra–Sommerfelda a odkryciem mechaniki kwantowej. W okresie tym zastosował Rubinowicz warunki

Bohra–Sommerfelda po raz pierwszy do układu niemechanicznego, złożonego z modów pola elektromagnetycznego w reprezentacji pędowej oraz reprezentacji momentu pędu (tzn. przy użyciu multipoli elektromagnetycznych). W rezultacie, wychodząc z zasad zachowania wyprowadził reguły wyboru dla promieniowań multipolowych. Później powtórzył rachunki już na gruncie mechaniki kwantowej i kwantowej teorii promieniowania.

Snucie reminiscencji na temat przełomowych okresów w historii fizyki ma ten prawie nieunikniony skutek, że pojawiają się pytania o analogie z czasem obecnym. Czy mechanika kwantowa ulegnie w przewidywalnej przyszłości istotnej przemianie, czy raczej jej zasady odkrywa się tylko raz, a cały problem fizyki polega na odkryciu i zidentyfikowaniu właściwych, elementarnych obiektów dynamicznych (właściwych, fundamentalnych współrzędnych)? Rozwój teorii cząstek idzie w tej chwili w tym drugim kierunku. Ciekaw jestem, co sądziłby o tym prof. Rubinowicz i muszę przyznać się, że się nie domyślałem.

Wojciech Królikowski

### Dziesięciolecie działalności PTZE

Początki Polskiego Towarzystwa Zastosowań Elektromagnetyzmu (PTZE) datują się na koniec lat osiemdziesiątych, czas, który obfitował w wielkie wydarzenia historyczne, ale obok nich, a może wraz z nimi, kielkowały różne inne, drobniejsze, ale może nie mniej ważne, inicjatywy naukowe, społeczne czy kulturalne. Jedną z takich inicjatyw była idea, która powstała w gronie kilku osób, a mianowicie idea zgromadzenia badaczy zajmujących się zastosowaniami elektromagnetyzmu. Różnorakie konferencje na ten temat, jak choćby ISEM (jeszcze wtedy w Japonii) czy ISEF, polsko-zagraniczna konferencja, tworzyły zaplecze intelektualne dla takiej idei. Ale historii nie tworzą organizacje, choćby najbardziej przebojowe, lecz ludzie, dlatego też idea wspólnoty elektromagnetycznej została wymyślona, podjęta i szczęśliwie sfinalizowana przez konkretne osoby. Wymienić należy tutaj trzy takie osoby: Kenzo Miyę z Uniwersytetu Tokijskiego, Jerzego Pawła Nowackiego z Instytutu Podstawowych Problemów Techniki w Warszawie oraz Andrzeja Krawczyka z Instytutu Elektrotechniki, też w Warszawie. Prace tych i wielu innych osób doprowadziły do rejestracji sądowej w dniu 19 lutego 1991 r., a to z kolei umożliwiło zwołanie I Walnego Zgromadzenia w dniu 5 kwietnia 1991 r. Zebranie to odbyło się w auli Instytutu Elektrotechniki w Międzylesiu.

Obecnie Towarzystwo liczy ponad 200 osób, reprezentujących prawie wszystkie ośrodki akademickie i naukowe w Polsce. Wśród członków Towarzystwa są też uczeni zagraniczni.

Dziesięcioletnia działalność Towarzystwa była realizacją celów sformułowanych podczas zebrania założycielskiego i następnie twórczo rozwijanych. A cele te to:

- promocja współdziałania uczonych rozmaitych dyscyplin w dziedzinie zastosowań elektromagnetyzmu,
- wymiana informacji naukowej,

- pomoc w szkoleniu młodej kadry naukowej poprzez wymianę stypendialną i organizowanie staży badawczych,

- organizowanie sympozjów i kursów szkoleniowych, zarówno krajowych jak i zagranicznych,

- współpraca z istniejącymi towarzystwami krajowymi i zagranicznymi.

