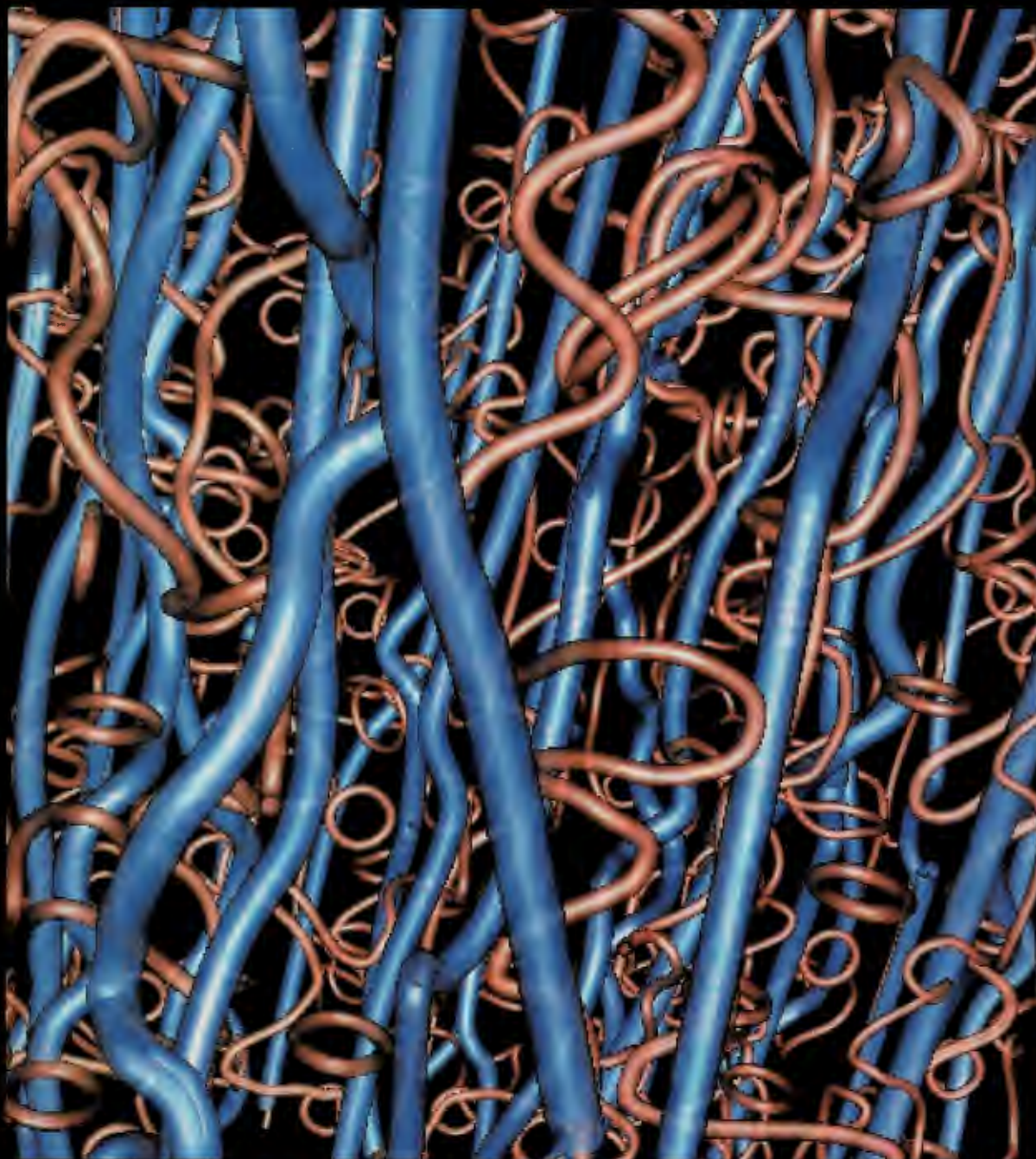


# POSTĘPY FIZYKI

Dwumiesięcznik Polskiego Towarzystwa Fizycznego



**Nadpłynne kryształy**

**Zegary optyczne**

**Mechanicy kwantowi**



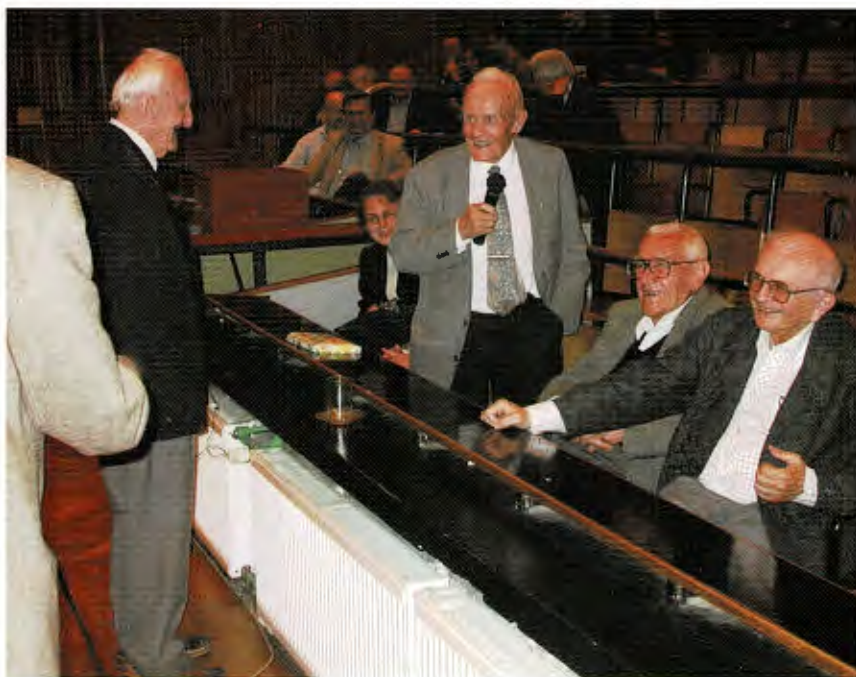
ISSN 0032-5430



## PODWÓJNY JUBILEUSZ BRONISŁAWA ŚREDNIAWY



Podczas jubileuszowego seminarium (patrz relacja na s. 225) Bronisław Średniawa odbiera życzenia, kwiaty i album od przewodniczącego Oddziału Krakowskiego PTF Zbigniewa Majki



Wspomina Andrzej Hrynkiewicz; w pierwszym rzędzie prócz niego Lucjan Jarczyk (z prawej) i Adam Strzałkowski oraz córka Jubilata Maria, doktorantka w IFJ PAN. Wszyscy się szeroko uśmiechają w reakcji na wspomnienie Hrynkiewicza, że Jubilat zmienił kobiety jak rękawiczki i ożenił się dopiero w wieku 45 lat.



Jubilat z Andrzejem Trautmanem (wszystkie zdjęcia: Stanisław Wróbel)

RADA REDAKCYJNA

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

REDAKTOR HONOROWY

Adam Sobiczewski

KOMITET REDAKCYJNY

Jerzy Gronkowski (redaktor naczelny), Mirosław Łukaszewski, Magdalena Staszal, Marek Więckowski, Barbara Wojtowicz

Adres Redakcji:

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

KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

Maciej Piętka (Białystok), Aleksandra Wronkowska (Bydgoszcz), Marian Głowacki (Częstochowa), Ryszard Drozdowski (Gdańsk), Roman Bukowski (Gliwice), Jerzy Warczewski (Katowice), Małgorzata Wysocka-Kunisz (Kielce), Małgorzata Nowina Konopka (Kraków), Elżbieta Jartych (Lublin), Michał Szanecki (Łódź), Halina Pięta (Opole), Maria Połomska (Poznań), Małgorzata Pociask (Rzeszów), Małgorzata Kuzio (Stupsk), Janusz Typek (Szczecin), Wini-cjusz Drozdowski (Toruń), Aleksandra Miłosz (Warszawa), Bernard Janczewicz (Wrocław), Joanna Borgensztajn (Zielona Góra)

POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

ZARZĄD GŁÓWNY

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

Adres Zarządu:

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

PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW PTF

Eugeniusz Żukowski (Białystok), Stefan Kruszewski (Bydgoszcz), Michał Piasecki (Częstochowa), Bolesław Augustyniak (Gdańsk), Andrzej Klimasek (Gliwice), Maciej Maśka (Katowice), Aldona Kubala-Kukuś (Kielce), Zbigniew Majka (Kraków), Jerzy Żuk (Lublin), Bogusław Broda (Łódź), Stanisław Waga (Opole), Roman Świetlik (Poznań), Małgorzata Kłisowska (Rzeszów), Włodimir Tomin (Stupsk), Adam Bechler (Szczecin), Grzegorz Karwasz (Toruń), Jerzy Garbarczyk (Warszawa), Zbigniew Kletowski (Wrocław), Paweł B. Szaniecki (Zielona Góra)

REDAKTORZY NACZELNI INNYCH CZASOPISM

WYDAWANYCH POD EGIDĄ PTF

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

Czasopismo ukazuje się od 1949 r.

Wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne

Dofinansowanie: Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Patronat: Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Skład komputerowy w redakcji

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

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

ISSN 0032-5430

SPIS TREŚCI

|   |     |
|---|-----|
| K. Byczuk – Nadpłynne kryształy .....   | 194 |
| D. Kaiser – Jak kształcić mechaników kwantowych ...                                       | 201 |
| J.L. Hall – Pomiar częstości optycznych – szansa dla zegarów optycznych i nie tylko ..... | 207 |
| JUBILEUSZE: Podwójny jubileusz Bronisława Średniawy .....                                 | 225 |
| PTF .....   | 227 |
| NOWI PROFESOROWIE .....   | 228 |
| WSPOMNIENIA: Marian Kryszewski (1925–2005) ....   | 229 |
| ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI .....  | 231 |
| RECENZJE .....  | 234 |
| KRONIKA .....   | 236 |

*Drodzy Czytelnicy,*

*Witamy jesienią, już po szczecińskim Zjeździe Fizyków i początku roku akademickiego, a jeszcze przed Bożym Narodzeniem i Nowym Rokiem, a więc w okresie, gdy mamy trochę więcej niż zwykle czasu na lektury.*

*Polecamy dziś zapowiadany już od dawna artykuł Krzysztofa Byczuka o nadpłynnych kryształach – jednym z fascynujących i zdumiewających odkryć ostatnich lat. Jeszcze raz zadziwił nas hel, potwierdzając, że jest substancją o niezwykle bogatych właściwościach kwantowych.*

*Nikogo nie trzeba przekonywać, że nasz świat jest kwantowy, lecz jest nadal kwestią otwartą – czego dowodzi w swym artykule David Kaiser – jak najlepiej i najskuteczniej nauczać mechaniki kwantowej, jak wiele uwagi poświęcić wyuczeniu biegłości obliczeniowej (czyli kształcenie tytułowych „mechaników kwantowych”), a jak wiele czasu zużyć na omówienie i dyskusję aspektów interpretacyjnych i filozoficznych wykładanych zagadnień. Właściwe wyważenie proporcji między umiejętnościami technicznymi a dogłębnym zrozumieniem przedmiotu dotyczy chyba nie tylko tej dziedziny i nie tylko fizyki, ale w przypadku mechaniki kwantowej jest pewnie najtrudniejsze, gdyż to właśnie ona konfrontuje nas ciągle ze zjawiskami i koncepcjami wysoce nieintuicyjnymi – jak choćby wspomniane nadpłynne kryształy. . .*

*W tym zeszycie znajdują też Państwo m.in. wykład noblowski Johna Halla oraz relację z podwójnego jubileuszu Profesora Bronisława Średniawy, któremu życzyć już chyba wypada nie stu, lecz dwustu lat, co z największą przyjemnością czynimy.*

*Mirek Łukaszewski*

*Na okładce:*

Symulacje Monte-Carlo wirów („materii wirowej”) w ciekłym wodorze metalicznym – modelowej nowej supercieczy kwantowej (dzięki uprzejmości Egora Babaeva, Eivinda Smørgrava i Jo Smisetha; patrz też artykuł K. Byczuka o nadpłynnych kryształach na s. 194). Szczegóły modelu i obliczeń – patrz E. Smørgrav, E. Babaev, J. Smiseth, A. Sudbø, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 135301 (2005).

# Nadpływne kryształy

Krzysztof Byczuk

*Instytut Fizyki, Uniwersytet w Augsburgu, Niemcy  
oraz Instytut Fizyki Teoretycznej, Uniwersytet Warszawski*

---

## Supersolids

*Abstract:* Supersolid is a state of matter where both diagonal and off-diagonal long-range orders are present. Physically it means that supersolids possess the crystallographic long-range positional order but they can move like a superfluid, i.e. they can flow without viscosity. In other words, supersolids support both the shear wave of the crystal and the superflow. We provide here a short introduction into the theory of supersolids and summarize current experiments.

---

## Wstęp

W wielu filmach pojawiają się sceny, w których bohaterowie lub przedmioty materialne przenikają przez betonowe lub kamienne ściany. W tym czasie ani ściana, ani osoba czy przedmiot nie ulegają zniszczeniu lub trwałej deformacji. Czy z punktu widzenia praw fizyki jest możliwe, aby jedno ciało stałe przenikało bez oporu przez inne? Okazuje się, że odpowiedź może być w jakimś sensie twierdząca. W ostatnich doświadczeniach [1–4] dwaj badacze: Eun-Seong Kim oraz Moses Chan z Uniwersytetu Pensylwańskiego zaobserwowali mniejszy moment bezwładności krystalicznego helu  $^4\text{He}$ , tak jakby pewna część kryształu pozostawała w spoczynku, podczas gdy reszta się obracała. Jednocześnie nie wydzielało się ciepło, czyli jeden podukład przenikał przez drugi bez tarcia. Z jednej strony taki stan ciała stałego można nazwać nadpłynnym, w analogii do stanu nadpłynności  $^4\text{He}$ , z drugiej jednakże badany układ nadal pozostawał w stałym stanie skupienia. W języku angielskim ten stan termodynamiczny nazwano „supersolid” (w analogii do superconductor, czyli nadprzewodnik, lub superfluid, czyli nadpłynny). W języku polskim można byłoby przetłumaczyć „supersolid” jako „nadciało stałe” (co nie brzmi dobrze) lub – lepiej – „nadpływne ciało stałe” czy „nadpłynny kryształ”. Tą ostatnią nazwą będziemy się posługiwali w tym artykule.

## Klasyczne stany skupienia

Już w gimnazjum uczymy, że materia występuje w trzech stanach skupienia: gazowym, ciekłym i stałym. Stan gazowy jest nieuporządkowany, atomy lub cząsteczki wypełniają całą dostępną objętość. W położeniu cząsteczek nie występują żadne korelacje przestrzenne. Ciecz przyjmuje kształt naczynia, w którym się znajduje, i oddzielona jest od powietrza powierzchnią. Atomy i cząsteczki w cieczy też poruszają się chaotycznie, lecz ich położenia wykazują pewne korelacje na małych odległościach. Natomiast ciała stałe zachowują swój kształt poza

naczyńmi i są sztywne. Atomy je tworzące są uporządkowane. W kryształach położenia atomów są ze sobą ponadto ściśle skorelowane, czyli pozostają we wzajemnej zależności na dowolnie dużych odległościach.

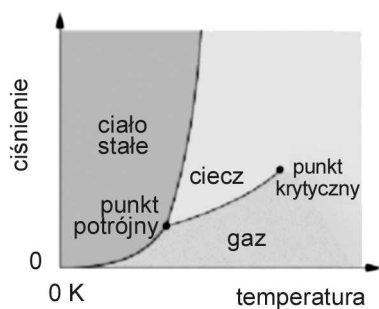
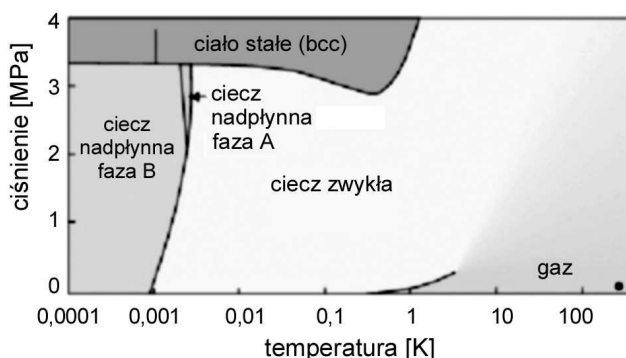
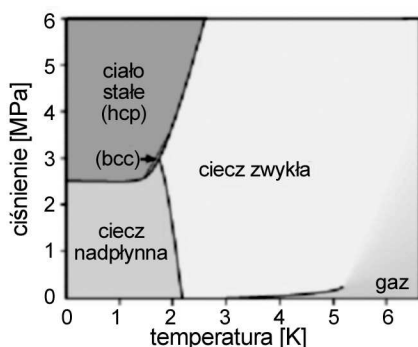
Wielkością opisującą te stany skupienia jest funkcja korelacji gęstość–gęstość ( $g-g$ )  $\langle \rho(\mathbf{r}_1)\rho(\mathbf{r}_2) \rangle$ , gdzie  $\rho(\mathbf{r}_i)$  jest gęstością w punkcie  $\mathbf{r}_i$ , a nawiasy trójkątne oznaczają średnią względem odpowiedniego zespołu statystycznego. Dla gazów i cieczy funkcja korelacji  $g-g$  znika, gdy odległość  $|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| \rightarrow \infty$ . Nie ma korelacji położenia cząsteczek na dużych odległościach. Natomiast w kryształach funkcja korelacji  $g-g$  dąży do stałej wartości, gdy  $|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| \rightarrow \infty$ , co oznacza, że w układzie występuje uporządkowanie dalekiego zasięgu. Makroskopowym przejawem jego istnienia jest pojawienie się sztywności układu. Zmiana położenia atomów w jednej części idealnie sztywnego kryształu powoduje taką samą zmianę w całym układzie.

Często się zdarza, że w zależności od warunków zewnętrznych (ciśnienie, objętość, temperatura) dana substancja może występować w jednym z tych trzech stanów skupienia. Powszechnie znanym przykładem jest związek  $\text{H}_2\text{O}$ , występujący w postaci gazu (pary), cieczy (wody) oraz ciała stałego (lodu, którego postaci jest bardzo wiele). Możliwe fazy substancji przedstawia się zwykle na diagramie fazowym; jako przykład przypomnijmy diagram fazowy  $\text{H}_2\text{O}$  (rys. 1).

Prawie wszystkie substancje pod ciśnieniem normalnym i w odpowiednio niskich temperaturach są ciałami stałymi. Prawie wszystkie, czyli wszystkie poza helem. Diagramy fazowe obu izotopów helu ( $^4\text{He}$  oraz  $^3\text{He}$ ) są wyjątkowe (rys. 2). Pod ciśnieniem normalnym aż do temperatury zera bezwzględnej hel pozostaje cieczą.

## Kwantowe stany skupienia

W wyjaśnienie klasycznych stanów skupienia materii mechanika kwantowa ingeruje w niewielkim stopniu. Jest potrzebna, aby wyjaśnić mikroskopową naturę efektyw-

Rys. 1. Diagram fazowy H<sub>2</sub>ORys. 2. Diagramy fazowe dla izotopów helu: <sup>4</sup>He (u góry) i <sup>3</sup>He (u dołu)

nych sił oddziaływania pomiędzy atomami i cząsteczkami (wiązania kowalencyjne, jonowe czy van der Waalsa) oraz paradoks Gibbsa (wzrost entropii przy mieszaniu identycznych gazów). Natomiast same atomy i cząsteczki są w zasadzie traktowane jak obiekty klasyczne i rozróżnialne.

W przypadku helu atomy są obiektami kwantowymi – są nierozróżnialne i muszą być opisywane przez wielociałową funkcję falową o odpowiedniej symetrii ze względu na przestawianie zmiennych. Oba izotopy helu różnią się pod tym względem. Atom <sup>4</sup>He składa się z dwóch neutronów, dwóch protonów i dwóch elektronów. W sumie zbudowany jest z parzystej liczby fermionów o spinie połówkowym, co daje w efekcie bozon o spinie zerowym. Atom <sup>3</sup>He ma tylko jeden neutron w jądrze i wskutek tego zbudowany jest z nieparzystej liczby fermionów o spinie połówkowym, czyli efektywnie jest fermionem. Przy niskich energiach (gdy nie badamy budowy wewnętrznej izotopów

helu) wielociałowa funkcja falowa musi więc być parzysta dla <sup>4</sup>He, jak dla bozonów, i nieparzysta dla <sup>3</sup>He, jak dla fermionów. Mówimy, że pod ciśnieniem normalnym hel jest cieczą kwantową.

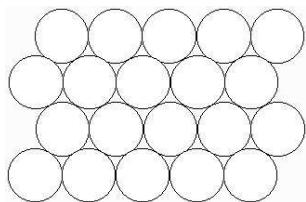
Dlaczego hel jest cieczą kwantową, a odpowiednie fazy litu lub neonu są już cieczami lub kryształami klasycznymi? Wszystko zależy od stosunku długości termicznej fali de Broglie'a  $\lambda_{dB} = (2\pi\hbar^2/mk_B T)^{1/2}$ , gdzie  $m$  oznacza masę atomu,  $k_B$  – stałą Boltzmana, a  $T$  – temperaturę bezwzględną, do charakterystycznego zasięgu oddziaływania między atomami lub po prostu typowej odległości między nimi  $d$ . Jeśli  $\lambda_{dB} \geq d$ , to układ zachowuje się kwantowo, gdyż funkcje falowe pojedynczych atomów częściowo się nakrywają. W przeciwnym wypadku układ można z dobrym przybliżeniem opisywać klasycznie. Widać, że w temperaturach rzędu 1 K jedynie lekkie atomy mogą tworzyć cieczy kwantowe.

W temperaturze skraplania helu  $T_c(^4\text{He}) \approx 4,2$  K długość fali de Broglie'a tego pierwiastka  $\lambda_{dB}(^4\text{He}) \approx 0,4$  nm. Typowy zasięg oddziaływania  $d(^4\text{He}) \approx 0,27$  nm jest więc mniejszy niż  $\lambda_{dB}(^4\text{He})$ , czyli układ powinien zachowywać się kwantowo. Neon skrapla się w temperaturze 27 K, a krystalizuje przy 24 K. Typowa długość fali de Broglie'a w tych temperaturach  $\lambda_{dB}(\text{Ne}) \approx 0,07$  nm jest dużo mniejsza od typowego zasięgu oddziaływania  $d(\text{Ne}) \approx 0,3$  nm i dlatego układ zachowuje się klasycznie. (Zauważmy, że kondensaty zimnych atomów I grupy układu okresowego też są układami kwantowymi, lecz trzeba pamiętać, że są one w stanie metatrwałym o dość długim czasie rozpadu z powodu bardzo małych gęstości. W stanie równowagi termodynamicznej atomy te dążą jednak do tworzenia molekuł i większych struktur, hel zaś jako pierwiastek o zamkniętej powłoce elektronowej pozostaje chemicznie obojętny).

Cieczy kwantowe pod ciśnieniem normalnym pozostają płynne aż do temperatury zera bezwzględnego. Jest to konsekwencja kwantowej natury tych układów i związanej z nią zasady nieoznaczoności Heisenberga. Im bardziej chcemy zlokalizować atomy w położeniach równowagi w sieci krystalicznej, zmniejszając nieokreśloność położenia, tym większa jest nieokreśloność pędu. Mówimy, że atomy wykonują drgania zerowe, których energia kinetyczna jest tym większa, im owe atomy są lżejsze. Zasada nieoznaczoności uniemożliwia zlokalizowanie atomów helu w węzłach sieci kryształu, gdyż energia kinetyczna drgań zerowych jest większa od energii przyciągania odpowiadającej minimum energii potencjalnej van der Waalsa.

W wysokich ciśnieniach hel staje się jednak ciałem stałym. Gdy zewnętrzne ciśnienie jest większe od 25 atm, <sup>4</sup>He krystalizuje w strukturze heksagonalnej najgęstszej upakowania (hcp). Atomy <sup>3</sup>He są lżejsze i potrzebują jeszcze większego ciśnienia (powyżej 30 atm), by utworzyć kryształ o strukturze regularnej centrowanej objętościowo (bcc). Krystalizacja helu pod wysokim ciśnieniem przypomina porządkowanie kul bilardowych w gęsto upakowanych warstwach o periodycznej strukturze (rys. 3). Podobnie jest z atomami helu – gdy są blisko siebie, odpychają się, jakby miały twarde rdzenie. Nawet jednak w fazie sta-

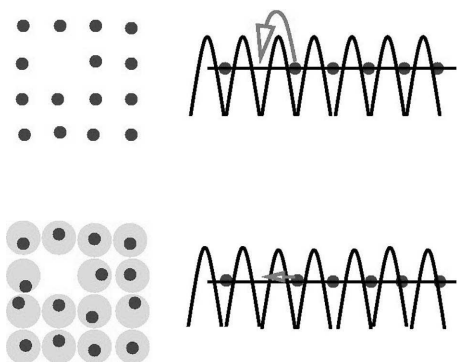
lej atomy He wykonują drgania zerowe, których amplituda wynosi ok. 30% odległości między atomami. Stały hel należy zatem do kryształów kwantowych.



Rys. 3. Uporządkowanie krystaliczne helu przypomina najgęstsze upakowanie kul bilardowych, odpychających się siłami typu twardego rdzenia

W kryształach występują różnego rodzaju defekty: luki, domieszki innych atomów, dyslokacje i in. Rozważmy najprostszy defekt punktowy – lukę, czyli brak atomu w jego normalnym położeniu, np. w węźle sieci krystalicznej. Aby taka luka mogła być zapełniona przez inny atom z sąsiedniego węzła, atom ten musi zostać wzbudzony termicznie, tak aby mógł pokonać barierę potencjału. Prawdopodobieństwo takiego procesu jest proporcjonalne do  $\exp(-E_a/k_B T)$ , gdzie  $E_a$  jest tzw. energią aktywacji. Widać, że im niższa temperatura  $T$ , tym mniejsze jest prawdopodobieństwo takiego przeskoku.

W kryształach kwantowych pojawia się też inna możliwość. Lekki atom może tunelować przez barierę potencjału, zgodnie z prawami mechaniki kwantowej. Tunelujący atom zapełnia lukę, ale w swoim poprzednim węźle sieci pozostawia nowe puste miejsce. Można sobie więc wyobrazić, że w kryształach kwantowych luka przemieszcza się z jednego węzła do innego (rys. 4). Innymi słowy, luka nie jest statyczna i może z niezerowym prawdopodobieństwem znajdować się w różnych węzłach. Jeśli przez  $|\mathbf{R}_i\rangle$



Rys. 4. Defekty i wzbudzenia w kryształach klasycznym (u góry), w którym położenia atomów są dobrze określone, i kwantowym (u dołu), w którym są one rozmyte zgodnie z zasadą nieoznaczoności Heisenberga

oznaczymy stan kwantowy z luką w węźle kryształu opisanym wektorem  $\mathbf{R}_i$ , to spójna superpozycja liniowa tych stanów  $|\mathbf{k}\rangle = \sum_i \exp(i\mathbf{k}\mathbf{R}_i)|\mathbf{R}_i\rangle$  opisuje spójne wzbudzenie jednocząstkowe – kwazicząstkę zwaną defektonem. Energia  $E$  pojedynczego defektu związana jest z wektorem falowym  $\mathbf{k}$  zależnością dyspersyjną  $E = E(\mathbf{k})$ , której postać zależy od rodzaju sieci oraz amplitud prawdopodobieństwa tunelowania dla pojedynczych atomów kryształu kwantowego. Defekty innego rodzaju w takich kryształach mogą zachowywać się podobnie, tworząc odpowiednie kwazicząstki.

## Kondensacja Bosego–Einsteina a nadpłynne ciecze kwantowe

Izotop  $^4\text{He}$  poniżej 2,17 K przechodzi w stan nadpłynny (ciecz  $^3\text{He}$  staje się nadpłynna w temperaturach poniżej 2 mK, a mikroskopowy mechanizm tego przejścia związany jest z tworzeniem się par Coopera i ich kondensacją podobnie jak w nadprzewodnikach). Nadpłynność nie jest zjawiskiem pojedynczym, lecz grupą zjawisk związanych z tym samym mikroskopowym mechanizmem, mianowicie istnieniem pozadiagonalnego uporządkowania dalekosięgowego i makroskopowej funkcji falowej.

Zgodnie z ideą Einsteina, poniżej pewnej temperatury makroskopowo duża liczba bozonów znajduje się w stanie kwantowym o najniższej energii, tworząc fazę zwaną dziś kondensatem Bosego–Einsteina (B–E). Jeśli ten stan energetyczny charakteryzuje pęd  $\mathbf{k} = 0$ , to rozkład cząstek względem pędu wyraża się delta Diraca:

$$n(\mathbf{k}) = N_0 \delta(\mathbf{k}, 0) + \dots$$

gdzie  $N_0$  jest liczbą bliską liczbie bozonów  $N$  w całym układzie. Względna koncentracja (gęstość) kondensatu wynosi więc  $n_0 = N_0/N$ . Opisany przypadek jest przykładem kondensacji w przestrzeni pędów.

Kondensację B–E można rozważać ogólniej, badając właściwości zredukowanej, jednocząstkowej macierzy gęstości [5]

$$\rho(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = N \sum_n p_n \times \int d\mathbf{r}_2 \dots d\mathbf{r}_N \psi_n^*(\mathbf{r}, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N) \psi_n(\mathbf{r}', \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N),$$

gdzie  $\psi_n(\mathbf{r}, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N)$  jest  $N$ -cząstkową funkcją falową układu w  $n$ -tym stanie kwantowym, a  $p_n$  określa prawdopodobieństwo znalezienia tego stanu w zespole statystycznym. Mówimy, że w układzie występuje kondensacja typu B–E, jeśli w rozkładzie spektralnym macierzy gęstości

$$\rho(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \sum_\alpha N_\alpha \chi_\alpha(\mathbf{r}_1)^* \chi_\alpha(\mathbf{r}_2)$$

przynajmniej jedna wartość własna  $N_\alpha$  (na ogół oznaczana  $N_0$ ) jest wielkością makroskopową rzędu liczby bozonów  $N$  w układzie<sup>1</sup>. Odpowiadająca jej funkcja wła-

<sup>1</sup>Można wyróżnić różne typy kondensatów w granicy termodynamicznej: 1) typ I, w którym istnieje tylko jedna wartość  $N_\alpha$  rzędu  $N$ , 2) typ II, w którym istnieje nieskończenie wiele takich  $N_\alpha$ , przy czym  $\alpha$  jest zawarte w skończonym paśmie, 3) typ III, w którym żadna wartość  $N_\alpha$  nie jest rzędu  $N$ , ale ich nieskończona suma jest tego rzędu.

sna  $\chi_0(\mathbf{r})$  lub funkcja  $\Psi_0(\mathbf{r}) = \sqrt{N_0}\chi_0(\mathbf{r})$  odgrywa rolę parametru porządku dla kondensatu B–E i zwana jest tradycyjnie funkcją falową kondensatu. Istnienie kondensatu oznacza, że

$$\rho(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \xrightarrow{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| \rightarrow \infty} \frac{N_0}{N},$$

czyli w układzie istnieje pozadiagonalne uporządkowanie dalekiego zasięgu. Zapisując  $\chi_0(\mathbf{r}) = |\chi_0(\mathbf{r})| \exp[i\varphi(\mathbf{r})]$ , zdefiniujemy prędkość cząstek w stanie nadpłynnym jako  $\mathbf{v}_0(\mathbf{r}) = (\hbar/m)\nabla\varphi(\mathbf{r})$ . Choć wielkość ta wygląda podobnie jak w mechanice kwantowej, to tutaj odnosi się do wielkości makroskopowej, której fluktuacje kwantowe są małe w stosunku do wartości średniej. Z definicji wynika natomiast, że prędkość kondensatu jest bezwładowa, czyli  $\nabla \times \mathbf{v}_0(\mathbf{r}) = 0$ .

Nadpłynność jest zbiorczym terminem określającym szereg szczególnych makroskopowych własności układu, m.in. nielepki przepływ, efekt fontannowy (zjawisko wypychania do góry powierzchni nadpłynnej cieczy pod wpływem jej ogrzania, powodujące np. wypływanie nadciekłego helu po ściankach otwartego pojemnika), włoskowość czy wreszcie nieklasyczny moment bezwładności. Wprawdzie nie wykazano ściśle istnienia w skończonych temperaturach związku między kondensacją a nadpłynnością, lecz wydaje się, że w większości fizycznie istotnych przypadków taki związek występuje. Hipotezę, że stan nadpłynny  $^4\text{He}$  wynika z pewnego rodzaju kondensacji B–E, wysunął już w latach trzydziestych ubiegłego wieku Fritz London [6].

Nieklasyczny moment bezwładności w stanie nadpłynnym jest koncepcyjnie związany z kondensacją B–E o bezwładowej prędkości. Wyobraźmy sobie cylindryczne naczynie o promieniu  $R$  wypełnione bozonową cieczą kwantową. Obracając ten układ wokół pionowej osi z prędkością kątową  $\omega$  oczekujemy, że w laboratoryjnym układzie odniesienia jego energia swobodna ma postać

$$F(\omega) = F_0 + \frac{1}{2}I_{\text{kl}}\omega^2,$$

gdzie  $F_0$  oznacza energię swobodną w stanie spoczynku, a  $I_{\text{kl}} = NmR^2$  – klasyczny moment bezwładności tej cieczy (efekty związane z naczyniem pomijamy). Nieklasyczny moment bezwładności wyraża się występowaniem w tym wzorze dodatkowego ujemnego wkładu do energii swobodnej, który dla małych  $\omega$  ma następującą postać:

$$\Delta F(\omega) = -\frac{1}{2}\frac{n_s}{n}I_{\text{kl}}\omega^2.$$

Ów dodatkowy wkład definiuje gęstość  $n_s$  składowej nadpłynnej (wielkość  $n$  w powyższym wzorze oznacza całkowitą gęstość cząsteczek). Gęstość ta może, ale nie musi<sup>2</sup> być równa gęstości kondensatu  $n_0$ . Fizycznie oznacza to, że w stanie równowagi moment bezwładności cieczy  $I = I_{\text{kl}}(1 - n_s/n)$ , czyli pewna jej część nie obraca się razem ze

zbiornikiem. Dokładniej mówiąc, rozważamy stan równowagi, przygotowany tak, że obracający się układ jest doprowadzony do stanu nadciekłego (np. przez ochłodzenie). W ten sposób wykluczamy logiczną możliwość interpretacji, że układ nadciekły potrzebuje bardzo długiego (nieskończonego) czasu, aby zacząć się obracać razem ze ścianami zbiornika. Związek z kondensacją jest natychmiastowy – prędkość kondensatu B–E jest bezwładowa, czyli kondensat nie może się obracać wraz z resztą układu. Rozumując heurystycznie, nielepki układ nadpłynny nie obraca się razem z układem będącym w fazie normalnej. (Nieklasyczny moment bezwładności jest zjawiskiem analogicznym do efektu Meissnera w nadprzewodniku I rodzaju, polegającego na znikaniu indukcji pola magnetycznego w układzie. Wnikanie wirów pola magnetycznego do nadprzewodnika II rodzaju jest odpowiednikiem pojawiania się wirów w szybko obracającym układzie nadpłynnym. Gdy prędkość obrotowa rośnie jeszcze bardziej, nadpłynność znika, podobnie jak silne pole magnetyczne niszczy nadprzewodnictwo. Jest tak dlatego, że pole powierzchni zajmowanej przez wiry nie może być większe od pola przekroju poprzecznego nadpłynnego (nadprzewodzącego) układu).

Historyczne już doświadczenie pokazujące bezpośrednio, że moment bezwładności układu nadpłynnego maleje, wykonali w roku 1967 George Hess i William Fairbank [7].

## Nadpłynne kryształy – idea

Po tym szerokim wprowadzeniu możemy przejść do zdefiniowania nadpłynnego kryształu. Sam kryształ cechuje dalekozasięgowe uporządkowanie gęstości. Układ nadpłynny charakteryzuje się występowaniem pozadiagonalnego uporządkowania dalekiego zasięgu. Nadpłynny kryształ łączy te dwie własności: układ jest w stanie krystalicznym i jednocześnie w nadpłynnym. Obrazuje to tabela 1.

Fizycznie biorąc, nadpłynny kryształ jest sztywny, lecz zarazem może przenikać przez pory i szczeliny jak nielepka ciecz. Ta zdumiewająca własność pokazuje jedynie, jak bardzo świat opisywany przez mechanikę kwantową jest daleki od naszych wyobrażeń.

Możliwość istnienia nadpłynnych kryształów po raz pierwszy rozważał noblista (1957) Chen Ning Yang już w 1962 r. [8]. Doszedł on jednak do wniosku, że stan taki nie powinien istnieć. W roku 1969 Andriejew i Lifszyc wysunęli hipotezę mikroskopowego mechanizmu powstawania nadpłynnego kryształu, według której to kondensacja defektów w kwantowym kryształcie prowadzi do stanu nadpłynnego [9]. Geoffrey Chester w 1970 r. badał klasy funkcji falowych dopuszczających możliwość istnienia nadpłynnego kryształu [10]. W tym samym roku przyszył noblista Anthony Leggett zaproponował, żeby nad-

<sup>2</sup>Zauważmy, że gęstość kondensatu opisuje układ w stanie równowagi termodynamicznej, podczas gdy gęstość cieczy nadpłynnej odnosi się do układu w stanie stacjonarnym, lecz nierównowagowym. W ogólności te dwie wielkości nie muszą być nawet ze sobą powiązane. Ze ściśle rozwiązywalnego jednowymiarowego modelu oddziałujących bozonów wynika, że kondensacja B–E nie zachodzi ( $n_0 = 0$ ), choć układ ma właściwości cieczy nadpłynnej ( $n_s \neq 0$ ).

