

# Foton 91

ZIMA  
2005

Pismo dla nauczycieli fizyki i przyrody oraz ich uczniów

INSTYTUT FIZYKI ✕ UNIwersYTETU JAGIELLOŃSKIEGO  
SEKCJA NAUCZYCIELSKA POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO



Nobel 2005  
1905 annus mirabilis  
Einstein w moim mieście  
Eksploratoria w Polsce

Światowy Rok  
FIZYKI  
2005  
[www.fizyka2005.org](http://www.fizyka2005.org)



*Courtesy American Institute  
Photograph by Jack Steger*

Roy Glauber jako młody student z własnoręcznie wykonaną aparaturą  
Zdjęcie otrzymano dzięki uprzejmości R. Glaubera



## Rok Fizyki 2005

Co roku przeżywamy emocje związane z przyznaniem Nagrody Nobla z fizyki. Często mamy potem trudności z wytłumaczeniem naszym uczniom, „za co” ten Nobel został przyznany. W tym roku sytuacja jest o tyle prostsza, że przynajmniej odkrycia fizyków mają powszechne zastosowania, dotyczą bowiem laserów. I chociaż zasada działania lasera nie jest bardzo prosta (stałe polecam wypróbowany „chwyt” Arkadiusza Piekary, opisany też w *Fotonie*), to jednak sam laser jest wręcz gadżetem, zabawką kupowaną w kiosku. Możemy nauczyć naszych uczniów całkiem sporo i poprawnie o naturze światła, i to na rozmaitych poziomach, od szkoły podstawowej począwszy. Uważam optykę za dział nie tylko ważny ze względów poznawczych, ale posiadający ogromne walory dydaktyczne. Optyka jest bohaterką tegorocznej Nagrody Nobla. W tym zeszycie znajdą Państwo artykuły jej dotyczące.

Kończący się Rok Fizyki znajduje odbicie w artykułach dotyczących prac Einsteina z 1905 roku o efekcie fotoelektrycznym i ruchach Browna. Artykuł Janusza Skalskiego jest gościnnym przedrukiem z *Delty*, do lektury której powinni Państwo zachęcać swoich zdolnych uczniów. O ruchach Browna napisał kolega redakcyjny J.P. Góra. W ramach koleżeńskiej współpracy z *The Physics Teacher* dostaliśmy artykuł redaktora naczelnego Karla Mamoli, opisujący ważne wydarzenie z życia Einsteina, a w nim mało znane fotografie uczonego. Opisujemy epizod z życia Einsteina, a mianowicie spotkanie z uczonym i wynalazcą, późniejszym prezydentem Ignacym Mościckim.

Informacje o konkursach zamieszczamy by zachęcać Państwa do specjalnej troski o ambitnych i najzdolniejszych uczniów. Stwarzajmy im warunki uczestnictwa w grupie rówieśniczej o podobnych zainteresowaniach i ambicjach. Jeśli w klasie jest tylko rodzynek, to trzeba go zapoznać z kolegami z innych klas, nawet niższych czy wyższych (kółko, jakieś projekty czy może wzajemne konsultacje).

Sukces i powodzenie imprez typu „Fizyka na Scenie”, szczególnie często organizowanych w tym roku, pokazują, że i Państwo, i uczniowie polubili tę formę nauki. Powinna ona zagościć na stałe w harmonogramach szkolnych. Polska wybija się w tej działalności na tle innych krajów europejskich.



*Redakcja składa Czytelnikom życzenia Wesołych Świąt  
i Szczęśliwego Nowego Roku*

*w prezencie plakat „Nobel 2005” [www.foton.z.pl](http://www.foton.z.pl)*

Z.G-M



## Contents

Year of Physics 2005	
<i>Zofia Gołqb-Meyer</i> .....	1
Annus mirabilis, interview with Piotr Garbaczewski	
<i>Andrzej Politowicz</i> .....	4
Theory of Brownian motion: A hundred anniversary	
<i>Pawel F. Góra</i> .....	12
Light quanta, photoelectric effect and photons reality	
<i>Janusz Skalski</i> .....	18
Nobel Prize 2005	
<i>Jakub Zakrzewski</i> .....	23
Nobel Prize 2005: Laser-based precision spectroscopy and the optical frequency combs	
<i>Tomasz M. Brzozowski</i> .....	26
Nobel Prizes for research on photoelectric phenomena	
<i>Maria Średniawa</i> .....	36
Einstein in my hometown	
<i>Karl Mamola</i> .....	40
The President of Polish Republic Ignacy Mościcki and Albert Einstein	
<i>Zofia Gołqb-Meyer</i> .....	45
Kundt's tube and the image method in electrostatic	
<i>Bartosz Lalek, Hieronim Lalek</i> .....	48
Science musea in Poland	
<i>Stanisław Bednarek</i> .....	53
The correct solution of a certain problem in the theory of relativity	
<i>Antoni Paja</i> .....	58
Problems (hydrostatic)	
<i>Adam Smólski</i> .....	61
Erratum.....	61
Experiments. Magic balls (from GIREP)	
<i>Zofia Gołqb-Meyer</i> .....	62
Polish physicists in philately (c.d.)	
<i>Jerzy Bartke</i> .....	63
Reading in English. „Strong”	
<i>Marko Budisa</i> .....	65
What to read	
„Dream” of Johannes Kepler	
<i>Andrzej Kobos</i> .....	66
„Delta” – popular monthly for high school students	
<i>Mikołaj Korzyński</i> .....	68
Science and Art Festival in Poznań	
<i>Barbara Orchel</i> .....	69
Young Lion Competition 2006.....	71
Competitions for high school students.....	73
Museum of Municipal Engineering in Cracow.....	75
Editorial News.....	77



## Spis treści

Rok Fizyki 2005	
<i>Zofia Gołąb-Meyer</i> .....	1
Annus mirabilis, rozmowa z Piotrem Garbaczewskim	
<i>Andrzej Politowicz</i> .....	4
Sto lat teorii ruchów Browna	
<i>Paweł F. Göra</i> .....	12
Kwanty światła, efekt fotoelektryczny i realność fotonów	
<i>Janusz Skalski</i> .....	18
Nobel 2005	
<i>Jakub Zakrzewski</i> .....	23
Nobel 2005: precyzyjna spektroskopia laserowa i optyczne grzebienie częstotliwości	
<i>Tomasz M. Brzozowski</i> .....	26
Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki za badanie zjawiska fotoelektrycznego	
<i>Maria Średniawa</i> .....	36
Einstein w moim mieście	
<i>Karl Mamola</i> .....	40
Prezydent Rzeczypospolitej Polskiej Ignacy Mościcki i Albert Einstein	
<i>Zofia Gołąb-Meyer</i> .....	45
Rura Kundta a „metoda obrazów”	
<i>Bartosz Lalek, Hieronim Lalek</i> .....	48
Eksploratoria fizyczne w Polsce	
<i>Stanisław Bednarek</i> .....	53
O poprawnym rozwiązaniu pewnego prostego zadania ze szczególnej teorii względności	
<i>Antoni Paja</i> .....	58
Kącik zadań	
<i>Adam Smólski</i> .....	61
Errata.....	61
Kącik eksperymentatora. Magiczne kulki	
<i>Zofia Gołąb-Meyer</i> .....	62
Fizycy polscy w filatelistyce (c.d.)	
<i>Jerzy Bartke</i> .....	63
Czytamy po angielsku. „Strong”	
<i>Marko Budisa</i> .....	65
Co czytać	
„Sen” Johanna Keplera	
<i>Andrzej Kobos</i> .....	66
„Delta”	
<i>Mikołaj Korzyński</i> .....	68
VIII Poznański Festiwal Nauki i Sztuki	
<i>Barbara Orchel</i> .....	69
Konkurs. Lwiątko 2006.....	71
Konkurs. V Małopolski Konkurs z Fizyki i Astronomii.....	73
Ogólnopolski konkurs fizyczno-fotograficzny.....	74
EDUKACJA w Muzeum Inżynierii Miejskiej w Krakowie.....	75
Komunikaty Redakcji.....	77



## Annus mirabilis<sup>1</sup>

Z Profesorem Piotrem Garbaczewskim z Uniwersytetu Zielonogórskiego  
rozmawia Andrzej Politowicz

Redaktor miesięcznika *Uniwersytet Zielonogórski*

### ***Panie Profesorze, dlaczego rok 2005 ogłoszono Światowym Rokiem Fizyki?***

Jak wszyscy, fizycy lubią okrągłe rocznice. W 1905 roku w niemieckojęzycznych czasopismach (taki był ówczesny język nauki) ukazało się pięć<sup>2</sup> prac 26-letniego fizyka z Berna – Alberta Einsteina. Z dzisiejszej perspektywy nikt chyba nie ma wątpliwości, że właśnie Einstein był największym umysłem XX wieku w zakresie fizyki. Co więcej, okazał się być gigantem miary największego ze swoich poprzedników – Isaaca Newtona. Co najmniej trzy prace z roku 1905 wytyczyły nowe kierunki badań w fizyce – o dalekosiężnych konsekwencjach naukowych i pozanaukowych. Przy tym dwie z nich stanowiły przełom koncepcyjny w rozwoju fizyki, zapowiedź dwóch rewolucji w fizycznym obrazie świata: odrzucenie pojęcia absolutnego czasu (szczególna teoria względności) i hipoteza fotonu jako kwantu energii (niezamierzone ojcostwo teorii kwantów). Mimo że potocznie Albert Einstein kojarzy się z ogólną teorią względności i jej ezoteryczną otoczką – w roku 1905 nie było o niej nawet wzmianki. Nagrodę Nobla otrzymał Einstein za swój „kwantowy foton” (1921).

### ***A co było w tych pracach tak naprawdę ważnego?***

Odpowiem niechronologicznie, z dokładnością do kilku miesięcy roku 1905. Analizując wcześniejsze prace holenderskiego fizyka H. Lorentza (1900–1904) poświęcone elektrodynamice klasycznej, Einstein sformułował podstawy szczególnej teorii względności – dramatyczne uogólnienie mechaniki newtonowskiej. W kolejnej pracy podał wyjaśnienie tzw. zjawiska fotoelektrycznego – kolejne potwierdzenie, po hipotezie kwantowania energii koniecznej do wyprowadzenia słynnego wzoru M. Plancka (1900), że energia promieniowania elektromagnetycznego jest pochłaniana i emitowana w kwantach, w dobrze określonych porcjach. Kolejna niezwykła praca to sformułowanie podstaw teoretycznych tzw. ruchów Browna – odkrycie dla fizyki procesów losowych, ale wsparte ilościowymi przewidywaniami. Za ich weryfikację doświadczalną, a przy okazji określenie – m.in. na podstawie rozprawy doktorskiej Einsteina z roku 1905 – liczby Avoga-

<sup>1</sup> *Annus mirabilis* – rok osobliwy, nadzwyczajny, cudowny. W ten sposób określa się w historii fizyki rok 1905.

<sup>2</sup> Pięć prac łącznie z pracą doktorską.

dra, Nagrodę Nobla w roku 1926 otrzymał J. Perrin. Jako ciekawostkę warto wspomnieć trzystronicową notkę z 1905 roku, w której po raz pierwszy pojawił się znak firmowy teorii względności w postaci wzoru na równoważność masy bezwładnej i energii (w oryginale niełatwo zidentyfikować wyrażenie  $E = mc^2$ ).

***Jak dziś określa się obszar zainteresowań fizyki? Czy jest to w ogóle możliwe w dobie szalonej dezintegracji badań i coraz węższej specjalizacji, gdy wiele dyscyplin wyodrębniło się z fizyki i funkcjonują pod własnymi nazwami, jak choćby astrofizyka, biofizyka, fizykochemia, geofizyka?***

Być może właściwą odpowiedzią jest upowszechniana przez specjalistów fizyki wysokich energii i niektórych astrofizyków „teoria wszystkiego”, która w jedną kwantową całość „sklei” różne rodzaje znanych fizykom oddziaływań: elektromagnetycznych, słabych, silnych i grawitacyjnych. Mnie osobiście bliskie jest rozumienie fizyki jako metody zarówno w sensie pragmatycznym, jak też w sensie wysublimowanej sztuki (dla szyderców może być też: „sztuki dla sztuki”) modelowania rzeczywistości. „Modelowanie rzeczywistości” to skądinąd tytuł książki autorstwa Iwo i Iwony Białynickich-Birula. Wówczas sama fizyka staje się „teorią wszystkiego” o nieograniczonym obszarze zainteresowań.

Myślę, że dla naukowca poważna skądinąd dyscyplina naukowa musi stanowić element po trosze zabawy, po trosze gry z naturą – jak interpretować niezrozumiałe na pierwszy rzut oka zjawiska w otaczającym świecie. Możemy wraz z K. Ernstem „posadzić” (przyszłego) Einsteina na huśtawce i zająć się fizyką zabaw, gier i zabawek. Można „grać w życie” z G.H. Conwayem. Można analizować procesy narastania płatków śniegu, żartować na temat „efektu motyla” E. Lorenza w przewidywaniach pogody. Nic nie przeszkadza analizować współczesnymi metodami fizyki prozaicznego (przynajmniej dla amerykańskich i meksykańskich hodowców bydła) „trzasku z bicia” (P. Pierański) czy – jak zdarzyło się znużonemu doktorantowi w Santa Cruz, C. Shawowi – poprzez analizę wpływu kropel wody z ciekącego kranu stworzyć teorię zachowań nieregularnych w dynamice tzw. iterowanych układów nieliniowych, wykazujących cechy chaosu deterministycznego.

Od analizy sieci neuronowych można przejść do modelowania zachowań społecznych – jednostka ludzka nie jest całkowicie przewidywalna, ale całkiem przewidywalna bywa w grupie podobnych sobie. Od psychologii czy socjologii możemy przejść gładko do zaawansowanej biologii i biochemii, bo w zainteresowaniach fizyków znajduje się jeszcze problem ludzkiej świadomości.

***A co kryje się pod określeniem „fizyka klasyczna” i co odróżnia ją od fizyki nazywanej „kwantową”?***

W zasadzie to, co nazywamy fizyką klasyczną, zaczęło się od badań Galileusza i Newtona. Kodyfikacja Newtona dotyczy mechaniki: zwykle przywołujemy „jabłko

Newtona” i jego podobno oryginalne pytanie – jak właściwie Księżyc spada na Ziemię – by ostatecznie dotrzeć do prawa powszechnego ciężenia. Oddziaływania elektromagnetyczne to wiek XIX – M. Faraday i J.C. Maxwell stworzyli elektrodynamikę klasyczną.

Trochę wbrew wyrażonemu wcześniej pogładowi, że to Einstein w XX wieku zamienił fizykę newtonowską na fizykę einsteinowską (relatywistyczną) i dodatkowo fizykę klasyczną na kwantową, prace A. Einsteina z roku cudów (1905) były głęboko osadzone w fizyce klasycznej. Dwie mieściły się w obszarze dziewiętnastowiecznej termodynamiki i tzw. teorii kinetycznej, dwie następne (szczególna teoria względności) uogólniały klasyczną mechanikę i elektrodynamikę. Dopiero piąta praca o kwantowaniu promieniowania elektromagnetycznego rozpoczęła rewolucję kwantową.

Kroki milowe: M. Planck (1900), A. Einstein (1905), N. Bohr (1917), E. Schrödinger (1926), to odejście od podstawowej koncepcji fizyki klasycznej, że wszystkie procesy fizyczne są ciągłe. Jest to opis całkowicie poprawny dla rzeczywistości makroskopowej. Fizyka kwantowa zaczyna się od spostrzeżenia, że istnieje świat zjawisk mikroskopowych, w których podstawowe procesy (np. wymiana energii) odbywają się w sposób nieciągły, porcjowany (stąd kwanty energii). I to doprowadziło do bomby atomowej, ale też do tranzystora i lasera, bez których trudno sobie wyobrazić współczesną technikę.

Obecnie dominuje pogląd, że u podłoża wszystkich procesów fizycznych leżą procesy kwantowe. Nieco to się kłóci z potocznym widzeniem świata: komputer jest obiektem „wyglądającym” klasycznie, można go bardzo „klasycznie” zniszczyć, np. zrzucając na podłogę, ale atomy go tworzące są obiektami mikroskopowymi i jak najbardziej kwantowymi, i niepodatnymi na zniszczenie poprzez proste rzucanie.

Niestety, nie istnieje precyzyjna, uchwytna dla laika granica między rzeczywistością klasyczną (podlegającą prawom fizyki klasycznej) a zjawiskami kwantowymi (rządzonymi prawami fizyki kwantowej). Jeszcze bardziej nieuchwytny jest podział na „małe” (mikroskopowe) i „duże” (makroskopowe). Model teoretyczny, jego stosowalność lub nie, są rozstrzygane (lub falsyfikowane) przez doświadczenie.

Fizyka jako sztuka modelowania rzeczywistości jest nauką o tym, jak najlepiej przybliżyć najczęściej niedokładne dane doświadczalne – jest czasem manufakturą, czasem taśmą produkcyjną (tu przydają się liczni, dobrze wyszkoleni doktoranci) do wytwarzania idealnych teoretycznych modeli zjawisk i poszukiwania ich zakresów przydatności.

W ramach teorii kwantów tzw. nanorurka czy molekula fullereny jest molekularnym obiektem mikroskopowym, na pograniczu cech kwantowych i klasycznych. Ale np. elektronowi przypisuje się brak mierzalnych rozmiarów (cząstka punktowa), atom miewa w przybliżeniu rozmiary od angstroma do (atomy



Rydberga) niemal mikrona. Jeśli się uprzeć, można Hyperion, jeden z księżyców Saturna (największy z nieregularnych (niekulistych) obiektów Układu Słonecznego) potraktować jako kwantowy megaatom. Tylko po co, jeśli prawa mechaniki klasycznej dostarczają wystarczających środków do rozumienia i opisu jego (skądinąd chaotycznej) dynamiki. Do przesuwania biurka niepotrzebna jest fizyka kwantowa, ale może się przydać do analizy procesu jego spalania (wraz z chemią).

Trochę podobnie dzieje się w ramach samej fizyki klasycznej. W fizyce relatywistycznej całość tzw. fizyki newtonowskiej jest uprawnionym przybliżeniem w zakresie małych prędkości. Termin „mała” jest nieco iluzoryczny, bo musi być ustalona względem prędkości światła. Dlatego małą prędkością jest zarówno metr na sekundę, jak i 20 tys. kilometrów na sekundę.

Fizyka najbliższego nam świata (nasze bezpośrednie otoczenie) jest oczywiście newtonowska i wcale nie jest jeszcze teorią zamkniętą. Wychodząc od dynamiki newtonowskiej, po pionierskich odkryciach H. Poincarégo (około 1900 r.) dopiero w latach 60. XX wieku uzyskano wiarygodne wyniki o klasycznej dynamice chaotycznej (W.I. Arnold – 1964). Dziś wiemy, że wzorzec regularności w życiu codziennym („obroty sfer niebieskich”), czyli planetarny układ dynamiczny, zwany słonecznym, jest układem niestabilnym. To techniczne pojęcie mówi, że jest układem o dynamice nieregularnej, chaotycznej, a więc znacznie mniej przewidywalnym, niż chcieliby astrologowie czy wróżki.

***Wróćmy jeszcze na chwilę do historii. Czy fizyka miała taki okres rozwoju jak np. historia cywilizacji – epokę wielkich odkryć geograficznych? Wydaje się bowiem, że nie ma w zasadzie okresów застоju w dziejach fizyki, że ten rozwój jest ciągły, choć od przełomu XIX i XX wieku ulega gwałtownemu przyspieszeniu.***

Rozwój fizyki tylko z pozoru można interpretować jako proces ciągły – narastającą kumulację doświadczeń i ujmowanie tych wyników w ramy stosownych modeli teoretycznych. W rzeczywistości decydujące są „przewroty pojęciowe” (teorie rewolucji naukowych T.S. Kuhna i K. Poppera).

W wieku XVIII i XIX dominował opis ciągły i falowy zjawisk. W wieku XX zwyciężył opis kwantowy. Przejście od dynamiki Galileusza (nierelatywistycznej) do dynamiki relatywistycznej dojrzało w XIX wieku w sposób niemal ciągły. Ale potrzebne było „ryzykanctwo” Einsteina, by postawić „kropkę nad i” i odrzucić absolutny układ odniesienia (eter) faworyzowany przez H. Lorentza. W XVII wieku Newton był zwolennikiem korpuskularnej teorii światła, ale jego wielkość nie wystarczyła do utworzenia „korpuskularnego” (kwantowego) paradygmatu. Ch. Huygens – zwolennik teorii falowej – argumentował bardziej przekonująco dla ówczesnej populacji badaczy przyrody. Wygrał paradygmat falowy. Atomy Demokryta (przełom V i IV w. p.n.e.) powróciły dopiero pod koniec XIX wieku, a potem nadeszła fizyka kwantowa.

*W potocznym rozumieniu świat, który opisuje fizyka, jest światem doskonale uporządkowanym, w którym taka sama przyczyna wywołuje zawsze taki sam skutek, periodyzacja zdarzeń da się przewidzieć, bo jest powtarzalna, orbity ciał kreślą regularne figury geometryczne itd. Czy jest to obraz rzeczywisty, czy też uproszczony – dla lepszego rozumienia zjawiska?*

Edukacja szkolna i znaczna część kształcenia uniwersyteckiego w zakresie fizyki tworzy przekonanie, że wszystkie ważne zjawiska fizyczne mają charakter regularny, w istocie okresowy. Okresowość zjawisk astronomicznych, zegarki mechaniczne, kwarcowe, zegary atomowe – utrwalają w nas przekonanie, że „wszystko” jest regularne: przewidywalne i powtarzalne. Tymczasem to przekonanie jest iluzją. Oczywiście, wiele ważnych układów fizycznych posiada wcześniej wymienione cechy, ale zarówno badania doświadczalne, jak i teoretyczne, zaburzają ten idealny obraz. Takie układy są wyjątkowe. Można sformułować tezę, że „prawie wszystkie” układy dynamiczne wykazują cechy nieregularności, niepowtarzalności.

Nawet jeśli model teoretyczny przewiduje, że wybrane dane początkowe prowadzą do jednoznacznie określonego stanu fizycznego po skończonym czasie, tzw. wrażliwość na warunki początkowe powoduje, że w ramach weryfikacji doświadczalnej, gdzie dane początkowe są określone z różnym od zera błędem (niepewnością), ta sama doświadczalna przyczyna może prowadzić do zasadniczo odmiennych skutków. To jest właśnie cecha chaosu deterministycznego, wspomniany wcześniej „efekt motyla” E. Lorenza (1964).

Warto też wiedzieć, że zachowanie układów ożywionych (mało eleganckie określenie, np. dla człowieka) wcale nie cechuje się nadmierną regularnością. Wśród tysięcy „rytmów życia” właściwym organizmom biologicznym przykładowo zbyt regularny rytm serca jest objawem choroby, rytm zaburzony nieregularnym szumem jest kanonicznym objawem zdrowia tego organizmu.

*A gdyby Pana poproszono o résumé osiągnięć fizyki w ostatnich 20 latach, to na co Pan zwróciłby szczególną uwagę?*

Próbując odpowiedzieć na to pytanie, w rzeczywistości prognozowałbym najbliższe Nagrody Nobla z fizyki. By hierarchizować ważność odkryć, trzeba znacznej perspektywy czasowej. Ponadto ograniczenia mojej własnej wiedzy o ogromnym skądinąd obszarze współczesnej fizyki uniemożliwiają w pełni wiarygodną odpowiedź na takie pytanie.

Sądzę, że łatwiejsze może być wskazanie niektórych odkryć, za które w minionym półwieczu przyznano Nagrody Nobla z fizyki. Przykładowo: 1956 – za wynalezienie tranzystora, 1964 – za skonstruowanie lasera, 1971 – za odkrycie holografii, 1979 – za jednolitą teorię tzw. elektroslabych oddziaływań cząstek elementarnych, 1985 – za odkrycie kwantowego efektu Halla, 1987 – za odkrycie tzw. nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego, 1989 – za stworzenie techniki

pułapek jonowych, które pozwalają badać pojedyncze atomy, 1991 – za stworzenie teorii ciekłych kryształów (patrz na swój zegarek), 1997 – za rozwój chłodzenia i pułapkowania atomów za pomocą lasera, 1999 – za ostateczne sformułowanie teorii oddziaływań elektroślabych – model standardowy, 2001 – za doświadczalne odkrycie kondensacji Bosego-Einsteina, 2003 – za sformułowanie teorii nadprzewodnictwa i nadciekłości (W. Ginzburg uczynił to 50 lat temu! I miał szczęście dożyć nagrody), 2004 – teoria tzw. asymptotycznej swobody w silnych oddziaływaniach cząstek elementarnych.

Wszystkie nagrodzone osiągnięcia mieszczą się w ramach fizyki kwantowej. Zwykle od opublikowania osiągnięcia do Nagrody Nobla mijało czasem pięć, częściej 15–20, a także 50 lat. Przypominam, że na liście mamy: tranzystor, laser, holografię, ciekłe kryształy – to odkrycia fizyków!

***Językiem fizyki jest matematyka. Interesuje mnie, czy obserwacja zjawisk i procesów jest częstszym sposobem na odkrycia naukowe, czy też zdarzały się przypadki, kiedy z dociekań matematycznych formułowano prawa fizyczne, które potem można było sprawdzić doświadczalnie?***

Sądzę, że w fizyce najczęściej podstawą matematycznych uogólnień były skumulowane dane doświadczalne. Proszę pamiętać, że dla fizyka matematyka jest jedynie językiem, w którym formułowane i zapisywane są prawidłowości w obserwowanych zjawiskach. Mała dygresja: wcześniej mówiłem, że w zjawiskach fizycznych porządek wcale nie jest powszechny. Nieregularność i nieporządek wydają się ingerować wszędzie. Ale właściwie zadaniem fizyki jako „sztuki modelowania” rzeczywistości jest odnajdywanie elementów porządku (praw natury) w zasadniczo nieuporządkowanym świecie.

Nie chcę minimalizować roli matematyki w fizyce, ale tzw. estetyka, poczucie piękna struktur matematycznych było manifestowane jako powód odkrycia naukowego tylko wyjątkowo. Przykładem jest P.A.M. Dirac, odkrywca równania zwanego jego imieniem.