Zorganizowano do tej pory 9 seminariów środowiskowych, cieszących się coraz większą popularnością, szczególnie wśród młodszego pokolenia kadr naukowych, 6 seminariów wspólnych z badaczami japońskimi, w tym trzy w Japonii, i 15 spotkań roboczych. Towarzystwo współorganizowało też inne konferencje, zarówno krajowe, jak i zagraniczne. Rozwijana jest współpraca z ośrodkami naukowymi w kraju i za granicą (nie tylko z Japonią). Wydawany jest *Biuletyn PTZE* z informacjami z życia PTZE, ale też z artykułami merytorycznymi. Rozpoczęto, książką P. Hammonda *Krótką historią elektromagnetyzmu*, serię wydawniczą PTZE, poświęconą teorii i zastosowaniom elektromagnetyzmu.

Polskie Towarzystwo Zastosowań Elektromagnetyzmu przez 10 lat na trwale, jak się wydaje, wpisało się w mapę polskiego życia naukowego.

Andrzej Krawczyk

### Fizyka na Scenie

Co wiedzą o fizyce obywatele Europy? Mimo tysięcy osiągnięć technicznych, które mogły się urzeczywistnić dzięki fizyce i bez których trudno sobie wyobrazić nasze codzienne życie, u schyłku „stulecia fizyki” obserwujemy swoisty analfabetyzm w zakresie znajomości fizyki, a nawet jej deprecjację. Wielu ludzi interesuje się astrologią, magią, wróżbami, cudownymi uzdrowieniami.

Podobnie jest w Polsce. Uczestnicy popularnego programu „Milionerzy” z tytułem magistra nauk ekonomicznych nie potrafią wskazać twórcy teorii względności. Niestety, pogłębia się rozdział między nauką (w szczególności fizyką) a społeczeństwem.

Właśnie po to, by uświadomić społeczeństwu europejskiemu, czym jest fizyka, 3 ośrodki badawcze: Europejskie Laboratorium Fizyki Cząstek (CERN) w Genewie, Europejska Agencja Kosmiczna (ESA) oraz Europejskie Obserwatorium Południowe (ESO) organizują akcję „Fizyka na Scenie” („Physics on Stage”). Jej kulminacją będzie Europejski Tydzień Nauki i Techniki, który zaplanowano w dniach 6–11 listopada br. w Genewie. Organizatorzy zaprosili do udziału w nim 22 kraje europejskie, w tym Polskę. Akcja ta ma być częściowo sfinansowana z funduszy V Ramowego Programu Unii Europejskiej.

Polskie Towarzystwo Fizyczne powołało Krajowy Komitet Organizacyjny „Fizyki na Scenie”, który ma wyłonić najlepszych nauczycieli i popularyzatorów tej dziedziny nauki i zaproponować pokaz mający szansę wejścia do programu genewskiej imprezy. Zakwalifikowane przez Międzynarodowy Komitet „Fizyka na Scenie” prezentacje mogą liczyć na finansowe wsparcie w wysokości do



10 tys. euro. Europejski Tydzień Nauki i Techniki będzie miał charakter raczej festiwalu niż konferencji naukowej, toteż ważna jest widowiskowa strona pokazu.

Komitet Krajowy, któremu przewodniczy autor tej notatki, wyłonił najlepsze polskie prezentacje podczas odbywających się w dniach 18–21 maja Poznańskich Dni Nauki i Kultury. Oto one: „Fizyka ping-ponga” (przedstawiona przez prof. Krzysztofa Ernsta z Wydziału Fizyki UW) i „Fizyka dźwięku muzycznego” (przedstawiona przez prof. Jana Mostowskiego z Instytutu Fizyki PAN i Szkoły Nauk Ścisłych).

Sprawą równie ważną jest wyłonienie szerszej (ponad 20-osobowej) polskiej reprezentacji środowisk fizycznych na spotkanie w Genewie (organizatorzy przewidują pokrycie kosztów podróży i pobytu 28 osób z Polski). Poza wspomnianymi pokazami w programie Europejskiego Tygodnia Nauki i Techniki znajdują się: dyskusje (m.in. na temat związku między fizyką a techniką oraz między nauczaniem a komunikowaniem społecznym), jarmark, na którym każdy kraj zorganizuje według własnego pomysłu swój „stragan”, a także wykłady plenarne, spotkania robocze (m.in. na temat wykorzystywania Internetu w nauczaniu fizyki). Krajowy Komitet chciałby, aby większość polskiej reprezentacji stanowili nauczyciele.