Tabela 1. Porównanie właściwości granicznych zwykłej i nadpłynnej cieczy oraz zwykłego i nadpłynnego kryształu

| Wielkość   | Granica przy $ r_1 - r_2  \rightarrow \infty$ |           |
|--|---|-----------|
|  | ciecz   |           |
|  | zwykła  | nadpłynna |
| $\langle \rho(\mathbf{r}_1)\rho(\mathbf{r}_2) \rangle$ | 0   | 0         |
| $\rho(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$                     | 0   | $N_0/N$   |
|  | kryształ                                      |           |
|  | zwykły  | nadpłynny |
| $\langle \rho(\mathbf{r}_1)\rho(\mathbf{r}_2) \rangle$ | const   | const     |
| $\rho(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$                     | 0   | $N_0/N$   |

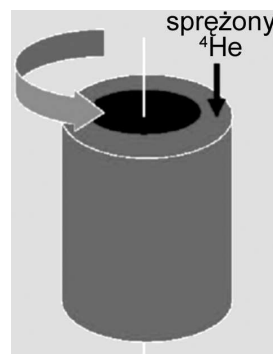
płynnych kryształów poszukiwać poprzez pomiary momentu bezwładności układu [11]. Za sprawą wspomnianych eksperymentów [1–4] w ostatnich latach nastąpił renesans badań teoretycznych w tej dziedzinie. I tak, David Ceperley i Bernard Bernu w 2004 r. wykazali numerycznie, stosując metodę Monte Carlo do całek po trajektoriach, że w idealnym kryształcie nadpłynność nie występuje [12]. Nikolay Prokof'ev i Boris Svistunov, także za pomocą numerycznej metody Monte Carlo, wykazali, że warunkiem koniecznym jej wystąpienia jest obecność luk w kryształcie [13]. Niestety, nie ma dobrych oszacowań numerycznych, w jakim zakresie temperatury, koncentracji luk (lub innych domieszek i defektów) czy ciśnienia należy oczekiwać nadpłynności w rzeczywistych kryształach.

### Nadpłynność w stałym $^4\text{He}$

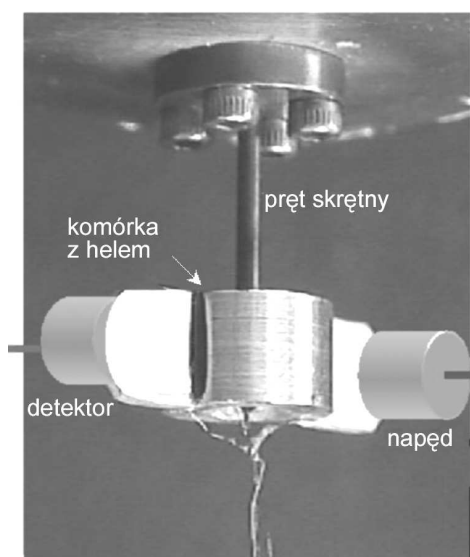
Naturalnym układem, w którym mógłby się pojawiać stan nadpłynnego kryształu, jest krystaliczny  $^4\text{He}$  (izotop  $^3\text{He}$  w stanie krystalicznym wykazuje uporządkowanie magnetyczne, co wyklucza nadpłynność). Poszukiwania tego stanu trwają od 1969 r. Wyniki pomiarów różnych wielkości fizycznych nigdy nie pozwoliły na jednoznaczne wykrycie nadpłynności w kryształcie, ale też tej możliwości nigdy jednoznacznie nie wykluczyły. Wyniki badań z okresu 1969–92 można znaleźć w pracy przeglądowej Marka Meisela [14].

Najnowsze badania doświadczalne na Uniwersytecie Pensylwańskim [1–4] spowodowały renesans w badaniu nadciekłych kryształów. Badanym układem był, jak w poprzednich pracach, hel w niskich temperaturach i pod wysokim ciśnieniem. Idea doświadczenia była bezpośrednio oparta na pomysle Leggetta [11] i polegała na wyznaczeniu momentu bezwładności krystalicznego  $^4\text{He}$  przy różnych ciśnieniach i temperaturach. Hel wprowadzano albo do porowatego szkła [2] lub złota [3], albo umieszczano na ścianie cylindra zbudowanego z magnezu i otoczonego glinem (rys. 5). Cały układ zawieszano na wadze

skręceń umieszczonej w kriostacie i komórce ciśnieniowej (rys. 6). Urządzenia elektromagnetyczne pobudzały układ do drgań oraz mierzyły okres oscylacji przy zadanym ciśnieniu i temperaturze.



Rys. 5. Komórka do wyznaczenia momentu bezwładności krystalicznego helu ( $^4\text{He}$  znajduje się między cylindryczną ścianką zewnętrzną z glinu i wewnętrznym rdzeniem z magnezu)



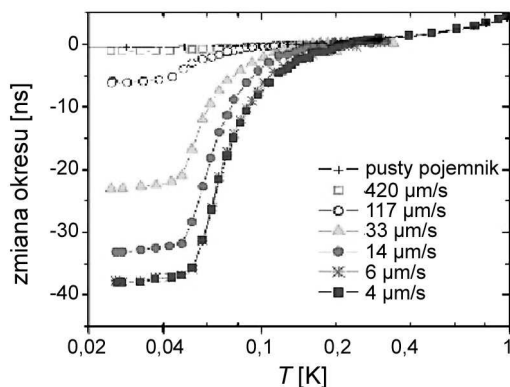
Rys. 6. Cylinder z helum umieszczony na wadze skręceń ([www.phys.psu.edu/~chan](http://www.phys.psu.edu/~chan))

W temperaturze około 2 K i pod ciśnieniem normalnym hel staje się nadpłynny. Faza nadpłynna odłącza się od fazy normalnej i nie obraca się wraz z cylindrem, dlatego masa i zarazem moment bezwładności układu biorącego udział w drganiu są mniejsze. Tym samym spada także okres drgań tego wahadła. Z pomiaru tego spadku można oszacować, jaka część ciekłego helu w danej temperaturze przeszła w stan nadpłynny.

Analogiczne pomiary po przyłożeniu ciśnienia, pod którym hel jest już kryształem, wykazują spadek okresu drgań w temperaturze około 0,2 K. Typową zmianę okresu

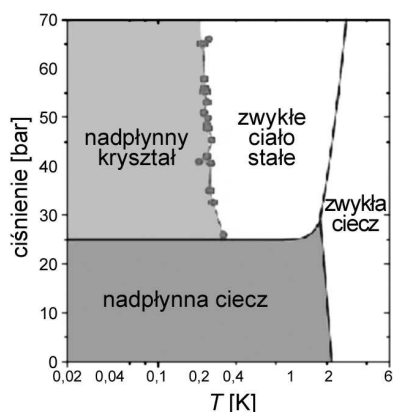


drgań w zależności od temperatury przedstawia rys. 7. Wynika stąd, że gęstość fazy nadpłynnej, nieobracającej się wraz z resztą kryształu, rośnie. Składowa nadpłynna stanowiła w zależności od ciśnienia 0,5–2% masy stałego helu.



Rys. 7. Zmiana okresu rezonansowych drgań cylindrycznego pojemnika ze stałym heliem pod ciśnieniem 5,1 MPa w zależności od temperatury układu. Spadek okresu przy ok. 0,2 K związany jest z przejściem stałego helu do fazy nadpłynnej, która przestaje się obracać i wnosić wkład do całkowitego momentu bezwładności. Z wielkości tego spadku, która zależy od maksymalnej prędkości drgań układu, można wyznaczyć gęstość składowej nadpłynnej (*Phys. Today*, listopad 2004, s. 23).

Kim i Chan powtarzali badania w różnych konfiguracjach i z różnymi materiałami, w których umieszczali hel. Wyniki doświadczeń były ze sobą zgodne i sugerują, że pod pewnym ciśnieniem i w pewnej temperaturze część stałego helu przechodzi w fazę nadpłynną. Oznaczałoby to, że układ faktycznie osiąga stan określony jako nadpłynny kryształ. Doświadczalnie wyznaczony przez Kima i Chana diagram fazowy przedstawia rys. 8. Poniżej 0,2–0,1 K

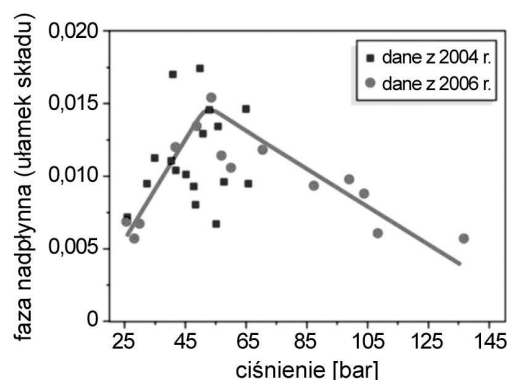


Rys. 8. Propozycja modyfikacji diagramu fazowego dla  $^4\text{He}$  uwzględniająca fazę nadpłynnego kryształu [15]

i przy ciśnieniach, przy których hel jest już kryształem, występuje faza nadpłynna. Gęstość składowej nadpłynnej

w stałym helu nie jest monotoniczną funkcją ciśnienia (rys. 9).

Interpretacja mikroskopowa tych wyników wciąż nie jest jednoznaczna. Sam pomysłodawca idei doświadczenia Leggett w komentarzu do pracy w *Science* [15] zwraca uwagę, że w stałym  $^4\text{He}$  liczba luk i dyslokacji jest o kilka rzędów wielkości za mała, by mogła prowadzić do obserwowanych ilości fazy nadpłynnej, które stanowiły 1–2% masy całego układu.



Rys. 9. Zależność ilości składowej nadpłynnej w stałym helu od ciśnienia dla bardzo niskich temperatur. Pomocnicza linia ciągła podkreśla, że ilość ta nie jest monotoniczną funkcją ciśnienia [4].

Niezależne doświadczenie z wagą skręceń wykonane przez Ann Rittner i Johna Reppy'ego pokazuje, że ilość składowej nadpłynnej w krystalicznym helu silnie zależy od historii układu [16]. Wygrzewanie próbki powoduje zmniejszanie liczby wewnętrznych defektów i dlatego ilość fazy nadpłynnej maleje.

Najnowszy wynik pracy Sébastiena Balibara i współpracowników [17], którzy wykorzystali barometr zamiast wagi skręceń, pokazuje, że za obserwowane właściwości układu odpowiedzialne mogą być granice ziaren krystalicznego helu. Takie niejednorodności struktury są jednak termodynamicznie nietrwałe, co pokazują symulacje numeryczne Bryana Clarka i Ceperleya [18]. Oznacza to, że stan podstawowy stałego helu nie może być nadpłynny, a wyniki obserwacji odnoszą się do stanów metatrwałych [19]. Nie wiadomo jednak, dlaczego różne układy doświadczalne Kima i Chana wykazywały bardzo podobne właściwości [1–4]. Stany metatrwałe powinny bardzo silnie zależeć od sposobu przygotowania układu.

## Zakończenie

Nadpłynny kryształ jest jednym z najbardziej odległych od naszej intuicji stanów kwantowych materii – jest krystaliczny i jednocześnie nadpłynny. Idea ta przyciąga uwagę badaczy, zarówno zajmujących się kwantowymi teoriami materii skondensowanej i zimnych atomów bozonowych w sieciach optycznych [20], jak i doświadczalników, wierzących, że istnieją układy fizyczne, w których stan ten zostanie odkryty. Doświadczenia Kima i Chana

wzbudziły ogromne zainteresowanie, ale, niestety, chyba nie stawiają przysłowiowej kropki nad i w poszukiwaniach nadpłynnych kryształów. Miejmy nadzieję, że ten artykuł, odwołujący się do idei uporządkowania dalekiego zasięgu, przybliżył Czytelnikom koncepcję nadpłynnego kryształu i zwrócił uwagę na obecną aktywność badań fizycznych w tej dziedzinie. Z pewnością jednak nie wyczerpuje on tej tematyki, choćby dlatego, że wciąż nie znamy ostatecznych wniosków. Być może ciąg dalszy dopisze ktoś z polskich Czytelników dzięki swoim odkryciom.

Autor dziękuje Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) za wsparcie badań grantem SFB 484.

## Literatura

- [1] E. Kim, M.H. Chan, *Science* **305**, 1941 (2004).
- [2] E. Kim, M.H. Chan, *Nature* **427**, 225 (2004).
- [3] E. Kim, M.H. Chan, *J. Low Temp. Phys.* **138**, 859 (2005).
- [4] E. Kim, M.H. Chan, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 115302 (2006).
- [5] O. Penrose, L. Onsager, *Phys. Rev.* **104**, 576 (1956).
- [6] F. London, *Nature* **141**, 643 (1938); *Superfluid*, t. II (Wiley, New York 1954), s. 144.
- [7] G.B. Hess, W.M. Fairbank, *Phys. Rev. Lett.* **19**, 216 (1967).
- [8] C.N. Yang, *Rev. Mod. Phys.* **34**, 694 (1962).
- [9] A.F. Andriejew, I.M. Lifszyc, *Ż. Eksp. Teor. Fiz.* **56**, 2057 (1969).
- [10] G.V. Chester, *Phys. Rev. A* **2**, 256 (1970).
- [11] A.J. Leggett, *Phys. Rev. Lett.* **25**, 1543 (1970).
- [12] D.M. Ceperley, B. Bernu, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 155303 (2004).
- [13] N. Prokof'ev, B. Svistunov, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 155302 (2005).
- [14] M.W. Meisel, *Physica B* **178**, 121 (1992).
- [15] A. Leggett, *Science* **305**, 1921 (2004); *Quantum Liquids: Bose Condensation and Cooper Pairing in Condensed-Matter Systems* (Oxford Univ. Press, 2006).
- [16] A.S. Rittner, J.D. Reppy, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 165301 (2006); **98**, 175302 (2007).
- [17] S. Sasaki, R. Ishiguro, F. Caupin, H.J. Maris, S. Balibar, *Science* **313**, 1098 (2006); także komentarz D. Ceperleya w *Nature Phys.* **2**, 659 (2006).
- [18] B.K. Clark, D.M. Ceperley, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 105302 (2006).
- [19] H.R. Glyde, *Nature* **444**, 693 (2006).
- [20] I. Bloch, *Nature Phys.* **1**, 23 (2005).



Dr hab. KRZYSZTOF BYCZUK zajmuje się teorią silnie skorelowanych układów kwantowych wielu ciał. Rozwija i stosuje teorię dynamicznego pola średniego do układów silnie skorelowanych elektronów w sieciach krystalicznych z przypadkowymi domieszkami oraz do układów bozonów i kondensatów Bosego–Einsteina w sieciach optycznych. Wcześniej badał jednowymiarowe układy kwantowe, jak nanorurki węglowe i druty kwantowe. W pracy doktorskiej zajmował się m.in. ułamkowymi statystykami kwantowymi dla oddziałujących cząstek. Doktoryzował się i habilitował na Uniwersytecie Warszawskim, gdzie pracuje na stanowisku adiunkta. Staże podoktorskie odbywał na Uniwersytecie Harvarda w USA jako stypendysta Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (1998–99) oraz na Uniwersytecie Augsburgskim w Niemczech jako stypendysta Fundacji Humboldta (2000–02). Obecnie pracuje na tym Uniwersytecie w ramach stażu pohabilitacyjnego (2005–08). Jest też współautorem mającego się wkrótce ukazać podręcznika do nauki fizyki w liceum.

DAVID KAISER (autor artykułu na następnej stronie) jest profesorem nadzwyczajnym w programie Nauka, Technika i Społeczeństwo w Massachusetts Institute of Technology i wykładowcą na Wydziale Fizyki MIT. W 1997 r. otrzymał doktorat z fizyki, a w roku 2000 doktorat z historii nauki (oba na Uniwersytecie Harvarda). Prowadzi działalność badawczą w dziedzinie kosmologii wczesnego wszechświata, na pograniczu fizyki cząstek i grawitacji. Jego badania historyczne skupiają się na rozwoju fizyki w XX wieku. Jest autorem książki *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics* (University of Chicago Press, 2005) opisującej, jak zindywidualizowane podejście Richarda Feynmana do fizyki kwantowej weszło do jej głównego nurtu. Był również redaktorem kilku książek na temat historii współczesnych nauk fizycznych, włącznie z najnowszą *Pedagogy and the Practice of Science: Historical and Contemporary Perspectives* (MIT Press, 2005). Jego prace ukazywały się w *Science* oraz *Scientific American*, ponadto napisał wiele specjalistycznych artykułów z fizyki i historii. Jego badania zostały uhonorowane nagrodami American Physical Society, History of Science Society, British Society for the History of Science oraz MIT. Zdobył także kilka nagród dydaktycznych na Harvardzie oraz w MIT.



# Jak kształcić mechaników kwantowych\*

David Kaiser

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

---

## Turning physicists into quantum mechanics

*Abstract:* Quantum mechanics is a theory with many philosophical ramifications that pioneers like Bohr, Heisenberg and Oppenheimer delighted in discussing in the classroom and in their textbooks. After the Second World War, many physicists abandoned this approach to teaching the subject – instead the goal was to train students to calculate with the theory, unburdened by speculative, philosophical concerns. New research suggests that this change of approach was driven by the demand for more physicists: large classes simply proved to be unsuitable venues for deep philosophical discussions. The focus on learning to calculate, however, brought many pay-offs, including the Standard Model of particle physics. As quantum computing and communications become reality, the philosophical aspects of quantum mechanics are coming back into fashion.

---

Kwantowe komputery, kwantowa kryptografia oraz kwantowa teleportacja: dzisiejsze czasopisma fizyczne bardziej niż kiedykolwiek przypominają *Star Trek*. Pojęcia te, oparte na dziwnych i sprzecznych z intuicją cechach mechaniki kwantowej, stały się realne w ostatnich latach zarówno dzięki teoretykom, jak i fizykom doświadczalnemu. Dziś wychodzą już one z laboratoriów fizycznych – przemysł wykorzystuje je w rzeczywistej produkcji. Kto wie, jakie rewolucje w telekomunikacji i technice obliczeniowej przyniosą nam te przełomowe odkrycia.

Jednakże te postępy na drodze od teorii do zastosowań ponownie roznieciły w wielu fizykach zainteresowanie niektórymi starymi kwestiami mechaniki kwantowej – interpretacyjno-filozoficznymi pytaniami, które na pierwszy rzut oka wydają się odległe o lata świetlne od przyziemnego świata inżynierii i produkcji przemysłowej. Czy coś może być w dwóch miejscach naraz? Czy jakiś obiekt może wpływać na inny w czasie krótszym niż potrzebny światłu na przebycie drogi między nimi? Czy jest naprawdę rzeczą niemożliwą – jak wskazuje zasada oznaczości – ustalenie takich właściwości obiektu kwantowego, jak jego położenie i pęd, w tej samej chwili?

Te zagadnienia filozoficzne nie są nowe. Najślynniejszym fizykiem, który zadreślał się następstwami mechaniki kwantowej, był zapewne Albert Einstein, któremu nie podobała się wrodzona przypadkowość tej teorii i który nazwał pozorną zdolność jednej cząstki do natychmiastowego wpływania na inną „upiornym działaniem na odległość”. Ale Nielsa Bohra też gnębiły takie pytania, podobnie jak Wernera Heisenberga i Erwina Schrödingera. W gruncie rzeczy większość twórców teorii kwantów, ciężko pracujących w drugiej i trzeciej dekadzie XX w.,

uważała, że mechanika kwantowa – nasz opis materii i sił w skali atomowej – wymaga nowych sposobów myślenia.

Te skomplikowane łamigłówki w dużym stopniu znikły z pola widzenia w połowie lat dwudziestych, mimo nadziei Einsteina, że znajdą się jakieś sposoby, by uratować deterministyczny opis przyrody. Nie udało się ich rozwiązać, co jasno pokazują żywe dyskusje w wydanych ostatnio książkach, jak *Programming the Universe* Setha Lloyda, lecz je po prostu ominięto. Dlaczego tak się stało?

Dużej części odpowiedzi na to pytanie, być może nieoczekiwanej, udzieli olbrzymi wpływ II wojny światowej na fizykę. W wyniku sukcesu takich wojskowych projektów, jak konstrukcja bomby atomowej i radaru, wpływowi decydenci nabrali przekonania, że to, czego im będzie trzeba po wojnie, aby zapewnić pokój, to znacznie więcej fizyków. Polityczne napięcie zimnej wojny uczyniło kilka lat później tę potrzebę jeszcze bardziej nagłą. Potężna akcja edukacyjna, która była tego skutkiem – wzmocniona w Stanach Zjednoczonych przez dziesiątki tysięcy nowych stypendiów federalnych w fizyce i naukach pokrewnych – radykalnie zmieniła sposób, w jaki uczono fizyki zarówno na amerykańskich uniwersytetach, jak i gdzie indziej.

Chociaż w USA zatrudniono wielu nowych profesorów fizyki, stosunek liczby studentów do liczby wykładowców znacznie wzrósł – w połowie lat pięćdziesiątych osiągnął trzy razy większą wartość niż przed wojną i nadal się zwiększał. W tych latach rozkwitu w Stanach szybko rosła liczba studentów fizyki niż jakiegokolwiek innego kierunku, osiągając w szczytowym roku 1969 poziom ok. 15 000 magistrantów. Jednakże wraz ze wzrostem liczebności roczników aspekty filozoficzne mechaniki kwantowej zostały wyparte z sal wykładowych. Ce-

---

\* Artykuł, opublikowany w *Physics World* 20, zes. 5, 28 (2007), został przetłumaczony za zgodą Autora i Wydawcy. [Translated with permission. © 2007 IOP Publishing Ltd]

lem stało się kształcenie „mechaników kwantowych”: studenci mieli w mniejszym stopniu przypominać bujących w obłokach filozofów, a bardziej inżynierów czy mechaników-atomistów.

Nacisk na naukę metod obliczeniowych, nieobciążoną tematami filozoficznymi o spekulacyjnym charakterze, z pewnością miał swoje dobre strony. Studenci tej ery skutecznie stosowali teorię kwantów do opisu sił jądrowych, nadprzewodnictwa i wielu innych zagadnień. Ogromny sukces Modelu Standardowego cząstek elementarnych też jest w dużym stopniu oparty na naszej fundamentalnej znajomości reguł mechaniki kwantowej.

Ale na początku lat siedemdziesiątych skutki recesji, odprężenie w stosunkach między Zachodem i ZSRR oraz ogromne cięcia wydatków na obronę i edukację spowodowały ogólny spadek liczby studentów, a studentów fizyki ubywało szybciej niż w jakiegokolwiek innej dziedzinie. Pod koniec dekady liczba studentów fizyki zmalała o połowę w stosunku do powojennego szczytu. Jak ujawniły moje badania historyczne, gdy kurczyły się roczniki studentów, do sal wykładowych i podręczników wracały fundamentalne pytania teorii kwantów. Zmiany w liczbie studentów w zadziwiający i często subtelny sposób wpływały na to, jak amerykańscy fizycy zmagali się z mechaniką kwantową; podobne tendencje zaobserwowano też w innych krajach (patrz wstawka na s. 203).

## Nacisk na filozofię

Jeszcze bardziej niż teoria względności – z jej opowieściami o kurczących się prętach, zwalnających bieg zegarów i starzejących się w różnym tempie bliźniętach – mechanika kwantowa jest nauką o rzeczach dziwnych. Cząstki tunelują przez ściany, koty wpadają w pułapkę na pół żywe i na pół martwe, obiekty oddalone od siebie o lata świetlne utrzymują ze sobą telepatyczny kontakt. Pozorna solidność świata rozwiewa się w grze prawdopodobieństw.

W latach dwudziestych i trzydziestych twórcy mechaniki kwantowej, w większości pochodzący z Europy, na wykładach i w podręcznikach nie uchylali się od bezpośredniego poruszania głębokich następstw filozoficznych przedmiotu. Żadna wyraźna linia nie oddzielała obliczeń od interpretacji. Tacy teoretycy, jak Bohr, Heisenberg, Hermann Weyl, Max Born i Arnold Sommerfeld, przerywali tok wykładu w swoich podręcznikach, aby powiązać najnowsze odkrycia w fizyce atomowej z długoletnimi tematami dociekań filozoficznych, np. do jakiego stopnia możemy w ogóle uzyskać wiarygodną wiedzę o świecie fizycznym (a co dopiero o bytach nieobserwowalnych), jaka jest rola języka w kształtowaniu naszych pojęć czy też jak przebiega aktywne filtrowanie na pozór bezpośrednich obserwacji przez nasze wcześniej ukształtowane pojęcia, takie jak przestrzeń i czas. Niektórzy przywoływali filozofów – Immanaela Kanta lub Ernesta Macha; inni o pomoc w interpretacji wyników najnowszych badań fizycznych zwracali się nawet ku wschodniemu mistycyzmowi i psychoanalizie Junga. Wszyscy zgadzali się jednak, że nowa fizyka wymaga dokładnej analizy filozoficznej.

Nawet w Stanach, gdzie fizycy wykazywali bardziej praktyczne podejście niż w Europie, panowało ogólne poczucie, że trzeba badać filozoficzne implikacje mechaniki kwantowej. W końcu lat dwudziestych i przez całe lata trzydzieste młodzi amerykańscy fizycy jak Edwin Kemble, Arthur Ruark i Henry Margenau obnosili się ze swoimi poglądami filozoficznymi w *Physical Review* i podręcznikach. Stało się wręcz normą, że recenzenci porównują i przeciwstawiają sobie najnowsze amerykańskie podręczniki mechaniki kwantowej na podstawie ich podejść filozoficznych.

Wielu najbardziej wpływowych nauczycieli tego przedwojennego pokolenia w swoich wykładach kładło na treści filozoficzne podobny nacisk. Typowy był pod tym względem popularny wykład Roberta Oppenheimera na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley. Studenci zwykle słuchali jego wykładów z mechaniki kwantowej więcej niż jeden raz; pewna zdesperowana studentka rozpoczęła nawet głodówkę, dopóki Oppenheimer nie zmiękł i nie pozwolił jej chodzić na wykład po raz czwarty. Jeszcze w końcu lat trzydziestych Oppenheimer przedstawiał mechanikę kwantową jako „radikalne rozwiązanie” palących kwestii filozoficznych, mających swe korzenie w fizyce.

### JEDNYM ZDANIEM

- Mechanika kwantowa jest teorią o wielu konsekwencjach filozoficznych, które jej pionierzy, jak Bohr, Heisenberg i Oppenheimer, z lubością omawiali na wykładach i w podręcznikach.
- Po II wojnie światowej wielu fizyków porzuciło to podejście dydaktyczne – celem stała się natomiast nauka wykonywania obliczeń w obrębie tej teorii, bez spekulacyjnych tematów filozoficznych.
- Nowe badania wskazują, że zmiana podejścia była wymuszona przez zapotrzebowanie na większą liczbę fizyków; duże roczniki okazały się po prostu nieodpowiednim forum dla głębokich dyskusji filozoficznych.
- Nacisk na naukę obliczeń przyniósł jednak wiele korzyści, w tym Model Standardowy cząstek elementarnych.
- Gdy komputery kwantowe i komunikacja kwantowa stają się rzeczywistością, wraca moda na aspekty filozoficzne mechaniki kwantowej.

Na kolejnych stronach notatek do wykładu Oppenheimer skupił się nie tylko na nowym formalizmie mechaniki kwantowej – skoncentrowanym na funkcji falowej Schrödingera – ale także na jej interpretacji fizycznej, mnóstwo uwagi poświęcając pochodzeniu i znaczeniu interpretacji probabilistycznych. Na długo przedtem, zanim stosując nowe równania przeprowadził pierwszy praktyczny rachunek, pozwalał sobie nawet na doświadczenia myślowe w stylu Einsteina, by obejść zasadę nieoznaczoności, i wykazywał, że każde z nich musiało skończyć się niepowodzeniem.

## MECHANIKA KWANTOWA W EUROPIE

Zapotrzebowanie na fizyków w Stanach Zjednoczonych wzrosło gwałtownie na początku lat pięćdziesiątych po tym, jak udowodnili oni swą przydatność dla wojska podczas II wojny światowej. Jednakże w miarę wzrostu liczebności roczników uniwersyteckich następstwa filozoficzne mechaniki kwantowej, które kiedyś dominowały w nauczaniu tego przedmiotu, były w przepelnionych salach wykładowych coraz bardziej odsuwane na bok. Ale, jak wie każdy, kto uczył się statystyki, sama tylko korelacja nie implikuje związku przyczynowo-skutkowego. Czy możemy więc być pewni, że sposób, w jaki uczono mechaniki kwantowej, jest związany z liczebnością rocznika?

Jest rzeczą interesującą, że fizycy w krajach, które doświadczyły niewielkiego wzrostu liczby studentów po wojnie, pisali podręczniki mechaniki kwantowej różniące się od podręczników ich amerykańskich kolegów. Autorzy z Niemiec, gdzie liczba studentów po wojnie wykazywała zastój, nadal podkreślali bliskie związki z filozofią, jakie zapowiadały wcześniejsze książki niemieckie. Na przykład, Wolfgang Finkelburg, współpracownik Wernera Heisenberga, włączył do swojego podręcznika z 1948 r. długi rozdział o „osiągnięciach, ograniczeniach i znaczeniu filozoficznym mechaniki kwantowej”, kończący się szczegółową dyskusją myśli filozofa Immanuela Kanta o naturze wiedzy. Podręczniki autorów francuskich podobnie kładły nacisk na filozofię, często narażając się na niepochlebne recenzje w czasopiśmie amerykańskich za „przesadne” i „nadmierne” eksponowanie materiału interpretacyjnego.

Z drugiej strony fizycy, którzy stanęli przed podobną presją skutków wzrostu liczby studentów, co ich koledzy w USA, pisali książki, które również wyglądały tak jak ich amerykańskie odpowiedniki. Na przykład, w Wielkiej Brytanii, gdzie liczba studentów fizyki osiągnęła maksimum w latach sześćdziesiątych tuż przed gwałtownym spadkiem, podręczniki mechaniki kwantowej autorstwa fizyków tam pracujących, np. *Mechanika kwantowa* Franza Mandla, zawierały tak samo mało pytań interpretacyjnych czy wymagających krótkich odpowiedzi, jak podręczniki amerykańskie.

Ten sam obraz dotyczył Związku Radzieckiego. Zniknięcia filozofii z radzieckich podręczników nie da się wyjaśnić wyłącznie strachem autorów przed wtrącaniem się partyjnych aparatczyków, który mogli ukarać fizyków za odstępstwo od oficjalnej doktryny „materializmu dialektycznego”. W końcu Stalin bardzo potrzebował broni jądrowej, więc po wojnie powstrzymywał się od przeszkadzania fizykom z powodów ideologicznych, tak jak to robił z biologami. Ponadto przynajmniej niektóre z radzieckich podręczników z lat wcześniejszych – gdy działała silna cenzura ideologiczna, ale nie wzrosła jeszcze liczba studentów – kładły duży nacisk na problemy filozoficzne.

Tak więc obraz jest chyba jasny. Tam, gdzie było wielu studentów, fizycy po obu stronach żelaznej kurtyny zmuszali ich, aby zamiast tracić czas na filozofowanie, „kręcili korbką” i rozwiązywali coraz więcej zadań rachunkowych.

Oppenheimer nie był jedyny. Notatki do wykładów innych kursów mechaniki kwantowej dla studentów z lat trzydziestych ujawniają podobny nacisk na sprawy interpretacji. Ówczesne zestawy pytań na egzaminach ogólnych, które musieli zdać doktoranci, zachowały się na kilkunastu czołowych wydZIAŁACH fizyki w całych Stanach Zjednoczonych. Wspólne dla nich wszystkich są pytania wymagające dłuższej odpowiedzi, zgłębiające drażliwe zagadnienia, np. w jaki sposób następuje redukcja paczki falowej z superpozycji możliwości do pojedynczego wyniku pomiaru. Inne dotyczą różnic między rolą obserwatora w mechanice klasycznej i kwantowej lub zmuszają studentów, by wyjaśnili, w jaki sposób zasada nieoznaczoności stanowi wyzwanie dla istoty fizycznej interpretacji.

### Liczba studentów a interpretacja – po wojnie

Po II wojnie światowej niewątpliwa rola fizyki jądrowej i fizyki ciała stałego w sukcesie wojskowych projektów typu bomby atomowej wysunęła mechanikę kwantową na czołowe miejsce w uniwersyteckich programach fizyki w USA. Formalnego zaliczenia tego przedmiotu wymagano na studiach magisterskich w całym kraju, więc już

po kilku latach prawie wszyscy studenci fizyki musieli uczęszczać na zajęcia z mechaniki kwantowej. Takie działy fizyki klasycznej, jak akustyka, optyka i termodynamika, którym studenci poświęcali większość czasu przed wojną, przestały odgrywać w programie nauczania główną rolę.

Jak jednak należało uczyć mechaniki kwantowej? W końcu lat czterdziestych niewiele zostało śladów wcześniejszych podejść dydaktycznych. W obliczu gwałtownego wzrostu liczby studentów większość wykładowców w USA zmieniła programy kursów mechaniki kwantowej, akcentując te elementy, które pozwalały uczyć studentów jak najszybciej, a jednocześnie po cichu porzucając ostatnie pozostałości jakościowych i interpretacyjnych rozważań, które przed wojną zajmowały tyle czasu na wykładach.

Można podać kilka wyjaśnień tej zmiany. Może sama dziedzina po prostu dojrzała i łamigłówek, na których utknęło pokolenie międzywojenne, znalazły z upływem czasu zadowalające rozwiązanie? Nic z tego: większość problemów interpretacyjnych, które wyłoniły się w latach dwudziestych, po wojnie nadal stanowiła zagadkę i do dziś nie została w pełni wyjaśniona. Być może wojna (wraz z powojennym wzrostem wydatków wojskowych) zmie-

niła akademików w pragmatyków; takie projekty jak radar i bomba atomowa wymagały praktycznych obliczeń, czyli zupełnie innego podejścia niż międzywojenne teoretyzowanie. A może nauczanie mechaniki kwantowej zmieniło się dlatego, że fizycy wiedzieli, iż coraz więcej studentów trafi do laboratoriów przemysłowych i rządowych, gdzie niuanse filozoficzne nie są takie ważne.

Choć te wyjaśnienia mogą być częściowo słuszne, okazuje się, że największy wpływ na nauczanie mechaniki kwantowej po wojnie miała liczebność roczników. Gdy się porównuje powojenne wykłady mechaniki kwantowej lub podręczniki tego przedmiotu w USA i innych krajach, jak ja to zrobiłem, staje się jasne, że wykładowcy, którzy mieli małe grupy, uczyli mechaniki kwantowej zupełnie inaczej niż ci, którzy mieli do czynienia z bardzo licznym audytorium.

Udało mi się dotrzeć do około tuzina kompletów notatek do wykładów mechaniki kwantowej dla I roku studiów drugiego stopnia z lat pięćdziesiątych i początku sześćdziesiątych, czyli w apogeum liczebności studentów. Niektóre z nich czerpią z dorobku najśłynniejszych nauczycieli tego przedmiotu – Enrica Fermiego, Hansa Bethego i Richarda Feynmana. Choć notatki te pochodzą z różnych uniwersytetów, siłą rzeczy są do siebie podobne: reprezentują ten sam poziom trudności, zawierają mniej więcej ten sam podstawowy materiał, a kilka z nich opiera się na tych samych podręcznikach. A jednak bardzo się przy tym różnią – nie zamieszczonymi wzorami czy dyskutowanymi zastosowaniami, ale ilością uwagi poświęconej zagadnieniom filozoficznym lub interpretacyjnym.

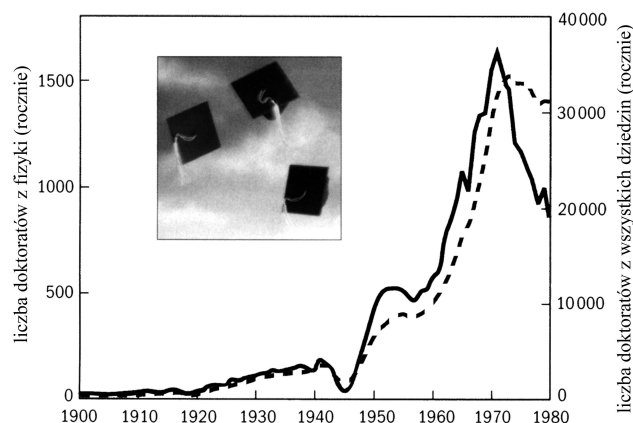
Mamy zatem jasny obraz. Kursy na najmniejszych wydziałach, na które zapisywało się najmniej studentów, konsekwentnie poświęcały znacznie więcej czasu zagadkom i paradoksom mechaniki kwantowej niż kursy dla dużych grup. Na podstawie proporcji miejsca, jakie te dyskusje zajmowały w zachowanych notatkach, okazuje się, że w małych grupach (o średniej liczebności 13 osób) wykładowcy omawiali pięć razy więcej materiału o charakterze interpretacyjno-filozoficznym niż w grupach dużych (o średniej liczebności prawie 40 studentów). Nie było jednak korelacji między rozmiarem grupy i miejscem przyszłego zatrudnienia absolwentów (szkolnictwo wyższe, przemysł czy instytucje rządowe).

Zarówno w małych, jak i dużych grupach z tej próbki zajęcia prowadzili weterani projektów czasu wojny, więc wojna nie wyjaśnia wszystkiego. Dla małych grup, podobnie jak dla dużych, wykładali też beneficjenci hojności Departamentu Obrony. Na przykład, Lothar Nordheim, fizyk odgrywający niegdyś czołową rolę w laboratorium w Oak Ridge w stanie Tennessee w ramach Projektu Manhattan, a w końcu lat czterdziestych prowadzący zajęcia dla stosunkowo małych grup na Duke University w Północnej Karolinie, nalegał, by jego studenci skupiali się na dwuznacznych, zdumiewających i jakościowych aspektach mechaniki kwantowej. Już jego pierwszy wykład dotyczył takich kwestii, jak co to znaczy, że teoria przewiduje tylko prawdopodobieństwa różnych wyników lub jak to może wpływać na przyczynowość. Równie starannie wprowadzał

zasadę nieoznaczoności, zmuszając studentów do myślenia o konsekwencjach niemożności jednoczesnego zmierzenia pewnych wielkości, np. położenia i pędu cząstki.