Często mozolne tworzenie poprawnego logicznie i niesprzecznego opisu zjawisk fizycznych skutkowało powstaniem nowych kierunków badań w matematyce. Współcześnie wybitni matematycy i matematycznie zorientowani fizycy próbują wykorzystać pewne idee teoretyczne fizyki w matematyce – i na odwrót. Wyróżniony Medalem Fieldsa (matematyczna Nagroda Nobla) był po trosze fizyk, po trosze matematyk – E. Witten, jeden z proroków „teorii wszystkiego”. Inny nagrodzony Medalem Fieldsa – A. Connes – pisał prace o tzw. geometrii nieprzemiennej jako możliwym matematycznym fundamentie „teorii wszystkiego”. Podobną drogą poszedł S. Woronowicz, współtwórca teorii tzw. grup kwantowych (mój przekorny komentarz: ani grup, ani kwantowych).

Myślę jednak, że dominuje priorytet doświadczenia. Przykładowo, w fizyce wysokich energii wielkie nadzieje wiąże się z nowymi, niesłychanie kosztownymi

konstrukcjami – „zderzaczami hadronowymi”, które mają być wkrótce uruchamiane w CERN-ie, Brookhaven i Stanfordzie.

Oczekuje się uporządkowania świata cząstek elementarnych, ale dopuszcza też myśl, że dotychczasowy porządek legnie w gruzach. W szczególności oczekuje się wyników falsyfikujących konkurencyjne teorie. Zaczyna się polowanie na niekoniecznie istniejącą cząstkę Higgsa i hipotetyczne, bardzo egzotyczne i też niekoniecznie istniejące tzw. cząstki supersymetryczne. A u progu mamy astrofizyczne rozważania o ciemnej energii i materii, o której współczesna fizyka nie ma jeszcze nic do powiedzenia, chociaż sporadycznie pojawiają się głosy, że „ciemność” jest w tym kontekście nadinterpretacją.

***Fizyka to obszerna, ale i fascynująca dziedzina wiedzy. Wiedzy, która przybliży nam rozumienie świata. Dlaczego zatem zainteresowanie studiami na tym kierunku słabnie?***

Zainteresowanie fizyką jako kierunkiem studiów podlega wahaniom, zarówno w Europie, jak i w USA. Oczywiście wiąże się to ze spektakularnością odkryć i możliwościami technologicznych zastosowań. Trudno codziennie odkrywać kolejny tranzystor czy laser, nie mówiąc o bombie atomowej. Sektor wojskowy lat 40. i 50. był żywotnie zainteresowany bombą atomową i wodorową, później technikami miniaturyzacji (tranzystor). Boom technologiczny lat 60. był związany z względnie łatwym dostępem do środków finansowych na badania podstawowe, a więc i dostępem do miejsc pracy dla fizyków.

Widziana z tej perspektywy fizyka wydaje się współcześnie mniej atrakcyjna niż jeszcze 20, 30 lat temu. Działa tu narastający kult pieniądza, model kariery zawodowej ocenianej z punktu widzenia stanu konta w banku, ale także zbyt pochopne i czasem nadmierne, kosztem innych dyscyplin, finansowanie przez agendy państwowe tzw. dyscyplin stosowanych (nauki techniczne, rolnictwo, ekonomia, informatyka/zarządzanie), których finansowanie powinno stanowić wynik zapotrzebowania na usługi badawcze szeroko rozumianego przemysłu, będącego skądinąd w zaniku w Polsce.

Nie będę tu rozwijał kwestii „usługowości” nauki w dziejach: trudno znaleźć technicznie lub rozrywkowo (*homo ludens*) interesujące zastosowanie Wielkiego Twierdzenia Fermata, nie wspominając o jego karkołomnym dowodzie (200 stron zaawansowanego matematycznie tekstu). A to właśnie należy do obszaru badań podstawowych, którymi parają się też fizycy.

W czasach nie tak odległych, na przykład w 1966 roku, gdy fizyka była postrzegana przez młodych ludzi jako atrakcyjny sposób poznawania świata, zdobywania wiedzy i rozumienia tego, co nas otacza, możliwa była sytuacja, gdy pierwszy rok uniwersyteckiej fizyki zaczynało 120 osób, kończyło pięć lat później – 90 osób. Z tego grona 26 osób uzyskiwało doktoraty, w tym było sześć habilitacji, a dwie osoby osiągały tytuł profesora. Jako ciekawostkę podam, że jeden z absol-

wentów został doktorem habilitowanym biochemii, a jedna z absolwentek – doktorem habilitowanym nauk medycznych. To był mój rok!

Sądzę, że do młodych ludzi w końcu dotrze, że ani wykształcenie uniwersyteckie, ani politechniczne, na ogół nie daje konkretnego zawodu i miejsca pracy. Nie da go też masówka (mówię o tzw. wielkich liczbach studentów na płatnych studiach dziennych i zaocznych) prawnicza lub zarządzająco-bankowa. Nie sądzę też, by dziesiątki tysięcy kształconych w Polsce pedagogów znajdowały łatwo pracę w tym zawodzie.

Należy myśleć o zdobywaniu wiedzy jako takiej, o zaspokajaniu młodzieńczej ciekawości, jeśli tylko nie została ona stępiona lub bezpowrotnie zniwelowana przez aktualny system kształcenia.

Zdobycie lub stworzenie sobie miejsca pracy staje się umiejętnością, która wymaga elastyczności w myśleniu i działaniu, podatności na zmiany, innowacyjności i niespokojnej duszy poszukiwacza. Znajdowanie rozwiązań problemów życiowych to tylko mały wyimek z tylokrotnie wymienianej „sztuki modelowania rzeczywistości”, nierozzerwalnie związanej z fizyką jako dyscypliną naukową i przedmiotem studiów.

Fizyka to kierunek trudny, ale wyjątkowo pożądanym i atrakcyjnym dla ludzi ciekawych świata, szukających trudnych wyzwań – przygody intelektualnej. Jej metodologia jest nastawiona na poszukiwanie prawidłowości i tworzenie modeli zjawisk, a następnie prognozowanie skutków wynikających z określonych przyczyn. To wykształca dużą elastyczność, ale też wzbogaca wyobraźnię.

Być może dlatego absolwenci fizyki sprawdzają się jako np. analitycy finansowi lub specjaliści od marketingu zaawansowanych technologicznie produktów. Ale przede wszystkim ta bardzo trudna – począwszy od gimnazjum – fizyka jest podstawą rozumienia procesów zachodzących w bardzo od fizyki odległych dziedzinach: modele zachowań społecznych, modele procesów ekonomicznych i giełdowych, modele zjawisk biologicznych, struktur i funkcji łańcuchów DNA, zagadka świadomości – to nieoczekiwane jest też obszar zainteresowań fizyki.

Z żalem stwierdzam, że w kształceniu powszechnym rola fizyki podlega minimalizacji ze szkodą dla kolejnych opuszczających szkoły średnie pokoleń. Podobny trend w postaci braku obowiązkowego egzaminu z matematyki na maturze jest znaczącym obniżeniem rangi tego, co nazywa się egzaminem dojrzałości. Bez wiedzy z podstawowego kanonu nauk ścisłych (dodajmy tu chemię) trudno mówić o przyzwoitym poziomie wykształcenia młodego człowieka.

***Dziękując za rozmowę, wypada mieć nadzieję, że ambicje młodych ludzi skłonią ich do podejmowania trudnych studiów, stanowiących nie tylko intelektualne wyzwanie, ale i związanych ze świadomością, że rozwój takich dziedzin jak fizyka wcześniej czy później przekłada się na postęp cywilizacyjny. I jakość życia.***



## Sto lat teorii ruchów Browna

Paweł F. Góra  
Instytut Fizyki UJ

Rok 1905 był rokiem prawdziwie cudownym, *annus mirabilis*, dla fizyki. W roku tym ukazały się cztery bardzo ważne prace Alberta Einsteina: dwie kładące podstawy pod szczególną teorię względności, praca wyjaśniająca efekt fotoelektryczny, za którą Einstein otrzymał Nagrodę Nobla w roku 1921, oraz praca tłumacząca mechanizm odpowiedzialny za ruchy Browna<sup>1</sup>. Rok później niezależne wytłumaczenie tego ostatniego zjawiska podał także Polak, Marian Smoluchowski<sup>2</sup>. Wyjaśnienie pochodzenia i właściwości ruchów Browna stanowiło rozwiązanie pewnego starego, prawie osiemdziesięcioletniego problemu – rzecz godna uwagi, nikt jednak nie spodziewał się, że podane rozwiązanie będzie miało zupełnie przełomowe znaczenie dla całej fizyki. Tak się jednak stało, my zaś spróbujemy powiedzieć, dlaczego tak się stało.



Marian Smoluchowski  
(1872–1917)



Robert Brown (1773–1858)

Ruchy Browna biorą swą nazwę od nazwiska szkockiego botanika, Roberta Browna. Brown był w swoim czasie człowiekiem bardzo znanym i cenionym, jednak nie za to, z czego słynie dzisiaj, ale za swoje prace nad klasyfikacją roślin Nowego Świata. Otóż w trakcie tych badań Brown w 1827 roku zaobserwował, iż pyłki roślin w zawieszynie wodnej, które obserwował pod mikroskopem, wykonują gwałtowne, bardzo nieregularne, zygawkowate ruchy. Ruchy takie obserwowano już przed Brownem, jednak ponieważ zawsze obserwowano cząsteczki materii organicznej, przyczyny tych ruchów upatrywano w jakiejś tajemniczej „sile życiowej”. Brown jednak nie zadowolił się takim wytłumaczeniem, które od biedy pasować by mogło do żywych pyłków. Stwierdził mianowicie, że zupełnie takie same ruchy wykonują nie tylko pyłki żywe, ale także pyłki obumarłe oraz drobne cząsteczki zawiesiny nieorganicznej (nawiasem mówiąc, Brown używał w tym celu sproszkowanych ka-

<sup>1</sup> A. Einstein, *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*, Ann. Phys. **17**, 549–560 (1905).

<sup>2</sup> M. von Smoluchowski, *Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen*, Ann. Phys. **21**, 756–780 (1906).

wałków słynnego egipskiego sfinksa, co nie miało wpływu na wynik badań, ale dobrze oddaje klimat umysłowy ówczesnej epoki), ruchy te musiały mieć zatem jakąś przyczynę fizyczną. Ale jaką? Brown stwierdził tylko – na ile jego wyposażenie laboratoryjne wystarczyło – że ruchy nie są powodowane ani przez prądy (przepływy) w cieczy, ani nie są pochodzenia konwekcyjnego, ani też nie są spowodowane parowaniem rozpuszczalnika.



Albert Einstein  
(1879–1955)

Przyczyna opisanych przez Roberta Browna ruchów pozostawała więc zagadką, jedną z wielu obserwacji naukowych, które nie miały swojego wytłumaczenia, ale które, w co nikt nie wątpił, kiedyś takie wytłumaczenie znajdzie, i choć problem ten nie wydawał się jakoś szczególnie ważny, wiele osób próbowało go rozwiązać. Po pierwsze zatem, potwierdzono obserwacje Browna, iż ani prądy w cieczy, ani konwekcja, ani parowanie nie były przyczyną tych ruchów. Dalej, jako możliwe przyczyny wyeliminowano skład chemiczny, kształt naczynia i wpływ warunków zewnętrznych. Wreszcie, po sformułowaniu przez Boltzmann i Maxwella tzw. teorii kinetycznej próbowano ruchy Browna opisać w jej języku, a więc przez podanie, jak zmienia się prędkość cząstek brownowskich w czasie. Wszystkie te próby zawiodły.

Choć z dzisiejszego punktu widzenia usiłowania te mają tylko znaczenie historyczne, fakt, iż ludzie je podejmowali, i to z mizernym skutkiem, miał w czasach Einsteina i Smoluchowskiego kolosalne znaczenie, przygotował bowiem grunt dla przyjęcia zaproponowanego przez nich, iście rewolucyjnego rozwiązania, a trzeba pamiętać, iż pozostałe osiągnięcia Einsteina z owego cudownego roku, szczególna teoria względności i pojęcie fotonu, były przez długie lata kontestowane przez czołowych fizyków tamtej epoki.

Jakież było więc rozwiązanie zaproponowane przez Einsteina i Smoluchowskiego? Stwierdzili oni, iż ruch cząstek brownowskich wywołany jest przez zderzenia z cząsteczkami rozpuszczalnika. Cząsteczki te wykonują bezładne ruchy, będące przejawem ich energii termicznej – temperatura jest pewną miarą intensywności tego ruchu. Cząsteczki rozpuszczalnika są zbyt małe, aby można było je bezpośrednio obserwować, natomiast cząsteczki zawiesiny, choć maleńkie z naszego punktu widzenia, są w porównaniu z cząsteczkami rozpuszczalnika prawdziwymi olbrzymami, co pozwala na ich bezpośrednią obserwację. Wyjaśnienie to brzmi być może banalnie w dniu dzisiejszym, wcale jednak nie było banalne sto lat temu. Choć dziś może wydawać się to nam dziwne lub nawet zdumiewające, sto lat temu hipoteza atomistyczna, hipoteza, iż materia ma budowę ziarnistą, że nie da się jej dzielić w nieskończoność w sposób ciągły, nie była powszechnie akceptowana. Wręcz przeciwnie, niektórzy badacze traktowali ją tylko jako niepotwierdzoną hipotezę roboczą, inni zaś, w tym postaci tak wybitne, jak Wilhelm Ostwald (laureat Nagrody Nobla z chemii w roku 1909) i Ernest

Mach, gwałtownie ją zwalczali<sup>3</sup>. Tymczasem Albert Einstein i Marian Smoluchowski twierdzili, że ruch cząstek zawieszony jest bezpośrednim dowodem na istnienie cząstek rozpuszczalnika i, co więcej, że badając cząstki brownowskie, można wiele wywnioskować o naturze cząstek rozpuszczalnika. Einstein i Smoluchowski dostarczyli też ilościowego narzędzia do opisu ruchów Browna: stwierdzili mianowicie, że średni kwadrat przesunięcia cząstki brownowskiej,  $\langle x^2 \rangle$ , powinien być proporcjonalny do czasu trwania obserwacji, współczynnik proporcjonalności zaś jest ściśle związany z tzw. współczynnikiem dyfuzji. Wnioski te pozwoliły na wykonanie wielu szczegółowych pomiarów, zwłaszcza zaś na doświadczalne wyznaczenie tzw. stałej Avogadra. W kilka lat po ukazaniu się prac Einsteina i Smoluchowskiego pomiary takie przeprowadził francuski fizyk Jean-Baptiste Perrin, za co w 1926 roku został uhonorowany Nagrodą Nobla.

Warto wspomnieć, iż Einstein wcale nie chciał podać wyjaśnienia ruchów Browna, nie to było jego celem. Einstein niezbyt dobrze znał fakty doświadczalne dotyczące ruchów Browna. Celem Einsteina było podanie związku pomiędzy współczynnikiem dyfuzji a temperaturą, co mu się udało, a że był człowiekiem prawdziwie genialnym, wymyślił też, jak powinny wyglądać mikroskopowe ruchy cieplne. Smoluchowski przeciwnie, doskonale znał fakty dotyczące ruchów Browna i planował ich wyjaśnienie. Jak zresztą wynika z zachowanej korespondencji pomiędzy Marianem Smoluchowskim a Albertem Einsteinem, Smoluchowski otrzymał swoje wyniki jeszcze przed Einsteinem, natomiast zdecydował się na ich publikację dopiero pod wrażeniem, jakie wywarła na nim praca Einsteina.

Omawiane tu prace Einsteina i – zwłaszcza – Smoluchowskiego odpowiedziały też na wiele innych pytań. Po pierwsze, podały mikroskopowe wytłumaczenie zjawiska dyfuzji (cząstki substancji dyfundującej są „przepychane” na skutek zderzeń z cząsteczkami rozpuszczalnika); po drugie, zawierały wyprowadzenie równania różniczkowego opisującego ten proces, zwanego dziś równaniem dyfuzji<sup>4</sup>; po trzecie wreszcie, tłumaczyły, dlaczego poprzednie próby opisu ruchów Browna w języku prędkości zawiodły. Smoluchowski zauważył, że obserwowane pod mikroskopem przemieszczenia cząstek brownowskich są wynikiem bardzo wielu zderzeń z cząsteczkami rozpuszczalnika, że są *uśrednionym* efektem bardzo wielu takich zderzeń. Dziś wiemy, że zderzeń tych jest tak dużo, że średni czas pomiędzy dwoma kolejnymi zderzeniami jest o wiele krótszy od najmniejszych odcinków czasu, jakie obecnie (na początku XXI wieku!) potrafimy mierzyć, a skoro tak, to ani w czasach Browna, ani w czasach Einsteina i Smoluchowskie-

<sup>3</sup> Nic też dziwnego, że Einstein, który Macha wysoce cenił, zaraz przesłał mu odbitkę swojej pracy.

<sup>4</sup> Równanie to, wynikające z heurystycznych praw sformułowanych pierwotnie przez niemieckiego fizjologa A. Ficka, było już wówczas znane, ale nieznanym było jego wyprowadzenie na podstawie praw bardziej fundamentalnych.



go, ani nawet obecnie nie możemy dwu *kolejnych* zderzeń zaobserwować – każde dwa kolejno zaobserwowane zygzyki trajektorii cząstki brownowskiej będą rozdzielone mnóstwem innych zygzyków, które umknęły naszej uwadze. Skoro tak, to można założyć, iż jakieś zderzenie zachodzi w każdej chwili, a zatem że trajektoria cząstki brownowskiej ma załamanie, zygzyk, w każdym punkcie i że jest całkowicie przypadkowa. Prędkość cząstki jest nieokreślona w momencie, w którym wykonuje ona gwałtowny zakręt – można oczywiście podawać prędkość średnią, ta jednak ma niewielkie znaczenie z punktu widzenia fundamentalnego opisu ruchu.

Punkt ten wymaga szczególnej uwagi. Używana powszechnie w czasach Smoluchowskiego – i stosowana z powodzeniem do dzisiaj w opisie *bardzo* wielu zagadnień – mechanika newtonowska przewiduje, iż trajektoria każdej cząsteczki, każdego „punktu materialnego”, daje się opisać za pomocą pewnego równania różniczkowego, do sformułowania którego potrzeba i wystarcza wskazać siły działające na cząsteczkę w każdej chwili. Jest to, w gruncie rzeczy, esencja tzw. II zasady dynamiki Newtona. Siły te mogą być zmienne, mogą zależeć zarówno od czasu, jak i od aktualnego położenia cząsteczki; jeśli jednak zmiany te będą ciągle, otrzymana trajektoria będzie gładka – być może bardzo skomplikowana, ale gładka, przy czym „gładkość” oznacza tu dobrze zdefiniowane pojęcie matematyczne. Jest to absolutny kanon fizyki, przez wielu traktowany jako nienaruszalna świętość. Tymczasem według Smoluchowskiego trajektoria cząsteczki brownowskiej nie była gładka, miała mnóstwo zygzyków, ba, miała zygzyk w każdym punkcie, co w języku matematycznym oznacza, iż nie była nigdzie różniczkowalna. To była prawdziwa rewolucja, odejście od ustalonego i uznanego paradygmatu – rzecz w tym, iż to podejście dawało wyniki zgodne z eksperymentem, podczas gdy wszystkie inne nie. Wspomniane wcześniej równanie dyfuzji nie opisuje trajektorii pojedynczej cząsteczki, ale zbiorowe, uśrednione zachowanie całego mrowia cząsteczek, na przykład kropli atramentu wpuszczonej do naczynia z wodą lub cukru, którym słodzimy herbatę<sup>5</sup>. Z punktu widzenia obserwatora zewnętrznego to nie losy pojedynczej cząsteczki, ale zbiorowe losy całego zespołu rozpuszczanych cząsteczek są ważne. Choć trajektoria pojedynczej cząsteczki, składająca się z samych zygzyków, może być dziwaczna, to zbiorowe zachowanie bardzo wielu cząsteczek daje się opisywać w sposób całkiem „przyzwoity”, jeśli tylko zgodzimy się nie zwracać uwagi na *bardzo* drobne szczegóły. W tym właśnie tkwi istota podejścia probabilistycznego.

Tak więc przemieszczenia cząsteczek brownowskich opisujemy jako proces losowy. Prace Einsteina i Smoluchowskiego stały się jednym z kamieni węgielnych, na których oparty jest dziś tak ważny dział matematyki, jak rachunek praw-

---

<sup>5</sup> Jest to standardowy przykład i tylko dlatego go używam, osobiście uważam bowiem, iż herbata bez cukru jest o wiele lepsza.

dopodobieństwa i teoria procesów stochastycznych. Modelowanie stochastyczne stało się dziś bardzo ważnym narzędziem w wielu dziedzinach nauki i techniki, od fizyki, poprzez projektowanie konstrukcji, aż do biologii, ekologii i nauk społecznych. Bez prac Einsteina i Smoluchowskiego nawet i to nie byłoby możliwe.

Einstein i Smoluchowski sformułowali też prawo, znane dzisiaj jako twierdzenie fluktuacyjno-dysypacyjne, głoszące, iż opory ruchu (lepkość) na poziomie molekularnym wynikają z cieplnego ruchu cząsteczek. Nieco później Marian Smoluchowski wykazał, że parametry opisujące *każdy* dostatecznie duży (makroskopowy), ale skończony, układ fizyczny w równowadze termodynamicznej muszą się zmieniać w czasie w sposób, który dziś nazywamy „białym szumem gausowskim” – ruchy Browna są zatem konieczną cechą każdego fizycznego układu makroskopowego w stanie równowagi.

Skoro ruchy Browna, a raczej wywołujące je fluktuacje termodynamiczne, są powszechne, musimy nauczyć się z nimi żyć. Szumy termiczne na ogół przeszkadzają – to one są odpowiedzialne za zakłócenia na liniach telekomunikacyjnych, za błędy pomiarowe, za straty przy przesyłaniu energii itd. – są jednak sytuacje, w których bez szumów cały znany nam świat by się zawalił. Okazuje się bowiem, że szumy mogą niekiedy wywierać wpływ konstruktywny: mogą podtrzymywać sygnały, które pod nieobecność szumów wygasłyby, mogą wzmacniać, nie osłabiać, sygnały (jest to tzw. rezonans stochastyczny), wreszcie szumy są ważne dla zrozumienia przebiegu wielu bardzo ważnych reakcji biochemicznych, bez których życie organicznie w postaci, jaką dziś znamy, nie byłoby możliwe. Obecność szumów termicznych należy brać także pod uwagę przy projektowaniu nanorobotów i motorów molekularnych, które od lat są przedmiotem marzeń fantastów, a od pewnego czasu także przedmiotem prac poważnych naukowców. Nanoroboty miałyby na przykład być wstrzykiwane do krwi człowieka, podróżować po całym ciele i naprawiać napotkane mikrouszkodzenia. Trzeba jednak pamiętać, iż w środowisku, w którym nanoroboty miałyby pracować, przez cały czas odbywa się bezustanny, termiczny ruch cząsteczek. Jeśliby nanorobota powiększyć do rozmiarów ludzkich, siłę fluktuacji także należałoby wzmocnić; proste wyliczenia pokazują, że fluktuacje termiczne osiągnęłyby wówczas prędkość huraganu. Projektowanie nanorobotów i motorów molekularnych jest zatem zadaniem tak trudnym jak projektowanie urządzenia, które miałyby bezbłędnie działać w czasie huraganu Katrina<sup>6</sup>; ba, które energię Katriny umiałyby obrócić na swoją korzyść! A jednak natura sobie z tym radzi, zaprojektowała bowiem wiele naturalnych motorów molekularnych, na przykład kinezyne, czyli białka poruszające się po błonach wewnątrzkomórkowych. I tak oto po raz kolejny okazuje się, że nauka jest jedna, niepodzielna: zrozumienie działania wielu mechanizmów biochemicz-

---

<sup>6</sup> Tak nazwano huragan, który zatopił Nowy Orlean w sierpniu 2005.

nych byłoby niemożliwe, gdyby nie rozwój tego działu fizyki teoretycznej, który zapoczątkowany został pracami Einsteina i Smoluchowskiego sprzed stu lat.

Marian Smoluchowski uważany jest za najwybitniejszego polskiego fizyka, jego prace są po dziś dzień często cytowane, a pewne ważne równanie używane w fizyce nazywa się dziś równaniem Smoluchowskiego. Jego imię nosi Instytut Fizyki UJ, najwyższe zaś wyróżnienie przyznawane przez Polskie Towarzystwo Fizyczne nosi miano Medalu Smoluchowskiego. Jak pisaliśmy wyżej, Jean-Baptiste Perrin, który do wyznaczenia liczby Avogadra używał teorii opracowanej przez Einsteina i Smoluchowskiego, otrzymał Nagrodę Nobla w roku 1926. Albert Einstein otrzymał Nagrodę Nobla w roku 1921. Ba, nawet wielki oponent hipotezy atomistycznej, Wilhelm Ostwald, otrzymał Nagrodę Nobla. Szkoda, że w gronie noblistów brakuje Smoluchowskiego. Niestety, Marian Smoluchowski, profesor Uniwersytetów Lwowskiego i Jagiellońskiego, zmarł na dyzenterię w roku 1917 w wieku zaledwie 45 lat, gdy na świecie szalała Wielka Wojna i zanim znaczenie prac Smoluchowskiego w pełni dotarło do świadomości fizyków. Być może gdyby Smoluchowskiemu dane było żyć dłużej – ale cóż, dziś możemy tylko gdybać.

W Krakowie, w Instytucie Fizyki UJ, ale także na AGH i w Instytucie Fizyki Jądrowej, pracuje grupa fizyków zajmująca się tym właśnie działem fizyki i jego zastosowaniami nie tylko w innych działach fizyki, ale także w biologii molekularnej, ekologii, matematyce finansowej i naukach społecznych.



## Kwanty światła, efekt fotoelektryczny i realność fotonów

Janusz Skalski

Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana

Gościenny przedruk z *Delty* 6/2005

W marcu 1905 r. Albert Einstein wysłał do publikacji pracę<sup>1</sup>, którą jako jedyną w swym dorobku uznał za „bardzo rewolucyjną”. Zawierała taką oto ideę:

[...] energia promienia światła ze źródła punktowego nie rozkłada się w sposób ciągły w powiększającej się objętości, ale składa się ze skończonej liczby kwantów energii, które są zlokalizowane w punktach przestrzeni, poruszają się bez podziału i mogą być wytwarzane lub pochłaniane tylko jako całości.