Wszystkich, którzy uważają, że potrafią w nowatorski, ciekawy i efektywny sposób nauczać fizyki, ukazać jej piękno i znaczenie w naszym życiu, mają jakiś pomysł, który mógłby być zrealizowany podczas Europejskiego Tygodnia Nauki i Techniki, bardzo prosimy o zgłaszanie siebie lub swoich kandydatów do polskiej reprezentacji, która wyjedzie do Genewy. Spróbujmy udowodnić, że polska fizyka godna jest prezentacji na europejskiej scenie, a udział Polski w Europejskim Tygodniu Nauki i Techniki zostanie zauważony.

Zgłoszenia należy kierować pocztą elektroniczną pod adresem: fns@ifpan.edu.pl lub skosk@ifpan.edu.pl. Adres do korespondencji listownej: prof. Tadeusz Skośkiewicz, Instytut Fizyki PAN, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa.

Zachęcamy też do zapoznania się ze stronami internetowymi „Fizyki na Scenie”: FizykaNaScenie.ifpan.edu.pl (strona polska) oraz www.estec.esa.nl/outreach/pos (strona centralna „Physics on Stage”).

*Tadeusz Skośkiewicz*

## XLIX Olimpiada Fizyczna

W XLIX Olimpiadzie Fizycznej (1999/2000) wzięło udział 1360 uczniów. Do III etapu zawodów, który odbył się w dniach 25–28 kwietnia 2000 r. w Warszawie, Komitet Główny zakwalifikował 69 osób.

We wtorek 25 kwietnia uczestnicy rozwiązywali zadanie doświadczalne na I Pracowni Wydziału Fizyki UW na Pasteura, a w środę 26 kwietnia – zadania teoretyczne w salach IFD UW na Hożej.

Po wieloletniej przerwie reaktywowano program kulturalny dla uczestników Olimpiady. Zawodnicy obejrzeli w Teatrze Narodowym spektakl „Szkoła żon” Moliere

oraz odwiedzili Łazienki i obejrzeli wystawę fotografii w Zamku Ujazdowskim.

W tym roku po raz pierwszy KGOF zdecydował ogłosić wyniki już w dwa dni po zawodach. Dzień przerwy, tj. czwartek 27 kwietnia, poświęcony był na wykłady oraz omówienie zadań. Wykłady wygłosili: prof. Tadeusz Skośkiewicz (Instytut Fizyki PAN i Szkoła Nauk Ścisłych) – „Czego uczy obserwacja prostych zjawisk fizycznych” (wykład ilustrowany był licznymi doświadczeniami) oraz prof. Andrzej Szymacha (Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego) – „Skąd bierze się uniwersalny charakter zasady zachowania energii”. Oba wykłady nagrodzone zostały wielkimi brawami. Wieczorem członkowie Komitetu Głównego omówili z zawodnikami zadania olimpijskie i ich rozwiązania, wskazali też na typowe błędy i ciekawe rozwiązania.

W piątek 28 kwietnia odbyło się ogłoszenie wyników i uroczyste zakończenie XLIX Olimpiady Fizycznej. Do olimpijczyków przemawiali: przewodniczący KGOF prof. Jan Mostowski, dyrektor IFPAN prof. Robert Gałązka, prezes PTF prof. Ireneusz Strzałkowski, przedstawicielka MEN pani Krystyna Wojda, dziekan Wydziału Fizyki UW prof. Katarzyna Chałasińska-Macukow, dziekan Wydziału Fizyki PW prof. Franciszek Krok, rektor SNŚ prof. Tadeusz Skośkiewicz. Odczytany został też list od wiceprezesa PAN prof. Jerzego Kołodziejczaka. Wszyscy zawodnicy i ich nauczyciele otrzymali dyplomy oraz nagrody książkowe, a laureaci i ich nauczyciele dodatkowo nagrody pieniężne.

Zamiast tradycyjnego wykładu kończącego Olimpiadę, odbył się występ satyryczny Jana Tadeusza Stanisławskiego.