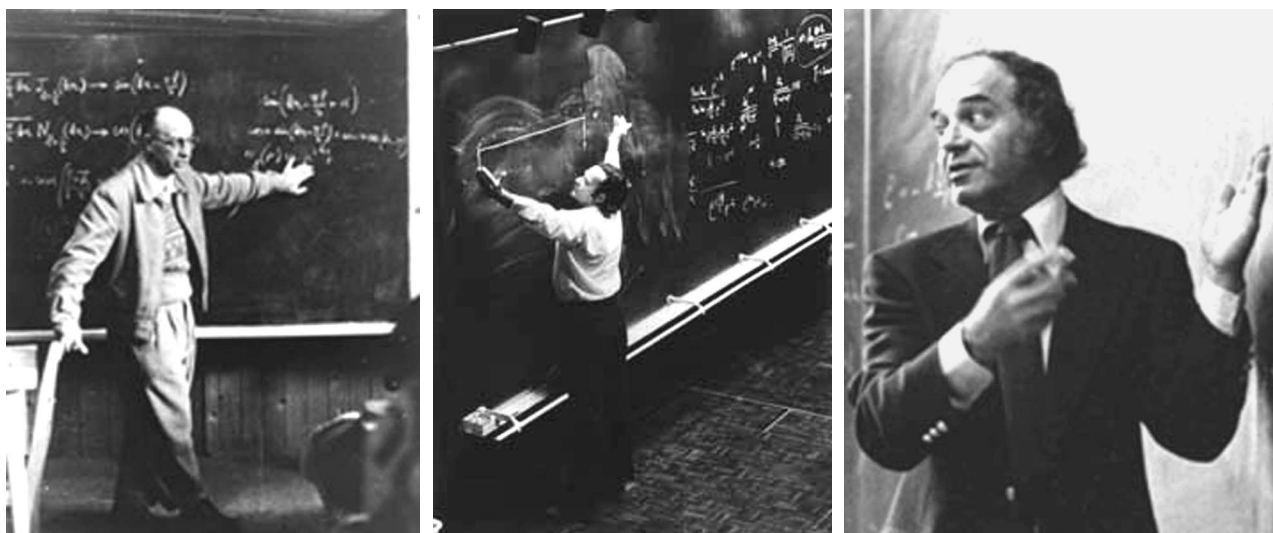
Jednakże to podejście dydaktyczne nie dawało się przenieść na duże grupy. Dyskusje typu pytanie–odpowiedź trudno było podtrzymywać w rocznikach liczących 40 lub więcej studentów; głębokie dyskusje dotyczące interpretacji źle się nadawały do dużych audytoriów. „Przy tych tematach [np. nieoznaczoności, komplementarności i przyczynowości] wykładanie nie na wiele się zdaje”, skarżył się w roku 1956 sfrustrowany Edward Gerjuoy, profesor fizyki na Uniwersytecie w Pittsburghu, który przed wojną zaliczył wykład Oppenheimera w Berkeley. „Skonsternowany student nieżyłby wie, co zanotować, a jeśli już coś zanotuje, to jego zapiski z pewnością wzbudzą zgrozę asystenta”. Przekaz był jasny: lepiej trzymać się materiału innego typu, np. transformacji układów współrzędnych, diagonalizacji macierzy lub rozwijania w szereg.

Inne przykłady: w roku 1954 na Uniwersytecie w Chicago Fermi poświęcił zaledwie dwie strony w swych notatkach zasadzie nieoznaczoności – podając luźne wprowadzenie oparte na skończonych paczkach falowych, ale bez dyskusji jakościowych – a dwa razy tyle miejsca subtelnym wielomianom Laguerre’a jako części wprowadzenia funkcji falowej elektronu w atomie wodoru. Na Uniwersytecie Cornella Bethe napisał zwięźle w notatkach do wykładu z 1956 r., że próby przechytrzenia zasady nieoznaczoności są tak niemądre i jałowe, jak uganianie się za perpetuum mobile, więc on i jego studenci przeznaczą swój czas na naukę rachunków.



Wzrost i spadek: liczba doktoratów przyznanych w USA w latach 1900–80: w fizyce (linia ciągła) i we wszystkich dziedzinach (linia przerywana). Liczba doktoratów z fizyki gwałtownie wzrosła po II wojnie światowej, pozostawiając w tyle wzrost w innych dziedzinach, ale na początku lat siedemdziesiątych spadła szybciej niż we wszystkich innych dziedzinach (na podstawie danych National Science Foundation).

Co się tyczy Feynmana, to przestrzegał on swych studentów w Caltechu, że problemy interpretacyjne „mają charakter kwestii filozoficznych i nie są niezbędne dla dalszego rozwoju fizyki”. Jego wykłady dla dużych rocz-



Przy tablicy, od lewej: Enrico Fermi, Richard Feynman i Robert Resnick (dzięki uprzejmości AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection, oraz CERN-u)

ników nie były wcale gorzej prowadzone. Wręcz przeciwnie, notatki do wymienionych wykładów wykazują jasność i dbałość o szczegóły, które potwierdzają, że prowadzący je wybitni fizycy w pełni zasłużyli na swą reputację. Jednakże w zamian za każdy dodatkowy przykład, który Fermi, Bethe, Feynman i inni przerabiali przy tablicy – jak przybliżyć wpływ pola elektrycznego na poziomy energetyczny w atomie wodoru lub jak obliczać prawdopodobieństwo rozproszenia dwu cząstek – poświęcali oni odpowiednio mniej czasu na zachęcanie studentów do wytężonego myślenia o tym, co te wszystkie wyszukane równania naprawdę mówią o świecie.

Być może nieświadomie uczyli te bardzo liczne roczniki w szczególnym stylu. Dzień po dniu wpajali pragmatyzm całkiem odmienny od podejścia rozwijanego w wielu amerykańskich salach wykładowych przed wojną, a po wojnie już tylko w garstce małych grup. Nic więc dziwnego, że tak wielu fizyków amerykańskich wolało ignorować kwestie interpretacyjne w mechanice kwantowej, a za to skupić się na jej zastosowaniu w fizyce jądrowej i fizyce ciała stałego, skąd wynikło tak wiele nowej fizyki.

## Podręcznikowe mody

Wraz z powojennym wzrostem liczby studentów zmieniły się także podręczniki mechaniki kwantowej pisane przez fizyków amerykańskich. Niegdyś recenzenci oceniali podręczniki (po części) za ich konkretne stanowisko filozoficzne, teraz zaś z reguły chwalili najnowsze pozycje za „unikanie dyskusji filozoficznych” i opuszczanie „pytań o zabarwieniu filozoficznym”, które odciągały od rachunków. Dość już „stęchłego, odziedziczonego zamieszania w sprawie położenia i pędu”, deklarował Herman Feshbach z MIT w recenzji grubego i naładowanego filozofią podręcznika francuskiego fizyka Alberta Messiah, który został przetłumaczony na angielski w roku 1961.

Od końca lat czterdziestych do roku 1980 fizycy pracujący w Stanach opublikowali łącznie 33 podręczniki mechaniki kwantowej dla pierwszego roku studiów II stopnia, jak np. *Mechanika kwantowa* Leonarda Schiffa, a dla studentów I stopnia ukazało się ponadto 20 dalszych podręczników. Książki te różniły się bardzo pod względem przyjętych metod i omawianych przykładów – niektóre trzymały się podejścia Schrödingera, inne przyjęły formalizm wektorów stanu Diraca – ale z punktu widzenia wykładania dla dużych audytoriów książki te zaczęły wyglądać dość podobnie. Wszystkie zawierały zwykle setki zadań i ćwiczeń – o rząd wielkości więcej niż zazwyczaj w amerykańskich podręcznikach przedwojennych.

Interesujący był jednak charakter zmian, a nie tylko liczba zadań. Na przykład, w pierwszym podręczniku mechaniki kwantowej wydanym w USA w roku 1929, autorstwa Edwarda Condon i Philipa Morse’a, znajdowało się 16 ćwiczeń, z których czwarta część zachęcała studentów do wyjścia poza wzory i do słownej dyskusji wyników obliczeń. Ale już na początku lat pięćdziesiątych te jakościowe pytania wymagające krótkiej odpowiedzi zaczęły znikać z amerykańskich podręczników, oscylując wokół poziomu 10%, podczas gdy liczba studentów w salach wykładowych rosła w Stanach wykładowczo. Dopiero gdy na początku lat siedemdziesiątych liczby studentów gwałtownie spadły, zaczęły pojawiać się podręczniki nowego typu, w których pytania wymagające odpowiedzi z interpretacją występują niemal w połowie zadań.

W roku 1974 Robert Eisberg z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Santa Barbara i Robert Resnick z Rensselaer Polytechnic Institute w Nowym Jorku opublikowali swoją liczącą 700 stron *Fizykę kwantową atomu, cząsteczek, ciała stałego, jądra i cząstek elementarnych*. Liczby osób rozpoczynających studia II stopnia z fizyki były wtedy mniejsze o 40% niż w apogeum z końca lat siedemdziesiątych,

i książka ta w pewnym stopniu odzwierciedlała zmieniającą się liczebność roczników. Jako dodatek do setek zadań rachunkowych Eisberg i Resnick zamieścili też długą listę „pytań do dyskusji”, z których każde wymagało odpowiedzi objaśniającej (a nie algebraicznej) takie tematy, jak charakter promieniowania ciała doskonale czarnego, tunelowanie cząstek i trudności pojęciowe związane z punktowym elektronem.

Po dwóch latach, gdy krzywa liczby zapisów osiągnęła minimum, ukazała się podobna książka autorstwa Michaela Morrisona, Thomasa Estle'a i Neala Lane'a z Rice University w Teksasie. Podręcznik zatytułowany *Kwantowe stany atomów, cząstek i ciał stałych* zawierał większość (przeszło 55%) pytań wymagających dłuższych odpowiedzi. Autorzy doszli do wniosku, że w nowych, mniejszych rocznikach najlepiej sprawdza się seria zadań wieloczęściowych, każde z obszernym wstępem przedstawiającym zakres i motywację dalszych części. Kolejne zadania zmuszały studentów do dyskusji, wyjaśnienia lub uzasadnienia wniosków.

Podręczniki dla początkujących studentów przeszły tę samą drogę. Książki opublikowane w latach 1969–78 zawierały średnio dwa razy więcej pytań wymagających krótkiej odpowiedzi w porównaniu z okresem 1959–68, co odpowiadało nagłemu spadkowi liczby studentów. Na przykład, gdy w roku 1958 ukazały się *Zasady fizyki współczesnej* autorstwa Anthony'ego Frencha, zawierały one 79 zadań, z których niecałe 9% wymagało od studentów słownej interpretacji materiału. Dwadzieścia lat później French opublikował z Edwinem F. Taylorem *Wstęp do fizyki kwantowej*, z 244 zadaniami, z których prawie jedna trzecia miała charakter interpretacyjny. W ten sposób, gdy pękła już bańka liczby studentów, dalekie echa rozważań filozoficznych wróciły do amerykańskich sal wykładowych.

## Ponowny boom i spadek

Statystyka zapisów na studia w USA w bliższych nam czasach odtwarza poprzedni wzrost i spadek, z ogromnym skokiem w latach osiemdziesiątych wywołanym głównie zwiększeniem wydatków na obronę za czasów administracji Reagana, a następnie ostrym spadkiem po zakończeniu zimnej wojny. To zapewne ta statystyka spowodowała, że działalność badawcza i dydaktyczna w tak soczystych pod względem filozoficznym tematach jak kwantowe komputery, kryptografia i splątanie, które zmuszają fizyków do szukania odpowiedzi na wiele pytań leżących u podstaw mechaniki kwantowej, zaczęła się dopiero w końcu lat dziewięćdziesiątych. Choć te zagadnienia były w obiegu

od co najmniej 70 lat, dziś, gdy „dziwaczność” kwantowa jest zaprzęgana do urządzeń nowej generacji, wielu fizyków i ich studentów na nowo dyskutuje, jak najlepiej interpretować superpozycję, prawdopodobieństwa i splątanie.

Nigdy nie istniał jeden najlepszy sposób nauczania mechaniki kwantowej. Moim celem nie jest ani sianie nostalgii za zaangażowanym filozoficznie stylem Oppenheima czy Nordheima, ani potępienie pragmatycznego podejścia Fermiego, Bethego i Feynmana. Chodzi mi raczej o uwypuklenie wyboru, którego fizyk musi dokonać przed rozpoczęciem wykładu. Wybór tematów do omówienia i zadań domowych jest odbiciem głębszej decyzji, jakiego typu fizyka chcemy wykształcić. Czy nowe pokolenie powinno być nastawione filozoficznie i troszczyć się o drobne szczegóły interpretacji pojęciowej? Czy może fizycy powinni raczej doskonalić swoje umiejętności obliczeniowe, zaprzęгая równania Heisenberga i Schrödingera do rozwiązywania coraz bardziej zawiłych problemów i analizy coraz bardziej wyszukanych zjawisk? Te rywalizujące ze sobą ideały rozkwitały w różnych warunkach pedagogicznych.

O dziwo, wielu zagadnień filozoficznych związanych z mechaniką kwantową używa się dziś do zwabienia potencjalnych studentów fizyki. Gdy komputery kwantowe i komunikacja kwantowa staną się komercyjną rzeczywistością, jutrzejsi studenci mogą zmagać się z tymi samymi kwestiami filozoficznymi, które stanowiły wyzwanie dla ich poprzedników prawie sto lat wcześniej.

Źródło: Magdalena Staszal  
Instytut Fizyki Doświadczalnej  
Uniwersytet Warszawski

## Lektura uzupełniająca

- D. Kaiser, „Cold War requisitions, scientific manpower, and the production of American physicists after World War II”, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* **33**, 131 (2002).
- D. Kaiser, „The postwar suburbanization of American physics”, *American Quarterly* **56**, 851 (2004).
- D.J. Kevles, *The Physicists: The History of a Scientific Community in Modern America*, wyd. III (Harvard University Press, Cambridge, MA 1995).
- S.W. Leslie, *The Cold War and American Science* (Columbia University Press, New York 1993).
- S. Lloyd, *Programming the Universe: A Quantum Computer Scientist Takes on the Universe* (Jonathan Cape, London 2006).



# Pomiar częstości optycznych – szansa dla zegarów optycznych i nie tylko\*

John L. Hall

*JILA, NIST oraz University of Colorado, Boulder, USA*

---

Defining and measuring optical frequencies: the optical clock opportunity – and more

---

*Nobel Lecture, 8 December 2005, Stockholm*

## Wstęp

Retrospektywne spojrzenie na niektóre doniosłe wydarzenia często sugeruje ich nieuchronność, która wówczas, gdy się one działy, wcale nie była oczywista. Istnieje dziś tendencja do skupienia się na konkretnym projekcie badawczym, wystarczająco prostym i przejrzystym, by jego kierownik mógł oczekiwać pomyślanej realizacji postawionego sobie zadania naukowego. Projekt taki przyniesie jednak zapewne tylko umiarkowane skutki, widoczne zresztą – niechby nawet nieco mgliście – od samego początku. Wielkie możliwości „optycznego grzebienia częstości”, powstałe dzięki niezwyklej syntezie niezależnego rozwoju czterech różnych pól: ultrastabilnych laserów, ultraszybkich laserów impulsowych, materiałów ultranieliniowych i ultraczułej spektroskopii laserowej, objawiły się niespodziewanie. Owe oddzielne pola łączyło wspólne – choć niezależne – dążenie do opracowania prostych, lecz skutecznych technik wykorzystywania sygnałów elektromagnetycznych z zakresu widzialnego do własnych potrzeb w optyce – spektroskopii itp. Dzięki tej Wielkiej Syntezie Techniki Laserowej z lat 1999–2000, czczonej dziś pod zwięzłą nazwą „optycznego grzebienia częstości”, arsenał narzędzi optyki przeżył istny rozkwit. Oddając hołd naszemu patronowi, doktorowi Noblowi, wyrażmy to kwiecistej i dobitniej: na polu optyki nastąpiła eksplozja!

Powstałe nowe możliwości i narzędzia są niewiarygodnie bogate, co z kolei stymuluje postęp w wymienionych czterech dziedzinach udziałowych. Na przykład, po gorączce pierwszej generacji pomiarów częstości, dziś zastosowania grzebieni drugiej generacji obejmują: synchronizację o małych fluktuacjach czasu (ang. low-jitter) ultraszybkich źródeł laserowych, spójne zszywanie widm oddzielnych femtosekundowych źródeł laserowych prowadzące do poszerzenia spektralnego i czasowego skrócenia

impulsu złożonego, syntezę kształtów fal optycznych do eksperymentów ze sterowaniem spójnym, precyzyjne pomiary nieliniowości optycznej z wykorzystaniem czułości fazowej technik w.cz., spójne przechowywanie kilkuset impulsów sekwencyjnych, a następnie wykorzystywanie ich łącznej energii do wytwarzania odpowiednio silniejszych impulsów o mniejszej częstości repetycji, itp. Atrakcyjne tematy badań dla trzeciej generacji to precyzyjna zdalna synchronizacja pól we wnękach akceleratorowych, stabilne oscylatory referencyjne do wielkich sieci teleskopów mikrofalowych oraz potencjalne zmniejszenie szumu fazowego w oscylatorach używanych w teleskopach do obserwacji dalekiego kosmosu (NASA, VLBI itp.). A jest to tylko część zamiarów z pierwszych pięciu lat.

Co zatem – dokładnie biorąc – zmieniło się w dziedzinie metrologii precyzyjnej? Przez ostatnie półwiecze rozkoszowaliśmy się potęgą metod spektroskopii sygnałów w.cz. (pomyślcie choćby o użyteczności obrazowania za pomocą rezonansu magnetycznego!), a teraz metody wykorzystujące sterowanie częstościowe możemy już stosować w spektroskopii optycznej. Istnieje tu jednak naprawdę ważna różnica: liczba cykli na sekundę jest w zakresie optycznym ok. 10 milionów razy większa niż w zakresie radiowym, aczkolwiek już procesy w.cz. z tego drugiego zakresu są kilka milionów razy szybsze niż skala ludzkiej percepcji. Istota postępu polega na tym, że te ogromne liczby przekładają się na odpowiedni wzrost rozdzielczości (patrz dyskusja poniżej). Za pomocą naszych zmysłów potrafimy rozróżnić połówki, ćwiartki, dziesiąte części, być może jeszcze mniejsze ułamki całości. Zdolności te ulegają tu zwiększeniu o czynnik równy iloczynowi wielkich liczb, co nas przenosi na pole metrologii o dokładności względnej rzędu  $10^{-14}$ . Możemy ją zresztą jeszcze poprawić, uśredniając niezależne pomiary.

---

\*Wykład noblowski, wygłoszony 8 grudnia 2005 r. w Sztokholmie, został przetłumaczony za zgodą Autora i Fundacji Nobla. [Translated with permission. Copyright © 2005 by the Nobel Foundation]

## Wzorce metrologiczne a nauka

### Ścisłe sprzężenie

Czasem nagromadzenie postępu w szczegółach jakiegoś naukowego dociekania prowadzi nas do nowej, wspinającej wizji pewnych części naszego doświadczenia – na ogół pojawia się wtedy nowa perspektywa lub organizacyjna zasada działania. Za takim objawieniem kryje się jednak zwykle masa wytężonej pracy, ilościowe opracowywanie wyników doświadczeń, które są zazwyczaj wyrażane w jednostkach bezwzględnych. Czasami sam eksperyment daje możliwość własnej, wewnętrznej kalibracji, ale na ogół potrzebne są praktyczne wzorce, z którymi moglibyśmy porównać nasze wyniki. Aby wyniki naukowe mogły być potwierdzone w kilku innych laboratoriach, same wzorce też oczywiście muszą być powielone i udostępnione. Najlepiej, jeśli potrzebny wzorzec jest oparty na jakimś fundamentalnym zjawisku fizycznym, w idealnym przypadku – kwantowym, tak by można go było realizować niezależnie w różnych laboratoriach z taką samą dokładnością. Ów proces realizacji wzorców [1] sam znajduje się teraz w fazie rewolucyjnej!

### Wzorzec długości i jego związek z częstotliwością oraz czasem

Warto poświęcić nieco uwagi dyskusji wzorców metrologicznych, za które możemy na początek przyjąć 7 wzorców jednostek podstawowych SI, czyli Międzynarodowego Układu Jednostek Miar (franc. *Système International d'Unités*), współczesnego systemu metrycznego. Jednostki te to kilogram (masa), sekunda (czas), metr (długość), amper (natężenie prądu elektrycznego), kelwin (temperatura bezwzględna), mol (ilość substancji) i kandela (światłość). Z tych siedmiu jednostek można wyprowadzić ok. 30 użytecznych jednostek pochodnych. Dla naszego celu, którym jest doprowadzenie dokładności pomiarów do ostatecznych granic, niewątpliwie wielkościami oferującymi największą potencjalną dokładność są czas i długość. Doba była naturalną jednostką czasu od wieków, za to wzorce długości zawsze wydawały się sztuczne i arbitralne. W roku 1791 zaczęto mówić o systemie metrycznym, a szlachetnie urodzeni członkowie Francuskiej Akademii Nauk z czasów Oświecenia, którzy nie mieli żadnego doświadczenia w dziedzinie metrologii, postanowili, że metr zostanie zdefiniowany jako pewien mały ułamek ( $\frac{1}{4} \cdot 10^{-7}$ ) obwodu koła wielkiego Ziemi przechodzącego przez bieguny oraz Francję. Oparcie wzorca na geodezji wprowadziło oczywiście pewne ograniczenia w praktycznej pracy laboratoryjnej, ale przynajmniej jednostkę długości stanowiła odtąd określona i w zasadzie absolutna odległość. Była to pożądana zmiana, gdyż przedtem, jak pokazują np. wystawy w Brunszwiku i na greckiej wyspie Thira (dawniej Santorin), stosowano sekwencje wzorców opartych na długości rąk kolejnych książąt obejmujących władzę. Na międzynarodowej konferencji poświęconej sprawie metra w 1875 r. za dobry pomysł na realizację wzorca uznano trwałą sztabę metalu. Nie był to wzorzec w pełni uniwersalny i dający

się zrealizować w sposób niezależny, ale fabryka mogła wyprodukować wiele takich wzorcowych sztab i potwierdzić ich równoważność.

Spółeczność krajów systemu metrycznego przychylnie przyjęła w roku 1889 ulepszenie wzorca długości – sztabę o przekroju w kształcie litery X (tzw. Międzynarodowy Prototyp Metra). Prototyp ten, wykonany ze stopu platyny i irydu, miał dwie wygrawerowane linie, przy czym metr zdefiniowano jako odległość między nimi w temperaturze 0 °C i pod normalnym ciśnieniem atmosferycznym, zmierzoną za pomocą specjalnego układu. Przy użyciu komparatora optycznego wykalibrowano 30 nowych sztab i rozprowadzono – po dwie – do różnych krajów.

W roku 1890 Albert Michelson odkrył wyjątkową spójność czerwonej linii kadmu, a w 1892 r. wykorzystał ją w swym nowym interferometrze do wyznaczenia długości Międzynarodowego Prototypu Metra. Pomiar wykazał, że tak zdefiniowany metr ma długość 1553 164,13 długości fali czerwonej linii Cd, zmierzonych w powietrzu pod ciśnieniem atmosferycznym 760 mmHg i w temperaturze 15 °C. Za te i inne, podobne prace Michelson w 1907 r. otrzymał Nagrodę Nobla. Problemem ograniczającym dokładność była naturalnie rozszerzalność cieplna, gdy więc Charles-Édouard Guillaume (dyrektor Międzynarodowego Biura Miar i Wag, BIPM) wynalazł inwar, stop żelaza, niklu i węgla o małym współczynniku rozszerzalności, w roku 1920 uhonorowano go za to Nagrodą Nobla. Definicja metra w układzie SI pozostawała niezmienną przez 85 lat – metalowe sztaby sprawowały się dobrze, a fotoelektryczne oczy komparatorów optycznych były niestrudzone.

Doświadczenia spektroskopowe i wspierająca je mechanika kwantowa prowadziły do lepszego rozumienia światła i budowy ulepszonych jego źródeł. Potrzeby pomiarowe podczas obu wojen światowych zmieniły klimat wokół metrologii, a kłopoty transportowe uwypukliły korzyści płynące z posiadania niezależnie odtwarzalnych wzorców opartych na fizyce kwantowej. Wreszcie, w 1960 r., XI Generalna Konferencja Miar zdefiniowała na nowo międzynarodowy wzorzec metra jako długość 1650 763,73 długości fali w próżni światła pomarańczowego wysyłanego w wyniku przejścia między odpowiednimi poziomami energetycznymi w atomie izotopu kryptonu o liczbie masowej 86. Na podstawie tej definicji można powiedzieć, że długość fali  $\lambda$  odpowiadającej temu przejściu jest równa  $1/1650\,763,73\text{ m} = 0,605\,780\,211\ \mu\text{m}$ . Przyjęta definicja mówiła o atomie niezaburzonym, ale w świetle emitowanym przez lampę wyładowczą stosowaną do praktycznej realizacji takiego metra obserwowano pewne przesunięcia. Ciśnienie i warunki wyładowań w lampie ustabilizowano dzięki jej używaniu przy ustalonym natężeniu prądu oraz określonym ciśnieniu i temperaturze (punktu potrójnego ciekłego azotu). Przepływ gazowego  $\text{Kr}^+$  wywołany obecnością pola elektrycznego wprowadzał jednak różnicę długości fali światła emitowanego z obu końców komórki. Gdy zaś wykonano pomiary porównawcze wzorca przy użyciu lasera, odkryto dodat-

kowy problem związany z przesunięciami dopplerowskimi wysyłanego światła zależnymi od odległości od osi lasera.

W latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX w. wprowadzano i udoskonalano różne stabilizowane układy laserowe, a długości fali mierzono i porównywano w różnych laboratoriach państwowych. Wszystkie te układy rywalizowały o miano kolejnego międzynarodowego wzorca długości. Do Konwencji Metrycznej należało w owych czasach 48 państw, więc wybór jednego spośród licznych proponowanych układów byłby trudny od strony politycznej. Ponadto żaden z tych układów nie przewyższał wyraźnie pozostałych pod względem łącznej funkcjonalności, kosztów i stopnia złożoności, a od strony naukowej atrakcyjniejsza wydawała się nowa definicja wzorca długości oparta na prędkości światła przyjętej za wielkość znaną dokładnie. Na podstawie serii pomiarów laserowych wykonanych w kilku laboratoriach metrologicznych przyjęto jej zaokrągloną wartość równą 299 792 458 m/s. Redefinicja z 1983 r. ma zatem postać:

**Metr jest długością drogi przebywanej przez światło w próżni w czasie  $1/299\,792\,458$  s. Prędkość światła  $c$  jest równa dokładnie  $299\,792\,458$  m/s. Sekunda jest wyznaczona za pomocą zegara cezowego z niepewnością względną standardową  $U = 10^{-14}$ .**

Generalna Konferencja Miar zarekomendowała wówczas także kilka innych źródeł promieniowania jako możliwych realizacji wzorca metra, np.:

**Długość fali  $\lambda_{\text{HeNe}}$  lasera helowo-neonowego stabilizowanego jodem wynosi  $632,991\,398\,22$  nm, z niepewnością względną standardową  $U = 2,5 \cdot 10^{-11}$ .**

Celem wszystkich tych zmian definicji nie było tylko poprawienie jej dokładności, ale także zminimalizowanie zmiany poprzedniej długości metra [2]. W każdym razie wraz ze zdefiniowaną prędkością światła częstość optyczna (powiązana z czasem) może służyć jako jednostka długości.

#### *Fundamentalne aspekty fizyczne redefinicji jednostki długości*

W czasach, gdy zmieniano definicję metra, wyrażano wątpliwości, czy celowa jest zmiana fizycznej podstawy definicji. Jeśli na przykład w przyszłości mielibyśmy odkryć, że niektóre „stałe fizyczne” w rzeczywistości zmieniają się powoli z upływem czasu, to można było się obawiać, że nowa definicja może mieć wpływ na rozwój wiedzy, wręcz go ograniczać, a w każdym razie utrzymywać nas w nieświadomości takich globalnych zmian, które nie zmieniałyby odkrywanych przez nas zależności fizycznych. Czy jednak w ogóle istnieje obserwowalne zjawisko różnicujące te zmiany? Przed rokiem 1960 przyjmowaliśmy za podstawę pomiaru długości odległość między pewnymi płaszczyznami sieci krystalicznej stopu Pt-Ir, z którego zrobiono sztabę wzorca metra; od strony fundamentalnej odległość ta jest związana z mechaniką kwantową, elektrycznością i magnetyzmem. Uwzględniając zaś drgania termiczne cząsteczek w lekko anharmonicznych potencjałach międzyatomowych, możemy założyć, że poprzez rozszerzalność cieplną także pewną rolę odgrywają tu masy

jąderek atomowych, a tym samym oddziaływania silne. Może wraz z redefinicją metra z 1960 r. poprzez długość fali promieniowania atomów kryptonu umożliwiliśmy powstanie pewnego nieładu? Mechanika kwantowa, elektryczność i magnetyzm wciąż odgrywają w tej definicji fundamentalną rolę, ale masa atomu występuje tu tylko w poprawce na masę zredukowaną, a nie poprzez efekty cieplne. Nowa „stała” – prędkość światła – służy jako wymiarowa, liniowa stała skalowania. Na pierwszy rzut oka redefinicja z 1983 r. wydaje się czymś zupełnie innym niż definicja kryptonowa z roku 1960, ale w gruncie rzeczy powtarza tylko ideę wykorzystania różnicy poziomów energetycznych (tyle że teraz mamy Cs w definicji sekundy zamiast Kr w definicji energii przejścia optycznego), połączoną w tym wypadku z zamianą jednostek. Kto wie, czy w tym wszystkim nie kryje się jakaś pułapka?

Doszliśmy dziś do tego, że układ SI zaczyna już funkcjonować z sześcioma, a nie siedmioma jednostkami podstawowymi. Metr ulega degradacji do roli jednostki pochodnej, a znaczenie czasu i częstości jeszcze bardziej wzrasta. Są to początki długiej epopei, w której jednostki podstawowe SI będą wystawione na rywalizację ze spektakularnymi postępami „na dnie dewara” [3], dającymi nam wzorzec volta oparty na zjawisku Josephsona (Nagroda Nobla 1973) czy też kwantowy wzorzec oma oparty na zjawisku von Klitzinga (Nagroda Nobla 1985). Połączone jako  $V^2/\Omega$ , dają elektrycznego wata, podczas gdy wat z układu SI – definiowany jako džul na sekundę – ma wymiar  $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$ . Związek między nimi określają m.in. eksperymenty z udoskonaloną wagą prądową (ang. watt balance) [4]. Od niedawna tranzystor jednoelektronowy zaczyna umożliwiać liczenie elektronów przepływających w ciągu sekundy, co daje związek jednostek mechanicznych z amperem, jednostką SI natężenia prądu elektrycznego. Takie pomosty między metrologią i fizyką kwantową stają się dziś tematami „gorącymi” [1,5]. Wspaniały rozwój metrologii upoważnia także do stawiania pytań – silnie motywowanych również przez postępy kosmologii i astronomii – o „dokładność” i „niezmiennność czasową” wartości rozmaitych wielkości używanych do opisu rzeczywistości fizycznej.

#### **Zegary i czas**

Wielkością, którą potrafimy mierzyć najdokładniej, jest czas, stąd jego pomiary zawsze przyciągały zaprzysięgłych badaczy. Ponadto przy dzisiejszych metodach sterowania za pomocą rozmaitych czujników i mikroprocesorów wiele parametrów fizycznych można wyznaczyć poprzez pomiary częstości, więc całe rzesze naukowców z innych dziedzin chcą je wykorzystać do wydobycia najsubtelniejszych szczegółów swych własnych pomiarów. (Mimo to wiele naprawdę ważnych tematów badań nie rozwinęło się jeszcze do tego stopnia, by owe narzędzia częstościowe były w nich użyteczne, np. podejmuje się zmieniające świat decyzje z zakresu ochrony powietrza przed zanieczyszczeniami, chociaż właściwie nie mamy nawet pewności co do kierunku przebiegu niektórych zjawisk).

Dla technologów z całego świata wzrost dokładności pomiaru czasu stanowi przedmiot wielkiego zainteresowania i rywalizacji. W dużej części dzieje się tak ze względów wymienionych w uzasadnieniu tegorocznej Nagrody – skok możliwości o kilka rzędów wielkości jest czymś niezwykle w każdej dziedzinie, a co dopiero takiej, w której dokładność pomiaru była już na najwyższym poziomie, doprowadzonym do fundamentalnych granic.

Zainteresowanie rachubą czasu stanowiło od zawsze część historii ludzkości, ale dopiero w kilku ostatnich wiekach pewne grupy szczęśliwców były na tyle uniezależnione od bieżących kolei losu, by móc spokojnie pomyśleć o Przyrodzie; dzięki temu *c z a s* objawił się także jako parametr doświadczalny. Dziś kwestii, dlaczego warto się interesować czasem, możemy się już przyjrzyć z naukowego i doświadczalnego punktu widzenia. Dla miłośników dokładności oczywistym powodem jest fakt, że *c z a s* jest najpotężniejszą wielkością metrologiczną.

#### Skalowanie dokładności osiągalne przy pomiarach czasu

Dokładność pomiarów czasu można zwiększać w zasadzie bez ograniczeń poprzez zwiększanie czasu trwania pomiaru i po prostu zliczanie rosnącej liczby cykli pewnego regularnie okresowego zjawiska. Silniejszy wzrost ilości informacji ze wzrostem czasu trwania pomiaru jest jednak możliwy wówczas, gdy mamy dobre źródło, które zachowuje spójność od początku do końca pomiaru. (Dla celów tego wywodu możemy przyjąć, że owa „spójność” oznacza tyle, że jeśli znamy fazę cyklicznych drgań na początku eksperymentu, to nasze źródło jest wystarczająco stabilne, by fazę drgań w chwilach późniejszych, pod koniec pomiaru, można było przewidzieć z dokładnością do jednego radiana). W takim przypadku możemy mieć dokładność pomiaru rosnącą z przedziałem czasowym  $\tau$  pomiaru jak  $\tau^{3/2}$ . Aby w prosty sposób wyjaśnić tę zależność, podzielmy długość przedziału na trzy równe części; każda z nich będzie obejmowała  $N/3$  zliczeń. Na odcinku startowym porównajmy zegar referencyjny z zegarem testowanym; precyzja względna takiego pomiaru jest równa  $(N/3)^{-1/2}$ . Na odcinku środkowym zanotujmy tylko liczbę zliczeń,  $N/3$ . Na ostatnim odcinku ponownie oszacujmy analogową zależność fazową między falą badaną i falą referencyjną; precyzja względna znowu wynosi  $(N/3)^{-1/2}$ . Odjęcie dwóch faz analogowych zwiększa niepewność jednego pomiaru  $2^{1/2}$  razy, zatem w sumie dokładność względna wynosi  $2^{1/2}(N/3)^{-3/2}$ . Dla pomiaru częstości mikrofalowych rzędu  $10^{10}$  Hz możemy w jednosekundowym pomiarze uzyskać wzrost dokładności  $10^5$  razy. Komercyjne przeliczniki przy rozsądnym sygnale wejściowym potrafią już rejestrować 12-cyfrowe liczby zliczeń w ciągu 1 s. Widać, że jeśli będziemy umieli w odpowiedni sposób zmierzyć częstość spójnego źródła, to możemy uzyskać ogromny wzrost dokładności pomiaru. Nic więc dziwnego, że mamy sytuację, w której nie tylko metrologowie, ale i filozofowie, żeglarze czy rolnicy interesują się zegarami, czasem oraz porami roku [6]. Nasz najlepszy sprawdzian, czy istnieje promieniowanie grawitacyjne przewidywane przez Einsteina, odwołuje się do

skrócenia okresu jednego roku obserwowanego dla podwójnego pulsara Hulse’a–Taylora; fizyka zegara orbitalnego łączy się tu z fizyką kwantowych wzorców częstości na Ziemi. Ta wspaniała praca została uhonorowana Nagrodą Nobla w 1993 r.

#### Z czego składa się zegar?

Trzy podstawowe elementy zegara to źródło regularnych zdarzeń, przelicznik–integrator do ich zliczania oraz odpowiedni mechanizm odczytowy do pokazywania aktualnego wyniku zainteresowanej osobie lub maszynie. Pod wieloma względami najbardziej interesujące jest źródło częstości, gdyż jest to z natury rzeczy układ analogowy, tak zaprojektowany, by miał możliwie największą wewnętrzną stabilność wykorzystywanych drgań fizycznych podczas odczytu informacji. W tej grze bardzo się liczą niuanse i subtelność. Jest zwykłą koleją rzeczy, że sprawność zegarów opartych na jakimś dobrze znanym źródle regularnych „tyknięć” zwiększa się dzięki pracy wielu ludzi przez wiele lat, by w końcu zegary te stały się nagle przestarzałe wskutek wprowadzenia stabilnego oscylatora nowego, lepszego typu. Nowa idea musi być związana ze znacznym postępowaniem, by mogła już u swego zarania konkurować z techniką poprzednią, ulepszaną przecież w wielu etapach. Mimo to niektóre techniki żyją bardzo długo, np. wciąż można kupić dobry zegarek na rękę wykorzystujący drgania skrętne sprężyny, chociaż idea koła balansowego została przez Christiaana Huygensa zastosowana już w 1675 r.

Rachuba czasu cieszyła się dużym zainteresowaniem, odkąd człowiek zaczął zajmować się rolnictwem, ale zainteresowanie to jeszcze bardziej wzrosło w czasach rozwoju lukratywnego handlu międzynarodowego – „nieuniknionych” zatonięć statków można byłoby uniknąć dzięki lepszej znajomości położenia na morzu (przede wszystkim długości geograficznej). Ustanowiona w 1714 r. przez brytyjski parlament Longitude Prize (ponad 10 milionów dolarów na dzisiejsze pieniądze) przykuła uwagę Johna Harrisona, wynalazcy, który jej zdobyciu poświęcił około 40 lat swej pracy. W roku 1761 jego chronometr H-4 pokazywał czas z dokładnością 0,2 sekundy na dobę, czyli miał dokładność względną  $\delta v/v \approx 2,5 \cdot 10^{-6}$ , nawet na morzu. Przekraczało to kilkakrotnie wymagania, ale początkowo wypłacono mu tylko połowę nagrody; spór dotyczył po części prawa do własności intelektualnej, a po części problemem był konflikt interesów w łonie kapituły nagrody (całą historię dobrze opowiedziano w książce [6]). Dzisiejsi klienci precyzyjnej rachuby czasu to sieci telewizyjne (dla potrzeb synchronizacji), operatorzy telefonii komórkowej, użytkownicy GPS-u, którym potrzebna jest skrajnie duża dokładność, radioastronomowie, agencje kosmiczne (np. NASA) oraz rozmaite inne dziedziny nauki, w których wartości wielkości fizycznych są wyznaczane metodami częstościowymi.