Natchnieniem dla Einsteina był o pięć lat wcześniejszy pomysł Maxa Plancka. Aby wytłumaczyć obserwowany rozkład natężeń promieniowania elektromagnetycznego (EM) wysyłanego w poszczególnych zakresach częstotliwości przez ciała o stałej temperaturze, Planck musiał przyjąć niezwykle założenie: materia pochłania i wysyła promieniowanie o częstotliwości  $\nu$  tylko w porcjach – kwantach – o wielkości  $h\nu$ , gdzie  $h$ , o wymiarze [energia  $\times$  czas], jest stałą uniwersalną (stała Plancka). Jej doświadczalnie wyznaczona (w 1900 r.) wartość wynosiła:

$$h \approx 6,55 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

Jako pretekst do wysunięcia śmiałej hipotezy posłużył Einsteinowi wyprowadzony przez niego przybliżony wzór na entropię promieniowania krótkofalowego. Po stwierdzeniu jego podobieństwa do wzoru dla gazu doskonałego sformułował rewolucyjną sugestię:

Monochromatyczne promieniowanie małej gęstości<sup>2</sup> [...] zachowuje się pod względem termodynamicznym tak, jakby składało się z wzajemnie niezależnych kwantów energii o wielkości  $h\nu$ . [...] sugeruje to zbadanie, czy procesy wysyłania i transformacji światła nie przebiegają tak, jakby światło miało się składać z kwantów energii tego rodzaju.

Następnie, posługując się tymi wyobrażeniami, przewidział prostą zależność energii elektronów wybijanych z metalu od częstotliwości padającego światła dla zjawiska fotoelektrycznego.

<sup>1</sup> *Annalen der Physik* **17**, 132 (1905).

<sup>2</sup> Tzn. dla  $h\nu \gg 3 kT$  ( $T$  – temperatura,  $k$  – stała Boltzmannna); przy  $T = 300 \text{ K}$  oznacza to długości fal  $\lambda \ll 20 \mu\text{m}$ .

Zjawisko to odkrył H. Hertz (1887) w trakcie badań nad wyładowaniami iskrowymi między dwiema powierzchniami metalowymi. Zauważył, że pierwotna iskra z jednej powierzchni wytwarza wtórną iskrę na drugiej. W serii pomysłowych doświadczeń udowodnił, że wtórna iskra powodowana jest przez światło pierwszej. W. Hallwachs pokazał (1888), że oczyszczona, izolowana płytka cynkowa wystawiona na promieniowanie ultrafioletowe ładuje się dodatnio, a płytka naładowana ujemnie traci ładunek, nawet jeśli jest umieszczona w próżni. J.J. Thomson stwierdził, że fotoefekt polega na emisji elektronów: zmierzył stosunek (ładunek/masa) dla emitowanych cząstek (1897), a następnie oddzielnie wyznaczył ich ładunek (1899). J. Elster i H.F. Geitel stwierdzili w 1900 r., że prąd fotoelektryczny jest proporcjonalny do natężenia światła i powstaje natychmiast po oświetleniu metalu. Kluczowego i niespodziewanego odkrycia dokonał w 1902 roku P. Lenard, używając jako źródła światła łukowej lampy węglowej, której intensywność mógł zmieniać tysiąckrotnie. Okazało się, że energia wybitych elektronów w ogóle nie zależy od natężenia światła, rośnie natomiast wraz z jego częstotliwością. Charakter tego wzrostu nie był znany w 1905 roku, gdy Einstein opublikował swą hipotezę.

Einstein zaproponował następujące wytłumaczenie fotoefektu: jeden kwant światła, zupełnie niezależnie od pozostałych, przekazuje całą swoją energię elektronowi. Elektron wyrzucony z metalu traci pewną jej część, zanim dotrze do powierzchni.

Jeśli  $E_{max}$  oznacza energię wyrzuconego elektronu dla przypadku, gdy ta strata wynosi zero, to:

$$E_{max} = h\nu - P, \quad (*)$$

gdzie  $P = h\nu_0$  jest tzw. pracą wyjścia – charakterystyczną dla metalu minimalną energią, która pozwala elektronowi opuścić jego powierzchnię, a  $\nu_0$  – częstotliwością, poniżej której nie ma emisji elektronów. Zatem minimalna różnica potencjałów, powstrzymująca fotoprąd między oświetlonym metalem a innym uziemionym przewodnikiem, wynosi:

$$V = E_{max}/e = (h/e)(\nu - \nu_0).$$

Pomysł kwantów światła fizycy potraktowali jak naciąganą spekulację, którą był w istocie. Jego porównanie z hipotezą Plancka pokazuje, dlaczego. Planck skwantował energie promieniujących oscylatorów – krok śmiały, ale dopuszczalny wobec braku danych o strukturze materii i jej oddziaływaniu z promieniowaniem. Dzięki temu opisał dotychczas niezrozumiałe dane doświadczalne. Tymczasem Einstein kwantował samo promieniowanie, czym zaprzeczał teorii Maxwella, i to w chwili, gdy odniosła ona ogromne sukcesy, tłumacząc falową naturę światła. Co więcej, w 1905 r. żadne dane *nie wymagały* hipotezy kwantów światła. Ówczesne

poglądy dobrze oddaje fragment opinii o Einsteinie w związku z jego kandydaturą do Pruskiej Akademii Nauk w 1913 roku<sup>3</sup>:

To, że czasami chybiał w swych spekulacjach, jak np. w hipotezie kwantów światła, nie może być traktowane jako zbyt wielki zarzut, bo niemożliwym jest wprowadzanie nowych idei w nawet najściślejszych naukach bez podejmowania ryzyka.

Natomiast sam wzór (\*) szybko wzbudził zainteresowanie jako nowe, niespodziewane i proste przewidywanie dotyczące znanego zjawiska: maksymalna energia fotoelektronów powinna zależeć liniowo od częstotliwości światła, a nachylenie prostej  $E_{max}(\nu)$  powinno być, niezależnie od oświetlanego metalu, równe liczbowo znanej stałej Plancka.

Doświadczalny test tej prostej zależności nie okazał się wcale prosty. Potwierdzenie zależności liniowej wymagało dostatecznie szerokiego zakresu częstotliwości – praktycznie ograniczało to wybór do metali alkalicznych (są fotoczułe dla  $\lambda < c/\nu_0 \approx 0,6 \mu\text{m}$ ). Dokładne wyznaczenie potencjału  $V$  hamującego fotoelektrony polegało na ekstrapolacji zmierzonej zależności natężenia fotoprądu od napięcia do natężenia zerowego. Tymczasem fotoprąd potrafił zmieniać się stokrotnie pod wpływem zmian na powierzchni metalu. Inne możliwe błędy wiązały się z rozproszonym światłem o częstotliwości wyższej od używanych linii widmowych rtęci, kontaktową siłą elektromotoryczną między tarczą a metalem drugiej elektrody, wreszcie z fotoprądem z drugiej elektrody, powstającym od światła odbitego. Poświęciwszy kilka lat pracy, wszystkie te trudności pokonał R. Millikan. W 1916 r. opublikował swoje bardzo dokładne rezultaty, które potwierdziły wzór Einsteina. Błąd wyznaczonej fotoelektrycznej wartości  $h = 6,57 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  ocenił na 0,5%.

Mimo tego większość fizyków nadal wątpiła w realność kwantów światła. Trwało to do 1923 r., gdy A. Compton przeprowadził eksperyment, w którym rozprasał na graficie promienie  $X$  z molibdenowej antykathody. Zmierzone różnice końcowej i początkowej długości fali  $X$  zgadzały się ze wzorem, wynikającym z potraktowania ich jak cząstek o energii  $h\nu$  i pędzie  $h\nu/c$ :

$$\Delta\lambda = (h/mc)(1 - \cos \theta)$$

( $m$  – masa elektronu,  $\theta$  – kąt rozproszenia). W 1925 roku A. Compton i A.W. Simon obserwowali odrzut elektronów w komorze mgłowej i znaleźli bezpośrednie potwierdzenie zachowania pędu w zderzeniu  $X$ -elektron. Gdy w 1926 r. powstała nazwa „foton”<sup>4</sup>, wbrew swemu pierwotnemu, dość mętnemu znaczeniu, błyskawicznie przyjęła się jako określenie kwantu światła, którego istnienie wydawało się potwierdzone przez efekt Comptona.

<sup>3</sup> Autorzy: M. Planck, H.W. Nernst, H. Rubens i E. Warburg.

<sup>4</sup> G.N. Lewis, *Nature* **118**, 874 (1926).

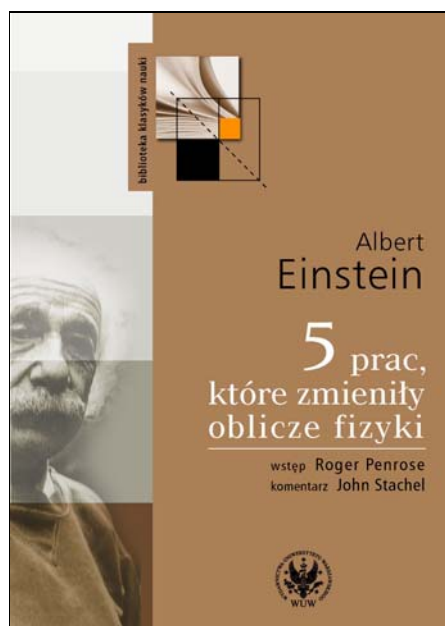
Tymczasem w latach 1925–1927 powstała mechanika kwantowa. Fizyka musiała pogodzić się z tym, że nie umie przewidzieć wyniku eksperymentu z elektronami i światłem – umie jedynie wyznaczać *prawdopodobieństwa wszystkich możliwych* wyników. Stan elektronu charakteryzuje amplituda prawdopodobieństwa, będąca funkcją położenia i czasu. Ma ona własności ograniczonego przestrzennie impulsu falowego, a więc ani położenie, ani pęd elektronu nie są określone dokładnie, lecz wykazują fluktuacje kwantowe<sup>5</sup>. Gdy elektron o początkowej energii  $E_p$  znajduje się w zmiennym polu elektrycznym o częstotliwości  $\nu$ , to po kilku okresach drgań pola pojawia się nowa składowa amplitudy elektronu. Jest ona proporcjonalna do amplitudy pola  $\vec{E}$  i odpowiada energii  $E_k = E_p + h\nu$ . Oznacza to, że niemal natychmiast po oświetleniu elektron może zwiększyć swą energię o  $h\nu$ , z prawdopodobieństwem na jednostkę czasu proporcjonalnym do  $|\vec{E}|^2$ , tzn. do natężenia światła. Równanie Einsteina (\*) wynika więc z kwantowej natury elektronów przy ich oddziaływaniu z klasycznym promieniowaniem. Także inne cechy fotoefektu, takie jak kierunek fotoprądu, otrzymano bez hipotezy Einsteina (G. Wentzel, 1927 r.). W tym samym roku E. Schrödinger opisał efekt Comptona, używając amplitud elektronu i klasycznych płaskich fal EM.

Fotony nabrały konkretnego sensu w 1927 roku, gdy P.A.M. Dirac przedstawił kwantową teorię promieniowania. Po około 20 latach usuwania z niej sprzeczności stała się ona, jako elektrodynamika kwantowa, podstawową teorią oddziaływań EM. Fotony rozpowszechniły się na stronach monografii naukowych i podręczników szkolnych. Czy pomagają zrozumieć fizykę promieniowania? Większość zjawisk elektrooptycznych, poza zjawiskiem fotoelektrycznym także emisja wymuszona (maser, laser), fluorescencja rezonansowa itd., daje się pojąć, gdy traktuje się materię kwantowo, a pole EM klasycznie. Obraz punktowego kwantu światła może nawet utrudniać zrozumienie klasycznych zjawisk interferencji i dyfrakcji, które najłatwiej tłumaczyć się przez klasyczne stany pola, opisywane równaniami Maxwella. Jednak według teorii kwantowej amplitudy pola elektrycznego  $\vec{E}$  i magnetycznego  $\vec{B}$  monochromatycznej fali EM nie są dokładnie określone, ale, podobnie jak położenie i pęd cząstki, wykazują fluktuacje kwantowe  $\Delta\vec{E}$  i  $\Delta\vec{B}$ . W „klasycznych” stanach pola EM, zawierających nieokreśloną liczbę fotonów, te fluktuacje są małe w porównaniu ze średnimi wartościami  $\vec{E}$  i  $\vec{B}$ . Kwantowa natura promieniowania uwydatnia się tam, gdzie fluktuacje pola EM dominują wobec zerowania się średnich  $\vec{E}$  i  $\vec{B}$ . Przykładem są stany fotonowe, w których światło jest spontanicznie emitowane przez wzbudzone atomy i jądra atomowe. Przy emisji spontanicznej obserwuje się odrzut atomu (jądra) równoważący pęd fotonu  $h\nu/c$ , sprzeczny z teorią Maxwella. Fluktuacje pola elektrycznego

<sup>5</sup> Fluktuacje te spełniają zasadę Heisenberga:  $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$ .

$\Delta \vec{E}$  występują nawet w stanie bez żadnych fotonów. Powodują rozszczepienie poziomów  $2s_{1/2}$  i  $2p_{1/2}$  atomu wodoru o  $\Delta\nu = 1057$  MHz (tzw. przesunięcie Lamba). Podobne źródło ma anomalny moment magnetyczny elektronu. Eksperymenty, w których mierzy się korelacje między detektorami światła przy bardzo słabych źródłach, dowodzą, wbrew teorii klasycznej, że fotonu wysłanego przez jeden atom nie da się zarejestrować w dwóch detektorach. Pozwalają też w końcu stwierdzić, że foton zapewnia zachowanie energii w zjawisku fotoelektrycznym: energia fotoelektronu zarejestrowanego po krótkim czasie oświetlenia  $t$  bywa większa od klasycznej energii padającego światła:  $E = \varepsilon_0 |\vec{E}|^2 Sct$  ( $S$  – powierzchnia detektora).

Fotony nie są tym samym co kwanty światła z 1905 r.: nie są punktowe, bo ich rozciągłość przestrzenna wynika z warunków brzegowych, np. rozmiarów wnęki rezonansowej lub czasu życia stanów atomowych (rzędu  $10^{-8}$  s); nie są niezależne, ponieważ np. w równowadze termodynamicznej podlegają statystyce Bosego; nie są podobne do gazu doskonałego, ich liczba nie jest bowiem ustalona itd. Pomimo tego spekulatywna hipoteza kwantów światła pozostaje świadectwem wyjątkowej intuicji fizycznej Einsteina, który trafnie odgadł, że poprawna teoria wymaga oddziaływania kwantowego światła z kwantowymi promieniującymi oscylatorami.







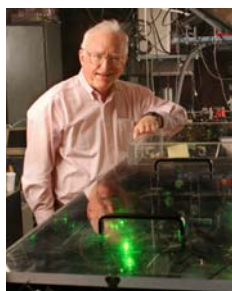
## Nobel 2005

*Jakub Zakrzewski*  
*Instytut Fizyki UJ*

Tegoroczną Nagrodę Nobla z fizyki dostali wybitni przedstawiciele szeroko rozumianej optyki kwantowej czy spektroskopii atomowej. Połowę nagrody otrzymał teoretyk **Roy Glauber** z Harvardu, który przed ponad 40 laty sformułował kwantową teorię koherencji. Druga połowa w równych częściach przypadła znakomitym wirtuozom technik laserowych **Johnowi Hallowi** z Boulder i **Theodorowi Hänschowi** z Monachium. Fundamentalne prace Glaubera z 1963 roku do teraz czyta się z dużą przyjemnością. W sposób bardzo elegancki i systematyczny wprowadził kwantową teorię spójności światła oraz teorię detekcji.



**Roy Glauber**



**John Hall**



**Theodor Hänsch**

### Spójność (koherencja) światła

Zgodność fazy dwóch (lub więcej) fal świetlnych i zgodność ich polaryzacji umożliwiająca interferencję. We wszystkich źródłach światła (oprócz laserów) promieniowanie świetlne powstaje w wyniku niezależnych aktów *emisji spontanicznej*; powstające w ten sposób światło może być spójne tylko w ograniczonym zakresie czasowo-przestrzennym. W laserze promieniowanie optyczne wytwarzane jest wskutek *wymuszonej emisji* promieniowania elektromagnetycznego zachodzącej w układach atomów, jonów, cząsteczek; powstaje w ten sposób promieniowanie spójne.

Glauber opisał w sposób kwantowy jak działa detektor absorbując fotony (w tegorocznej nagrodzie można znaleźć zatem nawiązanie do roku fizyki i 100-lecia analizy efektu fotoelektrycznego przez Einsteina). Przez korelację sygnałów z różnych detektorów można badać tzw. wyższe funkcje korelacji. Teoria Glaubera pozwala klarownie wyjaśnić różnicę między światłem termicznym (żarówka,

światło słoneczne) a światłem laserowym. Bezpośrednie jej zastosowanie pozwoliło zaplanować (i przeprowadzić) fundamentalne eksperymenty potwierdzające kwantową naturę światła (np. tzw. efekt antygrupowania fotonów). Glauber rozwinął też formalizm opisu kwantowych układów poprzez stany koherentne (zwane też stanami Glaubera), czyli takie stany, które są najbliższe fizyki klasycznej. Jako ciekawostkę można wspomnieć bliskie związki Glaubera z Polską. Co najmniej kilku polskich fizyków współpracowało z Glauberem, goszcząc u niego na Harvardzie. Jednym z najbardziej znanych jest Maciej Lewenstein, obecnie pracujący w Barcelonie. Inny to Wojciech H. Żurek z Los Alamos National Laboratory. Przez kilkanaście lat Glauber przyjeżdżał do Polski na konferencje Optyki Kwantowej, organizowane w Ustroniu przez optyków warszawskich.

Eksperymentatorzy, Hall i Hänsch, położyli wielkie zasługi dla rozwoju fizyki laserów i tzw. spektroskopii wysokiej zdolności rozdzielczej. Badania te pozwoliły na wyznaczenie stałych atomowych (częstości przejścia) z niesamowitą precyzją, z dokładnością do kilkunastu cyfr znaczących. Stabilność linii laserowych można istotnie poprawić przez sprzężenie światła z dodatkowym rezonatorem czy „aktywnymi” urządzeniami optycznymi, takimi jak akusto-optyczne modulatory. Hall był jednym z prekursorów, a metody spektroskopii do perfekcji doprowadził Hänsch w swoich pomiarach fundamentalnych stałych atomowych, głównie dla atomu wodoru. To jego grupa dzierży rekord w wyznaczeniu przesunięcia Lambda czy stałej Rydberga.

#### Stała Rydberga

$$R_{\infty} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} = 10\,973\,731,568\,549(83) \text{ m}^{-1}$$

wiąże energię elektronu w atomie wodoru lub jonie wodoropodobnym z jego główną liczbą kwantową  $n$  :

$$E_n = -\frac{R_{\infty}}{n^2}$$

Ta precyzja pomiarowa doprowadziła do powstania nowych standardów metra.

#### Wzorzec metra

**1792** – Francuskie Zgromadzenie Narodowe przyjęło: metr to jedna dziesięciomilionowa część odległości od bieguna północnego do równika.

**1889** – I Generalna Konferencja Miar postanowiła: metr to odległość między dwoma rysami wygrawerowanymi na przecie-wzorcze platynowo-irydowym, mierzona w temperaturze  $T = 0^{\circ}\text{C}$ , pod ciśnieniem  $p = 1013,25 \text{ hPa}$  (wzorzec ten przechowywany jest w Międzynarodowym Biurze Miar i Wag pod Paryżem).

**1960** – XI Generalna Konferencja Miar przyjęła definicję: metr to długość równa 1 650 763,73 długości fali emitowanej w próżni przy przejściu między poziomami w atomie kryptonu  $^{86}\text{Kr}$ .

**1983** – XVII Konferencja Ogólna ds. Miar i Wag określiła metr jako długość drogi, którą przebywa światło w próżni w czasie  $1/299\,792\,458$  sekundy.

Hall i Hänsch wreszcie stworzyli tzw. grzebień częstotliwościowy. Składając ze sobą odpowiednio sprzężone bardzo krótkie impulsy świetlne, otrzymuje się światło, które w domenie częstotliwości składa się z milionów sprzężonych modów, pokrywających duży zakres widma. Znając jedną z częstości i odstęp między nimi oraz licząc zęby grzebienia, otrzymujemy linijkę do pomiaru częstotliwości z precyzją do kilkunastu cyfr znaczących.



Roy Glauber (w środku w jasnej prochowej kurtce) na konferencji Quantum Optics V w Kościelisku (zdjęcie opublikowane w Acta Physica Polonica A 2002). Po prawej prof. W. Gawlik (IF UJ), poniżej od lewej doc. M. Gajda (IF PAN), prof. K. Rzażewski (CFT PAN), prof. J. Mostowski (IF PAN) i prof. I. Białynicki-Birula (CFT PAN). Za prof. W. Gawlikiem widoczny prof. M. Kuś (CFT PAN), a drugi od lewej w górnym rzędzie to prof. L. Sirko (IF PAN). Gdyby nie prof. J. Eberly (Rochester, NY, za laureatem) to można by mówić o osaczeniu R. Glaubera przez polskich fizyków



## Nobel 2005: precyzyjna spektroskopia laserowa i optyczne grzebienie częstotliwości

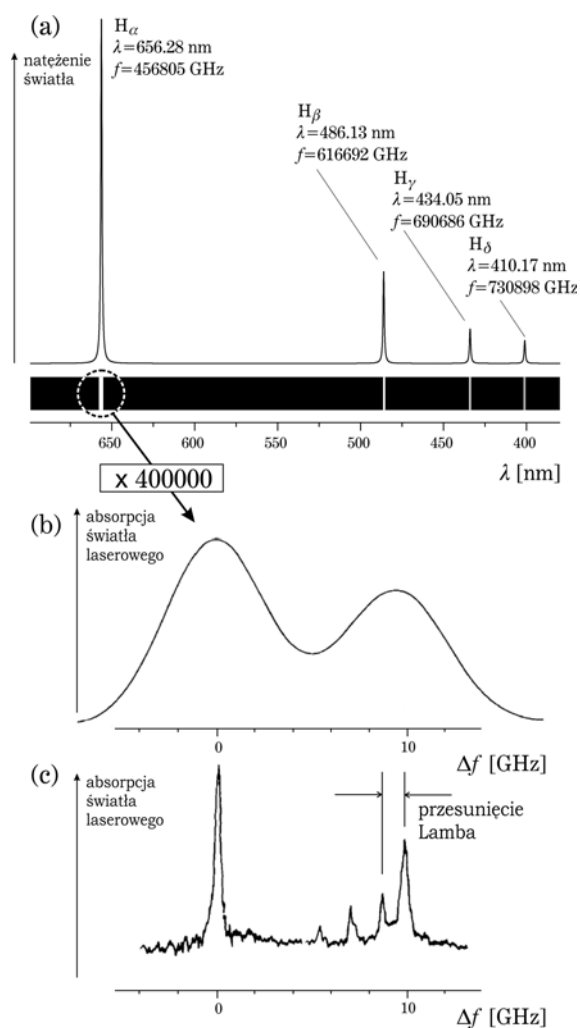
*Tomasz M. Brzozowski*

*Instytut Fizyki UJ*

Połowę tegorocznej Nagrody Nobla z fizyki otrzymali John L. Hall i Theodor W. Hänsch za „wkład w rozwój precyzyjnej spektroskopii laserowej, włączając w to technikę optycznego grzebienia częstotliwości”. To już drugi Nobel przyznany za spektroskopię laserową – w 1982 roku za rozwój tej dziedziny otrzymali go N. Bloembergen i A.L. Schawlow. Czym zajmuje się precyzyjna spektroskopia laserowa? Z czego wynika jej doniosłość dla nauki, aż dwukrotnie wyróżniona Nagrodą Nobla? Czym wreszcie jest ów tajemniczo brzmiący „optyczny grzebień częstotliwości”, wymieniony w komunikacie Komitetu Noblowskiego Szwedzkiej Akademii Nauk?

Ogólnie rzecz ujmując, spektroskopia jest nauką zajmująca się wszelkiego rodzaju promieniowaniem. Badania spektroskopowe dotyczą analizy i interpretacji widm promieniowania wysyłanego i absorbowanego przez materię tworzącą obiekty rozmaitego typu: od odległych galaktyk i gwiazd, aż do pojedynczych atomów, jonów i cząstek elementarnych. Wspomniana wyżej „interpretacja widm” oznacza dokładne poznanie mechanizmów odpowiedzialnych za powstawanie i pochłanianie promieniowania. Nietrudno się więc domyślić, że spektroskopia jest znakomitym narzędziem fizycznym umożliwiającym wgląd w procesy zachodzące w mikro- i w makroświecie, pozwalającym na formułowanie praw rządzących oddziaływaniem promieniowania z materią. To właśnie dzięki badaniom spektroskopowym dowiedzieliśmy się, jak zbudowany jest atom, to spektroskopia doprowadziła do powstania i rozwoju mechaniki kwantowej. Spektroskopii zawdzięczamy laser, ona też pozwoliła stwierdzić, że Wszechświat się rozszerza. Te przykłady to jedynie niewielka część niezwykle bogatej listy zasług badań spektroskopowych.

Każdy z nas zajmuje się spektroskopią na co dzień, i to bardzo intensywnie. Blisko 80% wrażeń docierających do nas to bodźce wzrokowe. Światło, a więc widzialna część promieniowania elektromagnetycznego, trafia do naszych oczu bezpośrednio ze źródeł lub po odbiciu od przedmiotów. Stwierdzając, że coś jest żółte albo czerwone, określamy w przybliżeniu długość fali światła, a więc dokonujemy tzw. analizy spektralnej docierającego do nas promieniowania. „Kolor” nie stanowi oczywiście wystarczająco precyzyjnej i jednoznacznej informacji spektroskopowej. Dokładna charakterystyka spektralna światła musi podawać jego długość fali  $\lambda$  lub częstotliwość  $f$  ( $\lambda = c/f$ , gdzie  $c$  – prędkość światła w próżni).