Laureaci XLIX Olimpiady Fizycznej (w nawiasach ich nauczyciele):

1. Rafał Sarnecki (mgr Włodzimierz Zielicz), XXXIII LO im. Mikołaja Kopernika w Warszawie, kl. IV;
2. Przemysław Broniek (dr Sławomir Brzezowski), V LO im. Augusta Witkowskiego w Krakowie, kl. IV;
3. Andrzej Janusz Jarosz (dr Sławomir Brzezowski), V LO im. Augusta Witkowskiego w Krakowie, kl. IV;
4. Jakub Maksymilian Gac (mgr Lech Sadoś), XLI LO im. Joachima Lelewela w Warszawie, kl. IV;
5. Piotr Kołaczkowski (mgr Włodzimierz Zielicz), XXXIII LO im. Mikołaja Kopernika w Warszawie, kl. IV;
6. Andrzej Tomasz Görlich (dr Jerzy Mucha), V LO im. Augusta Witkowskiego w Krakowie, kl. III;
7. Mateusz Marek Goryca (mgr Marek Golka), VI LO im. Jana Kochanowskiego w Radomiu, kl. II;
8. Piotr Paweł Skibiński (mgr Franciszka Kita), IV LO im. Mikołaja Kopernika w Rzeszowie, kl. IV;
9. Artur Jeż (mgr Marian Bąk), XIV LO im. Polonii Belgijskiej we Wrocławiu, kl. III;
10. Grzegorz Miłoś (mgr Janusz Kopecki), II LO im. Mikołaja Kopernika w Mielcu, kl. II;
11. Andrzej Przemysław Karczyński (mgr Stanisław Lipiński), XIV LO im. Stanisława Staszica w Warszawie, kl. IV;

12. Marcin Łukasz Marszałek (mgr Stanisław Lipiński), XIV LO im. Stanisława Staszica w Warszawie, kl. IV;
13. Grzegorz Pełka (mgr Wanda Wagner), V LO im. ks. Józefa Poniatowskiego w Warszawie, kl. IV;
14. Stanisław Konrad Skowronek (mgr Teresa Pollak), VIII LO im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, kl. III;
15. Tomasz Maksymilian Kłoda (mgr Bogusław Lanuszny), VIII LO im. Marii Skłodowskiej-Curie w Katowicach, kl. III;
16. Grzegorz Potocki (mgr Janina Prytek), Zespół Szkół Elektrycznych w Nisku, kl. V;
17. Bernard Dominik Schmidt (mgr Piotr Matys), LO im. Stanisława Wyspiańskiego w Bieczu, kl. IV;
18. Patryk Lesiewicz (mgr Andrzej Kudelski), LO w Łapach, kl. IV;
19. Przemysław Krzysztof Zygułski (mgr Jacek Rabiński), VI LO im. Tadeusza Reytana w Warszawie, kl. IV;
20. Wojciech Kamiński (mgr Hanna Szyburska), I LO im. Mikołaja Kopernika w Łodzi, kl. IV.

Wyróżnienia:

- Przemysław Broniek – za rozwiązanie zadania nr 1;  
 Tomasz Kłoda – za rozwiązanie zadania nr 3;  
 Rafał Sarnecki – za rozwiązanie zadania doświadczalnego.

Paweł Janiszewski

### Penrose powieściopisarzem

W Anglii ukazała się książka *White Mars* z dziedziny „science fiction” napisana wspólnie przez wybitnego fizyka-teoretyka Rogera Penrose’a i autora innych książek tego typu – Briana Aldissa.

Penrose, znany zarówno ze swoich prac (wspólnych z Hawkingiem) nad naturą czarnych dziur, jak i swoich, opartych na mechanice kwantowej, rozważań nad działaniem świadomości i umysłu ludzkiego (przedstawionych np. w książkach *Nowy umysł cesarza* i *Shadows of the mind*), napisał teraz wspólnie z Aldissem powieść o grupie ludzi, która pod koniec XXI wieku utknęła na Marsie. Ludzie ci potrafili zbudować tam odpowiednie dla siebie pomieszczenia, wytwarzać żywność i tlen, czerpać wodę z głębi planety i podjąć próbę stworzenia idealnego społeczeństwa Utopii. Głównym zagadnieniem książki jest, czy powstanie takiego społeczeństwa jest możliwe, czy ludzkość może osiągnąć lepszą, szczęśliwszą przyszłość.