**Rozwój źródeł częstości – w poszukiwaniu dokładności.** Z dyskusji parametrów zegara mechanicznego lub oscylatorów elektronicznych opartych na modach wibracyjnych kryształu kwarcu jasno wynika, że częstość pod-

stawową określają rozmiary mechaniczne. Urządzenie takie może być stabilne i precyzyjne w tym sensie, że odczyt może zawierać wiele cyfr, lecz nie można się w nim powoływać na żadną ustaloną czy naturalną częstość. Mimo to stabilność niektórych układów krystalicznych może być znaczna – dryf dokładności względnej większy od  $10^{-6}$  na dobę stopniowo zmalał do obecnej wartości mniejszej od ok.  $10^{-10}$  na dobę, podczas gdy względna zmiana częstości w zegarach mechanicznych związana ze zmianami przyspieszenia ziemskiego jest na poziomie  $10^{-9}$ . Wielka częstość elektronicznych oscylatorów z powodzeniem służyła do wygodnej interpolacji między „tyknięciami” ustanowionego przez Konwencję Metryczną w roku 1875 wzorca absolutnego, którymi były mierzone raz na dobę położenia zenitalne Słońca. (Później serie danych o obrocie Ziemi oparto na teleskopowych obserwacjach początkowych chwil zakryć różnych gwiazd i planet przez Księżyc). W latach pięćdziesiątych XX w. oscylatory elektroniczne były już tak udoskonalone, że można było wyznaczyć względną zmianę prędkości kątowej ruchu obrotowego Ziemi rzędu  $10^{-8}$ , przypisywaną zmianom momentu bezwładności układu Ziemia–atmosfera wywołanym przez pływy oceaniczne wzdłuż południków i wielkie burze. Metrologicy pragnęli wyeliminować tę zmienność, lecz potrzebowali do tego wzorca naprawdę absolutnego i uniwersalnego, a nie lokalnego i zmiennego. W 1960 r. przyjęto więc za nowy wzorzec określoną liczbę sekund w astronomicznym roku zwrotnikowym 1900. Motywacja była zapewne dobra, gdyż obieg Ziemi wokół Słońca podlega mniejszym perturbacjom. Z drugiej jednak strony trudno jest rozkoszować się pełną precyzją zegara-oscylatora, który „tyka” jedynie raz na rok. Z zasad metrologii wynika, że wolelibyśmy, aby źródło częstości podstawowej było urządzeniem o bardzo wielkiej częstości, tak by w pomiarach interesujących nas zjawisk łączna wielokrotność wzorcowych „tyknięć” była ogromną liczbą, a nieunikniony szum i niepewność resztkowego ułamka analogowego jednostki były jak najmniejsze.

#### *Zegary elektroniczne wykorzystujące przejścia kwantowe*

Rozwijając metodę wiązek atomowych, za którą Otto Stern otrzymał Nagrodę Nobla w 1943 r., Isidor Isaac Rabi wprowadził metody rezonansowe, umożliwiające sondowanie z wielką precyzją wewnętrznych (nadsubtelnych) kwantowych stanów energetycznych atomów takich pierwiastków jak cez. Prace te zostały uhonorowane Nagrodą Nobla w 1944 r. Wykorzystując w ten sposób atomy, można było liczyć na spełnienie wymagań niezależności realizacji oraz uniwersalności, stawianych wzorcowi. W dodatku częstości przejść leżały blisko górnego skrajnego zakresu radiowego, co optymalizowało także aspekty metrologiczne. Pierwszy zegar wykorzystujący wiązki atomowe, zbudowany w 1949 r. w amerykańskim National Bureau of Standards (NBS), był oparty na mikrofalowych przejściach w amoniaku, a w roku 1955 w brytyjskim National Physical Laboratory (NPL) oraz w NBS działały już zegary na wiązkach cezu. W tym samym roku Norman F. Ram-

sey ogłosił wynalezioną przez siebie metodę rozdzielonych pól zmiennych (patrz *PF* 42, 625 (1991) – red.), za którą w 1989 r. otrzymał Nagrodę Nobla. Jego idea podwójnego wzbudzenia polegała na tym, aby wzbudzić odpowiednie atomy, odczekać pewien czas, w którym ich wewnętrzna faza zmienia się (w przypadku idealnym) bez zaburzeń, po czym za pomocą drugiego impulsu wzbudzającego dokonać interferometrycznego porównania szybkości ewolucji fazy z laboratoryjnymi układami oscylacyjnymi. Rozwój wzorców częstości opartych na wiązkach atomów cezu następował szybko w wielu laboratoriach, co w 1967 r. umożliwiło redefinicję sekundy w układzie SI jako czasu trwania 9 192 631 770 okresów nadsubtelnych oscylacji w atomie Cs. Zgodnie z tym częstość drgań w cezcie określono jako równą dokładnie 9 192 631 770 Hz. Specjaliści, którzy opracowali tę redefinicję jednostki czasu i częstości, mądrze nie sprecyzowali szczegółów procesu pomiaru, zostawiając tu pole dla znacznego postępu. Na przykład, gdy na początku lat dziewięćdziesiątych możliwe i popularne stało się laserowe pompowanie optyczne atomów między stanami nadsubtelnymi, koledzy z National Institute of Standards and Technology (NIST) zbudowali nowy cezowy wzorzec atomowy NIST-7, oparty na optycznym przerzuceniu większości obsadzeń szesnastu dostępnych stanów nadsubtelnych do szczególnego ( $|3, 0\rangle$ ) stanu niższego, biorącego udział w przejściu zegarowym. Poza wymienionym czynnikiem (ok. 16 razy) przydały się ulepszenia samego źródła atomów, lepsze źródło częstości i lepsza elektronika w układzie odczytowym, ale zmniejszenie niedokładności realizacji sekundy cezowej w układzie z NIST-u do ok.  $5 \cdot 10^{-15}$  umożliwiła przede wszystkim komputerowa obróbka sygnałów i aktywna kontrola błędów systematycznych. Jak to jednak często bywa w sztuce precyzyjnego pomiaru, układ ten, będący podówczas istnym *tour de force*, w wyniku opracowania nowej techniki stał się za jednym zamachem przestarzały.

Jak wykazali Kasevich i Chu [7], wprowadzenie w życie idei „fontanny atomowej” w celu realizacji wzorca częstości opartego na atomach Cs stało się możliwe dzięki ich laserowemu ochłodzeniu. Zmieniając częstość lub moc laserów, można było kulę atomową przemieszczającą się powoli w oscylatorze w.cz. ekspediować pionowo do góry; kula osiągała szczytową wysokość kilkudziesięciu centymetrów nad oscylatorem, a następnie, po kilkuset milisekundach, zaczynała drogę powrotną w dół. Przy tak długim czasie oddziaływania spójnego szerokość linii rezonansowej zmniejszała się natychmiast do ok. 1 Hz, od wartości ok. 300 Hz osiąganey w poprzedniej epoce wiązek atomów termicznych. Sondowanie optyczne atomów pod rezonatorem (czyli po przejściu przez niego) pozwalało zmierzyć zależność prawdopodobieństwa wzbudzenia od dostrajanej częstości wiązki sondującej; zależność ta była potrzebna do sterowania częstością oscylatora w źródle. Jeśli wykorzystamy do odczytu odpowiednie („zamknięte”) przejścia optyczne, to możemy w takim układzie mieć wiele fotonów emitowanych przez atom, tak że – mimo ograniczonego kąta bryłowego i niepełnej wydajności detektora – szum pomiarowy nie jest znacznie większy od

szumu minimalnego, jaki wprowadza ograniczona liczba atomów. André Clairon i jego koledzy zbudowali w 1995 r. w paryskim instytucie znanym obecnie jako LNE-SYRTE pierwszy prawdziwy wzorzec częstości z fontanną cezową [8]. Nawet bez współczesnych metod pokonywania granicy atomowego szumu śrutowego wzorce fontannowe w NIST oraz SYRTE osiągają dziś poziom dokładności przekraczający  $1 \cdot 10^{-15}$ , jeśli uwzględnić wszystkie znane czynniki pomiarowe [9]. Z poprawą rozdzielczości związane są naturalnie nadzieje na potencjalny wzrost dokładności, lecz najpierw trzeba będzie się zastanowić nad obszerną listą poprawek i uciążliwych szczegółów. W końcu nawet przy rozszerzonym czasie oddziaływania zliczamy mniej niż  $10^{10}$  drgań, więc już niedokładność na poziomie  $1 \cdot 10^{-15}$  odpowiada rozdzielaniu szerokości rezonansowej linii fontanny atomowej o czynnik  $10^{-5}$ . Cezowe zegary fontannowe mają ograniczenia wynikające z dwóch efektów, które od niedawna stały się istotne: przesunięć częstości wprowadzanych przez zderzenia atomów w ogromnie zgęszczonym ośrodku [10] oraz przesunięć wywołanych przez wpływ promieniowania termicznego otoczenia, związanych ze ściankami układu próżniowego. Próby dalszego rozdzielania linii nieodmiennie przynoszą ze sobą rosnący szereg nowych drobnych problemów, które wprowadzają w efekcie barierę wzrostu dokładności.

Ważna jest obserwacja, że dla wielu rodzajów absorberentów kwantowych procesy poszerzania linii są takie same w dziedzinach częstości radiowej i optycznej. Na przykład, za pomocą fontanny atomowej można badać przejścia optyczne zamiast mikrofalowych z tym samym czasem oddziaływania. Wolelibyśmy oczywiście wyższą częstość podstawową ze świata optyki, ponieważ dla niej wykorzystywany rezonans wykazuje względną ostrość, zwiększoną o mniej więcej taki sam ogromny czynnik – stosunek częstości optycznej do mikrofalowej. Dla ostrzejszych linii możemy oczekiwać dokładniejszych pomiarów, które pozwolą nam lepiej zobaczyć niewielkie wpływy rozmaitych parametrów eksperymentu, co prowadzi do zwiększenia jego niezależnej odtwarzalności, którą – dzięki usilnym staraniom – często można przełożyć na niemal taki sam wzrost możliwej dokładności pomiaru, w miarę jak udaje nam się coraz pełniej charakteryzować procesy prowadzące do przesunięć. Ale właściwie jak zaplanowalibyście absolutny pomiar częstości optycznej przed milenijnym Rokiem Grzebień Optycznego?

Ta idea powtarzalności jest chyba słabsza niż złoty standard dokładności, w który tkwi ukryte założenie, że umiemy powiązać zmierzony wynik z jednostkami SI. Teraz jednak znamy już kilka zegarów optycznych o 10-krotnie mniejszej niepewności wyników niż wzorzec cezowy. Zanim więc redefinicja stanie się stosowna, bardzo ciekawe będą ich porównania, zwłaszcza jako punkt wyjścia do jednego z najciekawszych przedsięwzięć nauki – prób rozstrzygnięcia, które „prawa” fizyczne są fundamentalnie dokładne, które pomijają pewne szczegóły gwoździ ładnego wyglądu, a które są jedynie stwierdzeniami „faktów” o Przyrodzie, w rzeczywistości niedokładnie praw-

dziwych. Moimi przykładami są tu mechanika niebios, prawa gazów doskonałych ignorujące objętość cząsteczek oraz zasada zachowania parzystości w fizyce atomowej.

## Początki snu o zegarach optycznych

### *Do akcji wkracza laser*

Perspektywy metrologii uległy fundamentalnej zmianie 12 grudnia 1960 r., gdy w Bell Labs niewielki zespół pod kierunkiem Alego Javana w końcu dobrał dla swego „masera optycznego” właściwe warunki, by powstały w nim samopodtrzymujące się drgania o częstości optycznej. W gazowej rurze wyładowczej o specjalnej konstrukcji wytworzyła się mało prawdopodobna sytuacja, w której obsadzenia dwóch szczególnych poziomów energetycznych atomów neonu odwróciły się w porównaniu z termodynamiczną normą – w wyniku wyładowania w obfitszym gazowym helu przekazywanie energii w procesach zderzeń doprowadziło do inwersji obsadzeń, tak że więcej atomów znalazło się w wyższych stanach energetycznych. Godne podziwu jest to, że warunki te ustalono na podstawie starannych pomiarów i modelowania warunków wyładowania! Odwrócenie obsadzeń odwraca znak współczynnika absorpcji, która – jak uczy nas doświadczenie – jest uniwersalną właściwością zwykłej materii. Z odwróconymi obsadzeniami, a nie przez absorpcję, grupa Javana otrzymała emisję optyczną. Atomy wzmacniały każdy sygnał rezonansowy przechodzący przez komórkę wyładowczą. Wzmocnieniem o kilka procent nie warto byłoby się ekscytować, lecz wymyślono i skonstruowano zwierciadła wielowarstwowe, w których straty przy odbiciach były mniejsze, dzięki czemu powstały warunki do wzrostu mocy wiązki po każdym jej przejściu. W końcu uzyskano więc samopodtrzymujące się, ciągłe drgania optyczne i zaobserwowano skolimowaną wiązkę przewidywaną przez Charlesa Townesa i Arthura Schawlowa w klasycznej pracy z 1958 r. Podobne pomysły powstały również w byłym Związku Radzieckim; doprowadziło to do wspólnej Nagrody Nobla w 1964 r. dla Nikołaja Basowa, Aleksandra Prochorowa i Townesa.

### *Związek z glauberowskimi stanami spójnymi światła*

Rozumna metoda rozpoczęcia teoretycznych badań pól optycznych może być następująca: wyjść od znanych wyników dla pól jednofotonowych, a potem ostrożnie dodać kilka fotonów i patrzeć, co to zmienia. Prawdę mówiąc, dla nas wszystkich, idących śladami prac prof. Glaubera, było niespodzianką, że wystarczy parę fotonów, by funkcja rozkładu gęstości fotonów przestała być zwykłym rozkładem Poissona – wraz ze wzrostem liczby fotonów w danym modzie, pola zaczynają wykazywać niewielkie, ułamkowe fluktuacje, charakterystyczne dla pola klasycznego. Natomiast od strony doświadczalnej pierwszy laser Javana miał moc wyjściową ok. 1 mW, co oznaczało emisję  $N \approx 10^{16}$  fotonów na sekundę! Możemy oszacować oczekiwane względne odchylenie ze wzoru  $N^{-1/2}$ , lecz przy tak niewiarygodnie wielkiej liczbie spójnych fotonów w jednym modzie wynik tego oszacowania byłby niefizycznie mały. Tysiące czysto technicznych czynników

spowodowałyby względne fluktuacje większe od przewidywanej wartości  $10^{-8}$ ! Inaczej mówiąc, owe pierwsze lasery działały bardzo klasycznie i fluktuacje kwantowe byłoby niezwykle trudno zaobserwować. Dopiero w końcu lat siedemdziesiątych ludzie zaczęli rozumieć, jak skutecznie badać pola kwantowe zaledwie kilku fotonów. Przy tak ogromnie zmniejszonym natężeniu korelacje kwantowe są trudne do zaobserwowania, choć zarazem bardzo interesujące, gdyż odpowiadają znacznym efektom ułamkowym. Na przykład, grupa Jeffa Kimble'a wykorzystwała zależność od fazy światła ściśnięte do wykonania pomiarów spektroskopowych o około dwukrotnie lepszym stosunku sygnału do szumu niż dla prostej granicy szumu śrutowego [11]. Obserwacja silnych efektów dla światła ściśniętego wymaga minimalizacji strat optycznych, które dążą do odwrócenia statystyki w kierunku granicy termicznej. Niestety, szum ze źródeł technicznych rośnie liniowo ze wzrostem mocy lasera, szybciej niż korzyści płynące ze ściśnięcia. Uzyskanie 10-krotnej poprawy stosunku amplitudy sygnału do szumu wydaje się niezwykle trudne.

#### *Spójność pola laserowego umożliwia diagnostykę częstości*

Sukces konstrukcji lasera z Bell Labs wziął się z półklasycznej koncepcji działania masera optycznego. To prawda, wzmocnienie miały zapewniać kwantowe układy atomów, a nie lampy radiowe czy klustrony, prawdą jest też, że każdy atom w każdym zdarzeniu miał wносить do pola tylko jeden foton. Biorąc jednak pod uwagę, jak ogromna jest liczba fotonów tworzących pole, trudno oczekiwać, by ich dyskretny charakter miał znaczenie. Niemal natychmiast zespół z Bell Labs zaczął sprawdzać taką interpretację, łącząc dwie oddzielne wiązki światła laserowego w pojedynczą wiązkę współosiową i rzucając ją na światłoczułą powierzchnię szybkiego fotodetektora. Zatem już wtedy oscylacje w każdym laserze wyobrażano sobie jako zasadniczo klasyczne pole, spełniające warunki brzegowe przy odbiciach od obu zwierciadeł. Ten stabilny i powtarzający się schemat odbiciowy miał określać możliwe długości fali wytwarzanego światła laserowego. Dzięki konstrukcji rury oraz lutowi szczęścia wyładowanie było cudownie spokojne i można było oczekiwać, że współczynnik załamania w gazie będzie w zasadzie stały. Tak więc interferometryczne warunki brzegowe miały zasadniczo określać częstość oscylacji i dlatego można się było spodziewać, że urządzenie będzie wysyłać wiązkę o ostrej częstości optycznej. Przy dwóch ostrych częstościach z laserów należało oczekiwać wytworzenia przy powierzchni nieliniowego detektora częstości różnicowej, która też istotnie powstała. Wciąż słyszę gwizd akustycznego dudnienia, nagrany przez Javana, gdy dostroił swe dwa lasery do prawie takich samych częstości optycznych. Różnica częstości między dwoma źródłami 260-terahercowymi wynosiła ok. 1 kHz!

Linie powstałe z tych dudnień były niezwykle wąskie. Szacowaliśmy już, że strumień  $10^{16}$  fotonów/s powinien mieć względne fluktuacje statystyczne mocy na poziomie  $10^{-8}$ , zatem faza optyczna mogłaby być bardzo ściśle określona. Obliczenia wykonane przez Schawlowa i Townesa,

uwzględniające rolę strat optycznych, ograniczają jednak spójność wiązki z lasera i przewidują milihercowe szerokości linii.

Mamy więc w zasadzie promieniowanie o niewiarygodnej ostrości i powinniśmy być gotowi do poszukiwania ciekawych zjawisk fizycznych. Natychmiast wychodzi jednak na jaw rozczarowująca prawda – na owe maleńkie fluktuacje fazy w laserze nakłada się znacznie większy szum pochodzenia technicznego. Mówiliśmy już, że najsilniejsze zawężenie częstości jest wprowadzane przez warunek powstania fali stojącej wskutek odbić od zwierciadeł laserowego rezonatora. Ale nawet spokojne laboratorium jest miejscem „gwarowym”, z „sejsmicznym” szumem na poziomie ok.  $3 \cdot 10^{-9}$  m/Hz<sup>1/2</sup> w pasmie częstości powiedzmy 1–30 Hz. Rezonator lasera ma długość kilkudziesięciu centymetrów; układ taki trudno jest bardzo mocno usztywnić. Tak więc pewna część szumu (założmy, że tylko 1%) bierze się ze zmian długości rezonatora, prowadzących do zmian częstości fali laserowej. Widzimy od razu wynikającą z takiego założenia skalę problemu – względne zmiany częstości są rzędu  $10^{-10}$ . Czynniki termiczne też sprawiają kłopoty – nawet dla materiałów o małej rozszerzalności cieplnej, np. szkła kwarcowego, skala  $10^{-10}$  odpowiada już zmianie temperatury o kilka milikelwinów. Sytuację można poprawić dzięki sprzężeniu lasera ze stabilnym rezonatorem referencyjnym [12]. Dążąc do optymalnej redukcji drgań, zwierciadła tego rezonatora montuje się na sztywnej konstrukcji, a całość umieszcza na miękkim, poziomym zawieszeniu. Dzięki skupieniu się na izolacji drgań Bergquist [13,14] otrzymał linię laserową o rekordowo małej szerokości ok. 0,16 Hz! Inne podejście polega na minimalizowaniu czułości rezonatora na przyspieszenia. Wykorzystując symetryzowane w pionie zamocowanie rezonatorów referencyjnych, nasza grupa uzyskała niedawno linię laserową o szerokości na poziomie 1 Hz [15].

#### *Spójność dudnień umożliwia częstościowe sterowanie laserem*

Ze względu na niewielki własny szum fazowy źródła laserowego i jego dość dużą, miliwatową moc, heterodynowa detekcja częstości dudnień dwóch takich źródeł daje atrakcyjnie duży stosunek sygnału do szumu, nawet przy bardzo krótkich czasach uśredniania, rzędu 1  $\mu$ s. W dodatku dobrze wykonany laser prawie nie reaguje w tak krótkim czasie na „odgłosy życia” laboratorium (zmiany temperatury, napięcia zasilania, drgania itp.) – w ciągu 1  $\mu$ s nie mogą one zbyt zmienić układu. Czas ten jest zbyt krótki, by owe zaburzenia zaczęły niszczyć stabilność rezonatora określającego częstość. Możemy zatem rzeczywiście wykonać użyteczne pomiary fazy fali laserowej w tak krótkim przedziale czasu, że kłopoty jeszcze się nie zdążyły pojawić! Zaczynamy już dostrzegać wyłaniającą się strategię – szybko mierzymy to, co laser robi naprawdę w porównaniu z naszymi oczekiwaniami, a następnie wykorzystujemy sprzężenie zwrotne z odpowiednimi serwo-mechanizmami do sterowania częstością lasera. Jeśli wprowadzimy poprawki dostatecznie szybko i dokładnie,

to sterowany laser będzie w dobrym przybliżeniu takim idealnym, częstościowo stabilnym laserem, jakiego potrzebujemy.

Wprowadzenie w życie tej idei sterowania za pomocą serwomechanizmów wymagało wielu technicznych trików, których doskonaleniu autor poświęcił ponad 40 lat aktywnej pracy. Doprowadziło to do powstania wielu ciekawych i pożytecznych narzędzi oraz metod elektrooptycznych.

#### *Wzrost mocy laserów otwiera drogę do spektroskopii nieliniowej i ostrych rezonansów*

Zacznijmy od pierwszej próby obserwacji wąskich rezonansów atomowych za pomocą nasyceniowej spektroskopii absorpcyjnej. Tego typu zjawiska w rezonatorze laserowym jako pierwszy badał Bill Bennett, wykorzystując efekty dyspersyjne związane z neonem jako gazem aktywnym lasera. Wskutek maskowania przez zjawisko Dopplera naturalna szerokość rezonansowa linii Ne, rzędu 10 MHz, ulega zwiększeniu do ok. 1500 MHz. Większość atomów gazu odstraja się więc w sposób zależny od prędkości. Niektóre atomy poruszają się z prędkościami bliskimi takiej szczególnej wartości, dla której przesunięcie dopplerowskie doprowadzi do ich rezonansu z polem wewnątrz wnęki laserowej. W rzeczywistości trzeba wziąć pod uwagę dwie takie prędkości, gdyż wiązka w laserze, odbijając się od zwierciadeł, biegnie między nimi w obu kierunkach. Owe atomy rezonansowe dość silnie oddziałują z polem, co prowadzi do wzrostu szybkości zaniku stanów wzbudzonych atomów o takich prędkościach – ich odwrócone obsadzenia zamieniają się w rezonatorze w fotony! Jeśli wyobrazimy sobie wykres różnicy obsadzeń (obsadzenie stanu górnego minus obsadzenie stanu dolnego), to możemy oczekiwać lokalnego, dość wąskiego minimum wokół prędkości, dla której następuje przekształcenie inwersji obsadzeń w kwanty światła. Ściśle mówiąc, zgodnie z powyższym opisem występują dwa zwierciadłanie symetryczne minima. Ciekawe zjawiska zachodzą wtedy, gdy częstość lasera dostrajamy do częstości atomu w nieruchomym układzie odniesienia. Wówczas atomy rezonansowe będą miały coraz mniejsze prędkości dopplerowskie aż do chwili, gdy wybierzemy prędkość zerową. W tym momencie zachodzi nowe zjawisko. W stanie odstrojonym do mocy wyjściowej wiązki laserowej wnosily wkład dwie grupy aktywnych atomów. Gdy osiągamy sam środek dostrojenia, pola obu fal biegnących oddziałują z jedną atomową prędkością grupową. Tak więc w procesie bierze udział mniej atomów i moc lasera wyraźnie spada (ale tylko przy środkowym dostrojeniu). Ten „dołek” w wykresie zależności mocy lasera od dostrojenia można wykorzystać do stabilizacji częstości w środku owego „minimum Lamba”, od nazwiska Willisa Lamba, który w swych pracach teoretycznych wyjaśnił pochodzenie tego doświadczalnie obserwowanego efektu (Nagrodę Nobla dostał w 1955 r. za badania nowej struktury nadsubtelnej widma wodoru). Okazało się, że ciśnienie optymalne dla pracy lasera jest

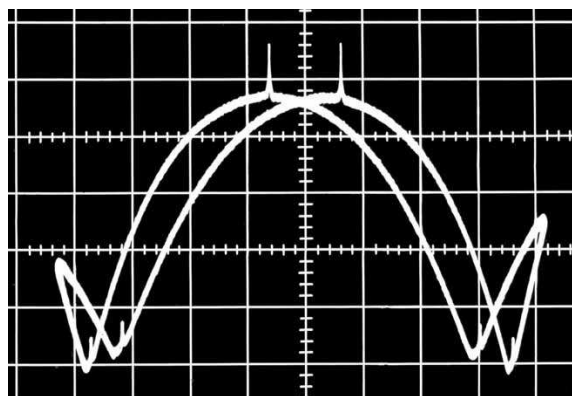
dość duże (ok. 3 mmHg, czyli 400 Pa), wskutek czego istnieje znaczne prawdopodobieństwo zderzeń między atomami nawet w ciągu optycznych czasów życia równych kilkudziesięciu nanosekundom. Minima Lamba są zatem szersze oraz płytsze i obserwuje się je obok stromej maksimum dopplerowskiego odpowiadającego rozkładowi dostępnych prędkości atomów. Oprócz spadku wyrazistości minimum Lamba otrzymano znaczne przesunięcia częstości [16]. Nie można było dowolnie zmniejszyć ciśnienia gazu, bo wyładowczy mechanizm pompowania prowadził do obsadzenia metatrwałego poziomu  $\text{He}^*$ , i do przeniesienia tych wzbudzeń do atomów neonu podczas wyładowań potrzebne były zderzenia. Tak więc, mimo że długość fali charakterystycznego spójnego światła laserowego była łatwiejsza do zmierzenia niż światła niespójnego z kryptonowej lampy wyładowczej (ówczesnego wzorca długości fali), przesunięcia ciśnieniowe w laserze były po prostu zbyt duże, by można je było zaakceptować. Działo się tak zwłaszcza dlatego, że ówczesna technika wyładowań prowadziła do dużych zmian ciśnienia mieszaniny gazów w laserze i stosunku jej składników wraz z czasem pracy laserów, co było związane z rozpylaniem jonowym elektrod.

Wkrótce potem Lee i Skolnick wysunęli ważną ideę rozdzielania funkcji wzmacniacza i referencyjnych komórek gazowych. Szczegółową dyskusję tych ciekawych innowacji można znaleźć w pracach [17,18], lecz dla celów tego wywodu musimy jednak rozważyć kilka najistotniejszych spraw. Ponieważ chodziło nam o ochronę życia naszych atomów referencyjnych, pociągało nas rozumowanie raczej w kategoriach absorpcji niż wzmocnienia. Niepotrzebne były nam w takim razie ani żadne wyładowania, ani pompowanie optyczne referencyjnych rezonatorów kwantowych. Aby do stabilizacji częstości wykorzystać nieliniowy rezonans Lamba, musieliśmy naturalnie mieć możliwość dostrojenia lasera do częstości rezonansowej komórki referencyjnej. W dzisiejszych czasach to żaden problem – wystarczy użyć laserów strojonych – ale wtedy najlepszym pomysłem na uzyskanie zgodności długości fali było wykorzystanie cząsteczek jako pochłaniaczy – można było wybierać spośród nieprzebranego mnóstwa linii absorpcyjnych. Współczesnym liderem na tym polu jest cząsteczkowy jod, z wąskimi, użytecznymi liniami absorpcyjnymi od bliskiej podczerwieni do ok. 500 nm. Dla innych molekuł typowe długości fali leżą w zakresie podczerwieni 2–10  $\mu\text{m}$ , jeśli ograniczymy się tylko do przejść między stanami wibracyjno-rotacyjnymi.

Pierwszy taki dwuskładnikowy układ referencyjny częstości optycznej – a zarazem wciąż jeden z lepszych – wykorzystuje komórkę wyładowczą He–Ne do wytworzenia wzmocnienia laserowego przy 3392 nm (rys. 1). W rezonatorze lasera umieszczona jest także komórka zawierająca cząsteczki  $\text{CH}_4$ , starego, pocziwego metanu o symetrii czworościanu foremego, mającego ciekawe linie, do których można dotrzeć za pomocą lasera He–Ne. Niezbędne nakładanie się widm emitera i absorbera zapewnia się, szukając – krótko mówiąc – szczęśliwego przypadku! Wykorzystywane pasmo absorpcyjne w podczerwieni,  $\nu_3$ ,



jest związane z silnymi drganiami podstawowymi i daje współczynnik absorpcji równy  $0,18 \text{ cm}^{-1}/\text{Tr}$ . Obecność pochłaniającego gazu wewnątrz rezonatora oczywiście oznacza, że do wpływania na dynamikę lasera niepotrzebna jest nam bardzo duża absorpcja – wystarczy w zupełności parę procent, co odpowiada z grubsza połowie strat związanych ze zwierciadłem wyjściowym. Przy ciśnieniu 10 mTr poszerzenie rezonansu  $\text{CH}_4$  wynosi ok. 160 kHz, czyli jest bliskie 130-kilohercowemu poszerzeniu związanemu ze swobodnym przelotem cząsteczek metanu w rezonatorze przez wiązkę światła, mającą typowo średnicę 0,3 mm. Co ważne, przesunięcie ciśnieniowe okazuje się dla tych przejść w tych warunkach b a r d z o m a ł e, rzędu 1 kHz.



Rys. 1. Sygnał absorpcji nasyconej w cząsteczkach  $\text{CH}_4$  [17]. Laser He-Ne wzbudzony przez wyładowanie w.cz. wysyła wiązkę o długości fali  $3,39 \mu\text{m}$ . Komórka z metanem pod ciśnieniem 12 mTr (16 mbar) jest umieszczona wewnątrz rezonatora. Moc wyjściowa wynosi ok.  $300 \mu\text{W}$ , a kontrastowość maksimum ok. 12%. Szerokość połówkowa maksimum w połowie wysokości jest równa ok. 270 kHz. Przy maksymalnej mocy wyjściowej (ok.  $0,8 \text{ mW}$ ) kontrastowość wynosi ok. 15%. Przedział dyspersji rezonatora to 250 MHz. Warto zwrócić uwagę na rezonanse krzyżowe widoczne w pobliżu brzegów zapisu (między sąsiednimi modami). Rozdwojenie sygnału jest spowodowane przez histerezę podczas rejestracji.

Mówimy zatem o układzie z krzywą mocy zawierającą rezonans o pełnej szerokości w połowie wysokości maksimum równej ok.  $0,6 \text{ MHz}$  i powiedzmy 5-procentową kontrastowością przy całkowitej mocy wyjściowej ok.  $200 \mu\text{W}$ . Proste obliczenie daje stosunek sygnału do szumu śrutowego rzędu  $10^6$  w pasmie pomiarowym o szerokości 1 Hz, a przecież przy środkowym dostrojeniu, gdy obie fale biegnące w rezonatorze „wybielają” te same cząsteczki pochłaniacza i zmniejszają w ten sposób wewnętrzne straty energii związane z absorpcją, otrzymujemy szerokie, submegahercowe maksimum. Gdyby optymalnie wykorzystać ten stosunek, laser można byłoby tak stabilizować, by miał subhercowe fluktuacje częstości przy pomiarach w przedziałach 1 sekundy. W roku 1968, gdy rozkręcał się cały ten biznes z nasyceńczo-absorpcyjnym wzorcem częstości optycznej, nasze detektory i przedwzmacniacze nie były zbyt dobre i nie mogliśmy nawet

zacząć się zbliżać do granicy szumu śrutowego, którą była względna (nie)stabilność częstości równa ok.  $2 \cdot 10^{-14}$  w czasie 1 s. Początkowo otrzymaliśmy  $\delta\nu/\nu \approx 1 \cdot 10^{-12}$ , a wkrótce potem dzięki lepszym detektorom i obróbce sygnałów poprawiliśmy ten wynik na  $3 \cdot 10^{-13}$ .

Dzięki umieszczeniu komórki z próbką na zewnątrz rezonatora laserowego można łatwiej analizować sytuację od strony fizycznej; układ taki w swych pierwszych eksperymentach wykorzystywali Bordé, Hänsch, a także grupa Czebotajewa. Ciekawe szczegóły tych prac omawiane są w podręcznikach (np. [19–21]). Teraz zajmiemy się sprawą związku szerokości linii z czasem przelotu cząsteczek przez wiązkę.

#### *Swobodne cząsteczki widzą impuls światła – dwa spojrzenia na zasadę nieoznaczoności*

Dla opisanych przejść radiacyjny czas życia (rzędu milisekund) jest znacznie większy od czasu przelotu cząsteczki (w zasadzie swobodnej) przez wiązkę laserową. Pod niskim ciśnieniem szerokość linii nasyceńczo-absorpcyjnej nie jest ograniczana ani przez zderzenia, ani zjawisko Dopplera, widać więc, że szerokości linii rezonansowych można zmniejszyć dzięki zwiększeniu czasu oddziaływania cząsteczki z polem. Pomóc mogą tu albo szerokie wiązki, albo chłodzenie szklanej komórki ciekłym azotem. Rozpoczęły się więc intensywne próby zrozumienia kształtu linii wysyłanej w warunkach swobodnego lotu. Czebotajew i jego koledzy opracowali analitycznie teorię w granicy niskiego ciśnienia i małej mocy optycznej [22]. Teoria stworzona w JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics w Boulder w stanie Colorado) była oparta na komputerowych obliczeniach macierzy gęstości dla pochłaniających cząsteczek przelatujących swobodnie przez wiązkę światła o profilu – w założeniu – gaussowskim [23]. W celu uproszczenia obliczeń założono również małe natężenie i słabe oddziaływanie, lecz szybko stało się jasne, że gros obserwowanego sygnału wytwarzają bardzo nieliczne cząsteczki powolne. Wynikiem teoretycznym jest logarytmiczne maksimum dokładnie w środku linii. Przy długich czasach oddziaływania nawet nikła moc prowadzi do nasyceńczo i innych efektów typowych dla silnych pól.

Potrzebujemy cząsteczek o niewielkiej podłużnej składowej prędkości, tak by nie przechodziły przez wiązkę osiowo, co powodowałoby powstawanie dopplerowskiej modulacji fazy. W praktyce wystarczy, jeśli cząsteczki lecą na tyle prostopadle do osi rezonatora, by ich przejście przez wiązkę nie wprowadzało geometrycznego przesunięcia fazowego większego od 1 radiana. Potrzebne są nam też małe prędkości poprzeczne, gdyż dłuższy czas przejścia znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w węższej linii. Oznaczmy przez  $\delta\nu$  szerokość połówkową obserwowanej linii rezonansowej w połowie wysokości maksimum (HWHM); wówczas związek  $\delta\nu \cdot \tau \approx 1$  prowadzi do  $\delta\nu = \beta v_t/w_0$ , gdzie  $v_t$  oznacza prędkość termiczną,  $w_0$  – promień (połowę średnicy) wiązki gaussowskiej, a  $\beta$  – pewien parametr pomiarowy. Dla metanu w temperaturze pokojowej wyznaczyliśmy  $\beta v_t = 88 \text{ mm} \cdot \text{kHz}$ . Zmierzyliśmy promienie  $w_0$  modów laserowych od  $56 \mu\text{m}$  do  $9 \text{ cm}$ , z odpowia-

dającymi im wartościami HWHM od 1,6 MHz do 940 Hz (o ciekawej substrukturze powiemy nieco dalej). Poszerzenie związane z przelotem warto rozważyć najpierw w dziedzinie sprzężonej fourierowsko, gdzie odpowiada mu rozbieżność kątowa. Minimalna rozbieżność skolimowanej wiązki laserowej odpowiadająca promieniowi  $w_0$  wyraża się wzorem  $\delta\theta = \lambda/2\pi w_0$ . Rozrzut wektora falowego  $\mathbf{k}$ , a zwłaszcza jego składowych niesiowych, prowadzi do zależnego od prędkości przesunięcia dopplerowskiego o tym samym znaku dla obu fal biegnących, co przejawia się poszerzeniem i przesunięciem rezonansu. Przy mniejszej średnicy modu rozbieżność kątowa wzrosnie i w widmie pojawi się większe poszerzenie.

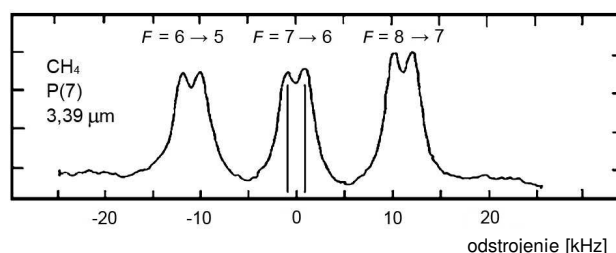
Cząsteczki zazwyczaj nie mają „zamkniętych” przejść optycznych, analogicznych do przejść potrzebnych do zwykłego laserowego chłodzenia atomów, lecz cząsteczki polarne mają za to moment dipolowy. Dokładając zatem pewnych starań, można otrzymać tzw. syzyfowe spalanie cząsteczek poprzez zmianę znaku przyłożonego silnego pola elektrycznego, jak wykazał Meijer ze swą grupą [24]. Niedawno w grupie Ye [25] opracowano niezwykle wysokorozdzielczą metodę spektroskopii mikrofalowej na wolnych rodnikach OH spowolnionych za pomocą zjawiska Starka. Z pewnością otwiera to ciekawy front badań!

Inne ważne kierunki to detekcja o wysokiej czułości oraz poprawa dokładności sprzężenia do sygnałów molekularnych. Na przykład, pewne prace wykonane w JILA („NICE-OHMS”) ukazują drogę do wzrostu czułości dzięki połączeniu wzmocnienia w rezonatorze i metod wykorzystujących radiowe wstęgi boczne [26]. Fascynującą perspektywą może być poszukiwanie przesunięcia częstości między odpowiednimi enancjomerami związanego z parzystością [27]. Inne ważne zastosowania laserów omówiono w książce Svanberga [28].