Rys. 1. (a) Widmo atomu wodoru w zakresie fal widzialnych. Widoczne są cztery linie widmowe. Podana jest ich długości fali  $\lambda$  w nanometrach i częstotliwość  $f$  w GHz ( $10^9$  Hz). (b) Standardowa spektroskopia laserowa linii  $H_\alpha$  – widać, że pojedyncza linia z rysunku (a) składa się z dwóch linii oddalonych od siebie o ok. 10 GHz (0,014 nm). (c) Spektroskopia laserowa w układzie przeciwbieżnych wiązek laserowych odkrywa bogatą strukturę linii  $H_\alpha$  i pozwala na znalezienie tzw. przesunięcia Lamba – efektu związanego z kwantowym charakterem pola elektromagnetycznego. Widma (b) i (c) pochodzą z pracy *Hänsch et al. Nature (London) Phys. Sci.* **235** 61 (1979)

Komunikat Komitetu Noblowskiego wspomina o „precyzyjnej spektroskopii laserowej”. Laserowej, czyli wykorzystującej światło generowane przez najdokładniejsze i najbardziej precyzyjne źródła promieniowania, jakimi dysponuje współczesna nauka. Czy zastosowanie laserów do badań spektroskopowych automatycznie gwarantuje precyzję? Czy sformułowanie „spektroskopia laserowa” nie oznacza w domyśle „precyzyjna”? Wreszcie, do czego tak naprawdę potrzebujemy tej wielkiej precyzji w spektroskopii?

Niech odpowiedzią na to pytanie będzie przykład. Wzbudzony do świecenia gaz atomów wodoru emituje światło. Chcemy sprawdzić, jakie długości fali w nim występują. Korzystamy zatem ze spektrometru – przyrządu do analizy spektralnej – i otrzymujemy widmo promieniowania przedstawione na rys. 1(a), składające się z serii dyskretnych linii. Spektrometr ma skalę, na której możemy odczytać długość fali odpowiadającej każdej z linii (oczywiście, skala ta musi zostać uprzednio dokładnie wycechowana, co, jak się za chwilę okaże, jest osobnym problemem). Analizując zmierzone długości fal, możemy wyciągnąć wiele ciekawych wniosków dotyczących budowy wewnętrznej emitującego światło atomu i jego struktury energetycznej. Takie badania prowadzono już w XIX wieku i właśnie na ich podstawie Bohr w 1913 roku zaproponował model atomu wodoru. Można oczywiście próbować zwiększać dokładność naszych pomiarów i coraz precyzyjniej określać długość emitowanych przez wodór fal. Okazuje się jednak, że nasza metoda badawcza – pobudzenie do świecenia gazu atomowego i obserwacja emitowanego światła – ma ograniczenia, które nie pozwalają przekroczyć pewnego progu dokładności. Skorzystajmy w takim razie z dobrodziejstw laserów i wykorzystajmy je do badań spektroskopowych wodoru. Doprowadźmy do oddziaływania atomów wodoru z wiązką przestrajalnego lasera. Zmieniając długość fali tego lasera, obserwujemy, w jakim stopniu jego wiązka jest przez gaz atomów wodoru pochłaniana. Skoncentrujmy się na pierwszej linii o długości fali  $\lambda = 656,28$  nm, nazywanej linią  $H_\alpha$ . Jeśli sporządzimy wykres pochłaniania wiązki w zależności od jej częstotliwości, to okaże się, że linia ta, obserwowana dotąd jako pojedyncza, składa się w rzeczywistości z dwóch leżących blisko siebie linii (rys. 1(b)). Poprawmy jeszcze bardziej precyzję naszego pomiaru. Zamiast jednej, zastosujmy układ dwóch przeciwbieżnych wiązek laserowych. Zniknie wtedy niepożądane zjawisko rozmywania linii widmowych przez termiczny ruch atomów – tzw. poszerzenie dopplerowskie. Wynik jest niezwykle interesujący (rys. 1(c)) – widzimy, że zaobserwowana uprzednio podwójna struktura linii  $H_\alpha$  składa się z większej liczby wąskich linii, rozmieszczonych w odstępach, które z bardzo dużą precyzją można zmierzyć. Na podstawie takich pomiarów można wysnuć ilościowe wnioski dotyczące bardzo subtelnych oddziaływań elektronów i jądra atomu wodoru. Co więcej, pomiar odległości dwóch ostatnich linii widocznych na rys. 1(c) daje nam wartość tzw. przesunięcia Lamba, wynikającego z kwantowej natury pola elektromagnetycznego. Wynik pomiaru tego przesunięcia idealnie zgadza się

z wartością liczbową otrzymaną po bardzo złożonych obliczeniach kwantowo-mechanicznych!

Powyższy przykład uświadamia nam co najmniej dwie rzeczy. Po pierwsze, zwiększanie precyzji w spektroskopii odsłania nowe, niezwykle ciekawe i frapujące aspekty badanego obiektu i jego oddziaływania z otoczeniem. Po drugie, aby zwiększyć dokładność pomiaru spektroskopowego, nie wystarczy użyć do niego lasera. Trzeba to jeszcze zrobić w odpowiedni, czasami nieoczywisty sposób – w omawianym przykładzie atomy wodoru zostały doprowadzone do oddziaływania nie z jedną, lecz z dwiema przeciwbieżnymi wiązkami laserowymi. Jest jeszcze jeden zasługujący na wzmiankę fakt: omawiany wyżej pomiar struktury linii  $H_\alpha$  wodoru jest autorstwa dwóch noblistów: Schawlowa (Nobel 1983) i Hänscha (Nobel 2005).

Tak jak wspomniałem, aby móc dokładnie mierzyć długość fali i jej częstotliwość, musimy z dużą precyzją wyskalować nasze przyrządy pomiarowe. Długość fali  $\lambda$  mierzymy w metrach, a częstotliwość  $f$ , podawana w hercach ( $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$ ), to liczba drgań fali w czasie 1 sekundy. Należy więc najpierw z wielką starannością zdefiniować, jaką długość będziemy uważali za wzorzec metra i jak długo będzie trwała 1 sekunda. Dokładna definicja tych jednostek jest dla pomiarów spektroskopowych szczególnie istotna: długość fali światła to ułamki mikrometra ( $10^{-6} \text{ m}$ ), a pojedyncze drganie fali świetlnej zachodzi w czasie rzędu femtosekundy ( $10^{-15} \text{ s}$ )! Historia definiowania tych dwóch jednostek układu SI jest niezwykle ciekawa. Obecne wzorce metra i sekundy zawdzięczają swoją dokładność i jednoznaczność właśnie badaniom spektroskopowym. Swój udział w ich ustalaniu miał tegoroczny noblista, J. L. Hall. W 1978 roku Hall ze współpracownikami wyznaczył metodami spektroskopii laserowej prędkość światła  $c$ . Wynik pomiarów był obarczony tak małym błędem, że w 1983 roku przyjęto go jako dokładną wartość stałej fizycznej  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ . Na podstawie stałej  $c$  określono długość jednego metra jako odcinek przebywany w próżni przez światło w czasie  $1/299\,792\,458 \text{ s}$ . W praktyce oznacza to, że metr jest wyznaczany przez sekundę. Innymi słowy, im dokładniej zmierzmy czas, tym dokładniej będziemy znali odległość! Dlaczego wzorzec metra oparto na sekundzie, a nie odwrotnie? Okazuje się, że o wiele dokładniej i w sposób daleko bardziej jednoznaczny potrafimy mierzyć czas niż odległość.

Jak długo trwa jedna sekunda? W 1967 roku przyjęto, że sekunda to czas równoważny trwaniu  $9\,192\,631\,770$  drgań promieniowania związanego z przejściem pomiędzy poziomami energetycznymi struktury nadsubtelnej atomu cezu  $^{133}\text{Cs}$ . Wystarczy w takim razie obserwować widmo cezu i na zadanym przez definicję sekundy przejściu atomowym zliczać drgania fali w czasie. Każde zliczenie  $9\,192\,631\,770$  drgań oznacza upływ jednej sekundy. Można powiedzieć, że wzorzec sekundy wyznaczany jest przez częstotliwość wzorcową, równą  $9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$ . Jeśli chcemy zmierzyć naprawdę dokładnie częstotliwość ja-

kiegokolwiek promieniowania, jesteśmy zobowiązani do porównania jej z częstotliwością odpowiedniego przejścia w atomie cezu.

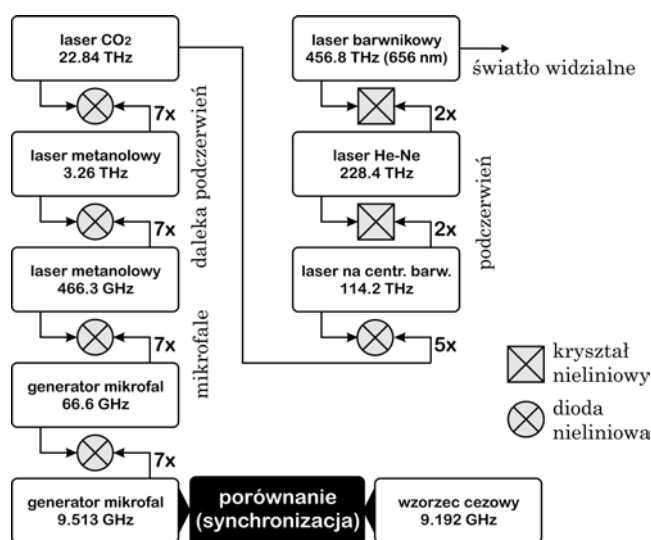
Porównanie takie nie nastęrcza trudności, gdy mierzona przez nas częstotliwość jest zbliżona do wzorcowej (9,192 GHz). Dotyczy to na przykład odległości pomiędzy liniami w widmie  $H_\alpha$  wodoru: na przedstawionym na rys. 1(c) wykresie dwie skrajne linie atomowe są od siebie odległe o około 10 GHz. Tę względną odległość linii atomowych na skali częstości możemy bardzo dokładnie wyznaczyć. Problemy zaczynają się wtedy, gdy oprócz takiego wzajemnego położenia linii chcemy podać ich dokładne, bezwzględne częstotliwości.

Skąd biorą się te problemy? Częstotliwości światła widzialnego zawierają się w przedziale od 400 000 GHz do 750 000 GHz. Są więc około 40 000–80 000 razy większe od częstotliwości wzorcowej. Bezpośrednie porównanie nie jest zatem możliwe. A może dałoby się zliczać drgania fal świetlnych tak, jak zliczamy wzorcowe drgania cezu? Odpowiedź na to pytanie brzmi: niestety, nie. Najszybsze detektory i liczniki, jakie jest nam w stanie zaoferować współczesna elektronika, mogą pracować przy maksymalnych częstotliwościach rzędu 100 GHz. Jest to aż 400 razy mniej, niż potrzebujemy do pomiaru pojedynczych drgań fali świetlnej.

Skoro odpada możliwość bezpośredniego zliczania drgań świetlnych, nie pozostaje nam nic innego jak w jakiś sposób pomnożyć częstotliwość wzorcową tak, aby wynik tego mnożenia znalazł się blisko częstotliwości mierzonej linii atomowej. Pamiętajmy, że chodzi tu o mnożnik nie 2 lub 3, ale rzędu dziesiątek tysięcy! Jak się to robi w praktyce, wyjaśni przykład. Załóżmy, że stoi przed nami ambitne zadanie: chcemy wyznaczyć dokładną częstotliwość jednej z linii w widmie  $H_\alpha$  z rys. 1(c), którą na podstawie pomiarów długości fali światła oszacowaliśmy na 456 805 GHz (456 805 ??? ??? Hz – znaki zapytania oznaczają cyfry, których nasze mało precyzyjne pomiary nie pozwalają otrzymać). Zabierzmy się do pracy w sposób następujący. Z częstotliwością wzorca cezowego zsynchronizujemy generator 9,513 GHz. Synchronizacja ta sprawi, że generator będzie równie dokładny jak sam wzorzec. W dodatku jest ona stosunkowo prosta w realizacji, bo częstotliwości generatora i wzorca są sobie bliskie. Gdy częstotliwość naszego generatora pomnożymy 48 020 razy, dostaniemy 456 816 GHz, a więc znajdziemy się bardzo blisko badanej linii, w domenie częstotliwości fal świetlnych. Niestety, nie ma prostego urządzenia mnożącego częstość aż tyle razy. Dysponujemy za to elementami nieliniowymi, kryształami i diodami, które mnożą częstotliwość od 2 do kilku–kilkunastu razy. Korzystając z nich, możemy zwielokrotnić częstotliwość naszego generatora 9,513 GHz w następujący sposób:  $7 \cdot 7 \cdot 7 \cdot 7 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 2 = 48\,020$ . Po każdym mnożeniu musimy użyć kolejnego generatora lub lasera w celu wzmocnienia sygnału i przekazania go dalej, aż do ostatniego lasera, pracującego już na żądanej częstotliwości (rys. 2). Zespół zsynchronizowanych ze sobą oscylatorów (bo tak fachowo określa się generatory i lasery) nazywa

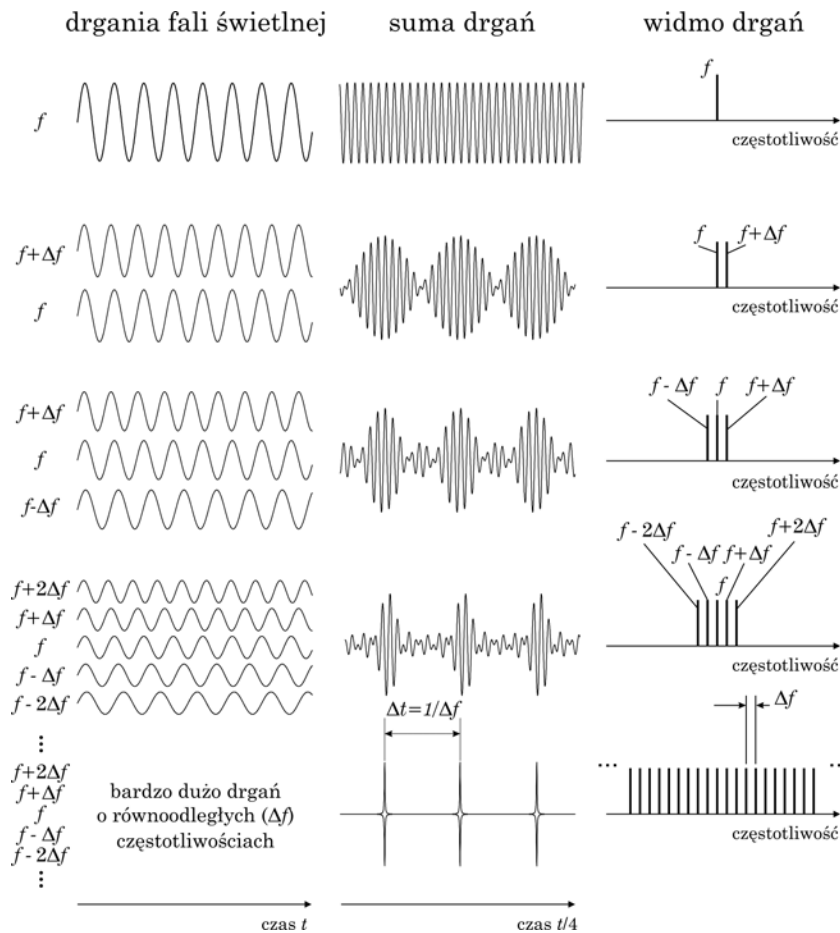


się łańcuchem częstotliwości. Stanowi on pomost albo lepiej: przekładnię pomiędzy gigahercowym drganiem wzorca cezu a kilkusetterahercowymi drganiami fal świetlnych. Zmiana częstotliwości pierwszego ogniwa łańcucha, generatora 9,513 GHz o 1 Hz pociąga za sobą zmianę częstotliwości ostatniego ogniwa łańcucha – lasera pracującego na częstotliwości optycznej – o precyzyjną wartość 48 020 Hz. Cały łańcuch jest zsynchronizowany z wzorcem cezowym, co zapewnia niezwykle dokładne wyznaczenie częstotliwości.



Rys. 2. Łańcuch częstotliwości – zespół zsynchronizowanych ze sobą oscylatorów: generatorów mikrofal i laserów. W wyniku sukcesywnego mnożenia częstotliwości podstawowej, zsynchronizowanej z częstotliwością wzorca cezowego, otrzymuje się wypadkowy mnożnik wynoszący 48 020. Pozwala on otrzymanie dokładnie określonej częstotliwości z zakresu fal widzialnych, generowanej przez ostatnie „ogniwo” – w tym przypadku przez laser barwnikowy. Zwróćmy uwagę na ilość użytych urządzeń: dwa generatory i sześć laserów

Niestety, tak jak pokazuje rys. 2, nawet najprostsze łańcuchy są niesamowicie skomplikowane i trudne w obsłudze. Zawierają od kilku do kilkunastu laserów różnego typu, które muszą być precyzyjnie kontrolowane i stabilizowane. Dodatkowo pomiar częstotliwości dowolnej linii atomowej wymaga innego zestawu mnożników, generatorów i laserów. Łańcuchy nie są zatem uniwersalne: pojedynczy pomiar częstotliwości optycznej danego przejścia atomowego wymaga osobnego łańcucha, którego zbudowanie i uruchomienie to średnio pięć lat pracy zespołu pięciu osób. Na szczęście pojawiło się lepsze rozwiązanie: optyczny grzebień częstotliwości – bohater tegorocznej Nagrody Nobla.



Rys. 3. Wyjaśnienie widma optycznego grzebienia częstotliwości

Aby zrozumieć działanie i własności optycznego grzebienia częstotliwości, spójrzmy najpierw na rys. 3. Rozważmy światło idealnego lasera o pracy ciągłej. Światło to ma częstotliwość  $f$ . Obserwowane w czasie drżania fali świetlnej (wiemy, że nie potrafimy tego zrobić!) wyglądałyby jak nieskończenie długi, sinusoidalny przebieg o stałej amplitudzie. Analiza spektralna tego światła wyraźnie pokazuje, że mamy do czynienia z jedną częstotliwością  $f$  – w widmie widać tylko jedną, wąską linię. Załóżmy teraz, że nasz idealny laser zaczął dodatkowo emitować drugą falę świetlną o częstotliwości większej od poprzedniej  $\Delta f$ . Łatwo zgod-

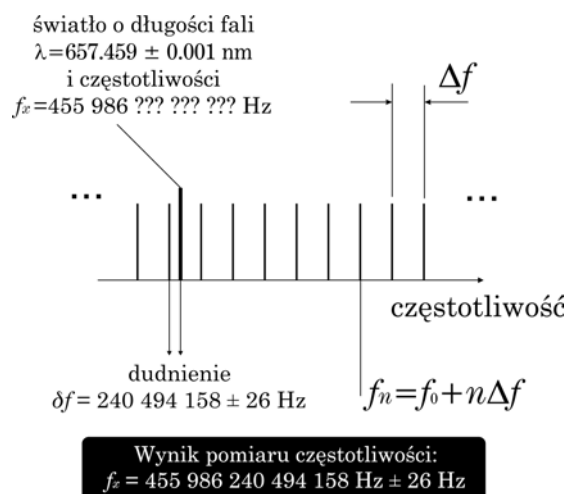
nać, jak będzie wyglądało widmo takiego lasera. Jak pokazuje rys. 3, będą w nim widoczne dwie wąskie linie, jedna o częstotliwości  $f$ , druga o częstotliwości  $f + \Delta f$ . A jak wygląda promieniowanie naszego lasera w czasie? Jak wiemy, złożenie dwóch drgań o zbliżonych częstotliwościach prowadzi do powstania dudnień. Nie inaczej jest i w naszym przypadku. Laser, pomimo że emituje dwie ciągłe fale, sam nie jest już urządzeniem o pracy ciągłej. Światło wychodzi z niego w postaci szerokich, połączonych ze sobą impulsów! Rys. 3 pokazuje, co dzieje się z przebiegiem czasowym światła laserowego, gdy laser zaczyna emitować coraz to więcej spójnych fal różniących się od siebie o częstotliwość  $\Delta f$  (kolumna „suma drgań”). Okazuje się, że im więcej takich fal, tym impulsy lasera stają się coraz węższe, a „przerwy” pomiędzy nimi coraz bardziej płaskie. W widmie lasera o coraz węższych impulsach pojawia się też coraz więcej linii odpowiadających kolejnym częstotliwościom. W granicznym przypadku, gdy laser generuje bardzo dużo spójnych, skorelowanych fal, impulsy laserowe stają się bardzo, ale to bardzo wąskie, a widmo takiego lasera to ogromna ilość linii rozmieszczonych w jednakowych odstępach wynoszących  $\Delta f$ . Można łatwo pokazać, że odwrotność tego odstepu,  $1/\Delta f$ , to tzw. okres repetycji lasera impulsowego, czyli czas pomiędzy emisją dwóch kolejnych impulsów. Widmo lasera impulsowego – zbiór wielu równoodległych linii spektralnych – kojarzy się nieodparcie z zębami grzebienia. Stąd właśnie pochodzi nazwa „optyczny grzebień częstotliwości”. Czasami nazwą tą określa się też femtosekundowy laser impulsowy, który generuje widmo grzebienia. Czas trwania jednego impulsu takiego lasera to kilkadziesiąt femtosekund, a czas upływający pomiędzy emisją kolejnych impulsów to pojedyncze nanosekundy.

Do czego taki grzebień może się nam przydać? Musimy sobie raz jeszcze uświadomić, czym jest widmo grzebienia. Jest to nic innego jak niesamowita ilość spójnych, wzajemnie zsynchronizowanych laserów o pracy ciągłej (w praktyce ich liczba, czyli liczba zębów w grzebieniu, jest rzędu miliona!). Widmo światła generowanego przez zespół takich laserów można traktować jak podziałki na linijce do pomiaru częstotliwości. Oczywiście, żeby taka linijka była dokładna, musi być stabilna – odległość pomiędzy wspomnianymi podziałkami nie może się zmieniać, a cała skala nie może się przesuwać. Jak w takim razie zapewnić stabilność takiej linijki? Okazuje się, że pomysł stabilizacji jest genialnie prosty. Spójrzmy na rys. 4, pokazujący fragment grzebienia. Powiedzieliśmy wcześniej, że odstęp  $\Delta f$  pomiędzy „zębami” grzebienia to nic innego jak częstotliwość, z jaką impulsy opuszczają laser. Częstotliwość ta jest rzędu gigaherców, a więc może być bezproblemowo mierzona przez detektory i, co najważniejsze, praktycznie bezpośrednio zsynchronizowana z cezowym wzorcem częstotliwości! Tak więc mamy sposób na zapewnienie stabilności odstepu zębów grzebienia z najwyższą osiągalną współcześnie dokładnością. To jednak nie wszystko. Częstotliwość  $n$ -tego zęba w grzebieniu dana jest wzorem  $f_n = f_0 + n\Delta f$ , gdzie  $n$  jest dużą liczbą całkowitą,

a  $f_0$  częstotliwością wynikającą z pewnych własności laserów impulsowych, których nie będę tutaj omawiał. Jeśli wystabilizujemy  $\Delta f$ , a nie zadbamy o stabilność  $f_0$ , to cały grzebień, pomimo idealnie równoodległych zębów, będzie się przesuwiał na skali częstotliwości. Jest to sytuacja niedopuszczalna. Na szczęście Hänsch zaproponował bardzo sprytną metodę „dobrania” się do tej częstotliwości. Wystarczy podwoić częstotliwość  $f_n$   $n$ -tego „zęba” i doprowadzić do jej zdudnienia z „zębem”  $2n$ -tym ( $f_{2n}$ ). Otrzymany w ten sposób sygnał dudnień będzie miał częstotliwość  $2f_n - f_{2n} = 2(f_0 + n\Delta f) - (f_0 + 2n\Delta f) = f_0$ ! I znów – ponieważ częstotliwość  $f_0$  jest rzędu gigaherców, stosunkowo prosto można ją zsynchronizować z wzorcem cezowym. Tak stabilizowany grzebień jest już naprawdę niesamowicie dokładny – częstotliwości wszystkich jego „zębów” są wyznaczone przez bardzo precyzyjnie kontrolowane wartości  $f_0$  i  $\Delta f$ , odtwarzane z dokładnością częstotliwości wzorcowej. Wspomniana wyżej liczba  $n$ , o wartości liczbowej kilkudziesięciu tysięcy, to nic innego jak pożądaný przez nas mnożnik, łączący obszar wzorcowej częstotliwości cezu z obszarem częstotliwości optycznych. Trudno nie zauważyć przewagi grzebienia nad łańcuchem. Po pierwsze, grzebień jest uniwersalny, bo umożliwia syntezę dowolnej częstości optycznej przez zmianę łatwo kontrolowanych częstotliwości radiowych  $f_0$  i  $\Delta f$ . Po drugie, jest on też o wiele prostszy w realizacji – wymaga zaledwie jednego lasera impulsowego!

Jak za pomocą grzebienia można mierzyć częstotliwość światła? Spójrzmy raz jeszcze na rys. 4. Załóżmy, że zależy nam na dokładnym wyznaczeniu częstotliwości  $f_x$  lasera o długości fali  $\lambda_x = 657,459$  nm, stabilizowanego do pewnego przejścia w atomie wapnia. Korzystając z komercyjnych urządzeń spektroskopowych do pomiaru długości fali i z równania  $f = c/\lambda$ , jesteśmy w stanie określić częstotliwość lasera z dokładnością do pojedynczych gigaherców. Oznacza to, że znamy jedynie 6 początkowych z wszystkich 15 cyfr, jakie należy podać, by określić częstotliwość z dokładnością do pojedynczych herców. Wyznaczenie 9 kolejnych cyfr umożliwi nam grzebień. Wystarczy, że światło naszego lasera skierujemy razem ze światłem grzebienia (czyli z wiązką „grzebieniowego” lasera impulsowego) na ten sam detektor. Powstanie wtedy sygnał dudnień pomiędzy światłem lasera 657,459 nm a najbliższym mu „zębem” grzebienia. Zliczając te dudnienia (potrafimy to zrobić – ich częstotliwość to zaledwie setki megaherców!), otrzymamy 9-cyfrową „końcówkę”  $f_x$ . Ostateczny wynik pomiaru częstotliwości za pomocą grzebienia,  $f_x = 455\,986\,240\,494\,158 \pm 26$  Hz, ma niesamowitą dokładność  $6 \cdot 10^{-14}$ !