*Phys. World* 13, nr 2 (2000)

B. W.

### Robert Rathbun Wilson (1914 – 2000)

16 stycznia 2000 r. zmarł Robert Rathbun Wilson, fizyk, który przez całe życie budował z pasją, znanstwem i niezwykłym talentem najpotężniejsze akceleratory cząstek.

Urodzony w stanie Wyoming, studiował w Berkeley, tam też uzyskał doktorat, pracując pod kierunkiem noblisty Ernesta O. Lawrence’a. Następnie przeniósł się

do Princeton i tam opracował metodę elektromagnetycznej separacji izotopów uranu. W roku 1943 Wilson wraz z kolegami przeniósł cyklotron Uniwersytetu Harvarda do laboratorium w Los Alamos i tam pracował w ramach Projektu Manhattan.

Pod koniec wojny współuczestniczył w założeniu Federation of American Scientists i w ramach tej organizacji działał na rzecz cywilnej kontroli nad wykorzystaniem energii atomowej.

W roku 1947 Wilson przeniósł się do Ithaki w stanie New York i rozpoczął długoletnią pracę na Uniwersytecie Cornell. Pracował przy synchrotronie o energii elektronów 300 MeV. Po wynalezieniu przez Couranta, Livingstona i Snydera zasady silnego ogniskowania, Wilson natychmiast wykorzystał tę technikę do zbudowania pierwszego działającego modelu synchrotronu z silnym ogniskowaniem, co otworzyło drogę do budowy tańszym kosztem akceleratorów o wyższej energii. Jego pionierskie prace nad kolejnymi akceleratorami w Cornellu doprowadziły do zbudowania słynnego akceleratora CESR z przeciwbieżnymi wiązkami elektronów i pozytonów – dziś Wilson Synchrotron Laboratory.

Gdy w 1967 roku pojawił się projekt budowy, kosztem 300 milionów dolarów i w ciągu 7 lat, potężnego akceleratora o energii protonów 200 GeV w Batavii w stanie Illinois, Wilson był naturalnym kandydatem na szefa tego przedsięwzięcia. Nie było to łatwe zadanie. Zaczynał od zera – trzeba było zgromadzić ludzi i zbudować laboratorium „w szczerym polu” – na płaskim pustym terenie z pastwiskami i nielicznymi fermami. Od razu nakreślił ambitniejszy plan: zbuduje akcelerator o wyższej energii cząstek, w krótszym czasie i w ramach mniejszego budżetu. Sześć lat później uruchomił akcelerator przyspieszający protony do energii 400 GeV, a cena spadła do 250 milionów. Energia 400 GeV umożliwiła w Laboratorium Fermiego, bo taką nosi dziś nazwę ośrodek w Batavii, odkrycie kwarka b, czyli kwarka pięknego.

Dla Wilsona był to dopiero pierwszy etap. Wkrótce rozpoczęto prace nad projektowaniem Tevatronu – akceleratora 1000 GeV, z wykorzystaniem istniejącego tunelu akceleratora 400 GeV. Musiał to być skok jakościowy – przy danym promieniu tunelu konwencjonalne magnesy pozwoliłyby dojść do 500 GeV, a koszt zużycia energii elektrycznej dla konwencjonalnych magnesów dla 1000 GeV był absolutnie zaporowy. Wilson postanowił zbudować akcelerator na magnesach nadprzewodzących. Aby zdać sobie sprawę ze śmiałości tego projektu, warto pamiętać, że wymagał on zbudowania tysięcy takich magnesów – a podówczas na świecie działały nieliczne, w specjalnych eksperymentach. Przemysł produkował kilogramy nadprzewodzących materiałów – a potrzeba była ton, nie mówiąc o dostawach ciekłego helu do chłodzenia magnesów na sześciokilometrowym obwodzie pierścienia akceleratora.