#### Światło przekazuje pęd cząsteczkom – rozszczepienie wskutek odrzutu

Pełny opis oddziaływań radiacyjnych musi obejmować pęd pola i cząsteczek, a także liczbę fotonów i stany wewnętrzne układu kwantowego. Opis taki jest bardzo ważny w przypadku pompowania atomów o zamkniętych poziomach energetycznych, które umożliwiają wielokrotne oddziaływania i głębokie chłodzenie prędkościowe (Nagroda Nobla w 1997 r. dla Phillipsa, Chu i Cohen-Tannoudjiego). Zanim dana cząsteczka z omawianej tu próbki molekularnej pojawi się ponownie w polach laserowych, czyha na nią wiele kanałów zaniku, a także zderzenie ze ścianką komórki próżniowej, tak więc założenie o jednym oddziaływaniu jest rozsądne. Jednoznaczna obserwacja przekazywania pędu przez pole układowi atomów umożliwia nasyceniowa spektroskopia absorpcyjna, w istocie dlatego, że jest to proces dwuetapowy. Rozważmy pochłaniające cząsteczki o masie  $M$ , które początkowo mają zerową prędkość wzdłuż wiązki światła. Dla wiązki biegnącej w lewo warunek dostrojenia ma postać  $\nu = \nu_0(1 + hv_0/2Mc^2)$ , przy czym nadwyżka ponad energię przejścia  $h\nu_0$  zamienia się w energię kinetyczną związaną z pędem, który wskutek odrzutu cząsteczka będzie

miała po przejściu. Wiązka biegnąca w przeciwną stronę także zuboży początkową grupę cząsteczek o prędkości zerowej. Tak więc przy takim dostrojeniu rezonansowym wynikający stąd nieliniowy spadek absorpcji molekularnej będzie prowadził do maksimum w widmie transmisyjnym, lekko przesuniętego ku błękitowi od częstości spoczynkowej. Inny ciekawy przypadek zachodzi wówczas, gdy cząsteczki mają początkowo prędkość  $v = h/M\lambda$ ; gdy laser odstrojony ku czerwieni oddziałuje wtedy z cząsteczką, pęd fotonu i pęd cząsteczki wzajemnie się znoszą, a początkowa energia kinetyczna może pokryć niedobór energii fotonu. W wyniku mamy cząsteczkę wzbudzoną o zerowej prędkości osiowej. Wiązka biegnąca w laserze w przeciwnym kierunku ulegnie w tych szczególnych warunkach strojenia wzmocnieniu, co znów doprowadzi do względnego maksimum przepuszczalności próbki. Dla cząsteczki mającej początkowo pewną energię kinetyczną warunek dostrojenia do rezonansu stanu górnego ma postać  $\nu = \nu_0(1 - hv_0/2Mc^2)$ . Tak więc w aspekcie odrzutu fotonów oddziaływanie nieliniowe jest związane z tym, że obsadzenie albo stanu podstawowego, albo wzbudzonego jest dostępne dla obu wiązek przy tym samym odstrojeniu – odpowiadającym zerowej prędkości w jednym ze stanów. Dla metanu rozszczepienie między oboma maksimumami wynosi 2,163 kHz; widać je wyraźnie na rys. 2 [29].



Rys. 2. Rozszczepienia maksimumów struktury nadsubtelnej swobodnych cząsteczek metanu związane z odrzutem [29]. Pionowe kreski oznaczają położenia obu składowych odrzutowych w jednej z trzech linii nadsubtelnych.

W pracach w JILA oraz na Université Paris-Nord do wydłużenia czasu oddziaływania z cząsteczkami używano głównie wiązek laserowych o dużej średnicy. Czebotajew, Bagajew i ich koledzy z grupy w Nowosybirsku wykorzystywali także inną ideę fizyczną – w ich eksperymentach główny wkład do obserwowanego sygnału wносиły cząsteczki superpowolne. Osiągnęli w ten sposób dodatkową 20-krotną redukcję szerokości linii do wartości mniejszej od 50 Hz [30]. Ważnym aspektem takiego podejścia jest spadek efektywnej temperatury cząsteczkowej w całej objętości gazu do wartości poniżej 0,1 K, co prowadzi do znacznego zmniejszenia dopplerowskiego przesunięcia drugiego rzędu ( $\ll 1$  Hz). Średnia prędkość powolnych molekuł  $C_2HD$  zmierzona przez Ye i in. [26] była 13-krotnie mniejsza od prędkości termicznej; pomiar ten był możliwy tylko dzięki bardzo dużej czułości metody NICE-OHMS.

### Inne wzorce częstości optycznej oparte na spektroskopii nieliniowej

Prace nad stabilizacją laserów, mające na celu ich zastosowania jako wzorce pomiarowe, np. do interferometrycznej kalibracji bloków służących do sprawdzania referencyjnych wzorców używanych w przemyśle, przyciągnęły wiele grup badawczych. Przy takich zastosowaniach jest ze wszech miar wskazane, by laser referencyjny emitował wiązkę widzialną, wystarczająco stabilną i powtarzalną. Ogromne sukcesy w tej dziedzinie święci laser He–Ne o długości fali 633 nm z umieszczoną wewnątrz rezonatora komórką z jodem; tego typu układy o dobrej konstrukcji są dziś wręcz dostępne komercyjnie. Dla takiego właśnie układu He–Ne/I<sub>2</sub> na początku lat osiemdziesiątych zmierzono w NBS częstość z niepewnością 70 kHz (był to pierwszy pomiar dla takiego układu w zakresie widzialnym, więc jest zrozumiałe, że źródła niektórych składników tej niepewności nie były wcale fundamentalnej natury). Wkrótce przyłączyły się inne laboratoria, w następnej dekadzie już wiele z nich nabrało doświadczenia i w niektórych przeprowadzono pomiary częstości potwierdzające wynik z NBS, tak że atrakcyjna stała się koncepcja zmiany definicji międzynarodowej jednostki długości, czyli metra.

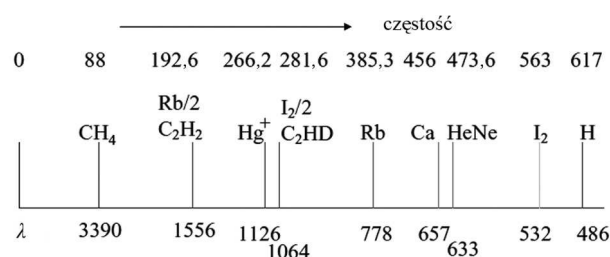
Świat spektroskopii zaprasza nas do nieskończenie wielkiego ogrodu fascynujących szczegółów. Można przypuszczać, że niezachowanie parzystości będzie prowadzić do następnej generacji struktur subtelnych w cząsteczkach chiralnych, zwłaszcza przy rozwoju metod chłodzenia molekularnego. Ale dość już o „tykaniu” zegara – czas powrócić do głównej historii: rozwoju stabilizacji częstości i narzędzi zliczania cykli, czyli do wewnętrznych mechanizmów zegara optycznego!

### Pomiary częstości optycznych metodą grzebieniową

Metrologom-praktykom, obarczonym zadaniem konkretnego zmierzenia pewnych wielkości fizycznych, redefinicja metra z 1983 r. nie wyrządzała, prawdę mówiąc, przysługi, gdyż wraz z nią nie zostały jeszcze sformułowane praktyczne zasady jej stosowania w pomiarach. Była ona jednak błogosławieństwem dla metrologów-badaczy: ich zadaniem stało się ustalenie, jaki układ laserowy z dobrą stabilizacją byłby optymalny w precyzyjnej interferometrii, geodezji, zdalnym sterowaniu za pomocą serwo-mechanizmów w fabrykach itp. Tak więc już po kilkunastu latach od wprowadzenia redefinicji istniało co najmniej 10 dobrze opracowanych wzorców częstości optycznej (rys. 3).

Na rysunku 3 pokazano dostępne źródła częstości od ok. 30 THz (10 μm) do ok. 1 PHz (ok. 280 nm), czyli wykraczające daleko poza zakres widzialny. Uderza zaskakujące podobieństwo interwałów częstości między liniami, równych ok. 88 THz, tj. w przybliżeniu częstości lasera stabilizowanego metanem. Wysuwano więc pomysły, by porównywać podwojoną częstość danego lasera z sumą częstości dwóch najbliższych sąsiednich laserów

z obu stron. Kilka dodatkowych teraherców można było wycisnąć przy użyciu grzebienia Kourougiego opartego na mikrofalowym modulatorze umieszczonym w rezonatorze, którego długość zapewniałaby wzmocnienie rezonansowe wszystkich wytworzonych wstęg bocznych [31]. Przy użyciu takiej metody różnicowej [32] porównaliśmy częstość jodowego wzorca 532 nm z różnicą podwojonej częstości linii 633 nm układu He–Ne/I<sub>2</sub> i częstości linii dwufotonowej Rb przy 782 nm.



Rys. 3. Stabilne lasery oparte na nieliniowych bezdopplerowskich rezonansach w gazach (1995); skala częstości w terahercach, długości fali – w nanometrach

Tak oto zaczęliśmy się zapoznawać z elegancją grzebienia optycznego – spójnego zbioru linii widmowych o częstościach dokładnie określonych prostym wzorem. Nasz układ pokrywał zaledwie kilka nanometrów. Jakże miło byłoby móc za jednym zamachem pokryć całe pasmo widzialne kilkoma milionami linii o dokładnie znanych częstościach referencyjnych!

Zakres widmowego naszego grzebienia można byłoby poszerzyć dzięki wprowadzeniu wzmocnienia wewnątrz rezonatora, tak by skompensować straty optyczne w modulatorze; schemat taki zastosował Diddams, który wykorzystał do tego celu kryształ OPO (ang. optical parametric oscillator), także umieszczony w rezonatorze, i z łatwością zaobserwował oscylacje oraz generację setek wstęg bocznych FM [33]. W niektórych warunkach dostrojenia faza kilku składników spektralnych prowadziła do wytwarzania impulsów, a nie czystej emisji FM. Pod wieloma względami był to po prostu trudniejszy sposób realizacji tego, co konstruktorzy ultraszybkich laserów wysoko sobie cenią w laserach Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> z autosynchronizacją modów – stabilne, samoorganizujące się, ultrakrótkie impulsy o dużej częstości repetycji. W artykułach naszej grupy dyskutujemy techniczne bogactwo tych laserów i całego biznesu grzebieniowego [34]. Tutaj potraktujmy to jako jeszcze jeden przyczynek do wzajemnego sprzężenia między „niezależnymi” strumieniami badań; przedstawiliśmy się na femtosekundowe lasery Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i nie wracamy do dawnych pomysłów.

Tak się złożyło, że w owych ostatnich dniach ubiegłego tysiąclecia społeczność optyków dostała od przemysłu laserowego fundamentalnie ważny prezent. Bez niego grzebienie częstości zapewne nie weszłyby do powszechnego użytku. Prezentem tym było wprowadzenie na rynek laserów dużej mocy wysyłających promieniowanie wi-

działne, opartych na podwojeniu częstości wiązki z lasera neodymowego pompowanego diodą laserową. Natychmiast zastąpiły one lasery argonowe, powszechnie używane do pompowania laserów na ciele stałym, lecz kapryśne i charakteryzujące się stosunkowo dużym szumem własnym. Mechanizmy konkurencji rynkowej sprawiły, że nowe lasery odznaczają się udaną konstrukcją, a ich dobra stabilizacja natężenia daje niezwykle niski poziom resztkowego szumu amplitudowego. Właściwość ta jest kluczowa ze względu na sposób, w jaki działa laser z autosynchronizacją modów. Takie lasery  $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$  są autosynchronizowane dzięki samoindukującej się soczewce optycznej, która sprawia, że straty w rezonatorze są mniejsze, gdy wszystkie mody lasera są zsynchronizowane i tworzą w ośrodku laserowym „optyczny pocisk” [35]. Taką chwilową soczewkę wytwarza radialny gradient współczynnika załamania, indukujący się tylko w obecności owego pocisku światła. Rezonator lasera ustawia się początkowo w taki sposób, by do wytworzenia modów o małych stratach potrzebował takiego dodatkowego ogniskowania, a gdy laser zacznie działać w trybie impulsowym, utrzymuje się stabilna autosynchronizacja. Przypuśćmy, że długość impulsów jest rzędu 10 fs, a okres repetycji wynosi ok. 10 ns. Przy idealnej synchronizacji stosunek mocy w maksimum do mocy średniej jest rzędu  $10^6$ . Moc emisji typowego lasera ze zwierciadłem wyjściowym o przepuszczalności 5% wynosi ok. 0,5 W. Mamy zatem średnią moc w rezonatorze 10 W, co oznacza 10 MW szczytowej mocy wiązki zogniskowanej w laserze  $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$  w plamkę o średnicy ok. 14  $\mu\text{m}$ . Obszar aktywny ma więc pole powierzchni równe zaledwie ok.  $3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$ , czyli przy mocy szczytowej 10 MW mamy 3 TW/cm<sup>2</sup>! Związane z tym pole elektryczne jest rzędu 10% pól międzyatomowych w kryształach, nic więc zaskakującego, że wiązka wprowadza znaczny wzrost współczynnika załamania (optyczne zjawisko Kerra). Widać teraz, że mały szum amplitudowy lasera pompującego jest rzeczywiście sprawą krytyczną – zależne od natężenia przesunięcie fazowe w kryształach lasera będzie prowadziło do konwersji amplitudowo-częstościowej, a tym samym do niedopuszczalnego szumu fazowego, jeśli sama pompa ma duże szumy. Nawet w najbardziej korzystnym przypadku szerokość linii laserowego grzebienia bez sterowania częstościowego (przed użyciem serwomechanizmu) wynosi wskutek tego 3–10 kHz. Szczegóły można znaleźć w pracy [36].

Tak więc z lasera wychodzi ciąg impulsów o mocy szczytowej ok. 500 kW; większość skupiamy w specjalnych włóknach nieliniowych, które wprowadziły erę grzebienia optycznego. Dzięki mikrostrukturze włókna kwarcowego pełne prowadzenie światła jest możliwe nawet przy średnicy rdzenia włókna równej 1,5–2  $\mu\text{m}$ . Aktywna powierzchnia przekroju włókna ma zatem 200-krotnie mniejsze pole niż pole przekroju wiązki laserowej, podczas gdy poziom mocy jest ok. 20 razy niższy. Dziesięciokrotnie większe natężenie wytwarza we włóknie trzykrotnie silniejsze pole elektryczne, porównywalne już teraz z polem międzyatomowym i torujące drogę poważnym oddziaływaniom nieliniowym. Zapomnijcie w tym wypadku

o rozwinięciu pana Taylora – mamy tu fizykę nieliniową silnych sygnałów! Wszystkie częstości składowe wiązki laserowej są wymieszane, co powoduje drastyczne poszerzenie widma. Dzięki budowie włókna szeroki zakres częstości optycznych może w nim podróżować z niewiele różniącymi się prędkościami, wskutek czego procesy konwersji częstości pozostają dopasowane fazowo i akumulują energię w częstościach nowo tworzonych. Zasadniczo na odcinku kilku centymetrów widmo wyjściowe przekształca się w światło białe i pokrywa oktawę lub więcej szerokości pasma optycznego. W rzeczywistości światło nie jest całkiem „białe”, bo wciąż przenosi podstawowe tętno pierwotnego lasera femtosekundowego, np. 100 MHz. Jak już wyjaśnialiśmy, wskutek tego powstaje wewnętrzne widmo grzebieniowe o szerokościach linii składowych związanych ze zdolnością rozdzielczą wykorzystywanego układu. W ostatecznym rozrachunku na poziomie kilohercowym i niższym powszechnie aktywne procesy modulacji fazowej, które wpływają na wszystkie lasery, poszerzą także i te linie (zanim zostanie włączony serwomechanizm).

## Komplementarność, współpraca i rywalizacja

### Podstawy

Wspaniała idea profesora Hänscha przedstawiona w stanfordzkiej pracy [37] opublikowanej w 1978 r. została przy użyciu lasera impulsowego także wykorzystana do budowy grzebienia optycznego, który mógłby służyć jako spektralna linijka. Pasma pokrywanego przez nią widma (do kilku gigaherców) było jednak niewystarczające do użytkowych pomiarów częstości, a że tak wąskie pasmo można było objąć także na inne sposoby, metoda grzebieniowa nie przyjęła się powszechnie. Właściwie nie była wtedy dostępna żadna techniczna ścieżka jej rozwoju, stąd jej ocena: jako zasada – tak, jako narzędzie – nie.

Niestrudzone, bezkompromisowe, by tak rzec – „rządowe” podejście do pomiaru częstości zademonstrowano w roku 1972 w NBS [38], w ślad za pionierską pracą grupy Alego Javana w MIT (patrz odnośniki w [39]). Był to jednak trud heroiczny, a zainteresowane jego podjęciem były niemal wyłącznie laboratoria narodowe. Lasery trzeba było ustawić w szeregu, a ich częstości powiązać z podwojonymi częstościami ich poprzedników, krok po kroku budując łańcuch pomiaru częstości. Ten rodzaj pracy wymagał stworzenia układów synchronizacji częstości i fazy, które obecnie są w powszechnym użytku. My też uzyskaliśmy jedyny w swoim rodzaju wynik fizyczny: pojedynczą częstość lasera zmierzono dzięki wspólnej i rozszerzonej pracy grupy z NBS [40]. Wystarczyło to jednak, by rozpocząć proces redefiniowania metra.

**Taktyka „dziel i podbijaj”.** W znanym artykule z roku 1990 profesor Hänsch i jego koledzy zaproponowali doskonały sposób uproszczenia łańcuchów częstości: powinniśmy wykorzystać różnice częstości między laserami, jako wielkości, które w widmie układają się harmonicznie [41]. W ten sposób cały zespół laserów będzie miał prawie tę samą długość fali i będzie mógł być

zbudowany w zasadzie poprzez powielenie podstawowego ogniwa – zwykłej diody laserowej. Wówczas dzięki kryształom nieliniowym, szybkim fotodetektorom i odpowiedniej, zsynchronizowanej fazowo elektronice będzie można przejść od mikrofal do częstości optycznych. Układ taki też wydawał się skomplikowany i wyspecjalizowany, ale użyto go z powodzeniem w MPQ w Garching. Podobną strategię, opartą na różnicach częstości laserów na CO<sub>2</sub> [42], rozwinęto w laboratorium kanadyjskiego NRC (National Research Council). Jeśli przyjrzymy się takiemu układowi, to zauważymy, że zadaniem pierwszych 9 lub 10 z łącznych 14 ogniw łańcucha jest jedynie zwiększenie częstości do progu zakresu terahercowego.

Następnie, w roku 1994, pojawiło się podejście Kourrogiego i Ohtsu wykorzystujące wnękę wielorezonansową i umożliwiające osiągnięcie częstości kilku teraherców w jednym kroku [31]. Problemem przy przejściu do zakresu widzialnego byłoby narastanie szumu fazowego, związane z wysoką harmoniczną wyjściowego źródła mikrofal. Tu jednak wkroczył grzebień na laserach femtosekundowych, oferujący lepszy, łatwiejszy sposób.

*Krótką historią cudu optycznego z lat 1999–2000*

**Włókna poszerzające widmo.** Grupa z JILA zaakceptowała laser femtosekundowy jako wspaniałe impulsowe źródło światła. Nasz laser miał pasmo o szerokości ok. 80 nm przy długości fali 800 nm, ale optyczne wzorce częstości, do których chcieliśmy się podłączyć, leżały przy 1064 nm (linia podstawowa lasera neodymowego stabilizowanego jodem) oraz 778 nm (laser diodowy stabilizowany względem przejścia dwufotonowego w rubidzie). Okazało się, że konieczne poszerzenie widmowe równe ok. 104 THz może zapewnić (co prawda z trudem) zwykłe włókno telekomunikacyjne. Artykuł na ten temat [43] wysłaliśmy do druku w końcu września 1999 r.

**Włókna mikrostrukturalne – nieliniowość na serio.**

Na konferencji optyki laserowej i elektrooptyki w czerwcu 1999 r. zespół z Bell Labs przedstawił spektakularną, zgłoszoną po terminie pracę [44], pokazującą, jak zwykły femtosekundowy impuls laserowy zmienia w dramatyczny sposób barwę przy przejściu przez kilkumetrowy odcinek specjalnego włókna. Włókno takie naprawdę wytwarzało skolimowane światło białe w postaci stabilnych, powtarzalnych impulsów, dokładnie tak, jak Ted Hänsch przewidywał w swej (nieopublikowanej) propozycji metody pomiaru częstości. Użycie owego nieznanego przedtem źródła światła miało umożliwić prawie całą resztę. (Gdy zobaczyłem ten ciąg impulsów quasi-laserowego światła białego wytwarzanego przez włókno, natychmiast uwierzyłem, że pomysł Teda może stać się fizyczną rzeczywistością! Bez białego lasera z repetycją impulsów nie było na to żadnych szans). Długotrwałe apele do organizacji producentów włókien o współpracę naukową stały się w końcu bezprzedmiotowe, gdy w JILA w cudowny sposób pojawiła się próbka tego Magicznego Włókna. Koncepcję włókien fotonicznych (włókien z przerwą energetyczną wykonanych z kryształów fotonowych) wysunęli jako pierwsi w 1996 r. Knight i in. [45], wskazując na możliwość

sterowania modami przestrzennymi i dyspersją prędkości grupowej poprzez rozmieszczenie pęcherzyków powietrza we włóknie. Nasze pierwsze eksperymenty w JILA wykonaliśmy przy użyciu mikrostrukturalnych włókien wyciąganych z formy wstępnej przygotowanej 10 września 1997 r. przez Roberta S. Windelera z Bell Labs [46] za pomocą techniki jego własnego pomysłu. Szeroką gamę struktur włókien badał Philip St.J. Russell wraz z kolegami w brytyjskim Bath.

*Zaczyna się wyścig*

Naturalnie w JILA nie wiedzieliśmy, że zespół z Garching przeszedł już od etapu planów do pierwszej realizacji spójnego fazowo łańcucha opartego na grzebieniu częstości od mikrofal do zakresu widzialnego i że wysłał pracę do *Physical Review Letters* już w listopadzie 1999 r., a więc gdy my jeszcze nie mieliśmy nawet magicznego włókna! Użyli grzebienia o nieco ograniczonej szerokości pasma (44 THz), lecz ich dzielniki były w stanie zapewnić częstość optyczną jako 28. harmoniczną różnicy między jego skrajami. Był to piękny wynik, który w końcu został opublikowany 10 kwietnia 2000 r. [47]. W tym czasie zespół z JILA przy użyciu światła białego z magicznego włókna usilnie pracował nad realizacją i prezentacją naszej fazowo spójnej synchronizacji częstości przesunięcia obwiedni względem fali nośnej z częstością repetycji lasera. W raporcie opisującym nasz układ nazwaliśmy go autoreferencyjnym. Zbudowana przez nas elektronika sterująca miała cyfrowy przełącznik, za którego pomocą fazę można było ustawić na dowolną wielokrotność jednej szesnastej przesunięcia fazy pojedynczego impulsu. Doświadczalna demonstracja w JILA była oparta na interferometrycznym wyznaczeniu różnicy fazy obwiedni i fali nośnej dwóch impulsów optycznych rozdzielonych dodatkowym impulsem. Nasza elektronika wreszcie zaczęła działać, wyniki doświadczalne były jednoznaczne i 28 kwietnia 2000 r. nasze doniesienie [48] ukazało się w *Science*. Wspólny artykuł [49] świętujący sukces połączonych zespołów z Garching oraz Bell Labs i JILA ukazał się w *PRL* 29 maja 2000 r. Następny rok przyniósł lawinę pomiarów bezwzględnych częstości optycznych w laboratoriach na całym świecie. Był to chwalebny rozdział historii optyki, w dużej mierze dzięki wielkiemu wzajemnemu szacunkowi zespołów z Garching i JILA oraz całkowitej otwartości badań, której sprzyjała częsta wymiana stażystów podoktorskich, Scotta Diddamsa i Thomasa Udem, między tymi ostro rywalizującymi grupami.

*Wyniki niektórych pomiarów częstości*

Na całym świecie pracowano nad wieloma laserowymi wzorcami częstości, gdy więc nadszedł przełom związany z grzebieniem, trzeba było dokładnie zmierzyć wiele rzeczy – w tym wiele po raz pierwszy. Dane o niektórych pracach przedstawione są w tab. 1.

Metoda grzebieniowa rozprzestrzeniła się lawinowo w roku 2000, przynosząc ogromne uproszczenie pomiarów częstości optycznych połączone z ciągłą poprawą dokładności. Wkrótce po pierwszych pomiarach okazało się, że precyzja pomiarów grzebieniowych może przekroczyć

Tabela 1. Zmierzone częstości optyczne – wybrane prace z lat 1996–2001. W kolejnych kolumnach: atomy lub cząsteczki referencyjne, długość fali przejścia optycznego, główny autor, ośrodek, czasopismo, data publikacji. Pierwszy femtosekundowy pomiar grzebieniowy wykonano dla wodoru (Reichert i in. [47]). Pierwsze bezpośrednie femtosekundowe pomiary optyczne przeprowadził zespół z JILA (Jones i in. [48]). Warto zwrócić uwagę na krótkie odstępy czasu między publikacjami.

|                               |         |              |      |                               |                     |
|-------------------------------|---------|--------------|------|-------------------------------|---------------------|
| Ca                            | 657 nm  | Schnatz      | PTB  | <i>Phys. Rev. Lett.</i>       | 1 stycznia 1996     |
| Rb                            | 780 nm  | Ye           | JILA | <i>Opt. Lett.</i>             | sierpień 1996       |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 1500 nm | Nakagawa     | NRLM | <i>J. Opt. Soc. Am. B</i>     | grudzień 1996       |
| I <sub>2</sub>                | 532 nm  | Hall         | JILA | <i>IEEE T. Instrum. Meas.</i> | kwiecień 1999       |
| Sr <sup>+</sup>               | 674 nm  | Bernard      | NRC  | <i>Phys. Rev. Lett.</i>       | 19 kwietnia 1999    |
| In <sup>+</sup>               | 236 nm  | von Zanthier | MPQ  | <i>Opt. Commun.</i>           | sierpień 1999       |
| H                             | 243 nm  | Reichert     | MPQ  | <i>Phys. Rev. Lett.</i>       | 10 kwietnia 2000    |
| Rb                            | 778 nm  | Jones        | JILA | <i>Science</i>                | 28 kwietnia 2000    |
| I <sub>2</sub>                | 532 nm  | Diddams      | JILA | <i>Phys. Rev. Lett.</i>       | 29 maja 2000        |
| H                             | 243 nm  | Niering      | MPQ  | <i>Phys. Rev. Lett.</i>       | 12 czerwca 2000     |
| Yb <sup>+</sup>               | 467 nm  | Roberts      | NPL  | <i>Phys. Rev. A</i>           | 7 lipca 2000        |
| In <sup>+</sup>               | 236 nm  | von Zanthier | MPQ  | <i>Opt. Lett.</i>             | 1 grudnia 2000      |
| Ca                            | 657 nm  | Stenger      | PTB  | <i>Phys. Rev. A</i>           | 17 stycznia 2001    |
| Hg <sup>+</sup>               | 282 nm  | Udem         | NIST | <i>Phys. Rev. Lett.</i>       | 28 maja 2001        |
| Ca                            | 657 nm  | Udem         | NIST | <i>Phys. Rev. Lett.</i>       | 28 maja 2001        |
| Yb <sup>+</sup>               | 435 nm  | Stenger      | PTB  | <i>Opt. Lett.</i>             | 5 października 2001 |

precyzję określenia sprawdzanych wzorców. Niedawne testy w NIST, BIPM oraz ECNU (East China Normal University w Szanghaju) [50] potwierdzają wyniki uprzednich doświadczeń w MPQ [51] i dowodzą, że zasada grzebienia działa ściśle także w pomiarach o precyzji przekraczającej 18 cyfr znaczących.

#### Jodowy wzorzec częstości optycznej

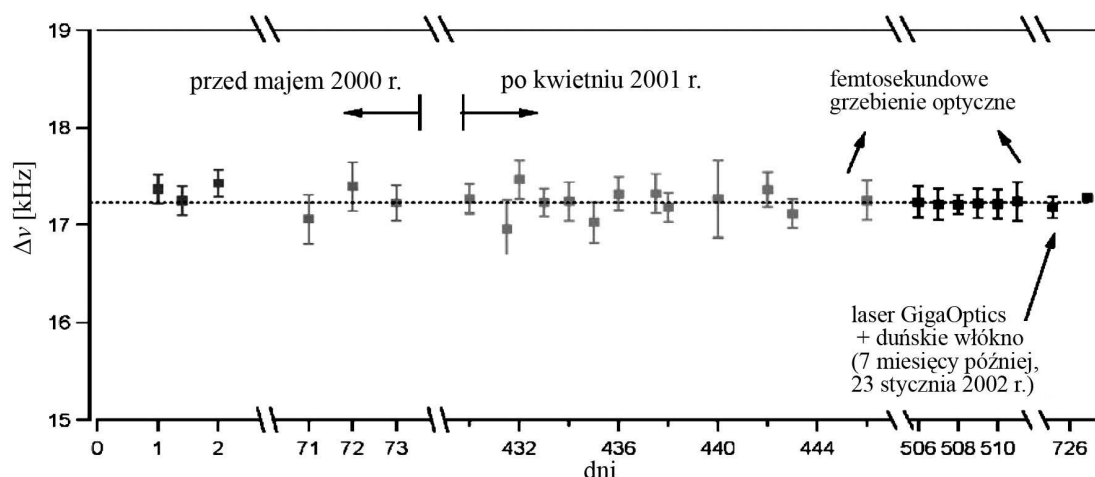
Laser Nd:YAG stabilizowany jodem to strzał w dziesiątkę w dziedzinie laserów stabilizowanych ze względu na doskonałą funkcjonalność i względną prostotę. W Japonii zrobiono układ, który był tak mały, że spełniał wymogi nakładane na bagaż podręczny w samolotach, a mimo to działał znakomicie [52]. Ponieważ masa atomowa jodu jest duża, dopplerowska poprawka drugiego rzędu wynosi dla tego układu zaledwie ok.  $5 \cdot 10^{-13}$ , a możliwe, że dzięki udoskonalonym rozwiązaniom technicznym uda się uzyskać niezależną powtarzalność nawet 5-krotnie lepszą od tej wartości. Wyzwaniem jest wciąż np. skonstruowanie układu z modulacją wolną od przesunięcia częstości. Zaletą tego układu byłyby jego niewielkie rozmiary i potencjalnie rozsądny koszt. W połączeniu z grzebieniem optycznym mógłby on utworzyć bardzo atrakcyjny zegar [53] (rys. 4). (Nie)stabilność częstości wszystkich linii grzebienia optycznego (w liczbie miliona) wynosi ok.  $4 \cdot 10^{-14}/\tau^{1/2}$ .

Od niedawna dostępne stały się stabilne jednoczęstościowe lasery Yb:YAG strojone do 1029 nm. Jeśli uda się podwoić częstość, to powinno dać się uzyskać doskonałą stabilizację dla przejść I<sub>2</sub> przy 514,5 nm, gdyż szerokość tej linii jest co najmniej 5-krotnie mniejsza niż linii 532 nm [54]. Długość fali 514,5 nm mogą także oferować jednoczęstościowe układy z włókien.

#### Co dalej?

Oprócz uproszczenia pomiarów częstości optycznych nowe układy stworzyły niewiarygodnie bogate narzędzia i możliwości pomiarowe, które z kolei stymulują postęp w dziedzinach stowarzyszonych. Niniejsza praca nie może nawet pretendować do próby prezentacji całych miriadów przepysznych zjawisk fizycznych, zwykle uważanych za należące do różnych dziedzin, które jednak dzięki dziś już poznanyemu wzajemnym związkom mogą stanowić naprawdę wspaniałe pole dalszego rozwoju narzędzi badawczych optyki. Omówmy mimo to przynajmniej kilka przykładów.

Po gorączce I generacji pomiarów częstości (tab. 1) niektóre z zastosowań grzebieni generacji II w grupie Yun Je to: synchronizacja o małych fluktuacjach czasu (rzędu femtosekund) ultraszybkich źródeł laserowych [55]; spójne zszycie widm oddzielnych femtosekundowych źródeł laserowych, tak by poszerzyć widmowo i czasowo skrócić impuls złożony [56]; precyzyjny pomiar nieliniowości optycznych z wykorzystaniem czułości pomiaru fazy w metodach w.cz. [57]; spójna akumulacja kilkuset impulsów sekwencyjnych, a następnie wykorzystanie ich łącznej energii do wytworzenia odpowiednio intensywniejszych impulsów o mniejszej częstości repetycji [58]; wreszcie poszukiwanie zmian wartości stałych fizycznych przez zespół z MPQ w Garching [59]. Ekscytujące tematy badań do zastosowań III generacji to obecnie koordynacja tymczasowych optycznych wzorców częstości na poziomie subhercowym (mimo różnic ich widm i różnej fizycznej lokalizacji), co umożliwiłoby precyzyjną zdalną synchronizację akceleratorowych wnęk rezonansowych, stworzyło stabilne oscylatory referencyjne dla dużych sieci te-



Rys. 4. Wzrost dokładności długookresowego pomiaru odchylenia stabilnej częstości 1064. harmonicznej jodowych zegarów optycznych po roku 2000 od częstości wzorcowej CIPM równej 281,630 111 74 THz. Za średnią wartość tego odchylenia mierzonego przez okres 1 roku w latach 2001–02 przyjmowano  $\Delta\nu = 17,240$  kHz, z niepewnością standardową 118 Hz (czyli niepewnością względną ok.  $4 \cdot 10^{-13}$ ). Dzięki rozwojowi technologii (grzebień optyczny) w roku 2002 odchylenie standardowe rejestrowane w ciągu miesiąca udało się zmniejszyć do 16 Hz (ok.  $6 \cdot 10^{-14}$ ).

leskopów mikrofalowych i dało możliwość zmniejszenia względnego szumu fazowego oscylatorów referencyjnych używanych w sieciach teleskopów do badania dalekiego kosmosu (NASA, VLBI, ...). Taka jest część programu na pierwszych 5 lat.

A następne projekty? Może by tak za pomocą linii harmonicznych grzebień 14,4 keV przyjrzyć się mössbauerowskim rezonansom jądrowym w  $^{57}\text{Fe}$ ? Kolejna ostra linia, przy 6,2 keV, pochodzi z  $^{181}\text{Ta}$ . A co byście powiedzieli na użycie przetwarzania równoległego do określenia aktywności biologicznej potencjalnego leku za pomocą receptorów CAR (ang. constitutive active receptor) – zsynchronizowane lasery impulsowe wzbudzają specyficzne ligandowe rezonanse ramanowskie pojedynczej cząsteczki, przyciągniętej i przyklejonej do paska odpowiednio dobranego białka próbnego, umieszczonego na podłożu?

W szerszym kontekście znajdujemy się obecnie w wyjątkowym punkcie rozwoju nauki – mamy wspaniałą zdolność „rozumienia” prawie wszystkich zjawisk, dokładnego przewidywania ich przebiegu dzięki rozwiązaniu naszych równań, wreszcie scalania rozmaitych szczegółów w nasze modele. Weźmy np. system GPS, w którym fizyka z różnych dziedzin, jak teoria grawitacji i teoria względności – nie wspominając o dynamice ruchu satelitów, technice radiowej i programach komputerowych – z powodzeniem łączy się z naszymi wyrafinowanymi zegarami optycznymi, tworząc spójne i wysoce użyteczne narzędzie praktyczne. Jest wspaniałą sprawą, że system ten jest tak prosty w obsłudze. System GPS musimy z pewnością zaliczyć do największych osiągnięć technicznych wszech czasów.

Praca uhonorowana Nagrodą Nobla w 2005 r. oznacza pojawienie się kolejnego dramatycznego, potężnego przełomu, który – jak można oczekiwać – zaowocuje osiągnięciami o takim samym rozmachu i charakterze, jak

wspomniany GPS. W tych pierwszych chwilach po swych narodzinach nasza technika optoelektroniczna jest jednak jeszcze zbyt nowa i mało spopularyzowana – cieszy się na razie tylko zainteresowaniem specjalistów od wzorców częstości i pozostałych metrologów. Wiemy, że dokładność pomiarów częstości optycznych jest dziś ograniczona przez obecny mikrofalowy wzorec częstości do „zaledwie” 15 cyfr znaczących, metoda grzebieniowa umożliwia już jednak porównanie dwóch częstości z dokładnością lepszą o kilka rzędów wielkości. Jeśli mamy się kierować historią fizyki, to możemy oczekiwać miłych niespodzianek, gdy metoda ta stanie się szerzej dostępna, a jej możliwości zaczną być wykorzystywane do pomysłowych pomiarów fundamentalnych przez rosnącą społeczność obdarzonych wyobraźnią naukowców „od badań podstawowych”. Biorąc pod uwagę cały dotychczasowy przebieg postępu w nauce, czy założylibyśmy się, że – otwierając matryoszkę Przyrody – dotarliśmy już do najmniejszej laleczki w jej wnętrzu?

## Podziękowania

Z pewnością jednym ze skarbów życia jest radość z obcowania ze wspaniałymi młodymi naukowcami. Spośród wielu z nich muszę wybrać do szczególnych podziękowań Jima Bergquista, Leo Hollberga, Miao Zhu i Juna Ye za ich entuzjazm i wyjątkowy wkład w realizację programu JILA. Dyrekcji NIST gorąco dziękuję za akceptowanie i sponsorowanie przez całe te lata wielu ryzykownych projektów badawczych z dziedziny spektroskopii laserowej. Leo Hollberg, Steve Cundiff i ja byliśmy szczególnie radzi, że wiosną 1999 r. znalazł akceptację projekt związany z femtosekundowym grzebieniowym syntetyzatorem częstości. Doskonałymi kolegami dokooptowanymi do tych eksperymentów byli Scott Diddams i David Jones, a siła naukowa JILA znacznie wzrosła, gdy w roku

1999 powrócił Jun Ye i utworzył własną grupę. Za każdym razem, gdy odwiedzał nas profesor Long-Sheng Ma z Szanghaju, tempo naszych badań ulegało dużemu przyspieszeniu. Niegdyś zaproszeni do nas goście, jak Christian Bordé, nie przestają być naszymi współpracownikami nawet po 30 latach od swego pobytu w JILA. Z przyjemnością i wdzięcznością odnotowuję, że nasza praca miała częściowe wsparcie finansowe ze strony NSF, ONR, AFOSR oraz NASA, a od ponad 40 lat ma je ze strony NIST. Wiele skorzystałem ze szczodrego dzielenia się pomysłami i wiedzą przez mego mentora z NBS, Petera L. Bendersa. Ponad wszystko jestem wdzięczny Lindy Hall, mojej cierplivej i troskliwej towarzyszce życia, za jej zrozumienie, wielki trud i wkład do tej pracy naukowej, a co ważniejsze, do naszego wspólnego życia pełnego radości i atrakcji. Przez tych 45 lat cudownie było patrzeć, jak rozwój eksperymentów i postępy ich strony technicznej przygotowywały tę ostateczną odpłatę w postaci grzebienia optycznego. Teraz zastanawiamy się razem, czy nie nadszedł już czas, by opróżnić mój pokój w JILA, spakować się do naszego nowego wozu kempingowego i wyprawić w świat na eksplorację innej jego części.