Rozwój precyzyjnej spektroskopii laserowej i techniki grzebienia sprawił, że pomiary częstotliwości są obecnie najdokładniejszymi pomiarami w fizyce. Dzięki tej dokładności możemy nie tylko ultraprecyzyjnie wyznaczać stałe fizyczne, ale badać, czy nie zmieniają się one w czasie. Takie zmiany, obserwowalne dopiero przy precyzji oferowanej przez grzebień, mogłyby świadczyć na niekorzyść pewnych teorii (złamanie zasady równoważności w ogólnej teorii względności).



Rys. 4: Zasada pomiaru częstotliwości z wykorzystaniem grzebienia

Grzebień optyczny, traktowany jako przekładnia pomiędzy domeną częstotliwości optycznych a domeną gigahercowych częstotliwości radiowych, które z łatwością potrafimy mierzyć, stanowi znakomity „mechanizm” zegara atomowego opartego na optycznych wzorcach częstotliwości. Wzorce te są znacząco stabilniejsze od wzorca cezowego i gwarantują lepszą, dokładniejszą definicję sekundy. Oparte na nich zegary pozwolą m.in. na poprawę dokładności systemu GPS, gdzie błąd pomiaru czasu rzędu nanosekundy powoduje niedokładność wyznaczenia położenia ok. 30 centymetrów. Światło grzebienia optycznego może zostać także wykorzystane bezpośrednio do spektroskopii laserowej, w szczególności do spektroskopii dwufotonowej.

Najbardziej fascynujące jest jednak to, że grzebień po raz pierwszy umożliwiły zliczenie drgań fali świetlnej z dokładnością co do jednego. Przypomnijmy, że takie drganie trwa około 1 femtosekundy. W tak krótkim czasie światło zdąży przebyć zaledwie ułamek mikrometra!

## Literatura:

- [1] The Nobel Prize in Physics 2005 – Supplementary Information  
<http://nobelprize.org/physics/laureates/2005/info.pdf>
- [2] Th. Udem et al., Nature **416** 233 (2002)
- [3] R. Holzwarth et al., IEEE Journal of Quantum Electronics **37** 1492 (2001)
- [4] T. M. Brzozowski, Optyczny grzebień częstotliwości – Nobel 2005  
 Konwers. PTF, <http://www.ceti.pl/tmb/php/run.php?type=seminars&l=pl>



## Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki za badanie zjawiska fotoelektrycznego

*Maria Średniawa  
II LO, Kraków*

Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki za badania zjawiska fotoelektrycznego  
dla Philippa Lenarda w 1905 roku, dla Alberta Einsteina w 1921 roku  
i dla Roberta Millikana w 1923 roku

### Badanie doświadczalne promieni katodowych i zjawiska fotoelektrycznego (1902)

Philipp Eduard Anton von Lenard [1] urodził się w Bratysławie w rodzinie pochodzącej z Tyrolu, studiował fizykę w Budapeszcie, Wiedniu, Berlinie i Heidelbergu. Stopień doktora uzyskał w 1886 roku w Heidelbergu. W latach 1892–1894 pracował jako docent i asystent Heinricha Hertza na Uniwersytecie w Bonn, a później jako profesor kolejno na Uniwersytetach w Heidelbergu i Kilonii.

Lenard początkowo pracował nad zjawiskami fosforescencji i luminescencji, po czym zajął się badaniem promieni katodowych. Promienie te odkrył w 1858 roku Julius Plücker, obserwując luminescencję na ścianie rury wyładowczej znajdującej się naprzeciw katody. O naturze promieni katodowych wypowiediano po ich odkryciu dwa różne poglądy. Fizycy niemieccy, wśród nich Hertz, uważali promienie katodowe za fale w eterze, tego rodzaju co promienie nadfioletowe, natomiast fizycy angielscy uważali je za promienie korpuskularne.

W celu zbadania natury promieni katodowych Lenard zbudował w 1893 roku rurę wyładowczą, mającą naprzeciw katody ściankę aluminiową, na tyle grubą, aby wewnątrz rury utrzymywała próżnię lub gaz pod obniżonym ciśnieniem, a na tyle cienką, by przepuszczała promienie katodowe na zewnątrz rury. Obserwując luminescencję wywołaną promieniami katodowymi, Lenard stwierdził, że na zewnątrz rury promienie, które wydostały się z niej, nie zmieniają kierunku, że są odchylane przez pole zarówno elektryczne, jak i magnetyczne, że jonizują powietrze i że mają zasięg kilku metrów w próżni, a około decymetra w powietrzu atmosferycznym. Świadczyło to o korpuskularnej naturze tych promieni. Dalsze badania Jean Perrina w 1895 roku, Johna Josepha Thomsona (który odkrył elek-



Philipp E.A. Lenard  
(1862–1948)

tron w 1896 roku) i Wilhelma Wiena w 1897 roku udowodniły, że promienie katodowe są wiązką elektronów.

Lenard prowadził badania promieni katodowych do 1898 roku, po czym zajął się badaniem zjawiska fotoelektrycznego. Zjawisko to zostało zaobserwowane w 1887 roku przez Heinricha Hertza, który zauważył, że naświetlanie cewki indukcyjnej promieniowaniem nadfioletowym ułatwia zajęcie wyładowań między kulkami iskiernika. Właściwym odkrywcą zjawiska fotoelektrycznego był Wilhelm Hallwachs. Stwierdził on w 1887 roku, że płytka cynkowa, użyta jako katoda lampy wyładowczej, naświetlana promieniowaniem nadfioletowym, wysyła ładunki ujemne, które można zbierać na anodzie. Julius Elster i Hans Geitel zaobserwowali w następnym roku, że ładunki te poruszają się po torach prostoliniowych i że są odchylane przez pole magnetyczne.

Lenard rozpoczął badanie zjawiska fotoelektrycznego w 1898 roku. Wyniki ogłosił w 1902 roku w pracy *Über lichtelektrische Wirkung* (O działaniu fotoelektrycznym) [2]. Stwierdził, że stosunek ładunku do masy dla cząstek pojawiających się w zjawisku fotoelektrycznym jest taki sam jak dla elektronów, oraz sformułował prawa zjawiska fotoelektrycznego, z których dwa były niezgodne z XIX-wieczną falową teorią światła. Stwierdził mianowicie, że istnieje częstość progowa fali świetlnej, poniżej której zjawisko fotoelektryczne nie występuje, oraz że maksymalna energia fotoelektronów nie zależy od natężenia fali świetlnej padającej na katodę.

Wyniki otrzymane przez Lenarda znalazły szybko uznanie. **W 1905 roku Philipp Lenard otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki za badanie promieni katodowych** [3].

### Kwanty światła

Oprócz zjawiska fotoelektrycznego znano też inne zjawiska, których prawa były sprzeczne z XIX-wieczną teorią promieniowania, zakładającą, że pochłanianie i wysyłanie światła odbywa się w sposób ciągły. Należał do nich rozkład spektralny promieniowania ciała doskonale czarnego.



Max Planck  
(1853–1947)

Aby ten rozkład wyjaśnić, Planck założył w 1900 roku, że pochłanianie i wysyłanie światła odbywa się skokami, pochłaniane i wysyłane są „kwanty” światła. Każdy z kwantów światła ma energię  $E = h\nu$ , gdzie  $h$  nazywamy obecnie „stałą Plancka”, a  $\nu$  jest częstotliwością pochłanianego lub wysyłanego promieniowania. Stosując tę „hipotezę kwantów światła”, Planck otrzymał zgodny z doświadczeniem wzór na rozkład spektralny widma ciała doskonale czarnego. Nagroda

Nobla z dziedziny fizyki w 1918 została przyznana Planckowi za wprowadzenie do fizyki koncepcji kwantów działania [4].

### Wytlumaczenie zjawiska fotoelektrycznego (1905)

W 1905 roku **Albert Einstein (1879–1955)** w pracy pt. *Über einen der Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden Gesichtspunkt* (O stanowisku odnoszącym się do wytwarzania i przemiany światła) [5] rozszerzył hipotezę Plancka, zakładając, że światło nie tylko jest pochłaniane i wysyłane kwantowo, lecz rozchodzi się jako zbiór kwantów. W zjawisku fotoelektrycznym energia  $h\nu$  kwantu promieniowania („fotonu”) padającego na powierzchnię metalu przekształca się w pracę  $P$  wyjścia elektronu z przypowierzchniowej warstwy metalicznej i w energię kinetyczną  $E_{kin}$  elektronu wytrąconego z metalu:

$$h\nu = P + E_{kin} \quad (\text{wzór Einsteina})$$

Dokładnego pomiaru stałej Plancka i sprawdzenia wzoru Einsteina dokonał w 1916 roku **Robert A. Millikan** [6], który otrzymał w 1923 roku Nagrodę Nobla z fizyki za badanie elementarnego ładunku elektrycznego i zjawiska fotoelektrycznego.



Robert A. Millikan  
(1868–1953)



Albert Einstein  
(1879–1955)

Einstein otrzymał Nagrodę Nobla z fizyki w 1921 roku za całokształt pracy w dziedzinie fizyki teoretycznej, a w szczególności za wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego [7]. W uzasadnieniu tym nie została wyraźnie wymieniona ani szczególna teoria względności, ani ogólna teoria względności, którą Einstein uważał za największe osiągnięcie swojego życia. Przyczyną tego stanowiska ówczesnych członków Komisji Nagrody Nobla była ich wyraźna skłonność do wyróżniania osiągnięć i nagradzania prac doświadczalnych. Te warunki spełniała praca Lenarda o zjawisku fotoelektrycznym. Natomiast znane w owym czasie i obliczone teoretycznie odstępstwa, wynikające zarówno ze szczególnej jak i z ogólnej



teorii względności, były bardzo małe i trudne wówczas do sprawdzenia doświadczalnego (zjawiska, w których efekty relatywistyczne były znaczące lub dominujące, poznano o wiele lat później).

Einstein nie uczestniczył w 1921 roku w uroczystościach nadania Nagród Nobla, gdyż przebywał wówczas daleko od Szwecji. Zamiast wykładu noblowskiego nadesłał w 1923 roku do Szwedzkiej Akademii Nauk artykuł pt. *Fundamental Ideas and Problems of the Theory of Relativity*, umieszczony w zbiorze *Nobel Lectures, Physics 1901–1921* [8]. W artykule tym Einstein nie wspomniał w ogóle o zjawisku fotoelektrycznym, za wy tłumaczenie którego przyznano mu Nagrodę Nobla.

Osobiste relacje Lenarda i Einsteina były początkowo poprawne, traktowali się wzajemnie z szacunkiem. Późniejszy konflikt [9] (mający tło polityczne w latach gdy w Niemczech dochodzili do władzy narodowi socjaliści) dotyczył ich przeciwstawnych poglądów na istnienie eteru. Lenard, zapalony faszysta, propagator „fizyki aryjskiej”, zwalczał „fizykę żydowską”, w tym teorię względności.

#### Literatura

- [1] *Nobel Lectures, Physics 1901–1921*, Elsevier, Amsterdam 1967, zob. s. 99–138.
- [2] P. Lenard, *Annalen der Physik*, **17**, 149 (1902).
- [3] Zob. [1], s. 99–138.
- [4] Zob. [1], s. 481–492.
- [5] A. Einstein, *Ann. d. Phys.* **17**, 132 (1905).
- [6] R. Millikan, *Phys. Rev.* **7**, 356 (1916), zob. [1].
- [7] Zob. [1], s. 477–492.
- [8] Zob. [1], s. 482–490.
- [9] L. Kostro, *Alberta Einsteina koncepcja nowego eteru*, Sciencia, Gdańsk 1999, s. 222.



## Einstein w moim mieście

Karl Mamola

Redaktor naczelny *The Physics Teacher*

Uniwersytet Stanowy Appalachów, Boone, NC

W ciągu dwudziestu dwóch lat, kiedy Albert Einstein mieszkał i pracował w Stanach Zjednoczonych, często udawał się na długie wakacje letnie. Zazwyczaj wybierał ciche, leżące na uboczu miejscowości, najchętniej w pobliżu dużych zbiorników wodnych, jako że kochał żeglarsstwo. Wypoczywał między innymi nad jeziorem Saratoga w północnej części stanu Nowy Jork, na wybrzeżu Rhode Island, w czasie wakacji 1937–1939 zaś w Nassau Point, w części Long Island zwanej North Fork. Nassau Point jest częścią miasteczka Cutchogue<sup>1</sup> i znajduje się nad zatoką Peconic, mniej więcej 90 mil na północ od Nowego Jorku. Dla Einsteina było to miejsce idealne, zarówno z uwagi na odległość od tłumnie uczęszczanych miejsc, jak i ze względu na znakomite warunki żeglarskie na zatoce Peconic. Ja ze swej strony jestem miasteczkiem Cutchogue szczególnie zainteresowany, gdyż tam się właśnie urodziłem i spędziłem kilka pierwszych lat życia. Cóż, pojawiłem się o jakieś pięć czy sześć lat za późno, aby osobiście zetknąć się tam z Einsteinem, ale spotykał się on z moimi starszymi przyjaciółmi i krewnymi.

Z pewną osobą z Nassau Point Einstein szczególnie się zaprzyjaźnił. Był to Dawid Rothman, właściciel i kierownik małego domu towarowego w pobliskim Southold. Wedle słów syna Dawida, Roberta Rothmana, poznali się oni pewnego dnia, gdy Einstein przyszedł do sklepu, aby kupić sandały (*sandals*)<sup>2</sup>. Ponieważ Einstein mówił z silnym niemieckim akcentem, Rothmanowi wydawało się, że usłyszał pytanie o zegary słoneczne (*sundials*), a jako że nie miał żadnych na sprzedaż, zaprowadził Einsteina na podwórko na tyłach sklepu, gdzie w istocie znajdował się zegar słoneczny; Rothman chciał go ofiarować Einsteinowi w prezencie. Gdy Einstein przestał się śmiać, kupił w sklepie sandały (sklep miał je na składzie), a obaj panowie stali się



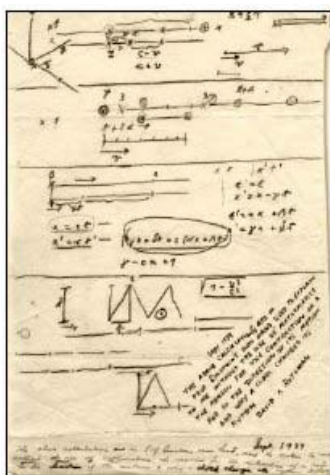
Fot. 1. Einstein i Dawid Rothman w Nassau Point (fotografia opublikowana dzięki uprzejmości Towarzystwa Historycznego Southold i rodziny Reginalda Donahue)

<sup>1</sup> Powiada się, że dawniej Nassau Point było częścią pobliskiego miasta Peconic.

<sup>2</sup> *Zatoka Peconic i  $E=mc^2$* , dostępne na <http://www.newsday.com/community/guide/lihistory/ny-hs734a,0,7548406.story?coll=ny-lihistory-navigation>.

przyjaciółmi. Na fot. 1 widać ich spacerujących w pobliżu letniego domu Einsteina.

Einstein i Rothman często długo dyskutowali, czasami aż do późna w nocy. Pewnego razu w dyskusji pojawił się temat teorii względności. Ponieważ Rothman znał matematykę w stopniu dość ograniczonym, Einstein zaproponował, że wytłumaczy niektóre idee „bez matematyki”. Na kartce papieru wykonał kilka prostych szkiców i notatek. Dawid Rothman zachował tę kartkę – zachowała się ona aż do dzisiaj (fot. 2). Na protesty Rothmana, że wyjaśnienie było jednak matematyczne, Einstein odparł: „Ale to jest takie proste!”<sup>3</sup> Obaj przyjaciele byli skrzypkami i grali wspólnie przy wielu okazjach<sup>4</sup> (fot. 3).



Fot. 2. Kartka papieru, na której Einstein „bez matematyki” tłumaczył Dawidowi Rothmanowi niektóre aspekty teorii względności



Fot. 3. Einstein w Southold (fotografia opublikowana dzięki uprzejmości Towarzystwa Historycznego Southold i rodziny Reginalda Donahue)

Einsteina w Nassau Point odwiedzało wiele znanych osób. W 1937 roku wpadł znany brytyjski pisarz i fizyk, C.P. Snow. Odwiedzał on Stany Zjednoczone w innych sprawach, lecz gdy usłyszał, że w pobliżu, na Long Island, wypoczywa Einstein, poprosił swego przyjaciela, Leopolda Infelda, aby go tam zawiózł. Spędzili razem kilka godzin, rozmawiając głównie o polityce międzynarodowej<sup>5</sup>. Tego

<sup>3</sup> Chuck Rothman, *Wakacje Alberta Einsteina na Long Island*, <http://www.sff.net/people/rothman/einstein.htm>.

<sup>4</sup> Peregrine White, *Skrzypek Einstein*, *Phys. Teach.* **43**, 286–288 (maj 2005).

<sup>5</sup> C.P. Snow, *O Albercie Einsteinie*, *Commentary* **43**, 45–55 (marzec 1967).

samego lata odwiedziła Einsteina sławna hollywoodzka aktorka Luise Rainer wraz z mężem, dramatopisarzem Cliffordem Odetsem. Luise Rainer była wówczas czołową gwiazdą filmową. Dwukrotnie, w latach 1936 i 1937, zdobyła Oscara dla najlepszej aktorki. W czasie jej odwiedzin u Einsteina zrobiono wiele zdjęć (fot. 4), ale nie wszystkie się zachowały. Einstein wobec atrakcyjnych młodych kobiet zachowywał się jak flirciarz – i taki też był wobec Luise Rainer. Jej mąż był tak wściekły, że odciął głowę Einsteina z jednego ze zdjęć<sup>6</sup>.



Fot. 4. Z Luise Rainer w Nassau Point (fotografia opublikowana dzięki uprzejmości Denisa Briana)

Najważniejszymi gośćmi, jakich Einstein przyjął w Nassau Point, byli dwaj fizycy, którzy odwiedzili go w lipcu 1939 roku. Byli to Leo Szilard, spędzający lato na Uniwersytecie Columbia w Nowym Jorku, i Eugene Wigner, profesor z Princeton. Kilka lat później Wigner otrzymał Nagrodę Nobla za swój wkład w fizykę jądrową. Odwiedzili oni Einsteina, aby porozmawiać o tym, co, jak się obawiali, działo się w środowisku fizyków w nazistowskich Niemczech. Szilard i Wigner bali się, że ludzie w rodzaju Wernera Heisenberga byli głęboko zaangażowani w tajny plan mający na celu zbudowanie pierwszej na świecie bomby jądrowej. W Niemczech niedawno odkryto reakcję rozszczepienia jądrowego. Wkrótce potem niemiecka armia zajęła Czechosłowację i natychmiast nałożono embargo na eksport uranu z czeskich kopalń. Niemcy najwyraźniej interesowali się uranem, lecz jeśli naprawdę planowali opracowanie i zbudowanie bomb atomowych, to, jak przekonywał Szilard, musieli zdobyć jeszcze więcej rudy uranu. Oczywistym źródłem tego surowca było wówczas Kongo Belgijskie, w którym znajdowały się znaczne złoża. Tak się składało, że Einstein dobrze znał belgijską rodzinę królewską, zwłaszcza królową Elżbietę, która była pianistką; zdarzało im się grywać razem w belgijskiej rezydencji królewskiej. Wiedząc to wszystko, Szilard i Wigner zamierzali prosić Einsteina, aby zechciał napisać list do odpowiednich władz belgijskich, ostrzegając przed możliwymi zamiarami Niemców.

Wybrali się zatem do Nassau Point samochodem Wignera, lecz gdy dotarli do North Fork, pojawił się pewien problem – nie znali dokładnego położenia letniego domu Einsteina. Wiedzieli tylko, że był on gdzieś w okolicach Nassau Point i że Einstein wynajmował go od niejakiego doktora Moore'a. Gdy więc dojechali w tamtą okolicę, zaczęli się rozpytywać o drogę do domu doktora Moore'a. Oka-

<sup>6</sup> Denis Brian, *Życie Einsteina* (Wiley, New York, 1966), str. 305.

zało się, że nikt o takim domu nie słyszał. Szilard opowiadał później<sup>7</sup>, że jeździli przez dobre pół godziny i tak się tym sfrustrowali, że byli gotowi się poddać i zawrócić do Nowego Jorku. Zobaczyli wtedy małego chłopca, siedmio- lub ośmioletniego, idącego wzdłuż drogi. Szilard postanowił jego zapytać o wskazówki, ale tym razem inaczej sformułował pytanie. Zamiast pytać o dom doktora Moore'a, zapytał „Chłopczyku, nie wiesz przypadkiem, gdzie mieszka profesor Einstein?” Chłopiec wiedział i zaprowadził ich wprost do uczonego – ale o domu doktora Moore'a nigdy nie słyszał.

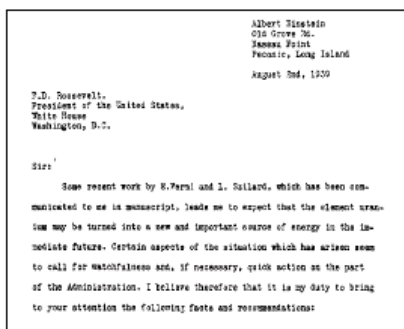
Einstein powitał gości z radością. Obaj byli imigrantami z Węgier, a Einstein poznał ich jeszcze w Europie. Poczęstował ich herbatą na werandzie i słuchał o tym, co było wówczas wiadome na temat rozszczepienia jądrowego. On sam nie śledził rozwoju fizyki jądrowej w latach trzydziestych, więc wiele z tego, co Wigner i Szilard mieli do powiedzenia, było dla niego nowością. Wszystko jednak zrozumiał i z łatwością pojął, jakie straszne konsekwencje miałyby zdobycie broni jądrowej przez Adolfa Hitlera. Einstein zgodził się, że ostrzeżenie Belgów było dobrym pomysłem i podyktował odpowiedni list. Szilard spisał go ręcznie i zgodził się go poprawić oraz przepisać na maszynie, aby Einstein mógł go podpisać. Gdy jednak Szilard wrócił do Nowego Jorku, przyszedł mu do głowy inny plan. Doszedł do wniosku, że znacznie rozsądniejsze byłoby, gdyby Einstein, najbardziej znany na świecie uczonec, napisał list do prezydenta Stanów Zjednoczonych, Franklina Roosevelta. List miałby przedstawiać całą sytuację związaną z uranem, a prezydent sam mógłby zająć się tą sprawą. Oczywiście, Szilard musiał przedyskutować z Einsteinem zmianę planów, postanowił więc ponownie wybrać się do Nassau Point. Ale Szilard nie miał ani samochodu, ani nawet prawa jazdy, Wigner tymczasem udał się do Kalifornii. Na szczęście Edward Teller, także spędzający tamto lato na Uniwersytecie Columbia, mógł pomóc. Teller miał samochód i zgodził się zawieźć Szilarda na spotkanie ze „staruszką”. Pojechali więc do domu Einsteina, Teller zaś do końca życia z lubością powtarzał, że po raz pierwszy zaistniał w fizyce jako kierowca wiozący Szilarda do Nassau Point. Szilard porozmawiał z Einsteinem, owocem zaś tej dyskusji stał się słynny dziś list (fot. 5), zaadresowany do prezydenta Roosevelta i opatrzony adresem Einsteina w Nassau Point<sup>8</sup>. List napisał Szilard, a podpisał Einstein, który później bardzo tego żałował. Przez całe życie był pacyfistą i, jak twierdził, gdyby zdawał sobie wówczas sprawę, że Niemcy tak naprawdę nie osiągnęli znaczących postępów w programie budowy bomby atomowej, nigdy, jak to ujął, „nie uczestniczyliby w otwarciu tej puszkę Pandory”. List jednak został podpisany i dostarczony przez posłańca do

---

<sup>7</sup> *Leo Szilard i jego wersja wydarzeń*, pod red. Spencera R. Wearta i Gertrudy Weiss Szilard (MIT Press, Cambridge, MA, 1978), s. 82–83.

<sup>8</sup> Adres na fot. 5 jest niepoprawny. Einstein naprawdę mieszkał na West Cove Road, odchodzącej od Old Cove Road.

Białego Domu, gdzie wywarł duże wrażenie na prezydencie. Roosevelt natychmiast powołał komisję mającą zbadać potencjalne zastosowania uranu. Komisja ta składała się z naukowców i wojskowych. Jednak choć działania prezydenta były szybkie i zdecydowane, podjęto bardzo ograniczone kroki. Cały początkowy budżet komisji wynosił zaledwie 6000 dolarów. Dopiero po ponad dwu latach ruszył olbrzymi projekt Manhattan.



Fot. 5. Fragment listu Einsteina do prezydenta Franklina Roosevelta (fotografia opublikowana dzięki uprzejmości Biblioteki i Muzeum Franklina D. Roosevelta)



Fot. 6. Einstein i Szilard w Nassau Point (scena odtworzona w roku 1946 — Getty Images)

Nie ma zgody co do tego, jaki był prawdziwy wpływ listu Einsteina na długi i skomplikowany proces, który doprowadził do zbudowania pierwszej bomby atomowej. Robert Oppenheimer, który kierował projektem Manhattan, twierdził, że wpływ ten był znikomy. Inni się z tym nie zgadzają, uważając, że zaangażowanie Einsteina odegrało rolę potężnego katalizatora, przynajmniej na początku. Ponieważ interwencja Einsteina z całą pewnością odniosła *jakiś* skutek, możemy uznać, że – w jakimś sensie – początek ery nuklearnej miał miejsce pewnego letniego dnia na werandzie Einsteina (zob. fot. 6) w Cutchogue, moim mieście rodzinnym.

Karl Mamola, były mieszkaniec Cutchogue, jest redaktorem naczelnym miesięcznika *The Physics Teacher*. Powyższy artykuł ukazuje się równocześnie w grudniowym zeszycie *TPT*.