Dziś w Batavii działa Tevatron – do czasu spodziewanego w 2005 roku uruchomienia akceleratora LHC w CERN-ie najpotężniejszy akcelerator świata. To tam odkryto w 1996 r. kwark t.

W centrum rozległego obszaru laboratorium wznosi się niezwykle oryginalna budowla. To Wilson Hall – budynek zaprojektowany przez Wilsona. Był on bowiem nie tylko fizykiem, lecz także utalentowanym artystą. Projektował magnesy, ale i kształt budynków, a także coś, co nazwalibyśmy architekturą otoczenia. W Fermilabie budynek Wilson Hall odbija się w wodzie, na terenie zdobionym licznymi rzeźbami (niektóre z nich są autorstwa Wilsona) odtworzono typową roślinność prerii, a w obrębie pierścienia akceleratora pasie się stado bizonów. Wilson był dyrektorem Fermilabu do 1978 r. Potem powrócił do Ithaki jako *professor emeritus* na Cornellu. Był laureatem licznych nagród naukowych i prezesem Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego.

Warto zapamiętać wypowiedź Wilsona podczas przesłuchania w Kongresie dotyczącego budowy akceleratora w Batavii, prowadzonego 17 kwietnia 1969 r. Senator John Pastore zapytał wówczas Wilsona:

— Czy jakiegokolwiek perspektywy związane z uruchomieniem tego akceleratora mają związek z bezpieczeństwem naszego kraju?

RW — Nie sądzę.

JP — Pod tym względem nie ma to żadnej wartości?

RW — To w żadnej mierze nie dotyczy bezpośrednio obrony naszego kraju – to tylko czyni ten kraj bardziej wartym obrony.

Helena Białkowska

## KALENDARZ IMPREZ

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

### 2000

3 – 9 września 2000, Stare Jabłonki

#### Charge, spin and electron momentum densities, SAGAMORE 13

Inst. Fizyki Uniw. w Białymstoku; prof. Ludwik Dobrzyński, IF UwB, tel.: (85) 7457247, fax: (85) 7457223, adr.el.: sagamore@alpha.uwb.edu.pl, Internet: alpha.uwb.edu.pl/sagamore.  
ang.

5 – 9 września 2000, Zakopane

#### 33rd Solid Mechanics Conference – SolMech 2000

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

5 – 13 września 2000, Zakopane

#### Trends in nuclear physics

Inst. Fizyki Jądrowej; Bogdan Fornal, IFJ, Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków, tel.: (12) 6370222, fax: (12) 6371881, adr.el.: zakopane@alf.ifj.edu.pl.  
ang.

11 – 15 września 2000, Wrocław

#### VII Konferencja Technologia Elektronowa – ELTE 2000

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

13 – 15 września 2000, Jaszowiec

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

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

18 – 22 września 2000, Jarnołtówek

#### 32nd Seminar on Positron Annihilation

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

25 – 27 września 2000, Rynia

#### Szkoła i Konferencja Modern Protection Techniques

Wydział Elektroniki WAT; dr Czesław Przybysz, Wydz. Elektroniki WAT, Kaliskiego 2, 01-489 Warszawa, tel.: (22) 6859135, fax: (22) 6859082, adr.el.: cprzybysz@wel.wat.waw.pl.

25 – 28 września 2000, Ustroń

#### II Int. Seminar on Semiconductor Gas Sensors – SGS 2000

Inst. Fiz. Pol. Śląskiej; prof. Jacek Szuber, IF PŚl., Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, tel.: (32) 2372057, fax: (32) 2372216, adr.el.: szuber@zeus.polsl.gliwice.pl.  
P, U: 80, O: 300 USD, ang.



9 – 13 października 2000, Zakopane

**Int. Conf. Solid State Crystals – ICSSC 2000**

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

18 – 20 października 2000, Jachranka

**XIX Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego**

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

25 – 27 października 2000, Warszawa

**Int. Conf. Systems of Optical Security**

Sekcja Polska SPIE i Inst. Optyki Stosowanej; mgr Mariusz Szyjer, IOS, Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa, tel.: (22) 8132051, fax: (22) 8133265, adr.el.: iosto@atos.warman.com.pl.  
Z: 15.9.00, P, ang.