## Dodatek: Cała historia grzebienia dla studentów

Cieszę się, że mogę odpowiedzieć na pytanie, jak można sobie wyobrazić grzebienie częstości. Przypuśćmy, że mamy sinusoidalny sygnał napięcia lub pola. Wówczas wykres w funkcji czasu pokazuje gładkie oscylacje, a wykres w funkcji częstości – pojedynczą składową fourierowską, czyli jedną ostrą linię. Dodajmy do tej fali kilka harmonicznych. Widmo ma teraz o kilka linii więcej, leżących przy dokładnych częstościach harmonicznych, podczas gdy obraz w dziedzinie czasowej jest dość skomplikowany. Dobierając fazy harmonicznych, możemy zacząć syntetyzować pewne zaburzenie zależne od czasu, które zacznie przypominać impuls lub – dokładniej – szereg identycznych impulsów. Idźmy o krok dalej, wprowadzając dużą liczbę harmonicznych. Im więcej ich dodajemy, tym ostrzejszy impuls możemy zsintetyzować i oczywiście tym bogatsze jest widmo takiej fali. Jeśli pójdziemy jeszcze dalej w kierunku dodawania spójnych harmonicznych, to otrzymamy widmo o mnóstwie linii, składające się wyłącznie z harmonicznych naszej początkowej fali sinusoidalnej. Aby dojść tą metodą do zakresu widzialnego, dla źródła o podstawowej częstości repetycji rzędu 100 MHz potrzebnych będzie parę milionów harmonicznych. Dzięki odpowiedniemu doborowi fazy harmonicznych impuls może być w dziedzinie czasowej  $10^6$  razy ostrzejszy niż początkowa fala sinusoidalna. Możemy więc oczekiwać naprawdę wąskich impulsów i widm o naprawdę dużej szerokości.

Sytuacja ta dobrze zgadza się z tym, czego oczekivalibyśmy na podstawie analizy fourierowskiej pojedynczego impulsu. Impuls taki będzie miał składowe fourierowskie o wszystkich częstościach i niemal takich samych amplitudach, stopniowo zmniejszających się jednak dla częstości

przekraczającej odwrotność szerokości impulsu w dziedzinie czasowej. Jeśli mamy do czynienia z ciągiem impulsów o pewnym odstępie czasowym, lecz chcemy koniecznie znać jego widmo, to będzie nam potrzebny analizator o pasmie przenoszenia węższym od częstości repetycji, w przeciwnym wypadku bowiem nie uda nam się rozdzielić struktury widma. Wąskie widmowe pasmo przenoszenia odpowiada jednak długiemu czasowi odpowiedzi. Tak więc sygnał na wyjściu spektrometru ustawionego na dowolną długość fali bądź częstość będzie wynikiem spójnego zsumowania wkładów wielu impulsów. Chociaż pojedynczy impuls ma szerokie widmo ciągłe, to jednak spójne sumowanie amplitud wielu impulsów powinno prowadzić do zjawisk interferencyjnych, które będą modułowały widmo. Dodawanie coraz większej liczby impulsów w coraz krótszym przedziale czasu (zwiększanie widmowej zdolności rozdzielczej) będzie dawało coraz głębszą modulację. W końcu dochodzimy do bardzo ostrych, równomiernie rozłożonych fourierowskich harmonicznych linii widmowych. Dopóki nie pojawią się trudności techniczne, np. szum fazowy związany z częstością repetycji, dopóty działa zasada: im lepsza jest rozdzielczość analizy kształtu fali, tym ostrzejsze są zaobserwowane linie widmowe. Widmo przypomina wtedy rzeczywiście „grzebień”. Opisane tu zależności łatwo sobie samemu sprawdzić w domowych pieleszach na układach elektronicznych – w świecie optyki i świecie elektroniki powinny przecież obowiązywać te same zasady...

Z laserami femtosekundowymi używanymi do wytwarzania tych impulsów jest, prawdę mówiąc, związana jeszcze jedna ciekawostka. Polega ona na tym, że laser taki może drgać w każdym z modów swego rezonatora, określonych przez warunek powtarzalności fazy po przejściu całej pętli rezonatora. Wszystkie liczne mody podłużne mają swe własne liczby kwantowe, określające z grubsza liczbę pełnych cykli optycznych zawartych w zamkniętej pętli. Ich obliczenie obejmuje oczywiście zależną od długości fali prędkość fazową i pewne uśrednienie po propagacji przez wiele elementów optycznych. Kolejnym czynnikiem jest fakt, że laser taki działa w samoorganizującym się repetycyjnym modzie impulsowym. W rezultacie straty optyczne w laserze mogą stać się tak duże, że uniemożliwiają akcję laserową, chyba że wszystkie mody rezonatora potrafią tak dopasować swe fazy, by zsintetyzowały się przestrzennie w impulsy typu delty Diraca. Sprawą krytyczną jest wytworzenie krótkotrwałego impulsu przechodzącego przez kryształ  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ , gdyż krótki impuls będzie odpowiadał bardzo dużej mocy szczytowej i oddziałując z prętem kryształu lasera według zależności kwadratowej (optyczne zjawisko Kerra), wytworzy soczewkę skupiającą o większym współczynniku załamania na osi lasera, gdzie natężenie wiązki jest największe. W ten sposób powstaje stabilna, samoorganizująca się sytuacja: wprawdzie w rezonatorze, który ma niewystarczającą zdolność skupiającą, następują duże straty związane z dyfrakcją, ale są one periodycznie niwelowane przez „kulę światła”, która swój własny wpływ na kryształ wykorzystuje do wytworzenia dodatkowej refrak-



cji potrzebnej do odpowiedniego zmniejszenia strat w rezonatorze.

Obwiednia impulsu opisująca tę kulę światła jest wynikiem superpozycji wielu modów rezonatora, a jej kształt ewoluuje, jeśli występują różnice opóźnienia dla fal o różnych długościach. Dyskutujemy teraz po prostu pojęcie prędkości grupowej, zgodnie z którym kształt zaburzenia ulega ewolucji, jeśli fale o wszystkich częstościach nie rozchodzą się z taką samą prędkością. Laser musi więc fizycznie zawierać elementy optyczne, których zadaniem jest przeciwdziałanie skutkom faktu, że światło niebieskie biegnie w kryształach wolniej niż światło czerwone. Aby laser wytwarzał najkrótsze impulsy, czas obiegu pętli musi być w zasadzie taki sam, chociaż – jak widać – jest to warunek dość trudny do spełnienia, gdyż same impulsy laserowe wprowadzają pewne opóźnienie. W każdym razie światło wychodzące przez zwierciadło wyjściowe lasera będzie regularnym, okresowym ciągiem ostrych impulsów, a analiza częstościowa ukaże jego grzebieniową strukturę. Szybkie oscylacje optyczne będą jednakże w ogólności miały inną fazę za każdym razem, gdy impuls dociera do powierzchni zwierciadła. Ich faza od impulsu do impulsu będzie się nieco przesuwała do przodu lub tyłu i w ten sposób grzebień częstości optycznych może być trochę przesunięty w stosunku do przypadku ściśle fourierowskich harmonicznych rodem z wyżej przedstawionych wyobrażeń. Zwykle przesunięcie fazowe jest stałe dla każdego impulsu, a tym samym stała jest częstość narastania opóźnienia fazy w stosunku do harmonicznej częstości repetycji. Opracowaliśmy elektrooptyczny schemat nazwany autoreferencyjnym, w którym owa dodatkowa częstość przesunięcia obwiedni fali nośnej jest stabilnie synchronizowana w stosunku małych liczb z częstością repetycji. Można wybrać ten stosunek równy zeru i mieć grzebień ściśle harmoniczny, a np. przy stosunku równym 1/2 powstaje grzebień przesunięty o połowę podstawowej częstości repetycji, która sama jest oczywiście równa odstępom „zębów” grzebienia [47–51].

Tłumaczył Jerzy Gronkowski  
Instytut Fizyki Doświadczalnej  
Uniwersytet Warszawski

## Literatura

- [1] [www.bipm.org/en/si/si\\_constants.html](http://www.bipm.org/en/si/si_constants.html) (BIPM).
- [2] [www.mel.nist.gov/div821/museum/timeline.htm](http://www.mel.nist.gov/div821/museum/timeline.htm) (NIST).
- [3] J.L. Flowers, B.W. Petley, „Progress in our knowledge of the fundamental constants of physics”, *Rep. Prog. Phys.* **64**, 1191 (2001).
- [4] R. Steiner, E.R. Williams, D.B. Newell, R. Liu, „Towards an electronic kilogram: an improved measurement of the Planck constant and electron mass”, *Metrologia* **42**, 431 (2005).
- [5] C.J. Bordé, „Base units of the SI, fundamental constants and modern quantum physics”, *Philos. T. Roy. Soc. A* **363**, 2177 (2005).
- [6] D. Sobel, *Longitude, the True Story of a Lone Genius Who Solved the Greatest Scientific Problem of His Time* (Penguin Books, New York 1995).
- [7] M.A. Kasevich, E. Riis, S. Chu, R.G. DeVoe, „rf Spectroscopy in an Atomic Fountain”, *Phys. Rev. Lett.* **63**, 612 (1989).
- [8] A. Clairon, P. Laurent, G. Santarelli, S. Ghezali, S.N. Lea, M. Bahoura, „A Cesium Fountain Frequency Standard – Preliminary Results”, *IEEE T. Instrum. Meas.* **44**, 128 (1995).
- [9] T.P. Heavner, S.R. Jefferts, E.A. Donley, J.H. Shirley, T.E. Parker, „NIST-F1: recent improvements and accuracy evaluations”, *Metrologia* **42**, 411 (2005).
- [10] K. Gibble, S. Chu, „Laser-Cooled Cs Frequency Standard and a Measurement of the Frequency-Shift due to Ultracold Collisions”, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1771 (1993).
- [11] E.S. Polzik, J. Carri, H.J. Kimble, „Atomic spectroscopy with squeezed light for sensitivity beyond the vacuum-state limit”, *Appl. Phys. B* **55**, 279 (1992).
- [12] R.W.P. Drever, J.L. Hall, F.V. Kowalski, J. Hough, G.M. Ford, A.J. Munley, H. Ward, „Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator”, *Appl. Phys. B* **31**, 97 (1983).
- [13] B.C. Young, F.C. Cruz, W.M. Itano, J.C. Bergquist, „Visible Lasers with Subhertz Linewidths”, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 3799 (1999).
- [14] B.C. Young, R.J. Rafac, J.A. Beall, F.C. Cruz, W.M. Itano, D.J. Wineland, J.C. Bergquist, „Hg<sup>+</sup> Optical Frequency Standard: Recent Progress”, w: *Laser Spectroscopy, Proc. XVII Int. Conf.*, red. E.A. Hinds i in. (World Scientific, Singapore 2005), s. 433.
- [15] M. Notcutt, L.-S. Ma, J. Ye, J.L. Hall, „Simple and compact 1-Hz laser system via an improved mounting configuration of a reference cavity”, *Opt. Lett.* **30**, 1815 (2005).
- [16] J.L. Hall, „The laser absolute wavelength standard problem”, *IEEE J. Quantum Electronics* **4**, 638 (1968).
- [17] R.L. Barger, J.L. Hall, „Pressure Shift and Broadening of Methane Line at 3.39  $\mu$  Studied by Laser-Saturated Molecular Absorption”, *Phys. Rev. Lett.* **22**, 4 (1969).
- [18] J.L. Hall, „Optical frequency measurement: 40 years of technology revolutions”, *IEEE J. Selected Topics Quantum Electronics* **6**, 1136 (2000).
- [19] V.S. Letokhov, V.P. Chebotayev, *Nonlinear Laser Spectroscopy* (Springer, Berlin 1977); przekład polski: *Nieliniowa spektroskopia laserowa* (PWN, Warszawa 1982).
- [20] S. Stenholm, *Foundations of Laser Spectroscopy* (Wiley, New York 1984).
- [21] M.D. Levenson, S.S. Kano, *Introduction to Nonlinear Laser Spectroscopy* (Academic Press, San Diego 1988).
- [22] S.N. Bagaev, L.S. Vasilenko, A.K. Dmitriev, M.N. Skvortsov, V.P. Chebotaev, „Narrowing of Nonlinear Resonances in Low Pressure Gases”, *JETP Letters* **23**, 360 (1976) [*Pis'ma w ŽETF* **23**, 399 (1976)].
- [23] C.J. Bordé, J.L. Hall, C.V. Kunasz, D.G. Hummer, „Saturated absorption line shape: Calculation of the transit-time broadening by a perturbation approach”, *Phys. Rev. A* **14**, 236 (1976).
- [24] H.L. Bethlem, G. Berden, G. Meijer, „Decelerating Neutral Dipolar Molecules”, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1558 (1999).
- [25] E.R. Hudson, H.J. Lewandowski, B.C. Sawyer, J. Ye, „Cold Molecule Spectroscopy for Constraining the Evolution of the Fine Structure Constant”, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 143004 (2006).
- [26] L.-S. Ma, J. Ye, P. Dubé, J.L. Hall, „Ultrasensitive frequency-modulation spectroscopy enhanced by a high-finesse

- optical cavity: theory and application to overtone transitions of  $C_2H_2$  and  $C_2HD$ ", *J. Opt. Soc. Am. B* **16**, 2255 (1999).
- [27] M. Ziskind, C. Daussy, T. Marrel, Ch. Chardonnet, „Improved sensitivity in the search for a parity-violating energy difference in the vibrational spectrum of the enantiomers of CHFClBr”, *Eur. Phys. J. D* **20**, 219 (2002).
- [28] S. Svanberg, *Atomic and Molecular Spectroscopy*, wyd. 2 (Springer Verlag, Berlin 1992).
- [29] J.L. Hall, C.J. Bordé, K. Uehara, „Direct Optical Resolution of Recoil Effect Using Saturated Absorption Spectroscopy”, *Phys. Rev. Lett.* **37**, 1339 (1976).
- [30] S.N. Bagayev, V.P. Chebotayev, A.K. Dmitriyev, A.E. Om, Yu.V. Nekrasov, B.N. Skvortsov, „Second-order Doppler-free spectroscopy”, *Appl. Phys. B* **52**, 63 (1991).
- [31] M. Kourogi, T. Enami, M. Ohtsu, „A coupled-cavity monolithic optical frequency comb generator”, *IEEE Photonics Tech. Lett.* **8**, 1698 (1996).
- [32] J.L. Hall, L.-S. Ma, M. Taubman, B. Tiemann, F.-L. Hong, O. Pfister, J. Ye, „Stabilization and frequency measurement of the  $I_2$ -stabilized Nd:YAG laser”, *IEEE T. Instrum. Meas.* **48**, 583 (1999).
- [33] S.A. Diddams, L.-S. Ma, J. Ye, J.L. Hall, „Broadband optical frequency comb generation with a phase-modulated parametric oscillator”, *Opt. Lett.* **24**, 1747 (1999).
- [34] J.L. Hall, J. Ye, S.A. Diddams, L.-S. Ma, S.T. Cundiff, D.J. Jones, „Ultrasensitive spectroscopy, the ultrastable lasers, the ultrafast lasers, and the seriously nonlinear fiber: a new alliance for physics and metrology”, *IEEE J. Quantum Electronics* **37**, 1482 (2001).
- [35] F. Salin, J. Squier, M. Piche, „Mode locking of Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lasers and self-focusing: a Gaussian approximation”, *Opt. Lett.* **16**, 1674 (1991).
- [36] K.W. Holman, R.J. Jones, A. Marian, S.T. Cundiff, J. Ye, „Detailed studies and control of intensity-related dynamics of femtosecond frequency combs from modelocked Ti:Sapphire lasers”, *IEEE J. Selected Topics Quantum Elect.* **9**, 1018 (2003).
- [37] J.N. Eckstein, A.I. Ferguson, T.W. Hänsch, „High-Resolution Two-Photon Spectroscopy with Picosecond Light Pulses”, *Phys. Rev. Lett.* **40**, 847 (1978).
- [38] K.M. Evenson, J.S. Wells, F.R. Petersen, B.L. Danielson, G.W. Day, R.L. Barger, J.L. Hall, „Speed of Light from Direct Frequency and Wavelength Measurements of the Methane-Stabilized Laser”, *Phys. Rev. Lett.* **29**, 1346 (1972).
- [39] A. Sanchez, C.F. Davis, Jr., K.C. Liu, A. Javan, „The MOM tunneling diode – Theoretical estimate of its performance at microwave and infrared frequencies”, *J. Appl. Phys.* **49**, 5270 (1978).
- [40] D.A. Jennings, C.R. Pollock, F.R. Petersen, R.E. Drullinger, K.M. Evenson, J.S. Wells, J.L. Hall, H.P. Layer, „Direct frequency measurement of the  $I_2$ -Stabilized He-Ne 473-THz (633-nm) Laser”, *Opt. Lett.* **8**, 136 (1983).
- [41] H.R. Telle, D. Meschede, T.W. Hänsch, „Realization of a new concept for visible frequency division – phase locking of harmonic and sum frequencies”, *Opt. Lett.* **15**, 532 (1990).
- [42] B.G. Whitford, „Measurement of the Absolute Frequencies of CO<sub>2</sub>-Laser Transitions by Multiplication of CO<sub>2</sub>-Laser Difference Frequencies”, *IEEE T. Instrum. Meas.* **29**, 168 (1980).
- [43] S.A. Diddams, D.J. Jones, L.-S. Ma, S.T. Cundiff, J.L. Hall, „Optical frequency measurement across a 104-THz gap with a femtosecond laser frequency comb”, *Opt. Lett.* **25**, 186 (2000).
- [44] J.K. Ranka, A. Stentz, „Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm”, *Opt. Lett.* **25**, 25 (2000).
- [45] J.C. Knight, T.A. Birks, P.S. Russell, D.M. Atkin, „All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding”, *Opt. Lett.* **21**, 1547 (1996).
- [46] R.S. Windeler, informacja przekazana autorowi (maj 2006 r.).
- [47] J. Reichert, M. Niering, R. Holzwarth, M. Weitz, Th. Udem, T.W. Hänsch, „Phase Coherent Vacuum-Ultraviolet to Radio Frequency Comparison with a Mode-Locked Laser”, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3232 (2000).
- [48] D.J. Jones, S.A. Diddams, J.K. Ranka, A. Stentz, R.S. Windeler, J.L. Hall, S.T. Cundiff, „Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis”, *Science* **288**, 635 (2000).
- [49] S.A. Diddams, D.J. Jones, J. Ye, T. Cundiff, J.L. Hall, J.K. Ranka, R.S. Windeler, R. Holzwarth, Th. Udem, T.W. Hänsch, „Direct Link between Microwave and Optical Frequencies with a 300 THz Femtosecond Laser Comb”, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 5102 (2000).
- [50] L.-S. Ma, Z. Bi, A. Bartels, L. Robertsson, M. Zucco, R.S. Windeler, G. Wilpers, C. Oates, L. Hollberg, S.A. Diddams, „Optical Frequency Synthesis and Comparison with Uncertainty at the 10<sup>-19</sup> Level”, *Science* **303**, 1843 (2004).
- [51] Th. Udem, R. Holzwarth, T.W. Hänsch, „Optical frequency metrology”, *Nature* **416**, 233 (2002).
- [52] F.L. Hong, J. Ishikawa, K. Sugiyama, A. Onae, H. Matsu-moto, J. Ye, J.L. Hall, „Comparison of independent optical frequency measurements using a portable iodine-stabilized Nd:YAG laser”, *IEEE T. Instrum. Meas.* **52**, 240 (2003).
- [53] J. Ye, L.-S. Ma, J.L. Hall, „Molecular Iodine Clock”, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 270801 (2001).
- [54] W.-Y. Cheng, L.S. Chen, T.H. Yoon, J.L. Hall, J. Ye, „Sub-Doppler molecular iodine transitions near the dissociation limit (523–498 nm)”, *Opt. Lett.* **27**, 571 (2002).
- [55] R.K. Shelton, S.M. Foreman, L.-S. Ma, J.L. Hall, H.C. Kapteyn, M.M. Murnane, M. Notcutt, J. Ye, „Sub-femtosecond timing jitter between two independent, actively synchronized, mode-locked lasers”, *Opt. Lett.* **27**, 312 (2002).
- [56] R.K. Shelton, L.-S. Ma, H.C. Kapteyn, M.M. Murnane, J.L. Hall, J. Ye, „Phase-Coherent Optical Pulse Synthesis from Separate Femtosecond Lasers”, *Science* **293**, 1286 (2001).
- [57] T.M. Fortier, D.J. Jones, J. Ye, S.T. Cundiff, „Highly phase stable mode-locked lasers”, *IEEE J. Selected Topics Quantum Elec.* **9**, 1002 (2003).
- [58] R.J. Jones, J. Ye, „High-repetition-rate coherent femtosecond pulse amplification with an external passive optical cavity”, *Opt. Lett.* **29**, 2812 (2004).
- [59] M. Fischer, N. Kolachevsky, M. Zimmermann, R. Holzwarth, Th. Udem, T.W. Hänsch, M. Abgrall, J. Grünert, I. Maksimovic, S. Bize, H. Marion, F. Pereira Dos Santos, P. Lemonde, G. Santarelli, P. Laurent, A. Clairon, C. Salomon, M. Haas, U.D. Jentschura, C.H. Keitel, „New Limits on the Drift of Fundamental Constants from Laboratory Measurements”, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 230802 (2004).

## Podwójny jubileusz Bronisława Średniawy

W roku 2007 przypadają okrągłe rocznice dwóch ważnych wydarzeń w życiu Bronisława Średniawy, profesora fizyki teoretycznej Uniwersytetu Jagiellońskiego: 90. urodziny i 60. rocznica obrony pracy doktorskiej. Z tej okazji Oddział Krakowski Polskiego Towarzystwa Fizycznego zorganizował 31 maja oraz 21 czerwca dwa konwersatoria poświęcone naszemu Seniorowi. Na pierwszym z nich dostojny Jubilat opowiedział zebrany o różnych wydarzeniach ze swego długiego i pracowitego życia, o młodości, studiach, czasach tułaczki wojennej, tajnej działalności Uniwersytetu. Wspominał swoich mistrzów, kolegów i współpracowników, trudne czasy komunistyczne, represje wobec fizyków w latach osiemdziesiątych. Równocześnie na ekranie były wyświetlane fotografie z życia Profesora, wybrane do ilustracji artykułów o nim przygotowanych do publikacji w *Fotonie* (zesz. 97, lato 2007).

Po referacie do wspomnień dołączyli się obecni na konwersatorium koledzy i uczniowie Jubilata. Przypomnieli swoje kontakty z nim, anegdoty, żarty studenckie, a także niektóre epizody z jego życia prywatnego.

W imieniu członków Towarzystwa przewodniczący Oddziału Zbigniew Majka złożył serdeczne gratulacje i wręczył Profesorowi kwiaty oraz album *Ziemia z kosmosu*, podpisany przez licznych uczestników spotkania, życząc mu dobrego zdrowia i dalszej aktywności w pracy. Podobnie dyrektor Instytutu Fizyki UJ Andrzej Warczak w imieniu całego Uniwersytetu pogratulował osiągnięć naukowych i dydaktycznych, wychowania wielu pokoleń fizyków teoretyków oraz podziękował za lata pracy jako wykładowcy, kierownika Zakładu Teoretycznej Fizyki Jądrowej, dziekana, prodziekana, a ostatnio historyka fizyki.

Podczas drugiego konwersatorium prof. Andrzej Trautman z Instytutu Fizyki Teoretycznej UW wygłosił referat pt. „Myron Mathisson w Krakowie i na świecie”. Niezwykle zdolny warszawski fizyk Myron Mathisson (1897–1940) cieszył się uznaniem samego Alberta Einsteina. W latach 1915–17 Einstein zabiegał dlań o stypendium Rockefellera i zapraszał go do współpracy. Świadczy o tym bardzo interesująca korespondencja obu uczonych, cytowana w referacie prof. Trautmana. Mathisson nigdy jednak nie spotkał się z Einsteinem. W 1937 r. został zaproszony do Krakowa przez prof. Jana Weyssenhoffa. Współpracowali przez dwa lata, czyli do 1939 r., gdy Mathisson wyjechał do Francji. Najwartościowsze prace Mathissona pochodzą właśnie z okresu jego pobytu w Krakowie. W tym czasie Bronisław Średniawa pod opieką Weyssenhoffa kończył studia fizyki na UJ. Obecnie jest jedynym żyjącym fizykiem, który znał osobiście Mathis-

sona. Po wysłuchaniu referatu podzielił się z zebranymi wspomnieniami z tej znajomości.

★ ★ ★

Bronisław Średniawa urodził się 17 czerwca 1917 r. w Ciężkowicach koło Tarnowa. Uczył się w znakomitym Polskim Gimnazjum w Bielsku. Studia fizyki i matematyki na UJ rozpoczął w 1935 r. Jego opiekunem naukowym w zakresie fizyki był prof. Jan Weyssenhoff, który zajmował się wtedy podstawami ogólnej teorii względności. W 1939 r. uzyskał absolutorium na obu kierunkach, ale wybuch wojny uniemożliwił rozpoczęcie nowego roku akademickiego. W pierwszych dniach września wyjechał najpierw do Lwowa, potem na Podole i z powrotem do Lwowa, gdzie spotkał prof. Weyssenhoffa. W obawie przed wcieleniem do Armii Czerwonej wrócił do okupowanego Krakowa już w grudniu tegoż roku (Weyssenhoff powrócił dopiero w lecie 1941 r.). Niemcy zamknęły szkoły wyższe i wywieźli większość profesorów do obozu koncentracyjnego w Sachsenhausen, ale Uniwersytet prowadził tajną działalność.

Średniawa przez kilka miesięcy pracował jako robotnik w wodociągach miejskich, później jako urzędnik w urzędzie statystycznym, mieszczącym się w gmachu Collegium Novum, a po ukończeniu szkoły Górniczo-Hutniczo-Mierniczej jako technik mierniczy.

Pod kierunkiem prof. Witolda Wilkosza w 1941 r. napisał pracę magisterską z matematyki „Metoda izoklin dla równań różniczkowych zwyczajnych”. Dwa lata później obronił tę pracę przed prof. Tadeuszem Wązewskim, gdyż prof. Wilkosz w międzyczasie zmarł. Pracę magisterską z fizyki teoretycznej „O momentorze Henriota”, której promotorem był prof. Weyssenhoff, wykonał w 1943 r., złożył tajny egzamin magisterski i zaczął pracować jako asystent. Jesienią 1944 r. powierzono mu tajne wykłady z fizyki dla kompletu studentów medycyny biorących udział w zorganizowanych przez prof. Mieczysława Małeckiego studiach na tajnym uniwersytecie.

Jesienią 1945 r. Kraków został wyzwolony i UJ wznowił działalność. Profesor Weyssenhoff zaproponował mgr. Średniawie temat pracy doktorskiej: Relatywistyczne równania ruchu cząstki dipolowej i kwadrupolowej. W pracy tej z zasady wariacyjnej Mathissona autor wyprowadził równania ruchu cząstki o nieznikającej masie i momencie dipolowym (rozpatrywanej przez Hönla i Papapetrou), cząstki określonej przez biwektor spinu (rozpatrywanej przez Mathissona) i cząstki o momencie kwadrupolowym. Zbadał też pewne własności rozwiązań tych równań. Egzaminy i promocja doktorska odbyły się w czerwcu 1947 r.

W roku 1951 dr Średniawa został mianowany prodziekanem Wydziału Matematyki, Fizyki i Chemii. Funkcję tę pełnił do roku 1955. W latach 1950–56 wykładał mechanikę teoretyczną, początkowo dla fizyków i matematyków, potem algebrę i geometrię analityczną, hydrodynamikę i teorię sprężystości oraz termodynamikę dla fizyków. We dwójkę z prof. Weysenhoffem pełnili obowiązki, które obecnie są rozdzielane na kilku wykładowców.

W 1954 r. ukazało się pierwsze wydanie skryptu *Mechanika ośrodków ciągłych*, który napisał wraz z Weysenhoffem. Drugie wydanie tego skryptu ukazało się w 1967 r.

Doktor Średniawa zajął się wówczas mechaniką kwantową i powstającą elektrodynamiką kwantową. Spośród jego ówczesnych prac wymienię tylko pracę z 1956 r. „O związku między metodą operatorów statystycznych i metodą perturbacji zależnych od czasu”. Wykazał w niej, że obie te metody są w przybliżeniu zgodne, jeżeli jeden z dwóch współdziałających układów ma cechy układu makroskopowego. Na podstawie tej pracy został w 1956 r. docentem.

Już w pierwszych latach powojennych Średniawa zainteresował się historią fizyki, zwłaszcza fizyki polskiej, w tym krakowskiej. Rezultatem tych zainteresowań było, oprócz kilku artykułów w *Życiu Nauki*, wydanie w 1962 r. wspólnej z Janem Weysenhoffem i Tadeuszem Piechem monografii *Wkład polskich uczonych do fizyki statystyczno-molekularnej*, poświęconej działalności Władysława Natansoniego i Mariana Smoluchowskiego.

W grudniu 1957 r., po półtorarocznym oczekiwaniu na wizę, docent Średniawa wyjechał do Szwajcarii, na Uniwersytet Zurychski, gdzie pracował do 1959 r. pod kierunkiem Walthera Heitlera. Tam wraz z fizykiem szwajcarskim Charles'em Terreaux i fizykiem irlandzkim Lochlainem O'Raihfertaigh obliczał różnicę mas protonu i neutronu na podstawie ówczesnej kwantowej teorii pól. Po ukończeniu tej pracy zajął się anihilacją pozytonu w metalach alkalicznych. W pracy „On the Breadths of Annihilation Times in One- and Two Valued Metals” wykazał, że anihilacja pozytonu odbywa się głównie z udziałem elektronów z powłok atomowych, a nie, jak przedtem sądzono, z elektronami swobodnymi w metalu. Artykuł ten jest teraz cytowany jako pionierska praca teoretyczna dotycząca zjawiska anihilacji.

Jesienią roku 1959 doc. Średniawa wrócił do Krakowa, by nadal zajmować się fizyką wysokich energii. W roku 1962 otrzymał tytuł profesora nadzwyczajnego, a w 1969 r. został profesorem zwyczajnym. Równocześnie otrzymał kierownictwo nowo utworzonej Katedry Teoretycznej Fizyki Jądrowej w IF UJ. W następnym roku wspólnie z emerytowanym już prof. Weysenhoffem opublikował rozszerzoną wersję pracy z roku 1956 „On the approximate applicability of the Schrödinger equation to non-isolated systems”.

Bronisław Średniawa trzykrotnie pracował w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej: w latach 1965–67 w Laboratorium Fizyki Teoretycznej zajmował się badaniem symetrii U(12) i SU(2) rodzin cząstek elementarnych, a w latach 1976–78 i 1982–84 w Laborato-

rium Wysokich Energii jako teoretyk w grupie prof. Zbigniewa Strugalskiego pracował nad własnościami zderzeń pionów o pędzie 3,5 GeV/c z jądrami ksenonu w komorze ksenonowej.

Lata 1967–76, 1978–82 i 1982–87 spędził w Krakowie, prowadząc zajęcia dydaktyczne i zajmując się teoretyczną fizyką wysokich energii we współpracy z Andrzejem Kotańskim i Andrzejem Białasem. W roku 1977 ukazał się jego podręcznik *Hydrodynamika i teoria sprężystości*, a w 1988 r. podręcznik *Mechanika kwantowa* (obie pozycje poprzedzone paroma wydaniami skryptów napisanych na podstawie jego wykładów hydrodynamiki i mechaniki kwantowej).

W latach siedemdziesiątych Średniawa opublikował w *Acta Physica Polonica* wraz z Andrzejem Kotańskim i Kacprem Zalewskim trzy prace o właściwościach tensorów statystycznych, a z Andrzejem Białasem i Jackiem Turnauem pracę o promieniowaniu multipolarnym podczas procesu wzbudzonej produkcji cząstek. Badania prowadzone do połowy lat osiemdziesiątych przedstawił w monografii *History of Theoretical Physics at Jagellonian University in Cracow in XIXth Century and in the First Half of XXth Century* (1985) i w artykule o współpracy fizyków, matematyków i astronomów krakowskich w tym okresie. Do roku 1987 opublikował 20 prac z historii fizyki w *Życiu Nauki*, kwartalniku *Historia Nauki i Techniki*, *Postęпах Fizyki*, *Polskim Słowniku Biograficznym* i *Pracach Fizycznych Zeszytów Naukowych UJ*. W uznaniu dla tej działalności został powołany na członka Komisji Historii Nauki PAN oraz PAU.

W roku 1987 po ukończeniu 70. roku życia przeszedł na emeryturę, lecz do dzisiejszego dnia nie zaprzestał pracy. W tych latach wzrosło jego zainteresowanie historią fizyki. Pisał artykuły biograficzne oraz szkic historii fizyki polskiej w latach międzywojennych. Prowadził i prowadzi wykłady historii fizyki dla studentów tego kierunku. Zajął się działalnością Mariana Smoluchowskiego oraz Ludwika i Aleksandra Birkenmajerów. Oprócz prac biograficznych opublikował pracę o przyjęciu teorii względności w Polsce. Napisał eseje o historii prowadzonych w Krakowie badań nad własnościami relatywistycznej cząstki spinowej, a w 2001 r. monografię *Historia filozofii przyrody i fizyki w Uniwersytecie Jagiellońskim*. W ostatnich latach zajmował się pracami Einsteina w „cudownym roku fizyki 1905”. W druku znajdują się jego prace w *Concepts of Physics* i Wydawnictwie Komisji Historii Nauki PAU o Władysławie Natansonie i kontaktach Einsteina z polskimi fizykami.

W roku 1997 Uniwersytet Jagielloński odnowił mu doktorat po 50 latach od jego obrony.

Oprócz fizyki wielką pasją Bronisława Średniawy jest żeglarsstwo. Już przed wojną ukończył kursy żeglarskie: morski – w Jastarni – i śródlądowy w Międzybrodziu Bialskim. Po wojnie zdobył stopień instruktora żeglarsstwa, a po przepłynięciu wymaganej liczby mil morskich i złożeniu przepisanych egzaminów otrzymał stopień kapitana jachtowego żeglugi wielkiej. Prowadził rejsy po Bałtyku, Morzu Północnym i Adriatyku. Przepłynął łącznie ok. 13 500

mil morskich. Był instruktorem na 15 kursach żeglarstwa morskiego. Ostatni rejs odbył w sierpniu 1992 r. Do dziś żałuje, że nie udało mu się wypłynąć w daleki rejs oceaniczny.

Profesor Średniawa obchodzi w tym roku jeszcze jeden, całkiem już prywatny jubileusz: 45-lecie pożycia mał-

żeńskiego. W roku 1962 ożenił się z Olgą Sularz, historykiem sztuki. Mają dwie córki, Bronisławę i Marię. Obie, wzorem swego ojca, zajmują się fizyką.

Małgorzata Nowina Konopka  
Instytut Fizyki Jądrowej PAN  
Kraków

## PTF



### Nagrody PTF za rok 2007

Nagrody otrzymali:

- ▶ Medal im. Mariana Smoluchowskiego – **prof. Robert R. Gałązka** z Instytutu Fizyki PAN za osiągnięcia z zakresu fizyki ciała stałego, a w szczególności za zapoczątkowanie badań półprzewodników półmagnetycznych;
- ▶ Nagrodę im. Wojciecha Rubinowicza i dyplom – **prof. Wojciech Gawlik** z Instytutu Fizyki UJ za osiągnięcia z zakresu spektroskopii laserowej i fotoniki, a w szczególności za prace, które doprowadziły do wytworzenia w Polsce kondensatu Bosego–Einsteina;
- ▶ Nagrodę PTF I stopnia im. Arkadiusza Piekary za wyróżniającą się pracę magisterską – **mgr Dorota Kubačka** za pracę „Oddziaływania warstwowe w mechanizmie rozpoznawania struktury kapu końca 5'mRNA przez izoformy ludzkiego białka eIF4E” wykonaną pod kierunkiem dr Joanny Żuberek w Zakładzie Biofizyki Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego;
- ▶ Nagrodę PTF II stopnia za wyróżniającą się pracę magisterską – **mgr Michał P. Heller** za pracę „Korespondencja AdS/CFT i plazma kwarkowo-gluonowa” wykonaną pod kierunkiem dr. hab. Romualda A. Janika w Instytucie Fizyki UJ;
- ▶ Nagrodę PTF III stopnia za wyróżniającą się pracę magisterską – **mgr Joanna Zemła** za pracę „Adsorpcja białek do powierzchni i wzorów polimerowych” wykonaną pod kierunkiem prof. Andrzeja Budkowskiego w Instytucie Fizyki UJ;
- ▶ Medal i nagrodę im. Krzysztofa Ernsta – **prof. Andrzej Maziewski** za popularyzację fizyki, zwłaszcza w ośrodku białostockim;
- ▶ Nagrodę PTF I stopnia im. Grzegorza Białkowskiego i Medal im. Grzegorza Białkowskiego dla wyróżniających się nauczycieli – **dr Jadwiga Salach**, emerytowana kierowniczką Zakładu Dydaktyki Fizyki Akademii Pedagogicznej w Krakowie, za zasługi na rzecz kształcenia nauczycieli fizyki oraz utrzymania wysokiego poziomu nauczania fizyki w Polsce;
- ▶ Nagrodę PTF II stopnia dla wyróżniających się nauczycieli – *ex aequo* **mgr Marta Gliwska-Rybczyk**, nauczycielka w Zespole Szkół w Strzyżowie, za rozwijanie zainteresowań fizyką wśród młodzieży, oraz **mgr Mirosława Żuber**, nauczycielka w I Liceum Ogólnokształcącym im. Adama Mickiewicza w Białymstoku, za sukcesy w pracy ze zdolną młodzieżą;
- ▶ Nagrodę PTF III stopnia dla wyróżniających się nauczycieli – *ex aequo* **mgr Stanisław Rząd**, nauczyciel w Liceum Ogólnokształcącym w Biłgoraju, za sukcesy w pracy ze zdolną młodzieżą, oraz **mgr Andrzej Sperka**, nauczyciel w I Liceum Ogólnokształcącym im. Mikołaja Kopernika w Łodzi, za rozwijanie zainteresowań fizyką wśród młodzieży;
- ▶ Wyróżnienia dla nauczycieli za rok 2007 – **mgr Zuzanna Suwald**, nauczycielka w LXV Liceum Ogólnokształcącym im. gen. Józefa Bema w Zespole Szkół nr 20 w Warszawie, za działalność organizacyjną na rzecz środowiska nauczycieli fizyki, **mgr Aleksandra Kluza**, nauczycielka w II Liceum Ogólnokształcącym im. Stanisława Staszica w Tarnowskich Górach, za rozwijanie oryginalnych form pracy z młodzieżą, oraz **mgr Helena Nazarenko-Fogt**, nauczycielka w X Liceum Ogólnokształcącym we Wrocławiu, za rozwijanie aktywnych form nauczania fizyki.

Uroczyste wręczenie nagród odbyło się 10 września 2007 r. podczas XXXIX Zjazdu Fizyków Polskich w Szczecinie.

## ■ Michał Giersig

Urodził się w 1954 roku w Skokach (Wielkopolska). Studiował fizykę na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu oraz na Wolnym Uniwersytecie w Berlinie (FU-Berlin), który ukończył w 1984 r. Pracę dyplomową wykonał pod kierunkiem prof. Elmara Zeitlera w Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft w Berlinie.