Przełożył P.F. Góra, Instytut Fizyki UJ



## Prezydent Rzeczypospolitej Polskiej Ignacy Mościcki i Albert Einstein

*Zofia Gołąb-Meyer*

Część Czytelników, zwłaszcza tych młodszych, może być zaskoczona obecnością Ignacego Mościckiego na łamach *Fotonu*. Jest jednak parę okazji ku temu, by przypomnieć jego sylwetkę. 11 listopada było nasze święto państwowe, rocznica odzyskania niepodległości. Niedawno wybraliśmy nowego prezydenta, który też jest profesorem. Czy to gwarantuje dobry wybór? Mościcki, choć w roli prezydenta prezentował się wspaniale – tak właśnie najchętniej wyobrażamy sobie głowę państwa – to jako naukowiec i wynalazca zostawił po sobie znaczące osiągnięcia, natomiast jako prezydent...? Historia ocenia go nie najlepiej. Okazją do wspomnienia Mościckiego jest rok 2005, rok poświęcony Einsteinowi, a właśnie Einstein, w czasie pracy w urzędzie patentowym, omawiał z Mościckim jego patenty.



Ignacy Mościcki  
(1867–1946)

Przypomnijmy niektóre fakty z życia Ignacego Mościckiego. Urodził się 1 grudnia 1867 roku w Mierzanowie pod Ciechanowem, w rodzinie ziemiańskiej o silnych tradycjach patriotycznych – jego ojciec był uczestnikiem powstania styczniowego. Szkołę realną ukończył w Warszawie. Jak wielu innych Polaków, studiował chemię na politechnice w Rydze. W czasie studiów prowadził również działalność konspiracyjną w partii Proletariat. Ta działalność była podstawą późniejszej przyjaźni z Józefem Piłsudskim i z jej powodu musiał wyjechać z Rygi do Warszawy.

Zagrożony aresztowaniem, wraz z żoną wyemigrował w 1892 roku do Londynu, gdzie przebywał przez pięć lat. Pracował głównie jako robotnik. Studiował też w Technical College w Finsbury i w Patent Library. W Londynie zetknął się po raz pierwszy osobiście z Józefem Piłsudskim. Jednak na emigracji porzucił zupełnie działalność polityczną, a całą energię skupił na pracy naukowej.

Do Fryburga sprowadził go z Londynu fizyk, profesor Józef Wierusz-Kowalski, który zaangażował Mościckiego jako asystenta. To rektor Uniwersytetu we Fryburgu Wierusz-Kowalski rozpoznał jego talenty wynalazcze i konstrukcyjne.

Na uniwersytecie we Fryburgu Mościcki został kierownikiem prac badawczych w laboratorium utworzonym według jego projektu. Dokonał wielu odkryć naukowych w dziedzinie elektrochemii i elektrofizyki. Dzisiaj nazwalibyśmy uprawianą przez Mościckiego naukę jako stosowaną. Jego odkrycia i patenty miały natychmiastowe zastosowania w technice i w przemyśle.



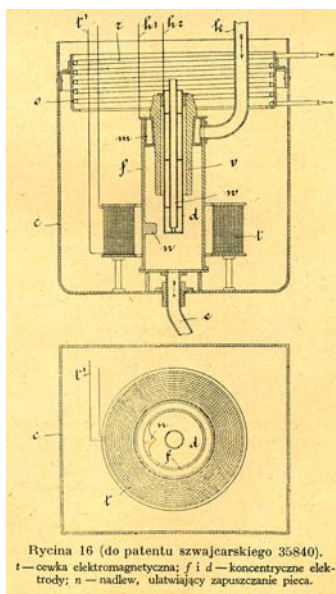
Mało kto wie, że sposoby zabezpieczania sieci przewodów elektrycznych przed niszczącym wpływem wyładowań atmosferycznych są pomysłami Mościckiego. Swoją projekt przedstawił na kongresie elektrotechników we Fryburgu. Było to niebywałe widowisko z setką „sztucznych piorunów”.

Dla spółki Societe Generale des Condensateurs Electriques opracował technologię do produkcji wielu typów kondensatorów i bezpieczników. Stosowano ją przez długie lata w Europie. W 1907 roku zainstalowano na wieży Eiffla baterie kondensatorów (100 000 V, ówczesny rekord) w radiowej stacji nadawczej.

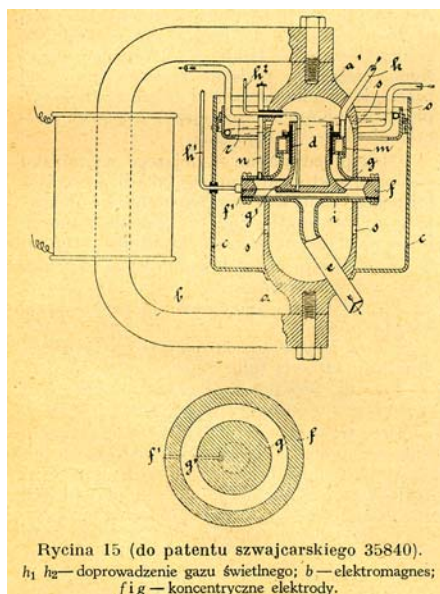


Pomysły dotyczące pieca z wirującym płomieniem Mościcki patentował – z tej okazji zetknął się z Einsteinem [1]. W czasie spotkania miał Einsteinowi szkicować i objaśniać proponowane przez niego rozwiązania technologiczne [2]. Oczywiście wydana przez Einsteina ocena projektów była pozytywna.

Na zdjęciu Albert Einstein w biurze patentowym



Rycina 16 (do patentu szwajcarskiego 35840).  
t – cewka elektromagnetyczna; f i d – koncentryczne elektrody; n – nadlew, ułatwiający zapuszczenie pieca.



Rycina 15 (do patentu szwajcarskiego 35840).  
h<sub>1</sub> h<sub>2</sub> – doprowadzenie gazu świetlnego; b – elektromagnes;  
f i g – koncentryczne elektrody.

Ilustracja z dokumentacji patentowej dotyczącej pieca z wirującym płomieniem, dyskutowanej z Einsteinem [2]



**Opis pracy naukowej** (cytat ze strony internetowej Ministerstwa Edukacji i Nauki [3]):

Ignacy Mościcki, choć niezbyt pozytywnie oceniany jako polityk, był wybitnym naukowcem, członkiem licznych towarzystw naukowych, doktorem *honoris causa* wielu uczelni krajowych i zagranicznych. Odznaczony wieloma krajowymi i zagranicznymi medalami, był autorem kilkudziesięciu patentów polskich, szwajcarskich, niemieckich, węgierskich, francuskich i amerykańskich. W 1900 roku Ignacy Mościcki zainteresował się azotem i jego wykorzystaniem do produkcji kwasu azotowego na skalę masową. W 1901 roku wykonał doświadczenia z utlenianiem azotu atmosferycznego za pomocą łuku elektrycznego. Polegały one na użyciu bardzo wysokiego napięcia (50 tys. woltów) z zastosowaniem odpowiednich do takiego napięcia kondensatorów. Okazało się, że takich kondensatorów nikt nie produkuje. Mościcki sam skonstruował więc potrzebny kondensator techniczny. Przeprowadzone przez niego pomiary wykazały, że przy użyciu taniej energii elektrycznej można rozpocząć produkcję kwasu azotowego. Przeprowadził pionierskie w skali światowej badania nad strukturą dielektryków kondensatorów stosowanych w przemyśle. Zaprojektował piece elektryczne, w których można było utleniać azot szybciej i wydajniej metodą spalania powietrza w łuku elektrycznym, stosując płomień wirujący pod wpływem pola magnetycznego. Stworzył metodę destylacji zachowawczej ropy naftowej, opartą na działaniu trzech wzajemnie się zązębiających układów cyrkulacyjnych. Odkrył i opisał metodę rozdziału emulsji wody i ropy naftowej za pomocą ogrzewania pod wysokim ciśnieniem. Przedstawił generalne założenia rozwoju przemysłu azotowego w Polsce. Opracował plany budowy fabryk: kwasu azotowego w Miluzie, związków cyjanowych w Neuhausen. Powołał do życia Instytut Badań Naukowych i Technicznych „Metan” (badania naukowe prowadził nawet wtedy, gdy zajął się działalnością polityczną), założył fabrykę chemiczną „Azot” w Jaworznie, uruchomił zdeorganizowaną przez Niemców Fabrykę Związków Azotowych w Chorzowie, której dyrektorem technicznym został inż. Eugeniusz Kwiatkowski (w latach 1922–1923 produkowano w niej najwięcej karbidu i azotniaku). Zainicjował budowę najnowocześniejszej w owych czasach Państwowej Fabryki Związków Azotowych pod Tarnowem. Na cześć swojego założyciela nowa przemysłowa dzielnica miasta nazwana została Mościcami.

*Profesor Dr. Ignacy Mościcki. Życie i działalność na polu nauki i techniki*, praca zbiorowa; Warszawa 1934, Nakładem Komitetu Uczczenia 30-lecia pracy naukowej Profesora Dr. Ignacego Mościckiego Prezydenta Rzeczypospolitej z zasiłku Ministerstwa Wyznań Religijnych i Oświecenia Publicznego. W tym:

- [1] *Prezydent Rzeczypospolitej Prof. Dr. h.c. Ignacy Mościcki jako uczonec, badacz i wynalazca* (str. 7); Prof. Dr. Wojciech Świętosławski
- [2] *Techniczno-naukowe prace Pana Prezydenta Rzeczypospolitej Prof. Dr. h.c. Ignacego Mościckiego na polu przemysłu nieorganicznego* (str. 35); Doc. dr. inż. Ludwik Wasilewski
- [3] Strona internetowa Ministerstwa Edukacji i Nauki <http://www.mnii.gov.pl>

O Prezydencie Ignacy Mościckim polecamy lekturę:

Sławomir M. Nowinowski *Prezydent Ignacy Mościcki*, Polska Oficyna Wydawnicza „BGW”, Warszawa 1994; Ignacy Mościcki *Autobiografia*, Bellona, Warszawa 1993



## Rura Kundta a „metoda obrazów”

*Bartosz Lalek, CKU Krosno*

*Hieronim Lalek, LO Rymanów*

Analizując tytuł tej pracy (nawet niezbyt powierzchownie), można przekornie zapytać: „co ma piernik do wiatraka?”. Istnieje jednak eksperyment, który w pewnym sensie łączy ze sobą te dwa tematy.

W standardowych doświadczeniach rura Kundta wykorzystywana jest do pomiaru szybkości dźwięku w metalach lub prędkości dźwięku w powietrzu. Regulując odległość jednego końca pręta, wprowadzonego w szklaną rurę, od ściany zamykającej rurę, przy odpowiednim jego zamocowaniu, otrzymujemy falę stojącą w obszarze „koniec pręta–ściana”, pobudzając do drgań drugi koniec pręta.

O tym, że w rurze powstała fala stojąca, informuje obserwatora widoczny rozkład gęstości sproszkowanej substancji wypełniającej rurę po pobudzeniu pręta do drgań. Stabilny rozkład tej substancji pozwala zmierzyć długość fali dźwiękowej w powietrzu na podstawie łatwego do rozpoznania położenia węzłów pochodzących od drgań podstawowych pręta. Pomiędzy tymi węzłami obserwuje się prążkowy rozkład substancji, za który odpowiedzialne są wyższe harmoniczne drgań pręta.

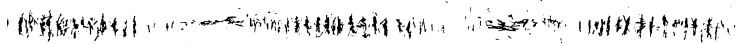
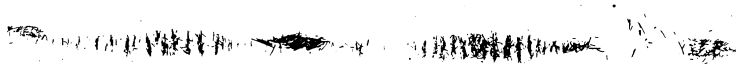
Przyjęta procedura doświadczalna wymaga zwrócenia szczególnej uwagi na jakość i stabilność obrazu rozkładu sproszkowanej substancji. Aby osiągnąć dobry efekt, rura wyścielana była białą, papierową taśmą, posypaną – w miarę równomiernie – sproszkowanym sianem. Po otrzymaniu stabilnego i dobrej jakości „obrazu fali stojącej” oraz wyciągnięciu taśmy następowało jego utrwalenie przezroczystą taśmą klejącą. Proces utrwalania obrazu, z pozoru prosty, okazał się bardzo niewdzięczny. Rozwiązanie tego problemu powiązało rurę Kundta z „metodą obrazów”.

Uczniowskie zespoły badawcze, wykonując czynności finalizujące eksperyment, spotykały się z dużą trudnością w utrwaleniu efektownego rozkładu sproszkowanego siana. W trakcie przyklejania przezroczystej taśmy, wskutek naelektryzowania, „drobiny” siana odskakiwały od papieru, przyklejając się chaotycznie do taśmy. Tym samym otrzymana uprzednio struktura rozkładu ulegała znacznym deformacjom. Wymiany sproszkowanego siana na inne substancje używane do tego celu oraz „zabiegi” odelektryzowujące taśmę nie dawały zadowalających wyników.

Problem został radykalnie rozwiązany dzięki podejściu, którego ideę obejmuje problematyka „oddziaływania ładunków z uziemioną płaszczyzną przewodzącą”. Rozwiązanie wielu zawartych tam problemów opiera się na „metodzie obrazów” (której podstawy mogą być przedstawione jako tematy uzupełniające lub fakultatywne).

Wynikające z „metody obrazów” podejście polegało na umieszczeniu białej taśmy na rozwiniętej „spożywczej” folii aluminiowej, za pomocą dwóch krokodylków i przewodnika podłączonej do kaloryfera. Po takim zabiegu substancja sproszkowana zachowywała prawie idealnie swe pierwotne położenia w trakcie przyklejania przezroczystej taśmy.

Cała grupa badawcza poczuła ulgę, a przede wszystkim dużą satysfakcję dzięki umiejętności praktycznego zastosowania wiedzy z elektrostatyki w uzyskaniu informacji o procesach falowych. Pozyskany materiał badawczy został wielokrotnie skopiowany techniką ksero i uczniowie otrzymali trwałe pamiątki czynnego uczestnictwa w eksperymencie. Oczywiście, wykonano też stosowne wyliczenia, ale ich znaczenie pozostało w cieniu zdarzeń, jakie miały miejsce przy realizacji zbierania danych, zgodnie z zaprojektowanym tokiem pomiarowym. W załączeniu przedstawiamy ksero fragmentów rozkładu sproszkowanego siana jednego z cykli pomiarowych. Na ich bazie można zrobić foliogramy, których zbiorowa analiza aktywizuje uczniów i uatrakcyjnia lekcje fizyki.



Ksero fragmentu rozkładu sproszkowanego siana

Spróbujemy skrótko wyjaśnić, dlaczego (naszym zdaniem) metalowa folia pomogła usunąć kłopoty, a także opiszemy problemy, które należy rozwiązać, by otrzymać oczekiwany efekt. W rozważaniach wykorzystamy analogię skonstruowaną na bazie dobrze znanych faktów doświadczalnych.

Wprowadzając uczniów w problemy elektrostatyki, wykonujemy wiele doświadczeń z użyciem lasek szklanych i ebonitowych. Przedstawiamy ich wzajemne oddziaływanie w stanie naelektryzowania. Pokazujemy też, że laski po potarciu przyciągają skrawki papieru, włosów itd.

Przyciąganie to jest skutkiem działania niejednorodnego pola elektrycznego, którego źródłem są ładunki elektryczne rozmieszczone w potartej części laski na wyindukowane w skrawkach materii dipole elektryczne. Dipole te wciągane są w kierunku wzrostu wartości wektora natężenia pola, a obserwator widzi „przyklejanie” się skrawków do laski.

W naszej analogii odpowiednikiem laski jest przezroczysta taśma klejąca, a rozklejanie taśmy z wałka, prowadzące do jej naelektryzowania, odpowiada pocieraniu laski. Przy braku zewnętrznych zaburzeń zbliżanie rozwijanej taśmy do drobin siana jest równoważne zbliżaniu naelektryzowanej laski do skrawków papieru i w obu przypadkach obserwuje się skokowe przyklejanie się drobin. Ułożenie drobin w bliskim kontakcie z uziemioną płaską folią metalową wprowadza nową jakość. Folia stanowi bowiem płaszczyznę przewodzącą o zerowym potencjale. Rozwiązanie typowych problemów związanych z oddziaływaniem ładunków elektrycznych z nieskończonej dużej płaszczyzny przewodzącej staje się proste po zastosowaniu „metody obrazów”. Wprawdzie każda folia ma ograniczone wymiary, ale gdy obszar aktywny leży daleko od jej brzegów, rozważania będą obciążone niewielkim błędem.

Z „metody obrazów” wynika, że do rozwiązania tych problemów można stworzyć sytuację zastępczą, usuwając folie i wprowadzając dodatkowe ładunki rekompensujące jej brak – „ładunki obrazy” – tak by wszystkie punkty płaszczyzny, tam gdzie była folia, zachowały zerowy potencjał.

W naszej sytuacji, by poprawnie rozmieścić „ładunki obrazy”, wystarczy dokonać zwierciadlanego odbicia ładunków realnie wytwarzających pole względem płaszczyzny będącej miejscem ułożenia folii, przy zachowaniu ich wartości i zmianie ładunku na przeciwny. Przesuwanie naelektryzowanej laski nad drobinami materii spoczywającej na uziemionej folii metalowej jest w sytuacji zastępczej równoważne równoczesnemu przesuwaniu laski i jej zwierciadlanego odbicia ze zmienionym znakiem ładunku. Podobnie ma się sprawa z rozwijaniem i klejeniem taśmy.

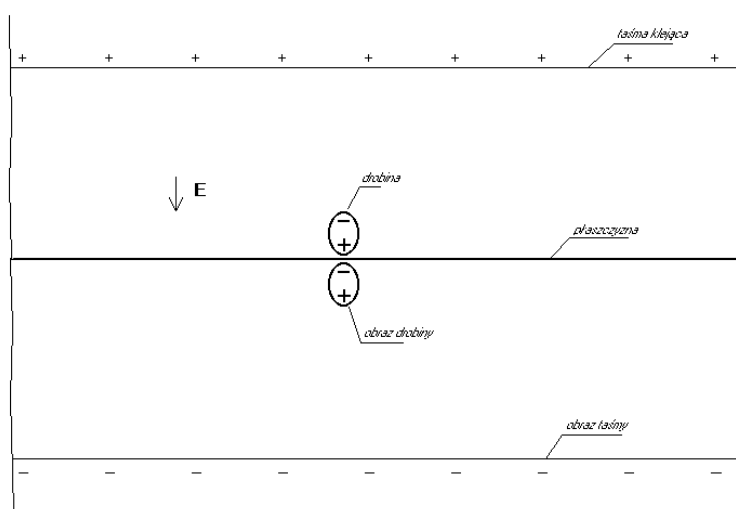
Niestety, nie rozwiązuje to problemu dużych niejednorodności pola, więc drobin przyciągane są zarówno przez laskę, jak i taśmę.

Drobin spoczywają w znaczącej odległości od płaszczyzny w stosunku do ich wymiarów, wskutek czego odciążone są od stanu równowagi metatrwałej, który jest osiągnięty w położeniu idealnie pokrywającym się z płaszczyzną. Przyciąganie się dipola ze swym obrazem nie wnosi istotnych efektów. Pozostaje zatem stworzyć optymalne warunki do uzyskania w pobliżu miejsca ułożenia drobin pola jednorodnego. W praktyce należy najpierw rozkleić taśmę ze znacznym nad-

datkiem w stosunku do długości rozkładu sproszkowanej substancji, który chcemy utrwalić, przyklejając taśmę. Następnie zbliżmy ją równoległe do płaszczyzny, na której umieszczona jest sproszkowana substancja, rozłożona na cienkiej taśmie papierowej. Ważne jest, by w trakcie zbliżania taśmy zachować równoległe położenie taśmy klejącej względem płaszczyzny i w miarę centralne położenie drobin względem środka szerokości taśmy.

Sytuację elektrostatyczną drobin w takim stanie przedstawia rys. 1. Należy zwrócić uwagę na wzajemne przyciąganie drobin i jej obrazu, co oprócz grawitacji sprzyja pozostawianiu jej na swoim miejscu.

Stosując się do opisanej procedury, uzyskiwaliśmy dobre „ostre obrazy” rozkładu sproszkowanego siana, które zostały wykorzystane w pomiarach.



Rys. 1

Według autorów zastosowanie uziemionej folii aluminiowej przyniosło następujące skutki:

- przyczyniło się do „ujednorodnienia” pola elektrycznego w obszarze położenia drobin, a zatem ograniczyło możliwość przemieszczania się dipola elektrycznego,
- sprawiło, że wektor natężenia pola elektrycznego był w tym obszarze prostopadły do płaszczyzny spoczynku drobin, a wynikające z niego ustawienie dipola nie sprzyja jego przesuwaniu w kierunku płaszczyzny,
- wspomogło przywieranie drobin siana do podłoża poprzez przyciągające działanie na wyindukowany dipol elektryczny.

Problem, który czynnik był najważniejszy, pozostawiamy do rozstrzygnięcia Czytelnikom.

Zapewne Czytelnicy zwrócili uwagę, że artykuł nie zawiera opisu wykorzystania rury Kundta w pomiarach fizycznych ani podstaw teoretycznych i zastosowań praktycznych „metody obrazów”. Sądzymy, że tematyka ta jest fizykom dobrze znana, a można ją znaleźć – między innymi – w cytowanej literaturze.

Głównym przesłaniem pracy było pokazanie, że proces badawczy – często dobrze znany – przy niewielkich modyfikacjach, na jakie pozwala inwencja i środki techniczne, może generować nowe problemy, których rozwiązanie bywa niejednokrotnie bardziej twórcze i inspirujące od pierwotnie zaplanowanych celów.

Warto zatem modyfikować standardowe eksperymenty w nadziei, że pojawią się nowe nieoczekiwane okoliczności, które w nauczanie fizyki wprowadzą pozytywne bodźce i twórcze emocje, czego wszystkim uczącym życzymy.

#### Literatura

- B. Fechner, Metoda obrazów elektrycznych rozwiązywania problemów elektrostatyki, „Fizyka w Szkole”, 3/1980.
- R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *Feynmana wykłady z fizyki*, t. II, cz. 1, PWN, Warszawa 1974.
- H. Lalek, Metoda obrazów w doświadczeniach z elektryczności, „Fizyka w Szkole”, 3/1980.
- H. Lalek, *Wyższe harmoniczne w rurze Kundta*, „Fizyka w Szkole”, 3/1987.
- A.N. Matwiejew, *Teoria pola elektromagnetycznego*, PWN, Warszawa 1967.
- Sz. Szczeniowski, *Fizyka doświadczalna*, cz. 1, PWN, Warszawa 1980.



## Eksploratoria fizyczne w Polsce

*Stanisław Bednarek*

*Instytut Fizyki Uniwersytetu Łódzkiego*

### Wstęp

Jedną z bardziej atrakcyjnych form zajęć szkolnych jest wycieczka. W ramach lekcji fizyki celem wycieczki może być specjalnie zorganizowana wystawa przyrządów przeznaczonych do przeprowadzania, samodzielnie lub z pomocą obsługi, edukacyjnych doświadczeń z fizyki. Wystawa taka nazywana jest pochodzącym z języka angielskiego słowem eksploratorium (od *explore* – badać, odkrywać).

Pierwsze eksploratorium zostało zorganizowane w San Francisco dzięki staraniom Franka Oppenheimera. Było to w roku 1969. Początkowo w eksploratorium tym znajdowały się przyrządy pozwalające na wykonywanie prostych doświadczeń z fizyki i chemii. Później eksploratorium rozbudowano, umożliwiając przeprowadzanie w nim doświadczeń z innych nauk przyrodniczych. Obecnie również w Polsce funkcjonują eksploratoria pozwalające na wykonywanie edukacyjnych doświadczeń z fizyki. Warto się z nimi zapoznać i wziąć pod uwagę ich odwiedzenie przy okazji szkolnej wycieczki.

### Eksploratorium w Lublinie

W gmachu Instytutu Fizyki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie mieści się najstarsze w Polsce eksploratorium fizyczne. Zostało ono umieszczone w korytarzu pierwszego piętra, a składa się z kilkudziesięciu zawieszonych na ścianach gablot, zawierających zestawy przyrządów fizycznych. Gabloty te zostały wykonane, w większości w latach siedemdziesiątych, jako prace magisterskie studentów fizyki.

Wszystkie zestawy przyrządów mogą być całkowicie uruchamiane i sterowane za pomocą przycisków i pokręteł znajdujących się na zewnątrz gablot. Jest to więc eksploratorium bezobsługowe, w którym wszystkie doświadczenia mogą być wykonane samodzielnie przez zwiedzających. Tematyka tych doświadczeń pokrywa cały kurs fizyki klasycznej z niektórymi elementami fizyki współczesnej. Oto przykładowe tematy doświadczeń: zasada zachowania momentu pędu, prawo Bernoulliego, siła elektrodynamiczna, składanie barw (fot. 1), fotoprądy.

Z eksploratorium można korzystać bezpłatnie, zarówno indywidualnie jak i w grupach. Mimo że zestawy przyrządów nie są najnowsze, działają sprawnie, spełniając wszystkie wyznaczone im funkcje. Uzupełnieniem eksploratorium jest niewielka wystawa zabytkowej aparatury naukowej, obejmująca m.in. aparaturę próżniową, mierniki napięć i prądów (fot. 2), liczniki promieniowania oraz technikę obliczeniową.



Fot. 1



Fot. 2

### Eksploratoria w Warszawie

Interesujące eksploratorium fizyczne w Warszawie znajduje się w Muzeum Techniki, mieszczącym się w Pałacu Kultury i Nauki. Nosi ono nazwę „Ciekawa Fizyka” i jest jedną spośród kilkunastu wystaw stałych, prezentowanych w tym muzeum. Warto wspomnieć, że Muzeum Techniki jest bezpośrednim kontynuatorem tradycji założonego w 1875 roku. Muzeum Przemysłu i Rolnictwa, po którym niestety nie zachowały się żadne eksponaty, ponieważ uległy one całkowitemu zniszczeniu podczas II wojny światowej.

Ekspozycja „Ciekawa Fizyka” obejmuje cztery następujące działy tematyczne: ruch w polu grawitacyjnym, przemiany energii, transport energii i informacji oraz promieniowanie korpuskularne. Na każdy z wymienionych działów składa się po kilka doświadczeń. W dziale „Ruch w polu grawitacyjnym” wykonać można trzy doświadczenia: spadek w rurze Galileusza (piórko i blaszka ołowiana spadają z różnymi prędkościami w rurze z powietrzem i z takimi samymi prędkościami po wypompowaniu z niej powietrza), spadek swobodny oraz rzut poziomy.