7 – 11 listopada 2000, Stare Jabłonki

**XIV Szkoła Optoelektroniki: Photonics in Information Processing**

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

16 – 18 listopada 2000, Łódź

**4th Conf. Infrared Thermography and Thermometry**

Inst. Elektroniki Pol. Łódzkiej; Sławomir Zwolenik, IEI PŁ, Stefanowskiego 18, 90-924 Łódź, tel.: (42) 63126373, fax: (42) 6362238, adr.el.: zwolenik@ck-sg.p.lodz.pl.  
ang.

**2001**

6 – 15 lutego 2001, Karpacz

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

Inst. Fizyki Teoretycznej UW; prof. Jerzy Lukierski, prof. Ziemowit Popowicz, prof. Jakub Rembeliński (UŁ), IFT UW, pl. Maksy Borna 9, 50-204 Wrocław, tel.: (71) 3201353, 3201411, 3201408, adr.el.: ziemek@ift.uni.wroc.pl, lukier@ift.uni.wroc.pl.  
P, U: 80, O: 1300 zł (330 euro), ang.

17 – 20 września 2001, Toruń

**XXXVI Zjazd Fizyków Polskich**

Odział Toruński PTF; prof. A. Bielski, IF UMK, Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń.

## NOWE KSIĄŻKI

- Józef Koziński, *Banach geniusz ze Lwowa*, Wyd. Akademickie „Żak”, Warszawa 1999, s. 110.
- Andrzej Huczko, *Fulereny – Nobel za węglowe piłeczki*, PWN, Warszawa 2000, s. 136.
- Richard P. Feynman, *Charakter praw fizycznych*, z jęz. angielskiego tłum. Piotr Amsterdamski; Prószyński i S-ka, Warszawa 2000, s. 186, cena 36 zł.

---

---

## WARUNKI PRENUMERATY

---

---

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

### I. RUCH-u

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

### II. ZARZĄDU GŁÓWNEGO PTF

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

### III. ODDZIAŁÓW PTF

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

---

---

## INFORMACJE DLA AUTORÓW

---

---

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

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

---

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

### INFORMATION FOR SUBSCRIBERS

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

---

## SPIS TREŚCI

S. Taczanowski – Transmutacje, układy podkrytyczne i energia .....	169
Z. Ajduk, S. Pokorski – Fizyka oddziaływań elementarnych po powstaniu ich teorii .....	178
G. Hähner, N. Spencer – Pocieranie i ścieranie .....	185
RÓŻNE	
O.A. Chomicki – Międzynarodowe organizacje fizyki medycznej i inżynierii biomedycznej ...	195
WSPOMNIENIA – ROCZNICE	
A. Ghiorso, D.C. Hoffman, A. Sobiczewski – Glenn Theodore Seaborg (1912 – 1999) ....	199
ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI .....	213
RECENZJE .....	215
KRONIKA .....	216

## CONTENTS

S. Taczanowski – Transmutations, subcritical systems and energy .....	169
Z. Ajduk, S. Pokorski – Physics of elementary interactions after formulation of their theory .	178
G. Hähner, N. Spencer – Rubbing and scrubbing .....	185
MISCELLANEA	
O.A. Chomicki – International organizations of medical physics and biomedical engineering .	195
RECOLLECTIONS – ANNIVERSARIES	
A. Ghiorso, D.C. Hoffman, A. Sobiczewski – Glenn Theodore Seaborg (1912 – 1999) ....	199
MEETINGS AND CONFERENCES .....	213
REVIEWS .....	215
CHRONICLE .....	216

## WKRÓTCE

- *Andrey Geim o tym, że wszystko jest magnetyczne, czyli lewitować każdy może*
- *Stanisław Bednarek o doświadczeniach wprowadzających do teorii zjawisk chaotycznych*
- *„Fizyka i kosmos” – referaty zjazdowe Andrzeja Udalskiego, Andrzeja Woszczyka i Krzysztofa Ziołkowskiego*
- *Daniel Roth, Frank Schweickert, Martin Menzel i Hans J. Jodl o zastosowaniu multimediiów w kształceniu na odległość*
- *Manfred Schroeder o akustyce sal koncertowych*