Po studiach pracował na Wydziale Chemii FU-Berlin. Pracę doktorską „Ultrastruktura nikotynicznego receptora acetylocholino” obronił w 1988 r. W roku 1989 objął samodzielne stanowisko naukowe w Hahn-Meitner-Institut (HMI) w Berlinie, gdzie zajmował się badaniami nanometrycznych cząstek metalicznych i półprzewodnikowych, a później także nanometrycznych cząstek magnetycznych oraz ich zastosowań w elektronice i biomedycynie. W 1999 r. habilitował się na Wydziale Chemii Fizycznej Uniwersytetu w Poczdamie. Tematem jego pracy habilitacyjnej była synteza i sposoby charakteryzacji nanocząstek metalicznych i półprzewodnikowych.



Od 2000 r. jest profesorem Politechniki Poznańskiej, a od roku 2002 również UAM, gdzie prowadzi wykłady na kierunku nanotechnologii. W 2003 r. przyjął propozycję utworzenia oddziału technologii nanocząstek w nowo powstałym Center of Advanced European Studies and Research (CAESAR) w Bonn, a od 2005 r. jest profesorem Uniwersytetu w Bonn. Jego praca naukowa znalazła wielokrotnie międzynarodowe uznanie, o czym świadczy zwłaszcza 18-miesięczny pobyt na Uniwersytecie w Melbourne (1995–96) oraz półroczny – jako stypendysta Fulbrighta – w Harvard Medical School i Boston College (2005–06). Jego indeks H, którego podstawą jest 197 publikacji oraz liczba ich cytowań, wynosi 42, co kwalifikuje go do pierwszej klasy naukowców w Niemczech. Jest też autorem 6 patentów. W listopadzie 2006 r. otrzymał z rąk prezydenta RP tytuł profesora nauk fizycznych.

Czas wolny spędza z małżonką Cecylią (doktorem medycyny) na słuchaniu muzyki klasycznej, wspólnych wyprawach rowerowych i czytaniu książek. Jest ojcem trójki dzieci: Joanny, Viktorii i Philippa.

## ■ Marek Szopa

Urodził się w 1958 r. w Tychach. Ukończył studia w 1982 r. i od tego czasu pracuje w Zakładzie Fizyki Teoretycznej Instytutu Fizyki Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. W roku 1989 obronił pracę doktorską „Hybridization in Valence Fluctuating Crystals – an Application of the Racah–Wigner Approach” przygotowaną pod kierunkiem prof. Elżbiety Zipper (UŚ) we współpracy z prof. Tadeuszem Lulkim (wówczas UAM). Habilitował się w 1998 r. na podstawie rozprawy „Symmetry and topological properties of systems of interacting electrons and boson fields”. Tytuł naukowy otrzymał 22 stycznia 2007 r.



Zajmował się m.in. prądami spontanicznymi w pierścieniach mezoskopowych, topologicznymi korzeniami twierdzeń Eulera–Poincarégo i Ceulemansa–Fowlera do opisu związków pomiędzy nieredukowalnymi reprezentacjami grup symetrii klastrow wielościennych, metodami transformacji zagadnień własnych w reprezentacji Bargmanna–Focka do postaci kanonicznej, strukturą elektronową wielościennych klastrow węglowych oraz koherencją prądów trwałych w nanorurkach węglowych.

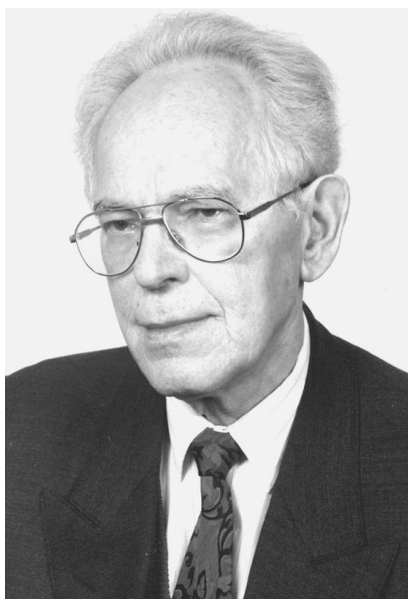
Jego obecne zainteresowania to: własności fizyczne nanorurek węglowych i fulerenów, prądy trwałe w układach mezoskopowych o topologii torusa oraz fizyczna realizacja elementów komputera kwantowego (kubity i ich sprzężenia) w układach nanoskopowych.

Odbył staże naukowe na uniwersytetach w Kolonii (u prof. Dietera Wohllebena) i Leuven (u prof. Anout Ceulemansa, Liviu Chibotaru i Patricka Fowlera), współpracował także z Uniwersytetem w Bradford (prof. Apostel Vourdas) oraz Uniwersytetem Paris-Sud w Orsay (Hélène Bouchiat).

Poza fizyką interesuje go ekonofizyka, zastosowanie teorii gier do negocjacji i podejmowania decyzji oraz myślenie twórcze, rozwiązywanie ciekawych zagadek i problemów logicznych, a także fotografia, turystyka górską i nurkowanie. Jest ojcem sześciorga dzieci: Magdy, Teresy, Pawła, Piotra, Marii i Jana.

## Marian Kryszewski (1925–2005)\*

Profesor Marian Kryszewski, jedna z najwybitniejszych postaci fizyki i fizykochemii polimerów w Polsce, twórca szkoły naukowej fizyki i fizykochemii polimerów na Wydziale Chemicznym Politechniki Łódzkiej oraz w Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych PAN w Łodzi, a także wybitny naukowiec o uznanym w świecie dorobku, zmarł 5 października 2005 r.



Marian Kryszewski

Marian Kryszewski urodził się 17 marca 1925 r. w Toruniu w rodzinie inteligentnej. Już jako uczeń interesował się fizyką i chemią. Dzięki samokształceniu i kontynuacji nauki na lekcjach prywatnych po zakończeniu wojny został przyjęty na Uniwersytet Mikołaja Kopernika (przeniesiony w tym czasie z Wilna Uniwersytet Stefana Bato-rego) na Wydział Astronomii, Fizyki i Chemii z indeksem nr 1.

Stopień magistra chemii uzyskał za pracę na temat rozkładu katalitycznego chlorowanych alkenów, będąc jednocześnie asystentem w Katedrze Chemii Fizycznej kierowanej przez prof. Antoniego Basińskiego. Zainteresowanie, a później fascynacja związkami wielkocząsteczkowymi zaczęła się od pobytu w Instytucie Włókien w Łodzi, stworzonym wtedy z inspiracji dr. Marka Wajnryba.

Późniejsza ośmioletnia praca na UMK w Toruniu, w zespole prof. Aleksandra Jabłońskiego, znanego fizyka i specjalisty w dziedzinie luminescencji i optyki molekularnej, dała Marianowi Kryszewskiemu solidne podstawy wiedzy fizycznej. Rzadkie w tym czasie połączenie wie-

dzy chemicznej i fizycznej pozwoliło mu na wyznaczenie absolutnych stałych szybkości reakcji fotopolimeryzacji bromku winylu, co w 1955 r. było dużym osiągnięciem i stało się podstawą jego pracy doktorskiej.

Staż podoktorski w latach 1956–57 Kryszewski odbył w słynnym ośrodku francuskim Centre de Recherches sur les Molécules et Macromolécules w Strasburgu, pracując z prof. Henrim Benoît nad roztworami polimerów i polimerami w fazie skondensowanej. Współpraca z prof. Benoît stała się ważnym etapem dla dalszych zainteresowań naukowych Kryszewskiego i jego kariery. Po powrocie do kraju, dalej pracując nad polimerami i ich roztworami, został wkrótce powołany przez Centralną Komisję Kwalifikacyjną na stanowisko docenta. W latach 1960–61 pracował w Brooklyn Polymer Institute wspólnie z prof. Hermanem Markiem i Georgem Osterem. Od tego czasu datują się bliskie naukowe i osobiste kontakty Kryszewskiego z prof. Markiem i innymi znakomitymi uczonymi z tego oraz innych czołowych ośrodków amerykańskich.

Prawdziwie samodzielną pracę badawczą Marian Kryszewski rozpoczął w 1958 r., gdy został zaproszony przez władze Politechniki Łódzkiej do objęcia stanowiska kierownika Katedry Fizyki na Wydziale Chemicznym tej uczelni; Katedrą tą kierował do 1968 r. Następnie do roku 1972 był dyrektorem Instytutu Polimerów WCh PŁ, w skład którego wszedł utworzony i kierowany przezeń Zakład Fizyki Polimerów.

Osiągnięcia naukowe przyniosły Marianowi Kryszewskiemu tytuł profesora nadzwyczajnego w 1968 r. i tytuł profesora zwyczajnego (1972). W 1976 r. został wybrany na członka korespondenta Polskiej Akademii Nauk, a członkiem rzeczywistym został w 1989 r. W międzyczasie pełnił wiele ważnych funkcji kierowniczych i doradczych w nauce, m.in. został powołany na okres trzyletniej kadencji na zastępcę sekretarza Wydziału III PAN.

Ważnym etapem w działalności badawczej Profesora stało się objęcie w 1970 r., po niespodziewanej śmierci prof. Stanisława Chrzczonowicza, kierownictwa Zakładu Polimerów Ministerstwa Oświaty i Szkolnictwa Wyższego oraz Polskiej Akademii Nauk w Łodzi. Wcześniej prof. Kryszewski kierował w tym Zakładzie Pracownią Fizyki Polimerów. Lata intensywnej pracy zaowocowały wykształceniem kadry pracowników naukowych i nagromadzeniem aparatury badawczej. W 1972 r. z inicjatywy profesorów Mariana Kryszewskiego i Jana Michalskiego utworzone zostało Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych PAN, w skład którego wszedł również Zakład Polimerów MOiSzW oraz PAN. Kryszewski pełnił w CBMiM PAN przez długie lata obowiązki dyrektora naukowego oraz kierownika Zakładu Fizyki Poli-

\* Artykuł przedrukowany z czasopisma *Polimery* za uprzejmą zgodą Autorów i Redakcji.

merów. Centrum wkrótce stało się znanym i liczącym się w świecie ośrodkiem badań nad polimerami.

Przechodząc do pracy w placówce PAN, Kryszewski nie zerwał kontaktów z Politechniką Łódzką, gdzie nadal kierował Zespołem Fizyki Polimerów w Instytucie Polimerów na Wydziale Chemicznym aż do przejścia na emeryturę w roku 1995.

Zainteresowania naukowe Mariana Kryszewskiego i jego kilku grup badawczych w CBMiM PAN i PŁ skoncentrowały się na wyjątkowo obszernym zbiorze problemów z dziedziny struktury i właściwości polimerów w fazie skondensowanej oraz innych organicznych ciał stałych – począwszy od właściwości mechanicznych, rozpraszania światła, morfologii i struktury krystalicznej polimerów oraz ich mieszanin, poprzez właściwości elektryczne dielektryków, półprzewodników, fotoprzewodników, przewodników i nadprzewodników organicznych, do mechanizmów generacji ładunków i mechanizmów ich transportu w cienkich warstwach polimerów plazmowych, a także degradacji termicznej i fotodegradacji polimerów.

Marian Kryszewski był autorem dużej monografii dotyczącej właściwości elektrycznych układów polimerowych *Semiconductive Polymers* wydanej w języku angielskim w roku 1980. Dużym osiągnięciem Profesora i jego współpracowników z Zakładu Fizyki Polimerów PŁ było opracowanie nowej klasy polimerowych materiałów przewodzących z użyciem organicznych kryształów molekularnych. Te nowe materiały kompozytowe zawierające jedynie niewielką domieszkę substancji organicznej na poziomie dziesiątych części procenta wykazują wysokie przewodnictwo prądu elektrycznego i charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi oraz przezroczystością. Kompozyty takie zespół Kryszewskiego otrzymał na drodze kontrolowanej krystalizacji domieszki w macierzy polimerowej w postaci kryształów tworzących ciągłą sieć przewodzącą, stąd nazwa tych materiałów „siateczkowato-domieszkowane” (ang. *reticulate-doped*). Dalsze badania nad polimerami siateczkowato-domieszkowanymi w obu zespołach kierowanych przez Kryszewskiego: w CBMiM PAN i PŁ, a także w zagranicznych instytutach w ramach współpracy, doprowadziły do otrzymania kilku odmian tych materiałów charakteryzujących się np. bardzo wysoką anizotropią przewodnictwa elektrycznego czy też przewodnictwem tylko powierzchni materiału. Szczególne zainteresowanie wzbudziły kompozyty siateczkowato-domieszkowane wykazujące przewodnictwo metaliczne, a nawet przejście do stanu nadprzewodnictwa. Warto podkreślić, że kompozyty te były pierwszymi w historii przewodnikami organicznymi, które zostały wdrożone do produkcji i wprowadzone na rynek (przez firmę Ciba-Geigy). Ukazało się sto kilkadziesiąt publikacji opisujących wyniki badań tej interesującej nowej klasy materiałów.

Współpracownicy prof. Kryszewskiego w CBMiM PAN i PŁ kontynuują i intensywnie rozwijają badania nad dielektrykami oraz fotoprzewodnikami wielkokształeczkowymi. Jednym z najnowocześniejszych badanych układów są cienkie warstwy otrzymywane w wyniku polimeryzacji

plazmowej różnych monomerów, w szczególności siloksanów, silazanów i – ostatnio – związków germanoorganicznych. Są to materiały stosowane powszechnie w nowoczesnej mikroelektronice ze względu na łatwość ich nanoszenia i kontroli grubości, znakomite właściwości dielektryczne, wysoką odporność termiczną i chemiczną, przezroczystość, a także łatwość modyfikacji ich właściwości elektrooptycznych. Profesor Kryszewski, wykazując dużą intuicję, rozwinął ten kierunek badawczy jeszcze w Katedrze Fizyki WCh PŁ i Zakładzie Polimerów MOiSzW oraz PAN na przełomie lat 60. i 70. jako jeden z nielicznych wtedy pionierów w tej dziedzinie.

Od końca lat sześćdziesiątych Marian Kryszewski wraz z grupą, która potem kontynuowała pracę w CBMiM PAN, zaangażował się w badania morfologii polimerów częściowo krystalicznych i układów wieloskładnikowych oraz jej korelacji z właściwościami mechanicznymi, termicznymi i optycznymi. Działalność kierowanej przez niego grupy rozwijała się w dłuższym okresie, począwszy od konstrukcji jednych z pierwszych w Polsce laserów, jako źródeł światła niezbędnych do badań, poprzez badania struktury sferolitycznej polimerów wyszukanyymi metodami doświadczalnymi, struktury mieszanin polimerów, właściwości mechanicznych skomplikowanych układów polimerowych, ich modelowania, skurczu termicznego i procesów relaksacji, aż do zjawisk wywołanych krystalizacją w polimerach i ich mieszaninach. W późniejszym okresie Profesor rozpoczął badania nowych układów polimerowych otrzymanych poprzez polimeryzację *in situ* monomeru dyfundowanego w zestalony polimer, uzyskując nowe materiały na membrany o kontrolowanej przepuszczalności gazów i cieczy.

Te wybrane przykłady aktywności badawczej wykazują, że działalność naukowa Mariana Kryszewskiego wiązała się z najnowszymi kierunkami w nauce światowej i mimo zmiennej sytuacji gospodarczej i politycznej w kraju zawsze mieściła się w światowej czołówce badań naukowych nad polimerami.

Marian Kryszewski aktywnie działał w licznych polskich i międzynarodowych towarzystwach naukowych (członek rzeczywisty PAN, członek Komitetów Fizyki i Chemii PAN, członek nominowany brytyjskiego Królewskiego Towarzystwa Chemicznego (MRSC), członek kilku innych towarzystw naukowych w kraju i zagranicą, m.in. Towarzystwa Krzewienia i Popierania Nauk oraz Europejskiego Towarzystwa Fizycznego, a także rad redakcyjnych wielu zagranicznych czasopism naukowych). Był wielokrotnie zapraszany do wielu znanych ośrodków badań polimerów w charakterze profesora wizytującego. Ośrodki te to np. Politechnika w Nowym Jorku, Uniwersytet Claude'a Bernarda w Lyonie, Uniwersytet w Kioto czy Instytut Maksa Plancka Badań Polimerów w Moguncji. Wygłaszał specjalistyczne referaty na zaproszenie w większości znanych polimerowych ośrodków akademickich i przemysłowych. Wielokrotnie był zapraszany do wygłaszania referatów plenarnych i sekcyjnych na międzynarodowych konferencjach oraz sympozjach naukowych.



Profesor Marian Kryszewski pozostawił imponujący dorobek publikacyjny – był autorem lub współautorem ponad 360 artykułów naukowych i 50 artykułów przeglądowych opublikowanych w renomowanych czasopiśmie o światowym zasięgu, dwóch monografiach, współredaktorem trzech książek naukowych oraz współtwórcą 22 wynalazków opatentowanych w kraju i za granicą.

W uznaniu zasług za stworzenie szkoły polimerowej i za wybitne osiągnięcia naukowe Kryszewski został uhonorowany 14 nagrodami naukowymi ministerialnymi, PAN i towarzystw naukowych, Nagrodą Marii Skłodowskiej-Curie za wybitne osiągnięcia w chemii oraz dwoma medalami, w tym medalem Uniwersytetu w Kioto. Marian Kryszewski był także dwukrotnym laureatem Nagrody Naukowej Miasta Łodzi. W roku 1995 nadano mu tytuł doktora honoris causa Politechniki Łódzkiej. Był odznaczony m.in. Krzyżem Komandorskim Orderu Odrodzenia Polski oraz wyróżnieniem Convallaria Copernicana przyznanym po raz pierwszy przez Uniwersytet Mikołaja Kopernika w roku 2004 za wkład do rozwoju nauki o polimerach i za promowanie tego kierunku na UMK. W roku 2005 otrzymał tytuł profesora honorowego Politechniki Wrocławskiej.

Szczególnie godna uznania była działalność dydaktyczna Profesora. Pracę jako nauczyciel akademicki rozpoczął w 1947 r. jeszcze na UMK. Zdobył doświadczenie we wszystkich rodzajach zajęć dydaktycznych od prowadzenia laboratoriów, ćwiczeń i wykładów aż do wykładów

monograficznych związanych z różnymi aspektami fizyki polimerów, fizykochemii, fizyki organicznych ciał stałych, mechaniki kwantowej i nauki o materiałach. Na Politechnice Łódzkiej zorganizował ogólne laboratorium fizyczne, specjalistyczne laboratorium z fizyki polimerów i reologii oraz kilka laboratoriów badawczych. Szczególną wagę przywiązywał zawsze do regularnych seminariów naukowych, traktując je jako bardzo ważną formę samokształcenia. Słynne wspólne seminaria obu zespołów, z CBMiM i PŁ, kierowanych przez prof. Kryszewskiego odbywają się nadal regularnie w piątki o 14.30, a sam Kryszewski był ich aktywnym uczestnikiem, pełniąc funkcję kierownika Seminarium jeszcze w r. akad. 2004/05.

Był promotorem 45 rozpraw doktorskich, w stworzonej przez niego szkole naukowej przygotowano 12 rozpraw habilitacyjnych. Wielu z jego byłych doktorantów zajmuje obecnie stanowiska profesorów w różnych uniwersytetach lub kieruje zespołami naukowymi w akademickich i przemysłowych ośrodkach badawczych w kraju i za granicą.

Spółeczność polimerowa, dla której Profesor Kryszewski zawsze był autorytetem i kolegą, poniosła niepowetowaną stratę.

*Andrzej Gałęski*

Centrum Badań Molekularnych  
i Makromolekularnych PAN, Łódź

*Jacek Ulański*

Wydział Chemiczny  
Politechnika Łódzka

## ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

### 43. Zimowa Szkoła Fizyki Teoretycznej

Wyróżnikami Instytutu Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Wrocławskiego w kraju i za granicą są organizowane przezeń od ponad 40 lat coroczne konferencje naukowe: Zimowe Szkoły Fizyki Teoretycznej (najpierw tylko w Karpaczu, a od początku lat dziewięćdziesiątych w innych miejscowościach Dolnego Śląska), należące do najstarszych imprez naukowych organizowanych przez fizyków w Polsce, oraz Sympozja Maksa Borna o zaledwie 16-letniej tradycji (właśnie przygotowywane jest 23. Sympozjum, gdyż w niektórych latach organizowano je dwa razy w roku).

W roku 2007 odbyła się 43. Szkoła Zimowa (tradycyjnie w lutym, w dniach od 5 do 11), jak wiele z ostatnich szkół – w Łądku Zdroju, gdzie uczestnicy Szkoły gośczeni byli przez ośrodek wypoczynkowy „Geovita”. Szkoła nosiła tytuł „Fizyka materii skondensowanej na początku XXI wieku: zjawiska, materiały, idee, metody”. Była ona prawdziwą szkołą, a nie konferencją. Wykłady były grupowane w kilkugodzinne serie (3–8 godzin na dany temat) i adresowane przede wszystkim do doktorantów i młodych

doktorów. Wśród tematów wykładów nie było tradycyjnych, takich jak nadprzewodnictwo czy nadciekłość. Usłyszeliśmy natomiast wykłady o własnościach cieplej materii gęstej (Ronald Redmer, Rostock, 3 h), bramkach kwantowych (Michael Geller, Athens, GA, 3 h), fizyce nanostruktur węglowych (Władimir Osipow, Dubna, 4 h), transporcie termoelektrycznym (Sriram Shastry, Santa Cruz, CA, 4 h), teorii dynamicznego pola średniego i jej zastosowaniach (Krzysztof Byczuk, Augsburg/Warszawa, 4 h), kropkach kwantowych (Paweł Hawrylak, Ottawa, i Paweł Machnikowski, Wrocław, 5 h), niskowymiarowych kwantowych układach spinowych (Oleg Dierżko, Lwów, i Johannes Richter, Magdeburg, 6 h), półprzewodnikach ferromagnetycznych i spintronice (Jacek Majewski i Tomasz Story, Warszawa, 6 h), teorii funkcjonatu gęstości i jej zastosowaniach (Bengt Lundqvist, Göteborg, i Manuel Richter, Drezno, 8 h).

Na podkreślenie zasługuje fakt, że Szkoła zorganizowana została przez trzy największe instytucje zatrudniające i kształcące fizyków we Wrocławiu oraz przez instytucję niemiecką z Drezna. Do organizacji włączył się Instytut Fizyki Politechniki Wrocławskiej (reprezentowany przez Arkadiusza Wójcisa), Instytut Niskich Temperatur i Badań

Strukturalnych PAN (reprezentowany przez Romualda Lemańskiego) oraz Instytutu Leibniza (reprezentowany przez Manuela Richtera). Pozwolę sobie wyrazić nadzieję, że ten precedens udanego współdziałania czterech wymienionych instytucji przy organizacji Szkoły jest zapowiedzią ich trwałej współpracy w przyszłości.



Wykłada Krzysztof Byczuk (fot. Romuald Lemański)

Uczestnikami Szkoły byli młodzi fizycy: krajowi przyjechali z Wrocławia, Poznania, Katowic i Warszawy (w kolejności malejącej liczby uczestników), a zagraniczni z Belgii, Czech, Hiszpanii, Niemiec, Rosji i Ukrainy. Najliczniej reprezentowana była Politechnika Wrocławska. Szkoła została zorganizowana skromnymi środkami finansowymi, które nie pozwoliły organizatorom ufundować stypendiów wielu zainteresowanym studentom z Europy, Azji i Afryki.

Wykłady 43. Szkoły Zimowej będą wydane przez World Scientific Publishing Co. Niestety, nie wszyscy wykładowcy zgodzili się spisać swoje teksty. Jeden z nich, prof. Bengt Lundqvist (Chalmers University of Technology, Göteborg, Szwecja), który miał bardzo interesujący 4-godzinny wykład „Density-functional theory of dense and sparse matter”, był uprzejmy przesłać organizatorom pliki pdf z częścią swojej prezentacji na Szkole. Pliki te zamieszczone zostały na stronie internetowej Szkoły ([www.ift.uni.wroc.pl/~karp43](http://www.ift.uni.wroc.pl/~karp43)).

Janusz Jędrzejewski  
Instytut Fizyki Teoretycznej  
Uniwersytet Wrocławski

## Europejska Konferencja Rozpraszania Neutronów

W dniach 25–29 czerwca 2007 r. w Lund obradowała 4. Europejska Konferencja Rozpraszania Neutronów. Było to kolejne z tej serii, po Villigen (Szwajcaria), Budapeszcie i Montpellier, spotkanie naukowców badających własności materii za pomocą rozpraszania neutronów.

Lund ze swą ponadtysiącletnią historią jest jednym z najstarszych miast w Szwecji i tradycyjnym miejscem

spotkań twórców, miastem nauki i kultury, ale też licznych przedsiębiorstw. Jest siedzibą największego w Skandynawii uniwersytetu, ma najlepsze w Szwecji szkoły, przepiękną katedrę i wiele zabytków.

Konferencja, której organizatorem był Uniwersytet w Lund, zgromadziła rekordową liczbę uczestników – ponad 700 osób! Jej otwarcia dokonał szwedzki minister edukacji i badań Lars Leijonborg. W uroczystości uczestniczyli przedstawiciele lokalnych władz samorządowych i władz uczelni.

W programie przewidziano 9 wykładów plenarnych wygłaszanych w głównej sali oraz 128 referatów przedstawianych podczas czterech równoległych sesji. Podziału na sesje wymagała zarówno ogromna liczba znakomych prac zakwalifikowanych do prezentacji, jak i liczba uczestników konferencji. Obrady odbywały się w wielkich salach wykładowych, świetnie przystosowanych do prezentacji audiowizualnych. (W jednej z nich – o nazwie Palaestra – każdy słuchacz miał stolik na komputer z dostępem do sieci internetowej, lampkę i osobny mikrofon! Natomiast sala w głównym budynku Uniwersytetu zachwycała zabytkowym wystrojem i wspaniałym sklepieniem).

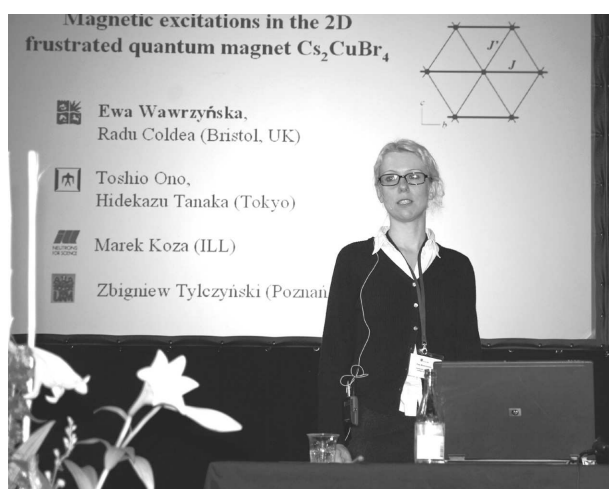
Na każdej z trzech sesji plakatowych, trwających dwie godziny, przedstawiono ponad 200 prac. Podczas tych sesji podawano drinki oraz owoce, orzeszki, paluszki itp. Znakoμίta atmosfera sprzyjała dyskusji i nawiązywaniu kontaktów naukowych prowadzących do dalszej współpracy.

Tematyka Konferencji obejmowała różne zagadnienia fizyki, chemii, biologii i inżynierii materiałowej badane za pomocą rozpraszania neutronów. Referaty plenarne dotyczyły następujących zagadnień: struktur międzypowierzchniowych badanych metodą reflektometrii neutronowej, nowych uporządkowań kwantowych, własności wieloskładnikowych materiałów miękkich, własności hydratów jako rezerwuarów wodoru, wpływu deformacji na uporządkowanie atomowe, własności bioblon oraz zastosowania wysokorozdzielczej spektroskopii do badań nadprzewodników i magnetyków. Spośród 44 sesji równoległych najliczniej, już tradycyjnie, reprezentowany był magnetyzm (6 sesji), liczne były też sesje poświęcone biomateriałom (4), materii miękkiej (4) oraz modelowaniu (3). Na podkreślenie zasługuje również fakt, że 4 sesje były poświęcone sprawom aparaturowym. Powyższych zagadnień dotyczyły również bardzo liczne plakaty.

Wysokie koszty konferencyjne spowodowały, że Polacy afiliowani w instytucjach krajowych, reprezentujący środowiska naukowe Krakowa, Poznania, Warszawy i Wrocławia, stanowili tylko kilkunastoosobową grupę. Przyjechało jednak też wielu młodych Polaków przebywających na stażach w różnych ośrodkach zagranicznych.

Udział Polaków w Konferencji to przede wszystkim dwa referaty podczas sesji równoległych: prof. Krzysztofa Parlińskiego z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie o obliczeniach *ab initio* fononów w różnych związkach oraz dr Ewy Wawrzyńskiej (obecnie stypendystki na Uniwersytecie w Bristolu, poprzednio doktorantki w Instytucie Fizyki UJ) o wzbudzeniach magnetycznych w dwuwymiarowym sfrustrowanym magnetyku kwantowym  $\text{Cs}_2\text{CuBr}_4$ .

Jedną z sesji plenarnych prowadził jeden z autorów tego sprawozdania (AS), który ponadto był członkiem Międzynarodowego Komitetu Doradczego. Prace Polaków przedstawiane na sesjach plakatowych cieszyły się dużym zainteresowaniem. Stanowiły one niejednokrotnie wynik współpracy z największymi ośrodkami neutronowymi w Europie: ILL, ISIS, HMI, Dubna. Odkąd mamy możliwość korzystania ze źródeł neutronów w tych ośrodkach, rośnie zarówno poziom jak i liczba takich prac.



Referat Ewy Wawrzyńskiej

Podczas Konferencji Nagrodę im. Waltera Hälga za rok 2007 wręczono prof. Jeffreyowi Penfoldowi z Rutherford Appleton Laboratory (Didcot, Wielka Brytania), specjalistę w zakresie niskokątowego rozpraszania neutronów, zwłaszcza w związkach biologicznych.

Nagrodą Lewy-Bertaut dla wybitnego młodego europejskiego naukowca został wyróżniony prof. Henrik M. Ronnow z Ecole Polytechnique Fédérale w Lozannie za prace doświadczalne i teoretyczne poświęcone kwantowemu magnetyzmowi (dwuwymiarowe magnetyki). Obaj laureaci wygłosili referaty plenarne na temat swoich badań. W tym samym dniu wyróżniono około 10 młodych autorów najciekawszych i najlepiej zredagowanych plakatów, wręczając im dyplomy i drobne gadżety.

Jakie wnioski można wyciągnąć z obrad Konferencji? Zastosowanie wiązki neutronów staje się coraz bardziej

powszechną metodą badawczą. We wszystkich ośrodkach prowadzących badania za pomocą tej techniki trwa proces modernizacji aparatury w celu zwiększenia natężenia wiązek neutronów i poprawienia zdolności rozdzielczej. Aby maksymalnie wykorzystać istniejące źródła neutronów, budowane są nowe wyprowadzenia wiązki stanowiące kolejne ścieżki pomiarowe.

W trakcie Konferencji odbyło się wiele formalnych i nieformalnych spotkań, na których dyskutowano sprawę budowy Europejskiego Źródła Spalacyjnego ESS. Jednym z ośrodków, które chcą się podjąć budowy tego źródła, jest właśnie Uniwersytet w Lund. Starania te są silnie wspierane przez szwedzki rząd, stąd obecność ministra i władz samorządowych na otwarciu Konferencji. Rząd chce pokryć 30% kosztów budowy i 10% kosztów eksploatacji, wspierając w ten sposób inicjatywę środowiska na rzecz budowy ESS. Konferencja była dobrą okazją do reklamy tej lokalizacji, z którą konkurują Bilbao, Budapeszt i Yorkshire.

Na wystawie towarzyszącej Konferencji kilkanaście firm z różnych krajów reklamowało swoje produkty i usługi przydatne do budowy ESS, a czołowe ośrodki badań neutronowych w Europie oferowały współpracę naukową.

Przedostatniego dnia po południu uczestnicy konferencji mieli okazję zwiedzić muzeum Kulturen – skansen będący jednym z najstarszych tego typu obiektów w Europie. W tymże muzeum prof. Robert Thomas wygłosił specjalny, popularnonaukowy wykład „Neutrony odsłaniają sekrety materiałów codziennego użytku”. Wieczorem uczestnicy Konferencji spotkali się na wspólnej kolacji w centrum konferencyjnym Luftkastellet, położonym przy malowniczym moście Øresund łączącym Szwecję z Danią. Kolację poprzedziły taneczne występy szwedzkiego zespołu folklorystycznego. Ten wieczór był zwieńczeniem ogromnych starań organizatorów, aby możliwie najbardziej zintegrować olbrzymią przecież liczbę uczestników.

Następna europejska konferencja neutronowa odbędzie się w Pradze w 2011 r. Nasi czescy koledzy już dziś na nią zapraszają.

*Andrzej Szytuła*

Instytut Fizyki  
Uniwersytet Jagielloński

*Małgorzata Nowina Konopka*

Instytut Fizyki Jądrowej PAN  
Kraków

## Krystalografia

Zbigniew Bojarski, Marek Gigla, Kazimierz Stróż, Marian Surowiec: *Krystalografia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007, s. 456.

Jest to najlepszy polski podręcznik krystalografii przeznaczony dla studentów chemii, fizyki, inżynierii materiałowej, biotechnologii i geologii, a także dla pracowników naukowych uprawiających te dziedziny. Stanowi trzecie, poszerzone wydanie książki *Krystalografia. Podręcznik wspomagany komputerowo*. Każdy rozdział kończy się ćwiczeniami pozwalającymi sprawdzić zdobytą wiedzę; podręcznik wyposażony jest w CD-ROM z zadaniami ułatwiającymi zrozumienie i przyswojenie materiału. Książka stanowi bardzo obszerne kompendium wiedzy z zakresu krystalografii. Wyczerpująco, i z troską o zrozumienie przez czytelnika, przedstawiono zagadnienia przestrzeni odwrotnej i jej relacje z przestrzenią rzeczywistą kryształu. Wykorzystano tu rachunek macierzowy. Tak kompletnego opisu wszystkich projekcji stosowanych kiedykolwiek w morfologii nie znalazłam w żadnym znanym mi podręczniku, także zagranicznym. Inne rozdziały charakteryzują się również rzetelnością i kompletnością opisu oraz prezentują aktualne kierunki rozwoju. Podręcznik cieszy się dobrą opinią wśród studentów i wykładowców, stąd wyczerpanie nakładu drugiego wydania i potrzeba wydania kolejnego.

Na polskim rynku księgarskim jest kilka pozycji o podobnej tematyce, jak choćby książka Zygmunta Trzaska Durskiego i Hanny Trzaska Durskiej, nie stanowią one jednak tak wielostronnego opracowania.

Książka Bojarskiego i współpracowników obejmuje następujące rozdziały: 1) Podstawowe prawa i pojęcia; 2) Projekcja sferyczna, cyklograficzna, stereograficzna i gnomoniczna; 3) Symetria w morfologii kryształów. Grupy punktowe; 4) Symetria w budowie wewnętrznej ciał krystalicznych, grupy przestrzenne; 5) Klasyfikacja ciał krystalicznych, typy struktur; 6) Rzeczywista budowa ciał krystalicznych, defekty; 7) Rentgenowska analiza strukturalna; 8) Kwazikrystaliczny stan materii; 9) Dodatki prezentujące podstawy rachunku wektorowego, macierzowego oraz podstawowe pojęcia dotyczące grup.

Autorzy dbają o ścisłe definiowanie pojęć i relacji między nimi, każdy opis wspierają wzorami obliczeń. Tekst jest wspomagany licznymi, bardzo starannymi rysunkami i tabelami. Wśród definicji w rozdziale pierwszym nie znalazłam jednak najnowszej definicji kryształu, podanej przez Międzynarodową Unię Krystalografii: „Kryształem nazywamy fazę skondensowaną, dającą obraz dyfrakcyjny o dyskretnym rozkładzie natężenia”. Nie znalazłam jej również w rozdziale prezentującym podstawy rentgenografii.

Nie wiem również, dlaczego Autorzy wybierają inaczej niż w *Międzynarodowych tablicach krystalograficznych* początek układu w komórce elementarnej (np. s. 218), co prowadzi do innych współrzędnych punktów równoważnych w komórce elementarnej. Autorzy mają oczywiście prawo do lansowania własnego sposobu patrzenia na różne pro-

blemy, ale może to nieco utrudniać czytelnikom przejście od podręcznika do *Tablic*.

Rozdział prezentujący rentgenografię jest potraktowany skrótowo, gdyż Zbigniew Bojarski i Eugeniusz Łągiewka wydali osobny, obszerny podręcznik z tego zakresu.

Recenzowaną książkę wydano bardzo starannie. Nie napotkałam w niej błędów drukarskich. Z przyjemnością bierze się ją do ręki. Należy podkreślić, że stanowi ona wynik wieloletniej pracy zespołu krystalografów z Uniwersytetu Śląskiego, wybitnych specjalistów o różnych profilach badawczych. Ta wielostronność zainteresowań jest widoczna w ujęciu wielu tematów, jak choćby kwazikryształy i realna struktura kryształów. Początkowo wydano skrypty do ćwiczeń z krystalografii i rentgenografii, stopniowo poszerzano ich zakres i sięgano po nowe zagadnienia, wspomagano książkę programami komputerowymi; wreszcie przyjęła ona obecną postać nowoczesnego, obszernego podręcznika krystalografii, wartego polecenia każdemu, kto zamierza zgłębiać problemy krystalografii, napotykane we własnych badaniach lub pobudzone zainteresowaniami.

Zofia Kosturkiewicz  
Wydział Chemii UAM  
Poznań

## Modelowanie rzeczywistości

Iwo Białynicki-Birula, Iwona Białynicka-Birula: *Modelowanie rzeczywistości. Jak w komputerze przegląda się świat*, z angielskiego przełożyła Zofia Białynicka-Birula, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007, s. 190.