Dział „Przemiany energii” obejmuje cztery doświadczenia – koło Maxwella (krążek o dużym momencie bezwładności zawieszony na dwóch niciach porusza się w dół i w górę podczas nawijania i odwijania nici, zmieniając swoją energię potencjalną na kinetyczną i odwrotnie), fotoogniwo, „bateria ręczna” (ogniwo galwaniczne utworzone z dwóch płytek z blachy miedzianej i cynkowej, połączonych z miliamperomierzem, który wskazuje przepływ prądu po położeniu dłoni na płytkach), indukcja elektromagnetyczna.

Wybierając dział „Transport energii i informacji”, można badać rozchodzenie się i właściwości fal mechanicznych podłużnych i poprzecznych oraz fal świetlnych. W przypadku światła możliwe jest w atrakcyjny sposób – za pomocą kalej-



doskopu – poznanie prawa odbicia, prawa załamania (przy użyciu stolika optycznego) oraz obejrzenie jego widma przy wykorzystaniu spektroskopu.

W dziale „Promieniowanie korpuskularne” bada się ruch elektronów, przeprowadzając doświadczenia z rurkami katodowymi, i wykrywa promieniowanie jonizujące, korzystając z licznika Geigera-Muellera. Wszystkie zestawy przyrządów przygotowane są bardzo starannie. Doświadczenia wykonuje pracownik muzeum z ewentualną pomocą opiekuna grupy. Korzystanie z tego eksploratorium jest odpłatne – przez wykupienie biletu wstępu do Muzeum Techniki.

Oprócz opisanego eksploratorium stałego w Warszawie skorzystać można również z eksploratorium czasowego, organizowanego w ramach Festiwalu Nauki w budynku Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego przy ulicy Hożej. Eksploratorium to czynne jest tylko przez okres około dwu tygodni – zwykle we wrześniu. Stanowi ono interaktywną wystawę kilkudziesięciu dostępnych w sprzedaży zabawek fizycznych i kilku zestawów przyrządów wykonanych przez pracowników Wydziału Fizyki. Zabawki i przyrządy zgrupowane są tematycznie w kolejnych pomieszczeniach według klasycznego układu działów fizyki występującego w programach nauczania – mechanika, ciepło, elektryczność i magnetyzm oraz optyka. Całe przedsięwzięcie nosi nazwę „Fizyka i zabawki”.

Wstęp do eksploratorium jest bezpłatny. Liczniejsze i zorganizowane grupy powinny wcześniej zarezerwować termin. Osoby przybywające indywidualnie wpuszczane są w miarę wolnych miejsc, np. co pół godziny. Większość doświadczeń przy użyciu zabawek zwiedzający mogą wykonać samodzielnie. Dodatkowymi objaśnieniami i pomocą służą studenci Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Niektóre doświadczenia, bardziej niebezpieczne lub wymagające większej sprawności, np. doświadczenie wykazujące niezależność ruchów, w którym strzela się do spadającego swobodnie przedmiotu, wykonywane są przez studentów jako pokazy.

W 2006 roku w Warszawie na Powiślu ma powstać nowoczesne muzeum techniki, będące jednocześnie ośrodkiem promocji nauki. Przedsięwzięcie to nosi nazwę „Centrum Nauki Kopernik”. Centrum zlokalizowane będzie na lewym brzegu Wisły, w pobliżu mostu kolejowego. O jego skali świadczą następujące dane. Na terenie 4 ha ma stanąć dwu- lub trzykondygnacyjny obiekt o powierzchni zabudowy ok. 6000 m<sup>2</sup> i powierzchni całkowitej ok. 15 000 m<sup>2</sup>. Pomieści on planetarium, laboratoria dla szkół, sale multimedialne, wystawy stałe i czasowe, a także sklepik i kawiarenki. Budynek otoczony będzie parkiem odkrywców i galerią sztuki współczesnej.

Całkowity koszt przedsięwzięcia szacowany jest na 120 mln zł i pokryty zostanie ze środków rządowych oraz samorządowych. Jest to więc jedna z większych inwestycji prowadzonych obecnie w Warszawie. Według zapowiedzi ministra nauki i informatyzacji Michała Kleibera, odwiedzający Centrum zobaczą również atrakcyjne doświadczenia z fizyki i chemii oraz innych nauk przyrodni-

czych. Współczesne środki multimedialne umożliwią bowiem odbycie wirtualnych podróży po różnych obiektach przyrodniczych i organizmach żywych, m.in. po organizmie człowieka. Dostępne w Centrum ekspozycje adresowane będą do osób w szerokim przedziale wiekowym – od przedszkolaków, poprzez młodzież szkolną, która stanowić będzie zapewne najliczniejszą grupę odwiedzających, aż po osoby w wieku dojrzałym i starszym.

### **Eksploratorium w Szczecinie**

Od listopada 2002 roku w Muzeum Narodowym w Szczecinie funkcjonuje interaktywna wystawa pod nazwą „Eureka”. Koncepcja tego eksploratorium została opracowana i jest rozwijana przez fizyków zatrudnionych na działającym w tym mieście uniwersytecie. Obecnie w eksploratorium dostępnych jest ponad 50 stanowisk doświadczalnych, zajmujących dwie duże sale Muzeum. Znaczna część wykorzystywanych tam przyrządów stanowi darowiznę od podobnego ośrodka niemieckiego, znajdującego się w Peenemuende. Pozostałe przyrządy zostały wykonane przez pracowników Instytutu Fizyki Uniwersytetu Szczecińskiego. Eksploratorium ma charakter rozwojowy i stale jest wzbogacane o nowe stanowiska. W przyszłości planuje się otwarcie w Szczecinie centrum nauki, którego częścią byłoby eksploratorium fizyczne.

Osoby korzystające z eksploratorium mogą samodzielnie przeprowadzać wszystkie doświadczenia. W razie takiej potrzeby dodatkowych informacji i wskazówek może udzielić pracownik eksploratorium – najczęściej student fizyki. Na poszczególnych stanowiskach umieszczone są krótkie, kilkudzaniowe opisy złożone z dwóch części. Pierwsza część zawiera polecenia dla użytkownika, żeby wykonał określone czynności i uzyskał pożądany efekt. W drugiej części, również krótko, opisane są podstawy fizyczne zachodzącego zjawiska. Wszystkie opisy zostały zebrane i wydrukowane w formie broszury, którą rozesłano do szczecińskich szkół.

Tematyka dostępnych w szczecińskim eksploratorium doświadczeń obejmuje wszystkie działy fizyki oraz elementy astronomii. Do bardziej interesujących doświadczeń z mechaniki należą: koło Maxwella wykonane z koła rowerowego, rezonans w układzie wahadeł o różnej długości oraz utrzymywanie znacznych rozmiarów piłki w strumieniu powietrza wydobywającego się z dmuchawy. Z akustyki warto wymienić doświadczenie, w którym można usłyszeć szept ze znacznej odległości, ponieważ fala dźwiękowa ogniskowana jest przez dużych rozmiarów czaszę. Wśród doświadczeń z elektryczności największym powodzeniem cieszy się niewątpliwie kula plazmowa, pozwalająca obserwować wyładowania w rozrzedzonym gazie, spowodowane wysokim napięciem o częstotliwości kilkudziesięciu kHz. Do najbardziej atrakcyjnych doświadczeń z optyki należy niekończący się tunel, uzyskany przez wielokrotne odbicie w dwóch równoległych zwierciadłach płaskich pierścienia świecących żarówek.

### **Eksploratorium w Łodzi**

W 2001 roku w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Łódzkiego zorganizowano eksploratorium pod nazwą „Środowiskowe Interaktywne Laboratorium Fizyczne”. Jego urządzenie stało się możliwe dzięki dofinansowaniu przyznanemu przez Wydział Edukacji i Sportu Urzędu Miasta Łodzi. Eksploratorium zlokalizowano w wydzielonej części jednego z mało używanych korytarzy budynku Instytutu. Umieszczono tam ponad 60 stanowisk umożliwiających przeprowadzanie doświadczeń ze wszystkich działów fizyki klasycznej. Sporo uwagi poświęcono optyce i psychofizjologii widzenia, umożliwiając obejrzenie hologramów, anglifów i stereogramów.

Do przeprowadzania doświadczeń w zdecydowanej większości zastosowano odpowiednio dobrane zabawki fizyczne produkcji fabrycznej, np. jo-jo – pozwalające badać ruch bryły sztywnej, wspomnianą wcześniej kulę plazmową czy magiczną skarbonkę – pudełko z pochylonym zwierciadłem, za które wpadały wrzucone monety. Na kilku stanowiskach umieszczono przyrządy wykonane samodzielnie z przedmiotów i materiałów codziennego użytku, m.in. kapsułkę schodzącą po równi pochyłej, nurka Kartezjusza oraz rurę do wytwarzania wirów w cieczy.

Przy każdym stanowisku na specjalnej tabliczce zamieszczono krótki opis, zapoznający z podstawami fizycznymi obserwowanych zjawisk i ich wykorzystaniem. Eksploratorium urządzono w taki sposób, żeby ograniczyć do minimum czynności związane z przygotowaniem stanowisk do doświadczeń oraz zapewnić samodzielne i bezpieczne eksperymentowanie. Osiągnięto to m.in. przez połączenie zabawek z tabliczkami elastyczną żyłką i zastosowanie nietłukących się butelek z plastiku. Z eksploratorium przez cztery lata korzystały bezpłatnie zorganizowane grupy uczniów pod opieką nauczyciela, przybywające z Łodzi i okolicznych miejscowości. Obecnie eksploratorium jest czasowo nieczynne z powodu remontu pomieszczenia. Wznowienie jego działalności ze zwiększoną liczbą doświadczeń planuje się na jesień 2005 roku.

Na zakończenie warto jeszcze dodać, że w Łodzi realizowany jest projekt pod nazwą „Manufaktura”. Polega on na adaptacji nieczynnej już starej fabryki Poznańskiego do pełnienia nowych funkcji. W zmodernizowanych budynkach, oprócz hipermarketu, ma się znaleźć również muzeum techniki. Jest też szansa na zorganizowanie w ramach tej placówki eksploratorium fizycznego.

### **Od Redakcji:**

Przypominamy, że o podobnych eksploratoriach w Krakowie pisaliśmy w *Fotonie* 82, jesień 2003.



## O poprawnym rozwiązaniu pewnego prostego zadania ze szczególnej teorii względności

Antoni Paja

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, Kraków

W 86 numerze *Fotonu* (jesień 2004) w „Kąciku zadań” zamieszczono ciekawe zadanie, w którym postawiono problem: czy jest możliwe zaobserwowanie narodzin Newtona i Einsteina

- a) równocześnie,
- b) w tym samym miejscu

przez przyjęcie odpowiednio dobranego układu odniesienia.

Niestety, zaprezentowane przez pana Miczka rozwiązanie jest niepoprawne. Co gorsza, oryginalne sformułowanie zadania świadczy o tym, że jego autorzy również nie zdają sobie sprawy z tego, jakie jest poprawne rozwiązanie problemu. Jako jedną z danych podają odległość między Woolsthorpe (miejsmem urodzenia Newtona) a Ulm (miejsmem urodzenia Einsteina), która jest w tym przypadku mało istotna. Nie podają natomiast dokładnych dat urodzenia obu fizyków, które są istotne (podanie roku jako punktu na osi czasu to trochę za duży luz). Ponadto pytanie o prędkość układu obserwatora względem powierzchni Ziemi sugeruje, że układ ten powinien poruszać się po łuku koła wielkiego, łączącego Woolsthorpe i Ulm, a – moim zdaniem – żaden ruch tego typu nie jest poprawnym rozwiązaniem w ramach STW.

Dla celów analizy sformułujmy problem w sposób równoważny, ale w ścisłym języku, używanym do opisu zjawisk w czasoprzestrzeni.

W układzie inercyjnym  $S$  mamy 2 zdarzenia o współrzędnych  $(t_N, x_N, y_N, z_N)$  oraz  $(t_E, x_E, y_E, z_E)$ . Czy istnieje taki układ inercyjny  $S'$ , w którym:

- a)  $t'_N = t'_E$
- b)  $(x'_E - x'_N)^2 + (y'_E - y'_N)^2 + (z'_E - z'_N)^2 = 0$  ?

Jeżeli tak, to należy opisać jego ruch względem układu  $S$ , tzn. podać jego wektor prędkości  $\mathbf{v}$ .

Specjalnie dwukrotnie użyłem w tekście słowa „inercyjny”, aby podkreślić, że rozwiązanie w ramach STW wymaga takiego założenia. Transformacja Lorentza wiąże współrzędne czasoprzestrzenne zdarzeń w inercyjnych układach odniesienia. Interwał czasoprzestrzenny jest niezmiennikiem transformacji Lorentza tylko wtedy, gdy do wyrażenia na  $\Delta s^2$  wstawimy współrzędne zdarzeń w inercyjnych układach odniesienia.

Tymczasem Ziemia z pewnością nie jest inercjalnym układem odniesienia w rozpatrywanym przedziale czasu, tzn. od  $t_N=25$  XII 1642 (narodziny Newtona) do  $t_E=14$  III 1879 (narodziny Einsteina). W tym czasie wykonuje ona około  $236\frac{1}{4}$  obiegu dookoła Słońca i jednocześnie około 86 290 obrotów wokół własnej osi. Ruchu takiego nie można uważać za jednostajny i prostoliniowy nawet w przybliżeniu.

Wyłania się tu problem: co przyjąć jako układ inercjalny  $S$ , właściwy do rozwiązania tego zadania? Najlepszym przybliżeniem byłby układ związany z naszą Galaktyką, ponieważ Słońce obiega środek Galaktyki po pewnej orbicie i – ściśle biorąc – Układ Słoneczny też nie jest układem inercjalnym. Na szczęście Słońce porusza się po orbicie o ogromnym promieniu krzywizny i w rozważanym przedziale czasu jego ruch można uznać za jednostajny i prostoliniowy względem układu związanego z Galaktyką, a więc układ  $S$  związany z Układem Słonecznym można uważać za inercjalny z bardzo dobrym przybliżeniem.

Ze względu na periodyczny ruch Ziemi po orbicie zamkniętej wokół Słońca odległość między miejscem narodzin Newtona a miejscem narodzin Einsteina w układzie  $S$  dana jest przez odległość między położeniami Ziemi względem Słońca w chwilach  $t_N$  i  $t_E$  (odległość 800 km między Woolsthorpe a Ulm mierzona na Ziemi jest tu mało znaczącą poprawką).

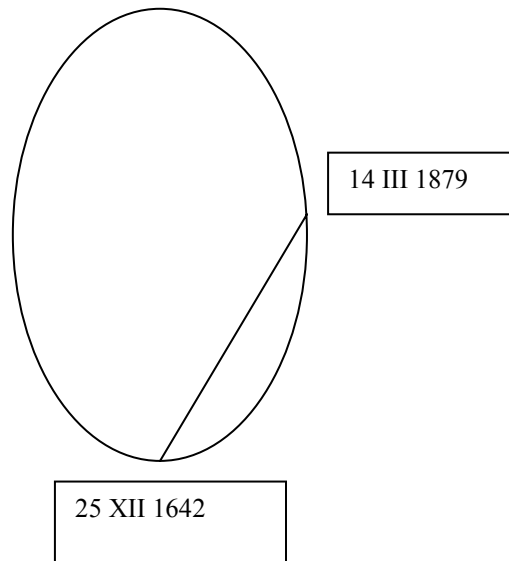
Dla uproszczenia obliczeń można poprowadzić oś  $x$  układu  $S$  przez pozycje Ziemi w chwilach  $t_N$  i  $t_E$  jak na rys. 1 (układ  $S$  nie musi być ściśle układem środka masy Układu Słonecznego, wystarczy, że jest nieruchomy względem tego środka masy). Wtedy interwał czasoprzestrzenny  $\Delta s^2 = c^2(t_E - t_N)^2 - (x_E - x_N)^2$  jest istotnie typu czasowego ( $\Delta s^2 > 0$ , ponieważ  $\Delta t \approx 7,46 \times 10^9$  s,  $\Delta x \approx j.a.\sqrt{2} \approx 2,12 \times 10^{11}$  m,  $\Delta s^2 \approx 5 \times 10^{36}$  m<sup>2</sup>). Tak więc zobaczenie jednoczesnych narodzin Newtona i Einsteina jest niemożliwe (Einstein jest w stożku przyszłości Newtona).

Istnieje jednak układ, w którym te narodziny można zobaczyć w tym samym miejscu, tzn.  $x'_N = x'_E$ . Pod względem formalnym obliczenie przebiega analogicznie jak w komentowanym artykule, tylko że za  $x_E - x_N$  trzeba podstawić nie 800 km, lecz  $\Delta x \approx j.a.\sqrt{2} \approx 2,12 \times 10^{11}$  m, a otrzymamy  $v = 28,4$  m/s (patrz rys. 1). Jest to całkiem przyzwoita prędkość kosmiczna, umożliwiająca swobodne podróże po Układzie Słonecznym osobnikom odpowiednio długo żyjącym (bo niestety jest znacznie mniejsza od prędkości światła). Nasz obserwator powinien poruszać się z tą prędkością wzdłuż linii łączącej  $x_N$  i  $x_E$ . W chwili  $t_N$  nie musi przelatywać dokładnie nad Woolsthorpe. Wystarczy, że wyceluje lunetkę w kierunku  $x_N$  i ustawi jej ostrość na dom Newtona. W jego układzie współrzędne tego punktu w chwili narodzin Newtona to  $x'_N = \gamma(x_N - vt_N)$ , a czas odczytany na jego zegarze to  $t'_N = \gamma(t_N - vx_N/c^2)$ . Potem przez dłuższy czas (236 lat i 3 miesiące) w okularze swojej lunetki będzie obserwował gwiazdziste niebo, a w chwili  $t'_E = \gamma(t_E - vx_E/c^2)$  w polu widzenia pojawi się Ulm. Według jego zegara cały eksperyment będzie

trwał  $\Delta t' = t'_E - t'_N$ , ale tak naprawdę  $\Delta t'$  różni się od  $\Delta t$  tylko o  $6 \times 10^5$  s, więc potrwa to tyle samo co w Układzie Słonecznym, tj. 236 lat z kawałkiem.

Podsumowując: najistotniejszy element praktycznej realizacji tego eksperymentu, tj. aby obserwator zobaczył oba wydarzenia w tym samym miejscu względem swojej rakiety (przelot nad obydwoma miejscowościami), jest przez pana Miczka trafnie zaproponowany. Natomiast trajektoria, po jakiej pan Miczek każe mu lecieć, oraz zalecana prędkość (0,1 mm/s) nie wynikają z STW (choć pan Miczek jest świadom tego, że obliczenia trzeba prowadzić w układzie inercyjnym, jak wynika z przypisu 2).

Podobne zadanie pojawia się również w skrypcie dla studentów Politechniki Rzeszowskiej („czy można zobaczyć chrzest Polski i bitwę pod Grunwaldem w tym samym czasie i w tym samym miejscu”), niestety, z tak samo błędnym rozwiązaniem. Z prywatnych rozmów wiem, że podobne zadania są zadawane studentom także innych uczelni i również niewłaściwie rozwiązywane. Świadczy to niezbicie, że fizyka jest trudną nauką, nawet dla tych, którzy podjęli się jej nauczania. Mam jednak nadzieję, że mój komentarz do tego zadania wyjaśni przynajmniej czytelnikom *Fotonu* rolę układu inercyjnego w STW i przyczyni się do poprawnego rozwiązywania analogicznych zadań.



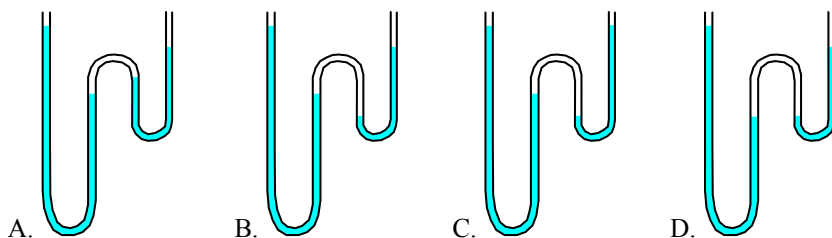
Rys. 1



## KĄCIK ZADAŃ

*Adam Smólski*  
*Fizyka w Szkole*

W rurce pokazanej na rysunku jest woda i bąbel powietrza. Który rysunek pokazuje możliwe położenie poziomów wody? Zjawiska włoskowatości nie należy brać pod uwagę.



E. Żadne z pokazanych położenia nie jest możliwe.

Prawidłowa odpowiedź **B**



## ERRATA

Opisany w poprzednim numerze *Fotonu* model oka (*Model oka w akwarium*, str. 55) został skonstruowany w ramach pracy magisterskiej pt. *Modelowanie wad wzroku – doświadczenia pokazowe i pomiarowe* w roku 2003. Praca została wykonana pod naukowym kierunkiem Pana prof. dr. hab. Antoniego Pędziwiatra i dzięki pomocy Pana mgr. Stanisława Tłałki w Zakładzie Metodyki Nauczania i Metodologii Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego, gdzie obecnie znajduje się model.

Katarzyna Dziedzic-Kocurek



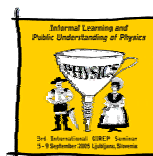
## KACIK EKSPERYMENTATORA

### Magiczne kulki

Zofia Gołąb-Meyer

Na tegorocznym sympozjum GIREP-u, które w tym roku odbyło się w Lublanie, amerykańskie trio Stanley Micklavzina, Chris Chia-verina i Brian Jones demonstrowali na warsztatach w muzeum eksperymentów fizycznych całe mnóstwo zmyślnych, a prostych doświadczeń. Zachwyciło mnie najprostsze, a dotykające istoty zrozumienia zasad Newtona i przełamywania fałszywych intuicji. Otóż Stan użył „magicznych kuleczek” nietypowo. „Magiczne kuleczki”, to moja ulubiona demonstracja „z kieszeni”: dwie na oko identyczne, czarne gumowe kuleczki. Jedna z nich doskonale elastyczna, wspaniale odbija się od podłogi, druga zaś doskonale niesprężysta – upuszczona z pewnej wysokości, płaska i pozostaje nieruchoma na podłodze.

Stan ostrym nożykiem przeciął dwie kuleczki na połówki, a następnie skleił dwie różne połówki, wklejając nitkę tak, aby było wygodnie zrobić ze sklezionej kulki wahadełko (patrz fotografii). Na drodze odchylonej od pionu kulki umieścił drewniany klocek, tak dobrany, by kulka uderzając w niego stroną sprężystą wywracała go, a uderzając stroną niesprężystą nie wywracała. Dla większości obserwatorów takie zachowanie kulki to niespodzianka.



W pierwszym przypadku zmiana pędu to  $2mv$ , a w drugim tylko  $mv$ . Jeśli czas trwania obu zderzeń jest taki sam, to wartość siły w zderzeniu elastycznym jest dwa razy większa niż przy nieelastycznym. Zrozumienie „skąd się bierze” siła działająca na klocek jest potrzebne do zrozumienia pojawiania się ciśnienia wywieranego przez gaz na ścianki naczynia. Większość uczniów ma z tym trudności.

Wbrew pozorom, zrozumienie zachowania klocka nie jest łatwe. Uważam, że doświadczenie jest dlatego cenne, iż samo już zapamiętanie wyniku tego doświadczenia może pomóc w przyszłości w zrozumieniu zasad Newtona.

Można wymyślić wersje tego doświadczenia z jedną sprężystą kulką i kawałkiem lepkiego żelu (podobnego do tego, jakim przykleja się np. płyty CD dołączane do gazet), czy plasteliny.





## Fizycy polscy w filatelistyce (c.d.)

*Jerzy Bartke*

*Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie*

W poprzednim zeszycie *Fotonu* zamieszczony był artykuł pt. „Maria Skłodowska-Curie w filatelistyce”, prezentujący niektóre spośród bardzo licznych walorów filatelistycznych poświęconych naszej wybitnej uczonej. Dziś przedstawiamy innych fizyków polskich, których uhonorowano różnymi walorami filatelistycznymi (zresztą wyłącznie wydaniem Poczty Polskiej).

Trzymając się chronologii okresów ich działalności, zaczniemy od Karola OLSZEWSKIEGO (1846–1915) i Zygmunta WRÓBLEWSKIEGO (1845–1888). Obaj byli profesorami Uniwersytetu Jagiellońskiego: Olszewski od 1876 roku, Wróblewski od 1882 roku. Zajmowali się niskimi temperaturami. W roku 1883 jako pierwsi skroplili składniki powietrza: azot i tlen, skroplili i zestalili dwutlenek węgla. Określili też parametry krytyczne dla wodoru, który udało się skroplić dopiero Karolowi von Linde w roku 1896. Poczta Polska poświęciła Olszewskiemu i Wróblewskiemu znaczek wydany w 1951 roku z okazji I Kongresu Nauki Polskiej oraz ilustrowaną kartę pocztową wydaną w 1964 roku z okazji 600-lecia UJ. Na ilustracji tej kartki widnieje historyczny aparat do skraplania gazów.

Marian SMOLUCHOWSKI (1872–1917) był profesorem Uniwersytetu Lwowskiego, a od 1913 roku profesorem Uniwersytetu Jagiellońskiego. Był wszechstronnym uczonym, działającym w różnych dziedzinach nauk przyrodniczych, ale przede wszystkim w fizyce. Największe znaczenie mają jego prace z kinetycznej teorii materii. Niezależnie od Alberta Einsteina podał wzór wyjaśniający na podstawie teorii kinetycznej zjawisko ruchów Browna (wzór Einsteina-Smoluchowskiego). Przedstawił też statystyczną interpretację II zasady termodynamiki. Poczta Polska poświęciła mu już w 1938 roku dwie ilustrowane karty pocztowe o nominałach 15 gr (dla korespondencji krajowej) i 30 gr (dla korespondencji zagranicznej, z napisami dwujęzycznymi) oraz kartę wydaną w roku 1964 z okazji 600-lecia UJ z ilustracją przedstawiającą budynek Instytutu Fizyki UJ, noszący imię tego wielkiego uczonego.