Pojawienie się na początku lat osiemdziesiątych taniego komputera osobistego („peceta”) spowodowało rozwój całych nowych dziedzin badań w fizyce. Wielu fizyków teoretyków zaczęło przeprowadzać „eksperymenty” komputerowe. Liczba analitycznie (dokładnie) rozwiązywalnych problemów w fizyce jest bardzo mała, a postępując się komputerem, można starać się znaleźć rozwiązania numeryczne. Wraz z bardzo szybkim rozwojem elektroniki i technologii pojawiła się możliwość modelowania coraz bardziej złożonych zjawisk: jeszcze kilka lat temu pamięć operacyjna rzędu 1 GB była dostępna tylko w superkomputerach, a dzisiaj można kupić peceta z taką ilością RAM-u w każdym supermarkecie. Książka prof. Białynickiego-Biruli i jego córki w przystępny sposób wprowadza czytelnika w krąg zagadnień związanych z modelowaniem „rzeczywistości” na komputerze. Powstała na podstawie wykładów dla studentów Szkoły Wyższej Psychologii Społecznej w Warszawie, liczy 190 stron i składa się z 16 rozdziałów (w semestrze jest zazwyczaj 15 wykładów). Na początku omawiane są automaty komórkowe i słynna gra w życie. Następne cztery rozdziały poświęcone są rachunkowi prawdopodobieństwa. Poza typowymi zagadnieniami (rzucanie monetą, deska Galtona) dowiadujemy się, jak metody statystyki pozwalają znaleźć fał-

szywe zeznania podatkowe. Rozdział 6 i dwa następne stanowią cykl poświęcony fraktalom i chaosowi. Przedstawione są słynne zagadnienia: płatki śniegu, atraktor Lorentza, uniwersalność Feigenbauma, zbiory Cantora i Mandelbrota, trójkąt Sierpińskiego. Kolejne dwa rozdziały omawiają kilka problemów należących do „computer science” (polskie określenie „informatyka” wydaje mi się tu zbyt szerokie). Wyłożone są zasady działania algorytmów kompresji danych i plików, teoria grafów i ich zastosowania: problem komiwojażera, rozpoznawanie języków. Rozdział 11 to krótkie wprowadzenie do modnej w ostatnich latach (częściowo za sprawą filmu *Piękny umysł* opartego na książce o tym samym tytule autorstwa Sylvii Nasar) teorii gier. Końcowe rozdziały obejmują zastosowania metod wypracowanych przez fizyków do modelowania zagadnień biologicznych, socjologicznych i politycznych. Poruszone tematy to sieci neuronowe, model Schellinga segregacji rasowej, powstawanie epidemii. Książkę kończą rozważania o komputerze uniwersalnym i sztucznej inteligencji.

Dużą atrakcją jest dołączona płyta CD-ROM zawierająca 25 programów skompilowanych pod system Windows, ilustrujących zagadnienia poruszane w książce. Udostępnienie tekstów źródłowych zwiększyłoby znacznie walory edukacyjne – zwłaszcza młodzi czytelnicy mieliby możliwość „podpatrzeć”, jak się takie programy pisze, a bardziej zaawansowani mogliby np. przerobić je na wersje działające w systemie Linux. Programy nie zostały spolszczone, przetłumaczono jedynie pliki pomocy, co może być zaletą, bo uczniowie albo studenci będą w ten sposób mieli praktyczną naukę języka angielskiego.

Książka jest napisana żywo, czyta się ją bardzo dobrze. W miejscu, gdzie młody czytelnik mógłby się znudzić omawianym tematem, zaczyna się następny. Wstawki matematyczne oraz krótkie notki biograficzne wydrukowano innym krojem czcionki. Bardzo duża liczba różnych zagadnień przedstawiona jest na jedynie 190 stronach, więc aby się więcej dowiedzieć o omawianych zagadnieniach, czytelnik będzie musiał zajrzeć do innych opracowań. Ale rozumiem, że z założenia książka ta ma służyć za wstęp do dalszych studiów. Wiele faktów historycznych i anegdot było dla mnie nowością. Trafne i zabawne są rysunki na początku rozdziałów.

Znalazłem kilka drobnych błędów, których nie ma w erracie na założonej przez Autorów stronie internetowej.

- s. 23<sub>10</sub>: podejrzewam, że „Mathematics of Computation” to nie tytuł artykułu D. Shanksa i J. Wrencha, a nazwa czasopisma (ukazuje się do dzisiaj), w którym opublikowana została ich praca;
- s. 57, u góry: chyba chodzi o trzecią, a nie czwartą literę;
- s. 62<sub>16</sub>: zamiast  $\lim_{x \rightarrow 0} \log(x) = 0$  powinno być  $\lim_{x \rightarrow 0} x \log(x) = 0$ ;
- s. 78<sup>3</sup>: zamiast 3,5 powinno być 0,35;
- s. 94, rys. 8.9, podpis pod ostatnim trójkątem Sierpińskiego: zamiast 19 powinno być 9;
- s. 100<sub>2</sub>: zamiast „101 bitów” powinno być „bitów 101”;
- s. 117: pierwszą pracę o teorii gier napisał Hugo Steinhaus – nosiła ona tytuł „Definicje potrzebne do teorii gry i pościgu”, ukazała się w *Mysli Akademickiej* w 1925 r. we Lwowie i jest zamieszczona w „Selected papers” Steinhausa wydanych przez PWN w 1985 r.;
- s. 174<sup>2</sup> zamiast „nieudowodnione twierdzenia” matematyk napisałby „nieudowodnione przypuszczenia”.

Na stronie 95 znajduje się stwierdzenie, że kompresja fraktalna nie znalazła zastosowania do zapisu obrazów. Wydaje mi się, że nie odpowiada to prawdzie, gdyż od kilku lat dostępna jest wtyczka do Photoshopa o nazwie Altamira Genuine Fractals PrintPro. Dokładny opis jej działania jest utrzymywany w tajemnicy, lecz podejrzewam, że Altamira zapisuje na dysk właśnie zbiór macierzy tworzących układ funkcji iterowanych. Po otwarciu zapisanego pliku pojawia się okno, w którym podaje się w pikselach, jakich rozmiarów chcemy mieć obrazek i następuje proces obliczeń (od kilku do kilkudziesięciu sekund w zależności od rozmiaru obrazka i szybkości komputera) prowadzący do odtworzenia zdjęcia.

Uważam, że książka jest potrzebna – to bardzo dobra popularyzacja nauki, bo młodzież może się z niej dowiedzieć, jak bogata w różnorodne zastosowania jest współczesna fizyka. Może być też znakomitą pomocą dla prowadzących takie wykłady, jak socjofizyka, ekonofizyka, biofizyka czy fizyka komputerowa, lub na kierunkach finansowych. Recenzowana książka może służyć za ilustrację tezy prof. Łukasza A. Turskiego, że fizyk może wykonywać prawie każdy inny zawód. Sprawdziłem na [www.amazon.com](http://www.amazon.com), że angielski oryginał kosztuje 59 dolarów, więc cena 35 zł za polskie wydanie wygląda atrakcyjnie.

Marek Wolf

Instytut Fizyki Teoretycznej  
Uniwersytet Wrocławski

## ■ Kolumbowie

Fundacja na rzecz Nauki Polskiej prowadzi od 1995 r. program stypendialny KOLUMB dla młodych badaczy (do 35. roku życia) z tytułem doktora. Laureatom konkursu FNP finansuje długoterminowe (6–12 miesięcy) staże zagraniczne w uznanych światowych ośrodkach zagranicznych. Wysokość stypendium odpowiada wysokości stypendium podoktorskiego w wybranym przez stypendystę ośrodku.

W 2007 r. napłynęło 79 zgłoszeń. Wybrano 15 laureatów, wśród których jest dwóch fizyków: dr inż. Marcin Szpulak (IF PWR) – roczny staż w Institut Fresnel CNRS w Marsylii, i dr Ireneusz Weymann (Zakład Fizyki Mezoskopowej UAM) – roczny staż w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Technicznego i Ekonomicznego w Budapeszcie, oraz jeden astronom: dr Sebastian Szybka (Obserwatorium Astronomiczne UJ) – 9-miesięczny staż w Zakładzie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Genewskiego.

Wręczenie dyplomów odbyło się 26 czerwca 2007 r.

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

B. W.

## ■ Maciej Wojtkowski zdobywcą EURYI

Europejska Nagroda dla Młodego Naukowca (EURYI) ma służyć otwarciu najlepszym badaczom drogi do kariery naukowej w Europie. Jej wysokość to 1–1,25 mln euro, co daje laureatowi szansę stworzenia własnego zespołu badawczego i skupienia się wyłącznie na pracy naukowej. Selekcja kandydatów jest dwustopniowa – najpierw krajowe fundacje naukowe wybierają najlepszych kandydatów ze swojego regionu (w Polsce jest to zadanie Fundacji na rzecz Nauki Polskiej) i kierują wnioski do Europejskiej Fundacji Naukowej (ESF), która po dalszej selekcji wybiera zwycięzców. Do nagrody roku 2007 wpłynęło w pierwszym etapie 474 wniosków, do drugiej selekcji przeszło 112 kandydatów. Nagrody przyznano 20 młodym naukowcom: z Francji 5 osobom, z Niemiec i Szwajcarii po 4, z Holandii – 3 i po jednej z Czech, Polski, Szwecji i Turcji. Nagroda EURYI finansowana jest z 6. Programu Ramowego Komisji Europejskiej.

Polski zwycięzca, dr Maciej Wojtkowski, ma 32 lata, pracuje w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, doktoryzował się w roku 2003. Prowadzi badania z dziedziny fizyki medycznej, skonstruował tomograf do badania siatkówki oka, przyczynił się znacznie do rozwoju metod fizycznych w okulistyce. Był stypendystą FNP w programach START oraz POWROTY/HOMING. Pracował w MIT oraz odbywał staże na Uniwersytecie w Wiedniu i University of Kent w Canterbury. Zamierza rozwijać metody umożliwiające otrzymywanie za pomocą światła w nieinwazyjny i bezkontaktowy sposób nowych informacji o strukturze i czynnościach organizmów żywych. Przede wszystkim będzie to rozwój nowych metod obrazowania wykorzystujących tomografię optyczną (OCT) z użyciem światła częściowo spójnego. W szczególności zaprojekto-

wana przez Laureata metoda ma służyć do analizy fragmentów oka ludzkiego w warunkach klinicznych.



Maciej Wojtkowski

Ceremonia wręczenia dyplomów EURYI odbyła się w Helsinkach 27 września 2007 r.

[fnp.org.pl](http://fnp.org.pl); [esf.org/activities/euryi](http://esf.org/activities/euryi)

B. W.

## ■ Nagroda im. Mariana Mięśowicza

Nagroda im. Mariana Mięśowicza jest przyznawana co dwa lata przez Wydział III Matematyczno-Fizyczno-Chemiczny Polskiej Akademii Umiejętności. W tym roku laureatem został prof. Marek Jeżabek, fizyk teoretyk, dyrektor Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie.

Nagrodę przyznano za pracę „QCD corrections to semileptonic decays of heavy quarks”, napisaną przez M. Jeżabka wraz z J.H. Kühnem i opublikowaną w 1989 r. w *Nuclear Physics B*. Obaj autorzy od dłuższego czasu badali fizykę kwarku  $t$ . Gdy powstała nagrodzona praca, kwark  $t$  nie był jeszcze odkryty doświadczalnie. Autorzy obliczyli jego czas życia z dokładnością ok. 2%. Obecnie na tę publikację powołują się podręczniki. W literaturze naukowej była ona cytowana ponad 180 razy.

Prof. Marek Jeżabek specjalizuje się w fizyce cząstek i ich oddziaływań, ma w tym zakresie wybitne osiągnięcia. Dokonał pierwszych obliczeń poprawek QCD do czasu życia kwarku  $t$  oraz rozpadów spolaryzowanych ciężkich kwarków, badał produkcję pary kwarków  $t$  w pobliżu progu energii w procesie anihilacji elektron–pozyton. Zajmował się modelem huśtawkowym (ang. seesaw) określania masy neutrin i fenomenologią oscylacji neutrin. Jego dorobek naukowy stanowi ponad 110 publikacji, głównie z niewielką liczbą współautorów; 14 z tych prac należy do grupy cytowanych ponad 50 razy, w tym 9 ponad 100 razy. Jest

laureatem nagrody zespołowej II stopnia Wydziału III PAN (1986) oraz nagrody Prezesa PAA (1988).



Wręczenie nagrody – od lewej profesorowie Marek Jeżabek, Jerzy Haber i Andrzej Białas (fot. Wacław Klag/Dziennik Polski)

Marek Jeżabek urodził się w 1952 r. w Nowym Sączu. Studiował fizykę na Uniwersytecie Jagiellońskim w latach 1969–74. Na tymże uniwersytecie odbył studia doktoranckie, zakończone w 1978 r. obroną pracy „Opis zderzeń hadronów o wielkich energiach w modelu kolorowych kwarków”, której promotorem był prof. Krzysztof Fiałkowski. Dr Marek Jeżabek został zatrudniony w IFJ (w 1978 r.), gdzie szybko awansował. Już w 1988 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego na podstawie rozprawy zatytułowanej „Anomalous charges of fermionic vacuum in chiral bags” oraz stanowisko docenta. Tytuł profesora uzyskał w 1993 r. i wkrótce potem został kierownikiem Zakładu Teorii Cząstek Elementarnych. W 1995 r. podjął dodatkowo pracę na Uniwersytecie Śląskim (do 2003 r.). Od roku 2004 jest dyrektorem IFJ PAN im. H. Niewodniczańskiego, a równocześnie profesorem na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Wypromował 5 doktorów. Jest inicjatorem i współorganizatorem serii międzynarodowych konferencji fizyki cząstek „Cracow Epiphany Conference”, odbywających się od 1995 r. co dwa lata w Krakowie.

*Małgorzata Nowina Konopka*

## ■ Nagroda Schawlowa dla Suckewera

Nagrodę im. Arthura Schawlowa przyznaną przez Amerykańskie Towarzystwo Fizyczne otrzymał w roku 2007 prof. Szymon Suckewer w uznaniu jego pionierskich dokonań w dziedzinie laserów emitujących miękkie promieniowanie rentgenowskie oraz impulsy femtosekundowe i za osiągnięcia w laserowej mikroskopii rentgenowskiej.

Szymon Suckewer studiował fizykę na Uniwersytecie Moskiewskim, doktorat i habilitację (1971) uzyskał na Uniwersytecie Warszawskim. Wyemigrował do Stanów Zjednoczonych w 1975 r. Pracował w Laboratorium Fizyki Plazmy Uniwersytetu w Princeton. Od 1987 r. jest profesorem tego Uniwersytetu. Jego główne osiągnięcia to: udoskonalanie i zastosowania mikroskopii rentgenowskiej, zastoso-



Szymon Suckewer

wania laserów subpikosekundowych, diagnostyka plazmy, nowe rodzaje układu zapłonu silników spalinowych, zastosowanie laserów w badaniach materiałów biologicznych i w medycynie.

[www.princeton.edu/mae/people/faculty/suckewer](http://www.princeton.edu/mae/people/faculty/suckewer)

B. W.

## ■ Binder doktorem h.c. UMCS

24 stycznia 2007 r. odbyło się uroczyste wręczenie tytułu doktora honoris causa Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie profesorowi Kurtowi Binderowi, austriackiemu uczonemu mieszkającemu i pracującemu w Niemczech. Tę najwyższą godność Uniwersytet przyznał mu za szczególne osiągnięcia w dziedzinie zastosowań metody Monte Carlo do badań zjawisk krytycznych i przemian fazowych oraz wieloletnią współpracę z lubelskimi chemikami, która przyczyniła się do rozwoju kadry naukowej na Wydziale Chemii UMCS. Podczas uroczystości sylwetkę prof. Kurta Bindera przedstawił promotor doktoratu, prof. Andrzej Patrykiewicz z Zakładu Modelowania Procesów Fizykochemicznych WCh UMCS. W swym wystąpieniu nakreślił on drogę naukową Kurta Bindera, który po ukończeniu szkoły podstawowej i średniej w Wiedniu studiował w latach 1962–67 fizykę na Politechnice Wiedeńskiej. Pracę doktorską wykonał w Austriackim Instytucie Fizyki Atomowej w latach 1967–69, a dotyczyła ona teoretycznego wyjaśnienia korelacji spinowych w ferromagnetykach w pobliżu punktu krytycznego. Podczas wykonywania pracy doktorskiej po raz pierwszy zetknął się z metodami symulacyjnymi, w szczególności z metodą Monte Carlo, i postanowił wykorzystać ją w swoich badaniach, stając się pionierem w dziedzinie zastosowań metod symulacyjnych w fizyce i chemii.

Po przeniesieniu się do Niemiec na Wydział Fizyki Politechniki Monachijskiej uzyskał w 1973 r. habilitację za opracowanie metod pozwalających na wykorzystanie skończonych rozmiarów układów symulacyjnych do wyznaczania wykładników krytycznych i określania właściwości układów w pobliżu ciągłych przemian fazowych. W roku 1974 objął stanowisko profesora fizyki teoretycznej na Uniwersytecie w Saarbrücken. W pracy naukowej rozszerzył zastosowanie metod symulacyjnych do badań dynamiki zjawisk krytycznych, dyfuzji, separacji faz w mieszaninach oraz przemian fazowych w szklach spinowych,

polimerach i układach kwantowych. Książka *Monte Carlo methods in statistical physics* pod jego redakcją, wydana w 1979 r., szybko stała się podstawową monografią poświęconą metodzie Monte Carlo. Od 1983 r. do dnia dzisiejszego prof. Binder kieruje Zakładem Fizyki Fazy Skondensowanej Uniwersytetu Johanna Gutenberga w Moguncji.

Dorobek naukowy Kurta Bindera obejmuje ok. 900 prac oryginalnych, 10 monografii i liczne prace przeglądowe. Wśród wielu nagród i wyróżnień należy wymienić prestiżową nagrodę Niemieckiego Towarzystwa Fizycznego (Medal Maksa Plancka, 1993), Berni J. Adler CECAM Prize (2003) oraz znalezienie się na liście 100 najczęściej cytowanych prac fizyków w latach 1981–99, opublikowanej przez Instytut Informacji Naukowej w 2001 r. Profesor Binder jest członkiem wielu towarzystw naukowych, m.in. Niemieckiego Towarzystwa Fizycznego, Europejskiego Towarzystwa Fizycznego i Towarzystwa Maksa Plancka oraz członkiem korespondentem Austriackiej Akademii Nauk. Jest zapraszany na wszystkie ważniejsze konferencje naukowe poświęcone mechanice statystycznej, zjawiskom powierzchniowym oraz polimerom.



Podczas uroczystości – od lewej profesorowie: Wiesław Kamiński, rektor UMCS, Andrzej Dąbrowski, dziekan Wydziału Chemii UMCS, oraz Kurt Binder

Profesor Patrykiewicz szczególnie ciepło ukazał mocne związki prof. Bindera z pracownikami Zakładu Modelowania Procesów Fizykochemicznych WCh UMCS. Wieloletnia współpraca prowadzona w ramach staży naukowych i grantów badawczych (m.in. 3-letni grant NATO) zaowocowała pracami doktorskimi i licznymi publikacjami w prestiżowych czasopismach naukowych. Obecnie prace badawcze prowadzone wspólnie z grupą naukową prof. Bindera dotyczą zastosowań metod symulacyjnych w badaniach przemian fazowych w układach o ograniczonej geometrii oraz zjawiska topnienia.

Przyjmując Profesora do grona swoich doktorów honorowych, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej wyraził szczególne uznanie dla jego wybitnych osiągnięć naukowych oraz owocnej współpracy.

Elżbieta Jartych

## ■ Medal Diraca 2007

Międzynarodowe Centrum Fizyki Teoretycznej (ICTP) przyznało Medal Diraca za rok 2007 dwóm fizykom: Jeanowi Iliopoulosowi (Laboratoire de Physique Théorique, Ecole Normale Supérieure, Paryż) i Luciano Maianiemu (Università degli Studi di Roma „La Sapienza”). Medal honoruje ich prace nad fizyką kwarku powabnego, stanowiące główny wkład do powstania Modelu Standardowego.

Iliopoulos, z urodzenia Grek, był jednym z założycieli Laboratorium Fizyki Teoretycznej ENS, którym kierował w latach 1991–95 i 1998–2000. Maiani był prezesem włoskiego Narodowego Instytutu Fizyki Jądrowej (INFN) w latach 1993–97 oraz dyrektorem generalnym CERN-u w latach 1999–2003, jest też doktorem honoris causa Uniwersytetu Warszawskiego (patrz Kronika *PF*, zes. 3/2004).

Medal Diraca, ustanowiony w 1985 r., jest wręczany co roku 8 sierpnia uczonemu, który wnieśli znaczący wkład do fizyki teoretycznej i matematyki i którzy nie są laureatami Nagrody Nobla, Medalu Fieldsa bądź Nagrody Fundacji Wolfa.

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

B. W.

## ■ Nowe wartości stałych fizycznych

Komisja ds. Danych dla Nauki i Techniki (CODATA), będąca organem Międzynarodowej Rady Unii Naukowych, opracowała kolejny zestaw zalecanych wartości stałych fizycznych i współczynników przeliczania równoważników energii często używanych w fizyce i chemii. Opracowanie uwzględnia wyniki doświadczeń i teorii z lat 2003–06. Dzięki wykorzystaniu tych wyników i ulepszonej procedurze dopasowania znacznej poprawie uległa nasza znajomość zarówno wielu stałych uniwersalnych jak i ich niepewności. Rezultat tych prac jest dostępny na stronie amerykańskiego Narodowego Instytutu Nauki i Techniki (NIST): [physics.nist.gov/constants](http://physics.nist.gov/constants). Zbiór tych danych będzie opublikowany w końcu roku 2007.

Artykuł w *Physics Today*, którego autorami są Peter J. Mohr, Barry N. Taylor i David B. Newell, omawia szczegółowo, jak przeprowadzono dopasowywanie danych.

*Phys. Today* 60, nr 7 (2007)

B. W.

## ■ Spotkanie Ogólnopolskiego Klubu Demonstratorów

W dniach 20–22 czerwca 2007 r. odbyło się w Krakowie VII Spotkanie Ogólnopolskiego Klubu Demonstratorów Fizyki. Zorganizowane zostało przez Instytut Fizyki UJ oraz Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH przy współudziale Muzeum Uniwersytetu Jagiellońskiego i Muzeum Inżynierii Miejskiej w Krakowie. Przewodniczącym komitetu organizacyjnego był dr Marek Gołąb (UJ), a spotkaniem kierował dr Jerzy Jarosz (UŚ). W spotkaniu udział wzięło prawie 50 demonstratorów fizyki z całej Polski: pracowników wyższych uczelni oraz nauczycieli szkół średnich i gimnazjów.





Uczestnicy Spotkania podczas zwiedzania Collegium Maius  
(fot. autor)

Celem spotkania była przede wszystkim wymiana doświadczeń. W czasie kilkunastu wykładów prelegenci przedstawili ciekawe doświadczenia pokazowe z takich działów fizyki, jak mechanika, termodynamika, optyka, elektryczność i magnetyzm, a nawet holografia oraz pomiary promieniowania kosmicznego. Były to zarówno całkiem nowe doświadczenia pokazowe, jak i standardowe doświadczenia „w nowych wydaniach”.

W pierwszym dniu spotkania poza wykładami w IF UJ organizatorzy przygotowali również wizytę w Muzeum Inżynierii Miejskiej w Krakowie oraz na zorganizowanej w nim wystawie interaktywnej „Zabawy z nauką”. Na wystawę tę składa się kilkadziesiąt stanowisk z modelami, na których każdy może samodzielnie wykonać proste doświadczenie, bawiąc się i ucząc jednocześnie.

W drugim dniu uczestników gościł WFiIS AGH. Dzień ten wzbogacony był o zwiedzanie Muzeum UJ, w tym wystawy historycznych przyrządów pomiarowych (fizycznych, astronomicznych i chemicznych). Chętni mogli też odbyć niezwykle interesującą wycieczkę po krakowskim Starym Mieście.

Trzeci dzień spotkania rozpoczął się od wycieczki do „Ogrodu doświadczeń” w Parku Lotników Polskich w Czyżynach. Jest to przygotowywana na świeżym powietrzu interaktywna wystawa doświadczeń naukowych. W chwili obecnej trwają jeszcze prace budowlane, ale do dyspozycji zwiedzających oddano już kilkanaście pierwszych eksponatów.

Niewątpliwie spotkanie umożliwiło uczestnikom poszerzenie wiedzy na temat metod prowadzenia demonstracji fizycznych oraz podsunęło pomysły na nowe doświadczenia pokazowe. Dało też możliwość spotkania z koleżankami i kolegami z innych ośrodków naukowych z całej Polski.

Następne, VIII Spotkanie Ogólnopolskiego Klubu Demonstratorów Fizyki odbędzie się w roku 2008 w Opolu. Więcej informacji: [www.if.uj.edu.pl/VI IOSDEF](http://www.if.uj.edu.pl/VI IOSDEF).

Marcin Paweł Sadowski

## ■ Theodore H. Maiman (1927–2007)

5 maja 2007 r. zmarł w wieku 79 lat Theodore Harold Maiman, fizyk, który zbudował pierwszy laser – impulsowy laser rubinowy pompowany silną lampą błyskową.

Maiman studiował na University of Colorado i Uniwersytecie Stanforda, gdzie w 1955 r. uzyskał doktorat z fizyki, pracując pod opieką Willisa Lamba. Po studiach podjął pracę w Hughes Aircraft Company. Zajmował się tam najpierw budową niewielkiego masera rubinowego, po czym podjął próby budowy optycznego odpowiednika masera, idąc za sugestią Charlesa Townesa i Arthura Schawlowa z 1958 r. Udało mu się to 16 maja 1960 r. Wkrótce potem opisał swoje odkrycie w artykule wysłanym do *Physical Review Letters*, który został jednak odrzucony, gdyż ówczesny redaktor *PRL*, Sam Goudsmit, zdecydował, że otrzymuje tak wiele artykułów na temat maserów, iż nie będzie ich więcej przyjmował. Maimanowi udało się opisać swój laser w bardzo krótkiej publikacji w *Nature*, która ukazała się 6 sierpnia 1960 r. Townes ze współpracownikami oraz Gordon Gould zbudowali podobne lasery w kilka tygodni po Maimanie. Powstanie pierwszego lasera kojarzono najczęściej z nazwiskiem Townesa (którego artykuł *PRL* przyjął do druku) i to on otrzymał Nagrodę Nobla z fizyki w 1964 r. wraz z fizykami radzieckimi Nikołajem Basowem i Aleksandrem Prochorowem.



Theodore Maiman

Maiman zajmował się potem optyką nieliniową, założył też własną firmę, Korad Corporation, specjalizującą się w produkcji laserów. Za swą rolę pierwszego budowniczego lasera otrzymał ostatecznie wiele nagród, w tym Nagrodę Wolfa, i znalazł miejsce w US National Inventors Hall of Fame. Był dwukrotnie nominowany do Nagrody Nobla, lecz jej nie dostał. Swój opis początków laserów zawarł w książce *The Laser Odyssey*, wydanej w 2000 r.

*Nature* 447, nr 7145 (2007)  
*Phys. World* 20, nr 6 (2007)

M. Ł.

## NOWE KSIĄŻKI

- Władysław Bulanda, *Podstawy fizyki środowiska przyrodniczego*, Wydawnictwa UMCS, Lublin 2007, s. 382.
- David Whitehouse, *Słońce*, z jęz. angielskiego tłum. Urszula i Mariusz Seweryńscy; Prószyński i S-ka, Warszawa b.r., s. 336.
- Simon Singh, *Wielki wybuch – narodziny wszechświata*, z jęz. angielskiego tłum. Jan Koźlaczek; Albatros, Warszawa 2007, s. 472.
- Jerzy Ginter, *Nie bój się pochodnej*, Wydawca UW Wydział Fizyki, Warszawa 2007, s. 116.

## POSTĘPY FIZYKI W INTERNECIE

Zapraszamy do odwiedzania naszej strony internetowej <http://postepy.fuw.edu.pl>, gdzie można znaleźć:

- ▶ szczegółowe spisy treści wszystkich zeszytów wydanych od 1993 r.
- ▶ archiwum zawierające spisy treści PF z lat 1949–1992
- ▶ materiały dodatkowe, uzupełniające treść niektórych artykułów
- ▶ materiały XXXV Zjazdu Fizyków Polskich (Białystok, 1999 r.) i XXXVI Zjazdu Fizyków Polskich (Toruń, 2001 r.)
- ▶ WYBRANE ARTYKUŁY W FORMACIE PDF, w tym:
  - wykłady noblowskie z lat 2001–05
  - zamieszczone w *Postęпах Fizyki* teksty wykładów na XXXVII Zjeździe Fizyków Polskich (Gdańsk, 2003 r.) i XXXVIII Zjeździe Fizyków Polskich (Warszawa, 2005 r.)

## WKRÓTCE W POSTĘPACH

- *Eryk Wolarz o metamateriałach, czyli nowych zastosowaniach elektrodynamiki*
- *Björn Trauzettel – Od grafitu do grafenu*
- *Jerzy Kuczyński o tym, dlaczego warto znać się na magii*
- *80 lat Jerzego Janika*
- *Wspomnienia: Pierre-Gilles de Gennes i Jerzy Rogaczewski*

## WARUNKI PRENUMERATY

Cena prenumeraty krajowej w 2007 r. wynosi 36,00 zł za pół roku, 72,00 zł za rok. Prenumeratę przyjmują:

### I. „RUCH” S.A.

1. Wpłaty na prenumeratę przyjmują jednostki kolportażowe „RUCH” S.A. właściwe dla miejsca zamieszkania lub siedziby prenumeratora.
2. Terminy przyjmowania wpłat na prenumeratę krajową: do 5 każdego miesiąca poprzedzającego okres rozpoczęcia prenumeraty.
3. Informacji o prenumeracie ze zleceniem dostawy za granicę udziela Dział Obrót Zagraniczny, ul. Jana Kazimierza 31/33, 01-248 Warszawa, tel. 022-5328731, e-mail: prenumerata@okdp.ruch.com.pl, Internet: www.ruch.pol.pl.

### II. ZARZĄD GŁÓWNY PTF

Wpłaty należy dokonać na konto Zarządu Głównego PTF: 69 1020 1097 0000 7206 0136 4215 lub w Biurze Zarządu Głównego PTF. Dostawa *Postępów Fizyki* następuje drogą pocztową pod wskazany adres.

### III. ODDZIAŁY PTF

Opłata roczna dla członków PTF oraz studentów wynosi 48,00 zł. Dostawa *Postępów Fizyki* odbywa się za pośrednictwem oddziału PTF.

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

## INFORMACJE DLA AUTORÓW

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

## REKLAMA W POSTĘPACH FIZYKI

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

## POSTĘPY FIZYKI (ADVANCED IN PHYSICS)

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

### INFORMATION FOR SUBSCRIBERS

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

Dyrektor Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie

## OGŁASZA KONKURS NA STANOWISKO ADIUNKTA W ODDZIALE FIZYKI PROMIENIOWANIA I SPEKTROSKOPII

Do konkursu mogą przystąpić osoby, które posiadają stopień naukowy doktora w dziedzinie fizyki. Preferowani są kandydaci o specjalności fizyka teoretyczna, z doświadczeniem w zakresie fizyki ultrazimnych gazów kwantowych.

Zgłoszenie do konkursu powinno zawierać:

- podanie,
- życiorys,
- autoreferat, zawierający informację o dotychczasowych osiągnięciach naukowych,
- odpis dyplomu ukończenia studiów wyższych i dyplomu stopnia naukowego doktora,
- spis publikacji,
- co najmniej dwie opinie od samodzielnych pracowników naukowych.

Zgłoszenia na konkurs należy przesłać pod adresem:

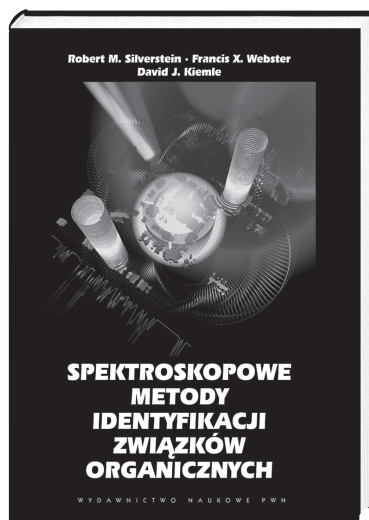
Kancelaria Ogólna, Instytut Fizyki PAN, Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warszawa.

Termin składania dokumentów upływa w dniu 21 grudnia 2007 r.

Konkurs zostanie rozstrzygnięty do dnia 31 grudnia 2007 r.

Warszawa, 29 października 2007 r.

Dyrektor Instytutu Fizyki PAN w Warszawie



### SPEKTROSKOPOWE METODY IDENTYFIKACJI ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH – TŁUMACZENIE NAJNOWSZEGO WYDANIA ORYGINAŁU

Jeden z najlepszych na świecie podręczników dotyczących identyfikacji związków organicznych za pomocą metod spektroskopowych. Zawiera bardzo gruntowne i rzetelne omówienie wzajemnie uzupełniających się technik, wykorzystujących promieniowanie elektromagnetyczne o różnej energii:

- spektrometrii mas
- spektroskopii w podczerwieni (IR)
- spektroskopii magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR)
- spektroskopii w nadfiolecie (UV)

Materiał teoretyczny jest doskonale zrównoważony informacjami praktycznymi. Każdy rozdział zawiera szczegółowe omówienie interpretacji widm, zestawy zadań dla studentów oraz materiały pomocnicze i literaturę przedmiotu. Dwa ostatnie rozdziały poświęcone są rozwiązywaniu problemów – w jednym pokazano przykładowe problemy z rozwiązaniami, a w drugim problemy do samodzielnego rozwiązania.

 WYDAWNICTWO NAUKOWE PWN • [www.pwn.pl](http://www.pwn.pl)

Dyrektor Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie

## OGŁASZA KONKURS NA STANOWISKO ADIUNKTA W ODDZIALE FIZYKI PROMIENIOWANIA I SPEKTROSKOPII

Do konkursu mogą przystąpić osoby, które posiadają stopień naukowy doktora w dziedzinie fizyki. Preferowani są kandydaci o specjalności fizyka teoretyczna, z doświadczeniem w zakresie fizyki ultrazimnych gazów kwantowych.

Zgłoszenie do konkursu powinno zawierać:

- podanie,
- życiorys,
- autoreferat, zawierający informację o dotychczasowych osiągnięciach naukowych,
- odpis dyplomu ukończenia studiów wyższych i dyplomu stopnia naukowego doktora,
- spis publikacji,
- co najmniej dwie opinie od samodzielnych pracowników naukowych.

Zgłoszenia na konkurs należy przesać pod adresem:

Kancelaria Ogólna, Instytut Fizyki PAN, Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warszawa.

Termin składania dokumentów upływa w dniu 21 grudnia 2007 r.

Konkurs zostanie rozstrzygnięty do dnia 31 grudnia 2007 r.

Warszawa, 29 października 2007 r.

Dyrektor Instytutu Fizyki PAN w Warszawie



### SPEKTROSKOPOWE METODY IDENTYFIKACJI ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH – TŁUMACZENIE NAJNOWSZEGO WYDANIA ORYGINAŁU

Jeden z najlepszych na świecie podręczników dotyczących identyfikacji związków organicznych za pomocą metod spektroskopowych. Zawiera bardzo gruntowne i rzetelne omówienie wzajemnie uzupełniających się technik, wykorzystujących promieniowanie elektromagnetyczne o różnej energii:

- spektrometrii mas
- spektroskopii w podczerwieni (IR)
- spektroskopii magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR)
- spektroskopii w nadfiolecie (UV)

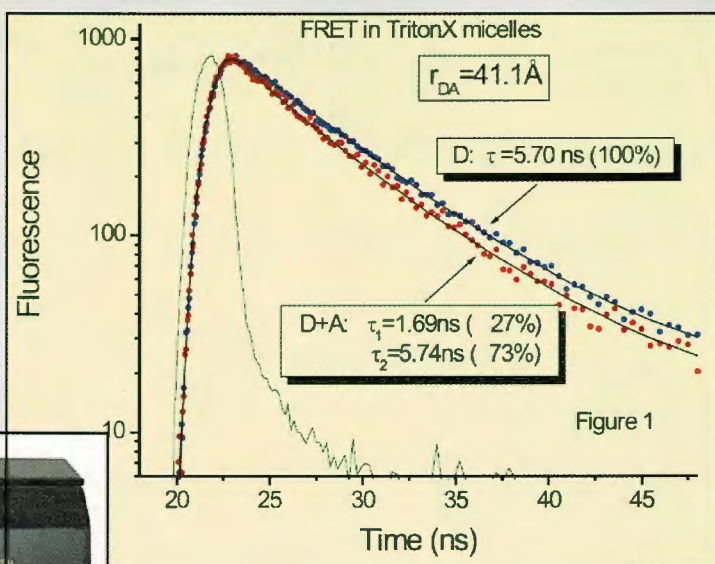
Materiał teoretyczny jest doskonale zrównoważony informacjami praktycznymi. Każdy rozdział zawiera szczegółowe omówienie interpretacji widm, zestawy zadań dla studentów oraz materiały pomocnicze i literaturę przedmiotu. Dwa ostatnie rozdziały poświęcone są rozwiązywaniu problemów – w jednym pokazano przykładowe problemy z rozwiązaniami, a w drugim problemy do samodzielnego rozwiązania.

**Pw** WYDAWNICTWO NAUKOWE PWN • [www.pwn.pl](http://www.pwn.pl)

# EasyLife LS

Fluorescencyjny spektrometr kinetyczny

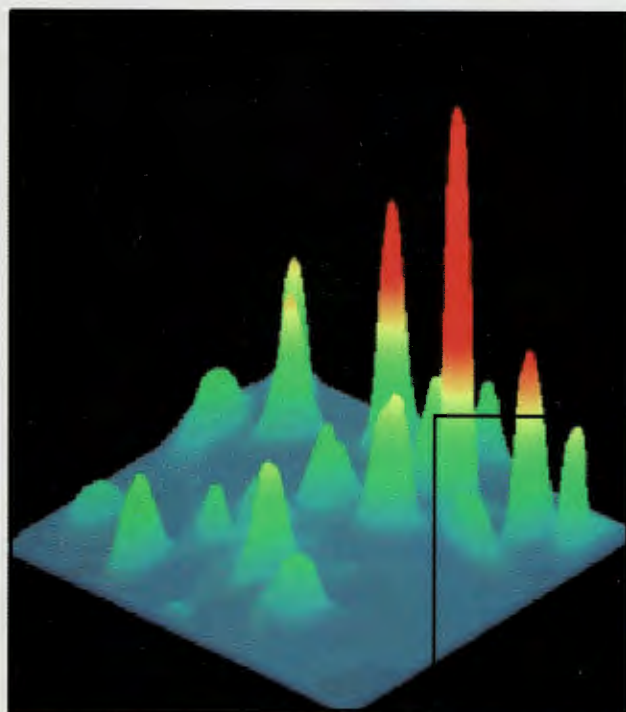
wzbudzenie LED: 280 - 540nm  
rozdzielczość: < 100 ps  
bogate oprogramowanie  
cena: \$25 000



## ImageMaster

Mikroskopowy układ do obrazowania fluorescencji i do spektroskopii emisyjnej.

Mierzy fluorescencję i fosforescencję rozdzieloną czasowo i przestrzennie.



**Photon Technology International**

*Eurotek International Sp. z o. o.*

022 843 70 40  
inbox@eurotek.com.pl