Marian DANYSZ (1909–1983) i Jerzy PNIEWSKI (1913–1989) prowadzili w Warszawie badania w zakresie fizyki jądrowej wysokich energii i fizyki cząstek elementarnych. Badając oddziaływania cząstek promieniowania kosmicznego zarejestrowane w emulsji naświetlonej w stratosferze, odkryli w 1952 roku pierw-

sze hiperjądro, w roku 1962 izomerię hiperjądrową, a w roku 1963 zostali współodkrywcami podwójnego hiperjądra. Danysz i Pniewski zapoczątkowali w ten sposób nowy dział fizyki: fizykę hiperjądrową, i podobno byli nawet nominowani do Nagrody Nobla, niestety bez sukcesu. Poczta Polska poświęciła im ilustrowaną kartę pocztową wydaną w roku 1993. Na wydrukowanym na tej karcie znaczku umieszczono mikrofotografię pierwszego przypadku zinterpretowanego jako rozpad hiperjądra w emulsji.





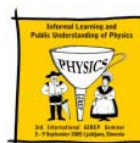
## CZYTAMY PO ANGIELSKU

### Strong

**Marko Budisa**

*Faculty for mathematics and Physics, University of Ljubljana, Slovenia*

Marko Budisa, 31-letni doktorant, główny „trzymający” w rękach organizację seminarium GIREP-u w Lublanie, które odbyło się we wrześniu 2005, aktywny uczestnik „mojej” grupy dyskusyjnej „Gaps and bridges in communicating physics to the public”, zmarł nagle 4 października 2005. Jego pasją była fizyka, jej nauczanie i poezja. Poniższy wiersz to jego przyczynek do naszej grupy dyskusyjnej. Ogłaszam mały konkurs na tłumaczenie. Nagrodą będzie raport z seminarium GIREP-u, niestety, już nie przez Marka przygotowany.



(Z.G-M)

### Strong

*Strong  
I crush a cracker  
Hard as rock  
With my bare hand  
The crust disintegrates  
Into smallest crumbles  
I spend a lot of energy  
Breaking apart chemical bonds  
Between matter consistent  
Yet I know nothing of the little atom  
And when I merely poke it  
It answers  
Joyfully  
With a single energy packet  
With a single photon  
Only then I realize  
The power of Weakness  
The nucleus decays  
Emitting a fast electron  
And a neutrino  
How strong Weakness is  
How weak Strongness is  
That which I am looking for*



*Is hidden  
In the last neutron  
Just about to decay  
In the last corner of Universe  
Where you are waiting  
For your prince  
And facing passing bandits  
Sorry  
But I was busy  
Discovering the truth  
That the Weak force  
Caused a nuclear explosion  
While I was being  
Strong*

August 2005, Lublana GIREP; <http://www.girep2005.fmf.uni-lj.si/>



## CO CZYTAĆ

### „Sen” Johanna Keplera

Andrzej Kobos

<http://www.zwoje-scrolls.com/zwoje43/text34p.htm>

Niedawno ukazała się w Polsce niezwykła książka. Johannes Kepler: *Sen, czyli wydane pośmiertnie dzieło poświęcone astronomii księżycowej (Somnium, seu opus posthumum de astronomia lunari)*. Przełożyli z łaciny Dorota Sutkowska i Jarosław Włodarczyk. Wstępem i komentarzem opatrzył Jarosław Włodarczyk. Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa 2004.

Używam tu określenia „niezwykła książka” z kilku istotnych przyczyn:

Po pierwsze: autor, Johannes Kepler (1571–1630), był jednym z dosłownie pierwszych nowoczesnych astronomów, jednym z pierwszych uczonych, którzy myśleli o Księżycu w kategoriach fizyki. Był człowiekiem, który stworzył nowoczesną astronomię i uchodzi za twórcę pierwszego naukowego, matematycznego modelu zjawisk w przyrodzie. Żył w epoce pokopernikańskiej, ale przed Descartes’em, Leibnizem, Huygensem, Newtonem, tj. przed twórcami nowoczesnej matematyki i fizyki.

Po drugie: książka ta miała we wczesnym XVII wieku cele edukacyjne. Kepler napisał w Uwadze nr 4 do *Snu*:

Celem mego *Snu* jest przedstawienie dowodu na ruch Ziemi albo raczej próba odparcia, na przykładzie Księżyca, zarzutów biorących się z powszechnego sprzeciwu rodzaju ludzkiego. Uznałem, że owa dawna Niewiedza wystarczająco już zanikła i została wykorzeniona z pamięci ludzi wykształconych, choć jej Dusza wciąż jeszcze walczy w więzach mocno zaciskanych przez tak liczne ręce w ciągu tych stuleci i wiekowa matka po dziś dzień żyje na uniwersytetach; lecz tak żyje, że śmierć powinna uznać za lepszą od życia.

Po trzecie: mimo niewątpliwej wielkiej i długotrwałej wartości edukacyjnej tej książki, jest to – co jest trudne do uwierzenia – pierwsze w ogóle polskie wydanie tej książki. Za to należą się słowa wielkiego uznania dla tłumaczy. Współczesna polszczyzna przekładu czyni go łatwym do czytania.

Po czwarte: chociaż książka Keplera *Sen* jest relacją z tego, co on widział we śnie, w tym opisie podróży na Księżyc (z pomocą demonów i czarów), i czyta się ją

jak pierwsze w historii *science fiction*, to jest ona *sensu stricto* traktatem naukowym, oczywiście w ówczesnych standardach, a nawet wyższych, bo Kepler był uczonym niezwykle ścisłym. Książka przynosi opis Księżyca i astronomicznego „widoku” z niego; rzeczywiście jest to traktat o astronomii księżycowej.

Kepler swój *Sen* napisał w pierwszej wersji około roku 1609, a po roku 1620 zaopatrzył go 223 krótszymi lub dłuższymi uwagami, które w niczym nie ustępują dzisiejszym naukowym przypisom. W przypisach tych (nieomal czterokrotnie obszerniejszych niż sama opowieść) Kepler wyklada swój punkt widzenia uczonego astronoma i matematyka, jak również dyskutuje kilka dzieł innych uczonych, m.in. swych mistrzów, Tycho Brahego i Michaela Mästlina. Rygorystycznie stawia też zagadki intelektualne, które często po prostu są stawianiem naukowych problemów. Taka technika pisania prac naukowych zasadniczo nie zmieniła się do dzisiaj

Warto przypomnieć, że koncepcja Keplera astronomii spoza Ziemi doczekała się naukowej realizacji dopiero w 350 lub więcej lat po jego śmierci. Mam na myśli astronomię uprawianą za pomocą pojazdów kosmicznych, przede wszystkim orbitującego Ziemię Hubble Space Telescope.

Po piąte: *Somnium* Keplera jest drugim, obok wiekopomnego dzieła Mikołaja Kopernika *De revolutionibus orbium coelestium*, wielkim dziełem astronomicznym ukończonym na ziemiach polskich lub z Polską związanych, konkretnie w mieście Żagań, w dzisiejszym Zielonogórskim.

Dr Jarosław Włodarczyk napisał do książki Keplera *Sen* obszerny, bardzo interesujący *Wstęp* oraz 399 obszernych naukowych przypisów do *Snu* i *Uwag* Keplera, jak również zestawiał kalendarium życia Keplera oraz obszerną bibliografię.

Ze *Wstępu* można na przykład dowiedzieć się, iż Hiszpan Eugenio Toralba w 1528 roku przyznał się hiszpańskiej inkwizycji, że odbył lot na Księżyc. Ma ów „lot” Toralba swoje odbicie w *Don Kiszocie* Miguela Cervantesa.

Nadzwyczaj istotną częścią *Wstępu* Włodarczyka jest obszerny życiorys Johanna Keplera.



## CO CZYTAĆ

### *Delta*

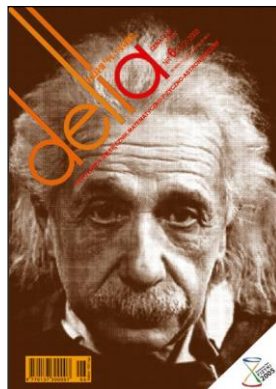
*Mikołaj Korzyński*

*Delta* to czasopismo dla tych, którzy znajdują przyjemność w matematyce, fizyce lub astronomii. Założone w 1974 roku, osiągnęło obecnie dojrzały wiek 31 lat. Przez cały czas opublikowało setki artykułów ze swoich dziedzin – nie próbując zastąpić książek czy podręczników, ale raczej starając się przekazać bogactwo podejść, metod i idei, wyjaśnić niektóre znane, choć może nie do końca zrozumiane, zjawiska i zaprosić czytelnika do samodzielnej zabawy w naukę.

Wydawcy *Delty* uważają, że ten ostatni punkt jest co najmniej równie ważny jak pozostałe. Od czytelników często oczekuje się, że sami włożą nieco wysiłku w czytanie. Choć twierdzeniom matematycznym zazwyczaj towarzyszą dowody bądź ich zarysy, dla ambitnego czytelnika zostawione jest coś do zrobienia. W dziale fizycznym czytelnicy mogą znaleźć sugestie doświadczeń do wykonania w domu. Co miesiąc publikujemy krótki opis nieba z informacjami co warto obserwować. Prócz tego w każdym numerze można znaleźć kilka problemów i zadań z matematyki i fizyki do samodzielnego rozwiązania.

*Delta* jest miesięcznikiem wydawanym przez Uniwersytet Warszawski. Jest dostępna w prenumeracie i kioskach. Wybrane artykuły umieszczone są na stronie <http://www.mimuw.edu.pl/delta>

Opublikowany artykuł J. Skalskiego pochodzi ze specjalnego numeru 6/2005, wydanego w setną rocznicę słynnych prac Alberta Einsteina z 1905 roku.



#### Redaguje kolegium w składzie:

Wiktor Bartol, Krystyna Kordos – sekr. red., Marek Kordos red. nac., Mikołaj Korzyński, Tomasz Kwast, Anna Ludwicka, Urszula Marciniak, Anna Rudnik, Witold Sadowski, Piotr Zalewski – z-ca red. nac. Okładki i ilustracje: Anna Ludwicka. Rysunki techniczne: Marc-in Adamski

#### Adres do korespondencji:

Instytut Matematyki UW, Redakcja „Delty”, ul. Banacha 2, pokój 5450, 02-097 Warszawa, e-mail: [delta@mimuw.edu.pl](mailto:delta@mimuw.edu.pl), tel.: (22) 55-44-545.



## VIII Poznański Festiwal Nauki i Sztuki

*Barbara Orchel*

*XXXI LO Kraków*

W dniu 13 października br. na Wydziale Fizyki UAM zorganizowano dla szerokiego kręgu odbiorców imprezę będącą częścią VIII Poznańskiego Festiwalu Nauki i Sztuki. Ze względu na Światowy Rok Fizyki przygotowano je ze szczególnym rozmachem.

Pomimo że budynki IF UAM położone są dość daleko od centrum miasta, przez cały dzień docierały tu grupy dzieci i młodzieży w różnym wieku oraz wielu indywidualnych gości. Na wszystkie wykłady rezerwację miejsc zamknięto już znacznie wcześniej. Tym, którzy nie mieli szczęścia, organizatorzy przygotowali transmisję wybranych wykładów i pokazów na ekranie umieszczonym w holu oraz przez Internet.

Obok wykładów skierowanych do osób szczególnie zainteresowanych fizyką (np. „Od wahadła do efektu fotoelektrycznego” czy „Fizyka jądrowa w medycynie”) znalazło się wiele popularnonaukowych, bogato ilustrowanych, np. „Pejzaż malowany dźwiękiem”, „Piękno Wszechświata”. (To oczywiście tylko przykłady z bogatej oferty wykładów). Ogromnym zainteresowaniem cieszył się kilkakrotnie powtarzany pokaz „Najpiękniejsze doświadczenia z fizyki”.

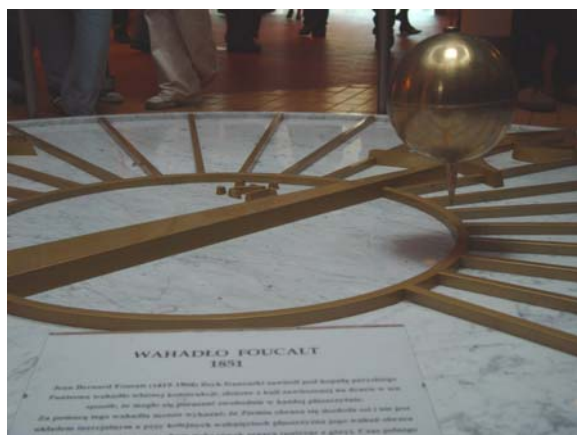
Imprezy festiwalowe nie zamykały się oczywiście wyłącznie w salach wykładowych. Tradycyjnie uwagę zwiedzających przykuwało znajdujące się w holu wahadło Foucaulta.

W jednym z bocznych korytarzy wspaniałego budynku grupa studentów z koła naukowego prezentowała proste, ale widowiskowe doświadczenia. Nurek Kartezjusza, *camera obscura* czy wiatraczek wykorzystujący konwekcję gromadziły grupki zaciekawionych obserwatorów w różnym wieku.

Festiwal Nauki i Sztuki był również okazją do obejrzenia ciekawych prac plastycznych (w tym pięknych fotografii zaćmienia Słońca) i posłuchania muzyki. Bardzo życzliwie przyjęto zespół krakowskich studentów, którzy zaśpiewali m.in. piosenki o tematyce fizycznej.

Obserwując Poznański Festiwal Nauki i Sztuki, trudno oprzeć się wrażeniu, że organizatorzy mieli szczęście do hojnych sponsorów, co w połączeniu z zaangażowaniem wielkiego zespołu pracowników i studentów pozwoliło zorganizować wspaniałą imprezę.

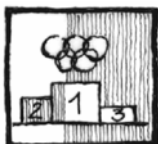
A że warto inwestować w promocję fizyki, chyba nikt (oprócz władz oświatowych) nie wątpi...



Zwiedzający już przy wejściu, w hollu mogli obserwować wahadło Foucaulta (z opisem historycznego eksperymentu). W trakcie wykładu „Najpiękniejsze doświadczenia z fizyki” dr Aleksandra Jendrzyczak zaprezentowała wiele ciekawych doświadczeń m.in. z mechaniki (ruch wahadła nad tarczą obrotową) i elektryczności (przeływ prądu elektrycznego przez rozrzedzone gazy).







## KONKURS **Lwiątko 2006**

Zapraszamy gimnazja, licea, licea profilowane i technika do udziału w

**Polsko-Ukraińskim Konkursie Fizycznym**

### **LWIĄTKO 2006**

<http://slo.bednarska.edu.pl/lwiatko>

Konkurs zostanie przeprowadzony 27 marca 2006. Szkoły mogą zgłosić uczestników najpóźniej do 31 stycznia 2006. Zachęcamy do dokonania zgłoszenia za pomocą formularza na ww. stronie internetowej. Możliwe jest także przesłanie zgłoszenia według poniższego wzoru, pocztą na adres:



I Społeczne Liceum Ogólnokształcące, ul. Bednarska 2/4, 00-310 Warszawa

Prosimy o nieprzesyłanie zgłoszeń faksem ani mailem.

Lista zgłoszonych szkół będzie widoczna na ww. stronie internetowej (bez liczb uczestników i danych osobowych). Wszelkich informacji udzielamy pod telefonem 660 248 617.

Opłata konkursowa wynosi 5 zł od uczestnika. Prosimy o dokonanie zbiorczej wpłaty przelewem na konto:

Towarzystwo Przyjaciół I SLO, ul. Bednarska 2/4, 00-310 Warszawa  
BRE BANK S.A. O. w Warszawie, 15 1140 1010 0000 2557 1000 1013.

Prosimy dopilnować, aby w rubryce „tytuł wpłaty” lub „wplacający” znalazły się dokładne dane szkoły oraz dopisek „LWIĄTKO 2006”.

W wypadku przesyłania zgłoszenia pocztą prosimy o załączenie kopii dowodu wpłaty.

**Wzór zgłoszenia szkoły do udziału w Polsko-Ukraińskim Konkursie Fizycznym LWIAŃTKO 2006**

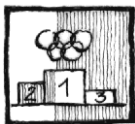
nazwa szkoły  
  kod pocztowy    poczta     (miejscowość) ulica, numer  
 imię i nazwisko nauczyciela odpowiedzialnego za organizację konkursu    e-mail (nieobowiązkowo)   
 imię i nazwisko dyrektora szkoły    telefon szkoły (z prefiksem)

liczba uczestników (prosimy wpisać zero, gdy na którymś poziomie nie są zgłaszani):

klasa 1-2 gim.     klasa 3 gim.     klasa I lic. i tech.     klasa II lic. i tech.     klasa III lic., III i IV tech.

czy wysłać podziękowanie dla nauczyciela?

..... podpis



## KONKURS



### **V Małopolski Konkurs z Fizyki i Astronomii dla Gimnazjalistów w roku szkolnym 2005/2006**

Organizatorem konkursu jest Małopolski Kurator Oświaty oraz Niepubliczna Placówka Doskonalenia Nauczycieli – Studio Edukacyjne „INDEKS”. Patronat nad konkursem sprawuje Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz Sekcja Nauczycielska Polskiego Towarzystwa Fizycznego.

#### **Konkurs jest trzyetapowy:**

- a) Etap I – szkolny: piątek, 25 listopada 2005. Czas trwania eliminacji 90 minut, miejscem przeprowadzenia etapu szkolnego jest szkoła ucznia.
- b) Etap II – rejonowy: piątek, 27 stycznia 2006. Czas trwania eliminacji 120 minut, miejscem przeprowadzenia etapu rejonowego jest wyznaczona szkoła.
- c) Etap III – wojewódzki: środa, 15 marca 2006. Czas trwania eliminacji 120 minut, miejsce przeprowadzenia etapu wojewódzkiego zostanie podane najpóźniej w dniu eliminacji rejonowych.

#### **Szczegółowe informacje na stronie**

[www.kuratorium.krakow.pl](http://www.kuratorium.krakow.pl)

[www.indeks.krakow.pl](http://www.indeks.krakow.pl)

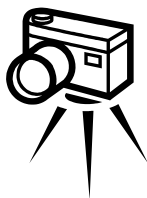
#### **Adres Wojewódzkiej Komisji Konkursowej**

Niepubliczna Placówka Doskonalenia Nauczycieli  
Studio Edukacyjne „INDEKS”  
ul. Mały Płaszów 4, 30-720 Kraków

e-mail: [studio@indeks.krakow.pl](mailto:studio@indeks.krakow.pl)

telefon/fax: (12) 653-05-07

strona internetowa: <http://www.indeks.krakow.pl>



## KONKURS



PLACÓWKA PROWADZONA PRZEZ POWIAT WIELUŃSKI  
STAROSTA WIELUŃSKI  
Kolo Młodych Fizyków przy MDK w Wieluniu

### Ogólnopolski konkurs fizyczno-fotograficzny – edycja IV

#### „ZJAWISKA FIZYCZNE WOKÓŁ NAS”

Oferta dla uczniów  
z gimnazjów i szkół ponadgimnazjalnych

Konkurs jest adresowany do **uczniów szkół gimnazjalnych i ponadgimnazjalnych.**

Warunkiem udziału w konkursie jest przesłanie lub osobiste dostarczenie do Młodzieżowego Domu Kultury **WŁASNORĘCZNIE WYKONANYCH ZDJĘĆ**, przedstawiających dowolnie wybrane zjawiska fizyczne, dostrzeżone w otaczającej przyrodzie lub świadomie wyeksponowane w przeprowadzonym przez ucznia eksperymencie.

**Na fotografii (barwne lub czarno-białe, wyłącznie formatu 13x18 cm i poprawne technicznie) oczekiwać będziemy do 19 maja 2006 r.**

Informacji o konkursie udziela i prace przyjmuje:  
Sekretariat MDK, ul. 3 Maja 29, 98-300 Wieluń, tel. (043) 843-87-80  
e-mail: [mdkwielun@wp.pl](mailto:mdkwielun@wp.pl)



## **EDUKACJA w Muzeum Inżynierii Miejskiej w Krakowie**

*Kraków ul. św. Wawrzyńca 15*

Rok szkolny 2005/2006

Jako jedyne muzeum w Krakowie proponujemy lekcje o tematyce technicznej. Lekcje przygotowane są tak, aby stanowiły uzupełnienie i rozszerzenie programu szkolnego z zakresu techniki i fizyki. Poniżej przedstawiamy główne tematy lekcji. Każdy z nich może zostać indywidualnie dostosowany do poziomu danej klasy. W tym celu prosimy zainteresowanych Nauczycieli o kontakt z osobą prowadzącą lekcję celem szczegółowych ustaleń.

1. „Budujemy poduszkowiec” – lekcja ma charakter warsztatu. Przeznaczona jest dla uczniów szkół podstawowych, gimnazjalnych i średnich. Czas trwania 1,5 h. W trakcie lekcji uczestnicy zapoznają się z pojęciami: ciśnienia, tarcia, grawitacji, bezwładności.

Prowadzi mgr inż. Piotr Mazurkiewicz (40 zł od grupy + bilet od osoby).

2. „Opowieści o tarciu” – lekcja ma charakter warsztatu. Przeznaczona jest dla uczniów szkół podstawowych. Czas trwania 1,5 h.

Prowadzi mgr inż. Piotr Mazurkiewicz (40 zł od grupy + bilet od osoby).

3. „Co dało nam Słońce?” – lekcja ma charakter warsztatu. Przeznaczona dla uczniów szkół gimnazjalnych i średnich. Czas trwania 1,5 h.

Prowadzi mgr inż. Piotr Mazurkiewicz (40 zł od grupy + bilet od osoby).

4. „Od Talesa do Volty” – teatrzyk. Uczniowie, zapoznają się z historią rozwoju elektryczności od czasów Prometeusza do czasów Volty.

Prowadzi dr Iwona Nowak (20 zł od grupy + bilet od osoby).

5. „Kopiące talerze” – lekcja ma charakter warsztatu. Zajęcia adresowane do uczniów szkoły podstawowej i gimnazjum. Czas trwania 1 h. W czasie doświadczeń zostają wyjaśnione pojęcia: ładunek elektryczny, elektrofor i butelka lejdej-ska.

Prowadzi dr Iwona Nowak (30 zł od grupy + bilet od osoby).

6. „Zabawy z tornado w butelce” – lekcja ma charakter warsztatu łączonego z pogadanką. Przeznaczona jest dla uczniów szkół podstawowych. Czas trwania 45 min.

Prowadzi dr Iwona Nowak (30 zł od grupy + bilet od osoby).

7. „Kochający kamień” – lekcja ma charakter warsztatu. Zajęcia skierowane są do uczniów klas zerowych oraz nauczania początkowego. Czas trwania 1 h. Dzieci poznają własności magnezu.

Prowadzi dr Iwona Nowak (30 zł od grupy + bilet od osoby).

8. „Bezpieczna droga do szkoły” – lekcja ma charakter warsztatu łączonego z pogadanką. Przeznaczona jest dla klas nauczania początkowego szkoły podstawowej. Czas trwania 1 h. Dzieci same wykonują światelko odblaskowe, które zabierają ze sobą do domu.

Prowadzi mgr Marek Golonka (40 zł od grupy + bilet od osoby).

9. „Tajemnica koloru” – lekcja ma charakter warsztatu łączonego z pogadanką. Skierowana jest do uczniów szkół podstawowych i gimnazjum. Czas trwania 1 h. Omawiamy zagadnienia związane ze światłem i barwą.

Prowadzi mgr Agnieszka Mędrak (40 zł od grupy + bilet od osoby).

10. „Czas” – lekcja skierowana do uczniów szkół podstawowych i gimnazjalnych.

Prowadzi mgr Agnieszka Mędrak (30 zł od grupy + bilet od osoby).

11. „Filozofowie o technice” – zajęcia mają charakter warsztatu. Lekcja przeznaczona jest dla licealistów. Czas trwania 1,5 h.

Prowadzi mgr Agnieszka Mędrak (30 zł od grupy + bilet od osoby).

Dane o pracownikach prowadzących lekcje:

1. Iwona Nowak – dr chemii, starszy asystent muzealny, specjalizacja: projektowanie wystaw naukowo-edukacyjnych.

2. Agnieszka Mędrak – mgr filozofii, specjalizacja: technika i filozofia, programy edukacyjne.

3. mgr Marek Golonka – absolwent UJ, asystent muzealny, specjalizacja: historia motoryzacji.

4. mgr inż. Piotr Mazurkiewicz – fizyk, asystent muzealny, specjalizacja: projektowanie wystaw naukowo-edukacyjnych.

Zachęcamy do kontaktu, wszelkie informacje pod numerem:

(012) 421-12-42 w. 31

Muzeum Inżynierii Miejskiej w Krakowie

ul. św. Wawrzyńca 15

31-060 Kraków

tel. 421-12-42, 431-03-74

fax 421-12-42 wew. 30

muzeum@mimk.com.pl



## KOMUNIKATY REDAKCJI

### SPOTKANIA ŚRODOWE W IF UJ

IF UJ, PTF Sekcja Nauczycielska  
Kraków, ul. Reymonta 4, parter – sala 055

Uprzejmie informujemy, iż w roku szkolnym 2004/2005 w **środy o 16<sup>00</sup>** w Instytucie Fizyki UJ odbywać się będą wykłady i pokazy dla młodzieży szkół średnich, jak również dla gimnazjów.

Tytuły i terminy można będzie znaleźć na stronie internetowej:

**<http://www.if.uj.edu.pl/Foton/>**

---

---

W chwili druku tego zeszytu zaplanowano:

**7 XII 2005** – dr Teresa Jaworska-Gołąb – *O prądzie elektrycznym* (dla gimnazjalistów)

**14 XII 2005** – dr Dagmara Sokołowska – *Jak to działa – czyli fale elektromagnetyczne w domu* (dla licealistów)

**21 XII 2005** – *Popołudnie z fizyką* – wykład z pokazami dla szerokiej publiczności

**11 I 2006** – dr Dagmara Sokołowska – *Tarcie* (dla licealistów)

**1 III 2006** – dr hab. Barbara Blicharska – *Jak zaglądnąć do wnętrza człowieka* (dla licealistów)

**22 III 2006** – dr Teresa Jaworska-Gołąb – *Fizyka w kuchni* (dla gimnazjalistów)

---

---

**Uczestnictwo w wykładach wyłącznie po zgłoszeniu telefonicznym:  
663 55 63 bądź 663 56 77, lub za pośrednictwem e-mail: [foton@if.uj.edu.pl](mailto:foton@if.uj.edu.pl)**

Polecamy lekturę bratnich czasopism:

