

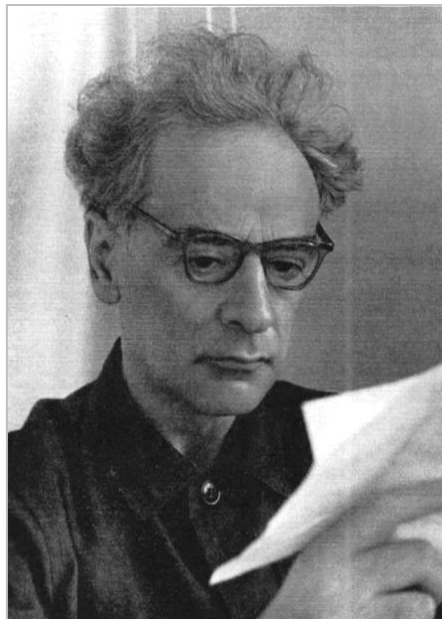
Foton

118
Jesień
2012

Pismo dla nauczycieli i studentów fizyki oraz uczniów

INSTYTUT FIZYKI  UNIWERSYTET JAGIELLOŃSKI
SEKCJA NAUCZYCIELSKA POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO

Bozon Higgsa znaleziony
Fizyka niewidzialności
Lew Landau - mistrz
Reaktory jądrowe lekkowodne



Lew Dawidowicz Landau (1908–1968) czyta zawiadomienie
o przyznaniu Nagrody Nobla (1962)



Pułapki przy przekazywaniu wiedzy

Już od kilku dziesięcioleci psychologowie i dydaktycy głoszą, że nauka jest wtedy skuteczna, kiedy uczeń sam odkrywa prawdy. Stąd bierze się powódzenie tzw. aktywnych metod nauczania. Bierne przekazywanie wiedzy jest wręcz w czambuł potępiane. Tymczasem praktyka w większości szkół jest zupełnie inna. Jednym z powodów jest nieprzygotowanie nauczycieli do aktywnego nauczania. Nie jest to jednak najważniejszy powód. *Gros* wiedzy musi być podane uczniom, przekazane. Uczniowie nie mogą samodzielnie odtworzyć dorobku stuleci i generacji naukowców, bo ani nie ma na to ani czasu, ani uczniowie nie są do tego przygotowani. Tymczasem zamiast dyskredytować tzw. bierne nauczanie należy podczas studiów wyposażyć nauczycieli w możliwie głębokie zrozumienie fizyki oraz sztuki aktywnego intelektualnie prowadzenia ucznia drogą zapoznawania się z prawami fizyki. Na tej drodze czyhają pułapki, ponieważ jest to przekazywanie wiedzy nawet nie z drugiej ręki, tylko z kolejnej. Nauczyciel sam pobierał nauki od kogoś na uczelni, kto też nie sam dokonał wykładanych przez siebie odkryć. Rodzi się problem deformacji informacji i problem tego, co jest uważane za zrozumiałe. Zrozumiałe w sensie zadowolające umysł, spójne z posiadaną już wiedzą, dające poczucie równowagi, zadowolenia.

Niech zilustruje to przykład podany w PAUZie (czerwiec 2012) przez profesora Andrzeja Białasa. Otóż starożytni Grecy (Pappos) tłumaczyli sześciokątny kształt komórek plastrów miodu jako efekt optymalizacji pewnego problemu matematycznego, zaś przekaz tego został następnie przez Rzymianina Pliniusza zinterpretowany istnieniem sześciu nóg u pszczół. Zapewne i Pliniusz i jego czytelnicy byli usatysfakcjonowani tłumaczeniem i mieli wrażenie rozumienia. Ten drastyczny przykład pokazuje, jakie niebezpieczeństwa czyhają, gdy wiedza jest przekazywana przez pośredników.

Nie jest to problem wydumany. Skąd się biorą nieporozumienia pomiędzy autorami podręczników szkolnych a naukowcami-recenzentami? Autorzy nauczyciele uważają, skąd inąd słusznie, że oni lepiej wiedzą, co uczeń może zrozumieć, i że ich, nauczycieli, prezentacja wiedzy jest lepsza. Naukowcy jednak „takiego” rozumienia czasami nie mogą zaakceptować.

Wracając do początku rozważań: osiągnięcie odpowiedniej równowagi pomiędzy aktywnym nauczaniem wiedzy a jej przekazywaniem jest prawdziwą sztuką. Sztuką jest pobudzić intelektualnie słuchacza tak, by z przewodnikiem-nauczycielem aktywnie podążał drogą odkrywców. Trzeba naśladować Sokratesa. W jesiennym *Fotonie* oferujemy Państwu cały szereg interesujących i pożytecznych artykułów, także w tej materii.

Z.G-M



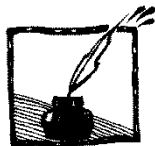
Contents

Traps in a knowledge transfer <i>Zofia Gołąb-Meyer</i>	1
Fuel cycle in light water reactors <i>Marcin Buchowiecki</i>	4
The physics of invisibility <i>Katarzyna Ostasiewicz</i>	13
Higgs particle discovered? <i>Krzysztof Fiałkowski</i>	27
Waves reflection on the boundary of media <i>Jerzy Ginter</i>	33
Lew D. Landau and his school of theoretical physics <i>Maria Pawłowska</i>	43
One problem in physics from <i>Matura</i> (high-school final exam) 2012 <i>Jadwiga Salach</i>	54
Students' misconception about seeing <i>Marcin Braun</i>	60
Risky physics teaching <i>Barbara Sagnowska</i>	65
Annual awards 2012 for physics teachers of Polish Physics Society	68
What I like most in my profession physics teacher <i>Zenona Stojecka, Adam Bartczak</i>	69
The 3 rd Meeting of high school physics clubs <i>Stanisław Bednarek</i>	70
What to read. <i>American Prometheus: The Triumph and Tragedy of J. Robert Oppenheimer</i>	73
The <i>Fotons'</i> contest. „Bright waves” problem from IYPT 2012.....	74
Physics students are helping in preparation for the final state exam in physics <i>Daniel Dziob</i>	75
The student conference in Vilnius Open Readings <i>Mariusz Tarnopolski</i>	76
The editor PWN project „Physics is interesting”	78



Spis treści

Pułapki przy przekazywaniu wiedzy <i>Zofia Gołęb-Meyer</i>	1
Cykl paliwowy reaktorów jądrowych lekkowodnych <i>Marcin Buchowiecki</i>	4
Fizyka niewidzialności <i>Katarzyna Ostasiewicz</i>	13
„Boska cząstka” odkryta? <i>Krzysztof Fiałkowski</i>	27
Odbicie fali od granicy ośrodków <i>Jerzy Ginter</i>	33
Lew D. Landau i jego szkoła fizyki teoretycznej <i>Maria Pawłowska</i>	43
Zadanie z mechaniki w arkuszu maturalnym <i>Jadwiga Salach</i>	54
Co znaczy widzieć – błędne wyobrażenia uczniów <i>Marcin Braun</i>	60
Uczenie fizyki, czyli stąpanie nad przepaścią <i>Barbara Sagnowska</i>	65
Nagrody dydaktyczne PTF w roku 2012.....	68
Co lubię w swoim zawodzie <i>Zenona Stojecka, Adam Bartczak</i>	69
III Festiwal Szkolnych Kół Fizycznych w Łodzi <i>Stanisław Bednarek</i>	70
Co czytać. <i>Amerykański Prometeusz, triumf i tragedia Roberta Oppenheimera</i>	73
Konkurs Redakcji <i>Fotonu</i> „Jasne fale”	74
Sprawozdanie z warsztatów „Ostatni dzwonek przed maturą z fizyki i astronomii” <i>Daniel Dziob</i>	75
Konferencja studencka w Wilnie Open Readings <i>Mariusz Tarnopolski</i>	76
Projekt pwn.pl „Fizyka jest ciekawa”	78



Cykl paliwowy reaktorów jądrowych lekkowodnych

Marcin Buchowiecki

Zakład Fizyki Molekularnej, Uniwersytet Szczeciński

1. Wstęp

W związku z rozwojem polskiej energetyki jądrowej ważnym zagadnieniem jest zapewnienie dostaw paliwa dla reaktora jądrowego oraz postępowanie ze użytym paliwem jądrowym. Oba te zagadnienia są etapami tzw. cyklu paliwowego obejmującego cały cykl życia paliwa jądrowego (uranu w odpowiedniej formie), który składa się kolejno z:

1. wydobycia (poprzedzonego identyfikacją złóż) i przeróbki rud uranu,
2. produkcji paliwa jądrowego i umieszczenia go w elementach paliwowych,
3. procesów zachodzących w reaktorze,
4. czasowego składowania zużytego paliwa,
5. recyklingu (etap opcjonalny),
6. postępowania z odpadami radioaktywnymi.

Wszystkie te etapy są wspólne dla dowolnego typu reaktora jądrowego, jednak wszystkie reaktory proponowane Polsce (np. francuskiej firmy AREVA) należą do grupy reaktorów, w których chłodziwem oraz spowalniczem neutronów jest lekka woda (H_2O). Lekką wodę odróżnia się od ciężkiej (D_2O), w której atomy „zwykłego” wodoru (1H) są zastąpione atomami deuteru – cięższego izotopu wodoru. Spowalnianie neutronów jest kluczowym zjawiskiem w działaniu reaktora, ponieważ rozszczepienie uranu, będące zjawiskiem generującym energię w reaktorze w postaci ciepła, wymaga neutronów o odpowiedniej energii tzw. neutronów termicznych.

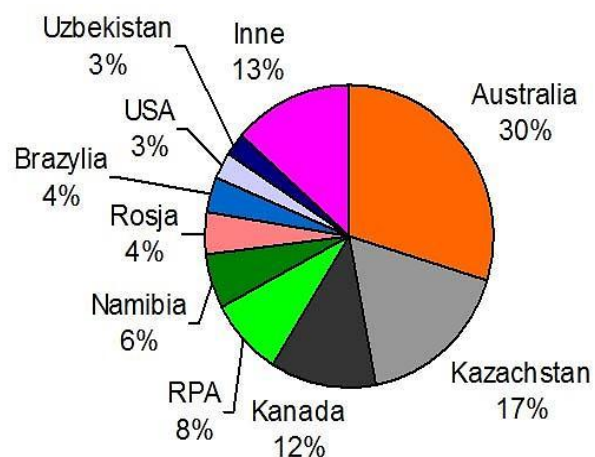
2. Zasoby uranu i produkcja żółtego ciasta (*yellow cake*)

Uran jest metalem i podobnie jak większość innych metali występuje w przyrodzie w postaci tlenków. Głównymi rudami uranu są uraninit (rys. 1) oraz blenda uranowa (zwana też smolistą ze względu na wygląd podobny do smoły). Uran jest pierwiastkiem dość rozpowszechnionym w skorupie ziemskiej (2–3 gramy na tonę) – jest go 40 razy więcej niż srebra i 500 razy więcej niż złota. Ogromne ilości uranu, które szacuje się na miliardy ton zawarte są w wodzie oceanicznej, jednak ze względu na niską koncentrację pozyskiwanie uranu z tych zasobów nie jest obecnie opłacalne.



Rys. 1. Uraninit z kopalni w Kowarach

Wydobycie danych zasobów uranu jest zdeterminowane czynnikami ekonomicznymi. Z tego powodu eksploatowane są stosunkowo bogate złoża w krajach o dużych zasobach. Największe zasoby uranu posiadają następujące kraje: Australia, Kazachstan i Kanada (rys. 2). W Polsce także występuje uran, ale w ilościach znacznie mniejszych niż w wyżej wspomnianych krajach i nie opłaca się go obecnie wydobywać, gdyż kupno paliwa jest tańsze. Krajowy uran wydobywano do 1973 roku – dzisiaj można zwiedzać kopalnię uranu w Kowarach (Sudety).



Rys. 2. Kraje o największych zasobach uranu na świecie

Przy okazji omawiania zasobów uranu pojawia się kwestia dostaw paliwa i pytanie, na jaki czas wystarczą zidentyfikowane oraz niezidentyfikowane jeszcze zasoby. Wiele z krajów będących w posiadaniu znaczących zasobów uranu jest dla Polski bezpiecznymi partnerami, co jest ważne w kontekście szeroko dyskutowanego w kraju problemu bezpieczeństwa energetycznego. Według danych szacunkowych komisji Parlamentu Europejskiego z 2008 roku, znane zasoby uranu wystarczą na 300 lat. Polskie zasoby rozpoznane i prawdopodobne prof. H.M. Prasser (ETH, Szwajcaria) oszacował na ponad 600 lat dla mocy reaktorów równej 1000 MW.

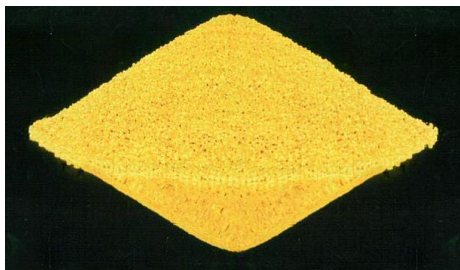
Ponadto ciągle odkrywane są nowe złoża, a rozwój technologii zapewni dostawę paliwa dla całego świata na co najmniej kilka tysięcy lat. Reaktory IV generacji (zbiorecza nazwa dla kilku rozwijanych obecnie typów reaktorów jądrowych) będą mogły wykorzystywać zużyte paliwo z reaktorów obecnie eksploatowanych oraz pozostały z procesu wzbogacania zubożony uran (patrz część 3 artykułu). Innym dodatkowym źródłem paliwa mogą być zasoby niekonwencjonalne, czyli o bardzo niskiej zawartości uranu oraz takie, dla których uran jest produktem ubocznym (wydobycie miedzi, fosforanów, węgla).

Warto także wspomnieć, że ewentualna kontynuacja obecnego trendu wzrostowego cen paliwa jądrowego (spowodowanego zwiększającym się popytem) nie jest zagrożeniem, ponieważ cena paliwa jest bardzo niewielką częścią kosztu energii z elektrowni jądrowej. Jeżeli przyjąć cenę energii na 15 gr/kWh, to koszt paliwa wynosi około 0,5 gr/kWh.

Obecnie działają kopalnie odkrywkowe, podziemne oraz takie, w których rudę uranu wymywa się czynnikiem rozpuszczającym. Pewną ilość uranu uzyskuje się też jako produkt uboczny w kopalniach miedzi i srebra (np. w Australii).

Po wydobyciu rudy uranu pierwszym etapem jest oddzielenie rudy sterylnej (zawierającej znikome ilości uranu). Sam uran nie wykazuje istotnej promieniotwórczości jednak produkty jego rozpadu wykazują znaczącą promieniotwórczość, dzięki temu można odnaleźć złoża uranu badając radioaktywność na powierzchni ziemi. Pojawia się jednak zagadnienie ochrony radiologicznej pracowników kopalni, przykładowo kopalnia musi być odpowiednio wentylowana, tak aby usunąć radioaktywny gaz radon.

Kolejnym etapem jest kruszenie i mielenie rudy aż do uzyskania zawiesiny wodnej w celu uwolnienia minerału zawierającego uran. Następnie zawiesinę poddaje się obróbce zwanej koncentracją – tlenki uranu wymywa się, otrzymany roztwór oczyszcza i otrzymuje się produkt końcowy tzw. *yellow cake* (żółte ciasto, rys. 3). *Yellow cake* jest postacią uranu zdatną do transportu – jest to substancja stała koloru żółtego (głównie mieszanina tlenków uranu), która dzięki procesowi oczyszczenia z izotopów innych pierwiastków nie wykazuje istotnego poziomu promieniotwórczości.

Rys. 3. *Yellow cake*

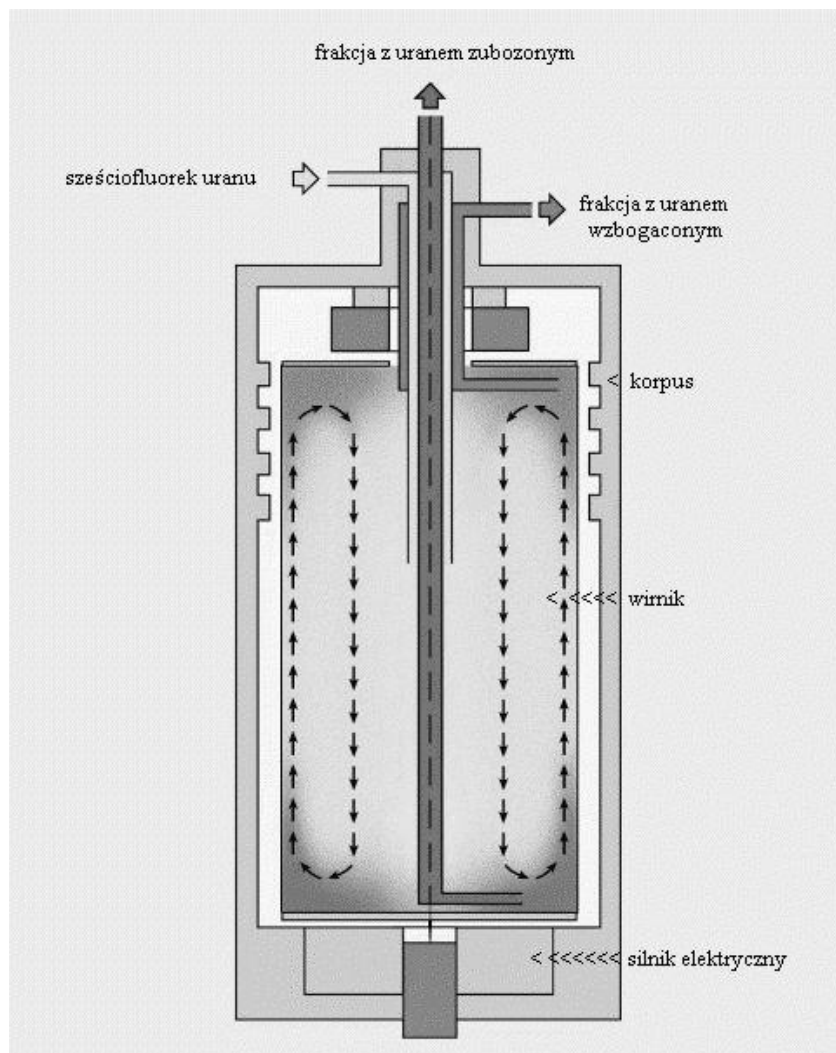
3. Produkcja paliwa jądrowego

Yellow cake jest produktem wyjściowym do wytwarzania paliwa jądrowego. Zawiera on głównie izotop 238 uranu (U^{238}), podczas gdy materiałem rozszczepialnym jest uran 235 (U^{235}), którego zawartość w uranie naturalnym to ok. 0,7%. W reaktorach lekkowodnych używa się uranu wzbogaconego do ok. 4% aby zapewnić samorzutne podtrzymanie reakcji łańcuchowej rozpadu jąder uranu.

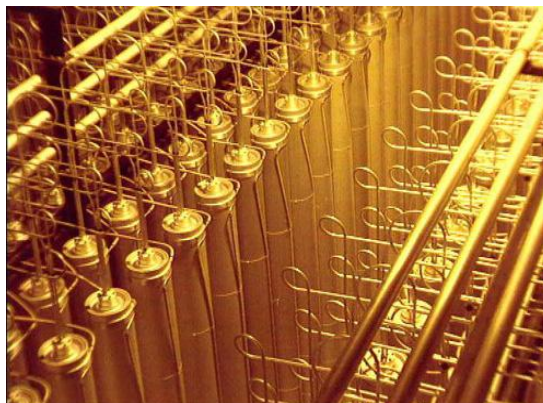
Proces wzbogacania przebiega w fazie gazowej, dlatego musi być poprzedzony konwersją uranu do odpowiedniej formy, którą jest sześćfluorek uranu (UF_6). Jest on bezbarwnym ciałem stałym przechodzącym w stan gazowy w temperaturze $56^\circ C$. Konwersja jest procesem dwuetapowym – najpierw w procesie hydrofluorynacji pod działaniem wodoru i fluorowodoru w temperaturze $500^\circ C$ otrzymuje się czterofluorek uranu (UF_4 , zielone ciało stałe), a następnie w temperaturze $1500^\circ C$ przeprowadza się dalszą fluorynację do UF_6 pod działaniem gazowego fluoru. Największe zakłady konwersji do UF_6 znajdują się w Rosji, USA, Kanadzie oraz Francji.

UF_6 poddaje się wzbogacaniu wykorzystując niewielką różnicę w masach cząsteczki zawierającej izotop U^{235} i U^{238} . Jako, że jest to ciągle cząsteczka o takim samym składzie chemicznym, nie ma możliwości wykorzystania metod chemicznych. Większość uranu wzbogaca się używając wirówek o prędkości obrotowej rzędu dziesiątek tysięcy obrotów na minutę. Proporcjonalna do masy cząsteczki siła odśrodkowa sprawia, iż większa koncentracja rozszczepialnego lżejszego izotopu występuje bliżej osi wirówki, natomiast cięższy izotop gromadzi się głównie bliżej obwodu wirówki (uran zubożony). Niezwykle duże siły niezbędne podczas wirowania ze względu na bardzo małą różnicę mas wymuszają produkcję wirówek z materiałów znacznie bardziej wytrzymałych niż stal, takich jak włókno węglowe. Poza prędkością wirowania, problemem jest to, że przy osi wirówki skąd powinien być pobierany wzbogacony gaz jego ilość, ze względu na działanie siły odśrodkowej, jest bliska zera, wymusza to konieczność pobierania go w pewnej odległości od jej osi. Wirówki mają postać długich cylindrów, w celu wykorzystania zjawiska konwekcji. Dzięki gra-

dientowi temperatury wytwarzanemu przez silnik znajdujący się na dole wirówki, w górnej jej części jako chłodniejszej gromadzi się gaz o większej gęstości i stąd jest właśnie pobierany wzbogacony produkt (rys. 4a). Z wirówki otrzymujemy produkt wzbogacony w niewielkim stopniu, co powoduje, że proces ten należy wielokrotnie powtarzać aż do uzyskania żądanego stopnia wzbogacenia. Wymusza to konstrukcje zestawów wielu sprzężonych ze sobą wirówek (rys. 4b). Z procesu wzbogacania pozostaje uran zubożony do zawartości 0,2–0,3% U235. Największe zakłady wzbogacające uran znajdują się w Rosji, Francji oraz USA.



Rys. 4a. Budowa wirówki do wzbogacania UF_6



Rys. 4b. Zestaw sprzężonych wirówek

Ostatnimi etapami produkcji paliwa są konwersja sześćfluorku UF_6 do dwutlenku uranu UO_2 (pod działaniem wody i wodoru) i produkcja ceramicznych pastylek przez spiekanie w temperaturze $1700^\circ C$. Jako paliwo stosuje się uran w postaci UO_2 ze względu na obojętność chemiczną względem wody i powietrza. Cylindryczne pastylki o wysokości 10 mm i średnicy 8 mm umieszcza się w szczelnie zaspawanych prętach paliwowych, które z kolei jako część tzw. elementów paliwowych tworzą rdzeń reaktora jądrowego (rys. 5).



Rys. 5. Element paliwowy reaktora lekkowodnego

Jako ilustrację kaloryczności paliwa jądrowego można przytoczyć fakt, że jedna pastylka o masie ok. 5 g jest równoważna energetycznie tonie węgla. Ze względu na tak dużą wydajność, ilość paliwa zużywanego przez elektrownię jądrową jest wielokrotnie mniejsza niż przez elektrownię konwencjonalną, czego konsekwencją jest niewielka ilość zużytego paliwa, które trzeba poddawać obróbce i następnie składować.

4. Zużyte paliwo jądrowe

W reaktorze jądrowym znajduje się ok. 100 ton uranu (przy mocy 1300 MW), z czego jedną trzecią lub jedną czwartą wymienia się corocznie na nowe paliwo. Ilość zużytego paliwa jest zatem bardzo niewielka objętościowo, szczególnie biorąc pod uwagę dużą jego gęstość.

W trakcie pracy reaktora jądrowego w paliwie pojawiają się izotopy wielu pierwiastków chemicznych, z których pewna ich ilość jest promieniotwórcza. Zatem zużyte paliwo jest silnie promieniotwórczą mieszaniną, która powinna być poddana odpowiedniej przeróbce i ewentualnemu recyklingowi do innego rodzaju paliwa zwanego MOX (Mixed OXides – mieszane tlenki). Paliwo bezpośrednio wyjęte z reaktora ma temperaturę ponad 100°C i umieszczane jest w basenie wypełnionym wodą niedaleko reaktora. W basenie tym paliwo chłodzi się i zmniejsza swoją radioaktywność do momentu, gdy bezpieczny stanie się jego transport, proces ten jest długotrwały gdyż w paliwie tym ciągle zachodzą reakcje rozpadu jąder.

Gdy zużyte paliwo nie jest poddawane recyklingowi jest ono uważane za odpad i przed ostatecznym zabezpieczeniem poddawane jest chłodzeniu przez dziesiątki lat. W tej sytuacji cykl paliwowy nazywamy otwartym (postępują tak np. Finlandia, Szwecja i USA). Jeżeli paliwo będzie poddane procesowi recyklingu, chłodzi się je przez kilka lat przed dalszą przeróbką, a cykl paliwowy nazywamy zamkniętym (postępują tak np. Rosja, Francja i Japonia).

W chwili obecnej całe światowe zapotrzebowanie na przeróbkę paliwa pokrywa pięć fabryk znajdujących się we Francji, Rosji, Wielkiej Brytanii, Japonii oraz Indiach. Postępowanie ze zużytym paliwem zostanie omówione na przykładzie francuskiego zakładu znajdującego się na półwyspie La Hague w Normandii.

Pręty paliwowe po wyjęciu z basenu (rys. 6) cięte są na około 35-milimetrowe kawałki, które rozpuszcza się w kwasie azotowym. Jeżeli uran i pluton mają być odzyskane, oddziela się je w procesie technologicznym zwanym PUREX (Plutonium – URanium Extraction). Pozostałość po ekstrakcji poddaje się zeszkleniu – mieszanie ze szkłem następuje w temperaturze 1700°C, uzyskaną mieszaninę wlewa się do kanistrów, chłodzi i na koniec sprawdza zanieczyszczenie powierzchni. W tej formie odpady są przechowywane i transportowane (rys. 7).



Rys. 6. Basen z pojemnikami do przechowywania zużytego paliwa (All about nuclear energy, AREVA)



Rys. 7. Przeladunek pojemnika ze zużytym paliwem w porcie w Cherbourgu (All about nuclear energy, AREVA)

Zakład w La Hague zajmuje się także przechowywaniem francuskich odpadów radioaktywnych, w przypadku przerobu paliwa pochodzącego z innych

krajów przerobione paliwo odsyłane jest do zleceniodawcy (z usług tego zakładu korzystają np. Niemcy).

Jeżeli zużyte paliwo ma być poddane recyklingowi w celu uzyskania paliwa MOX odzyskany uran i pluton przesyła się do fabryki produkującej MOX. Dwie fabryki Melox w Marcoule (Francja) w roku 2006 pokryły 85% światowego zapotrzebowania na MOX. Paliwo MOX jest mieszaniną 93% dwutlenku uranu (UO_2) i 7% dwutlenku plutonu (PuO_2), a element paliwowy MOX jest taki sam jak dla paliwa uranowego (UOX) – także procesy zachodzące w reaktorze są podobne. Uran do produkcji tego paliwa może być naturalny, zubożony z procesu wzbogacania lub odzyskany podczas przerobu zużytego paliwa. Eksperyment w La Hague dowiódł, że zużyte paliwo MOX można ponownie poddać procesowi recyklingu.

Pojemnik do przewozu paliwa widoczny na rys. 7 podczas przeładunku w porcie w Cherbourgu (Francja) wykonany jest ze stali oraz posiada warstwę ekranującą promieniowanie. Ciekawostką jest, że ze względu na ciężar paliwa niektóre pojemniki okazują się za ciężkie do transportu po drogach i muszą być przewożone koleją lub drogą wodną. Pojemniki takie przechodzą rygorystyczne testy na wypadek nieprzewidzianych zdarzeń. Są to próby wytrzymałościowe podczas spadku swobodnego pojemnika z wysokości 9 m, spadku na stalowy pręt z wysokości 1 m, wytrzymałości na ogień o temperaturze $800^{\circ}C$ przez 30 minut oraz zanurzenie w wodzie na głębokość 200 m (podobne testy przechodzą pojemniki w innych krajach).

W Polsce istnieje już składowisko odpadów radioaktywnych (nisko- i średnioaktywnych) w Różanie (www.zuop.pl), ponieważ odpady powstają z eksploatacji reaktorów badawczych, zastosowań medycznych oraz przemysłowych i niezależnie od budowy elektrowni jądrowej potrzebne będzie nowe składowisko (także dla odpadów wysokoaktywnych). Jest to zatem dobry moment do przeanalizowania losów odpadów z polskiej elektrowni jądrowej. Zużyte paliwo z elektrowni jądrowej będzie mogło być wykorzystane w przyszłości w reaktorach IV generacji a odpady, zgodnie z planami krajów o długim doświadczeniu z energetyką jądrową, powinny być składowane w specjalnych składowiskach głęboko pod powierzchnią ziemi. Działające już składowiska tego typu istnieją w Skandynawii, a wiele kolejnych jest w fazie testów lub też w trakcie procesu zatwierdzania do użytku.

Źródła:

Rys. 1 – <http://www.atom.edu.pl/index.php/ej-w-polsce/wczoraj/wydobycie-uranu-zaklady-r-1.html>

Rys. 2 – <http://elektrownia-jadrowa.pl/Zasoby-i-wydobycie-uranu-w-Polsce-i-na-swiecie.html>

Rys. 3 – <http://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Plik:Yellowcake.jpg&filetimestamp=20050727063248>

Rys. 4a, b – <http://www.atom.edu.pl/index.php/technologie/cykl-paliwowy/konwersja-i-wzbogacanie.html>

Rys. 5 – <http://www.atom.edu.pl/index.php/technologie/cykl-paliwowy/produkcja-paliwa-i-recykliacja.html>



Fizyka niewidzialności

Katarzyna Ostasiewicz

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

„...widzialność zależy od akcji, którą widzialne ciała wywierają na światło. (...) ciało albo absorbuje światło, albo łamie je i odbija, albo robi te wszystkie trzy rzeczy naraz. Jeżeli ani nie absorbuje, ani nie łamie, ani nie odbija światła, wtedy nie jest widzialne”.

Cuda niewidy

Słowa te napisane zostały pod koniec XIX wieku. Herbert George Wells, jeden z prekursorów gatunku *science fiction*, pisarz, który w latach młodości studiował biologię, fizykę i geologię, włożył je w usta szalonego naukowca Griffina. Po czterech latach żmudnych badań Griffinowi udało się wynaleźć „maszynę gazową”, powodującą niewidzialność. Pierwszy eksperyment na żywym stworzeniu – kocie – powiódł się niecałkowicie. Zniknął mianowicie niemal cały kot, prócz *tapetum*, odbijającej światło warstwy wewnątrz kocich oczu. Po dziewiętnastowiecznej Anglii błąkały się zatem nie tylko uśmiechy bez kota (z Cheshire – bohatera *Przygód Alicji w krainie czarów*), ale i samotne kocie oczy. Eksperyment przeprowadzony przez Griffina na samym sobie powiódł się lepiej, o ile za sukces uznać można życie pełne udręk, które stały się udziałem nieszczęsnego niewidzialnego naukowca.

Choć to Wells prawdopodobnie jako pierwszy oparł swoje fantazje na – jakkolwiek cienkiej – a jednak naukowej podstawie, marzenia o niewidzialności obecne były w mitologiach i opowieściach dla najmłodszych już od wieków. Wraz z latającym dywanem, siedmiomilowymi butami i samonakrywającym się stolikiem, czapka-niewidka towarzyszyła dorastaniu milionów dzieci. Obecnie rolę czapki przejmuje peleryna-niewidka, zyskująca na popularności dzięki poczytnej serii książek o młodym czarodzieju, Harrym Potterze. W naturze ludzkiej leży, by próbować realizować dziecięce marzenia, by sięgać poza nie-naruszalne – wydawałoby się – granice rzeczywistości. Również i niewidzialność stała się wyzwaniem, podjętym przez człowieka zarówno w praktycznym jak i pozapraktycznym celu.

Przyjrzyjmy się bliżej próbom, jakie w ostatnich czasach podjęli naukowcy w celu okiełznania (nie)widzialności.

Fizyka (nie)widzialności

Każdy przedmiot, który nie emituje własnego światła, jest widzialny tylko poprzez wpływ, jaki wywiera na padające na nie promieniowanie. Na przykład Słońce wysyła w przestrzeń promieniowanie powstające w jego wnętrzu na

skutek reakcji termojądrowych, natomiast Księżyc widoczny jest na niebie tylko dzięki temu, że rozprasza¹ światło słoneczne. Barwne przedmioty odbijają światło o określonej długości fali, odpowiadającej ich barwom, a pochłaniają kolory dopełniające. Błyszczące powierzchnie odbijają padające promienie w jednym kierunku, natomiast powierzchnie matowe – rozpraszają je. Coś, co pochłaniałoby całe padające na nie światło i nie emitowało wtórnego promieniowania w zakresie widzialnym, byłoby postrzegane jako czarny cień na otaczającym tle. Choć ludzkie oko jest wrażliwe na promieniowanie tylko z zakresu długości fal mniej więcej od 400 do 700 nanometrów, to pojęcie „widzialności” czy „niewidzialności” można rozszerzyć na inne zakresy widma promieniowania elektromagnetycznego. I tak kamery podczerwieni pomagają „widzieć” promieniowanie o długościach fali większych od światła widzialnego, czyli promieniowanie termiczne; liczniki Geigera wykrywają wysokoenergetyczne fotony promieniowania gamma, a rozmaite inne detektory wrażliwe są na różne częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego.

Oko radaru

Pierwsze nowoczesne próby uczynienia przedmiotów niewidzialnymi dotyczyły samolotów. Jak niestety większość wynalazków człowieka, niemal od zarania swojej historii latające maszyny wykorzystywane były do celów wojennych. Pierwszy, trwający 12 sekund kontrolowany przelot samolotu napędzanego silnikiem spalinowym, udało się wykonać w 1903 roku braciom Wright. Zaledwie osiem lat później z nieba poczęły spadać bomby. Pierwsze cztery, ręcznie wyrzucone z pokładu samolotu małe bomby, spadły na głowy tureckich żołnierzy w trakcie wojny Włoch z Imperium Osmańskim. Od tej chwili rozwój lotnictwa bojowego następował w zawrotnym tempie, a w czasie drugiej wojny światowej to właśnie w powietrzu odbyła się cała słynna „bitwa o Anglię”.

Wobec liczebnej przewagi niemieckiej nadzieją Anglików była sieć stacji radarowych, wzniesionych wzdłuż południowego i wschodniego wybrzeża kraju – Chain Home (Łańcuch Obrony Kraju). Radary wysyłały w przestrzeń fale radiowe i rejestrowały promieniowanie odbite od nadlatujących samolotów znajdujących się w odległości ponad 160 km.

Coraz lepsza technologia radarowa zapoczątkowała trwający po dziś dzień wyścig zbrojeń w tym zakresie. Aby „oślepić” radar należało skonstruować urządzenie, które albo pochłaniałoby padające na nie promieniowanie, albo je rozpraszało we wszystkich możliwych kierunkach, znacznie osłabiając sygnał. Współcześnie w arsenalach wielu krajów znajdują się samoloty wykonane w tak zwanej technologii *stealth* (ang. skradać się). Pokrycie tych maszyn dobiera się specjalnie tak, by pochłaniało ono jak największą część padających na nie fal radarowych. Najskuteczniejsze jednakże jest zastosowanie takiej geome-

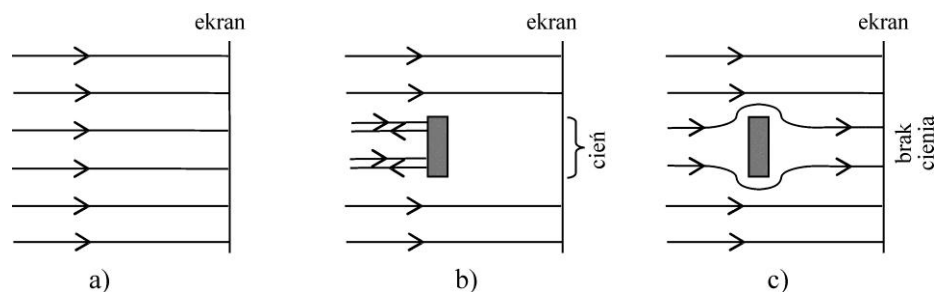
¹ Czyli odbija w różnych kierunkach: jest to tzw. „odbicie rozproszone”.

trii, która zmniejszałaby powierzchnię odbicia i powodowałaby odbijanie fal w kierunku innym niż ten, z którego przyszły. Służą temu płaskie, krzywoliniowe kształty. Najbardziej znanym przykładem takiego samolotu jest słynny „Duch”, amerykański bombowiec *B-22 Spirit*.

Zniknąć z „oczu” radaru jest stosunkowo prosto. Dlaczego? Zauważmy jeden ważny szczegół. Aby uczynić samolot niewidzialnym wystarczy sprawić, by nie docierał od niego żaden sygnał, świadczący o jego obecności. Znacznie trudniejsze są przypadki, gdy brak sygnału sam w sobie świadczy o obecności czegoś zakłócającego. Chodzi tu o cień.

Podstępny cień

Jeśli to my wysyłamy sygnały, jak w przypadku radaru czy nietoperza, kierującego się swoim zmysłem radiolokacyjnym, brak sygnału zwrotnego świadczy o braku obiektu. Jeśli jednak nastawiamy się na odbiór sygnału dochodzącego skądś zza obiektu – brak sygnału świadczy o jakiejś przeszkodzie, która stanęła mu na drodze (rys. 1a, b). W przypadku fal radiowych, będących podstawą działania radaru, nie dysponujemy żadnym na tyle silnym i stabilnym źródłem promieniowania gdzieś w górnych warstwach atmosfery, by zaniknięcie pochodzącego od niego sygnału mogło być interpretowane jako obecność czynnika zakłócającego. Inaczej rzecz się ma w przypadku promieniowania elektromagnetycznego o krótszych długościach fali, szczególnie z zakresu widzialnego.



Rys. 1. Widzialność przedmiotów, a) Światło pada na ekran przy nieobecności przeszkody, b) Światło pada na ekran w obecności przeszkody: powstaje cień, c) Światło „opływa” przeszkodę: brak cienia

Oko ssaków, w szczególności człowieka, wyewoluowało tak, by być wrażliwym na te długości fal elektromagnetycznych, które są najlepiej dostępne w świecie, który zamieszkujemy. Maksimum natężenia promieniowania słonecznego przypada na długość fali około 500 nm, co odpowiada barwie zielono-żółtej. Jednakże nic by nam nie przyszło z tego słonecznego promieniowania, gdyby coś mu przeszkodziło w wędrówce do powierzchni Ziemi. Tak się składa, że atmosfera naszej planety złożona jest z cząsteczek, które skutecznie zatrzymują promieniowanie nadfioletowe, natomiast światło z zakresu widzialnego

go przepuszczają w wysokim stopniu. Jednakże to wciąż jeszcze za mało, by cieszyć się błękitem nieba i widokiem siebie nawzajem. Gdyby atmosfera nie rozpraszała słonecznego światła czerń nieba nad nami urozmaicona byłaby tylko punktami gwiazd w nocy oraz tarczą słoneczną w dzień. Na powierzchni Ziemi widzielibyśmy tylko te strony przedmiotów, które byłyby zwrócone w stronę Słońca. W cieniu natomiast byłoby całkiem mroczno, o ile nie rozjaśniłoby go przypadkowe odbicie promieniowania od innych rzeczy. Dzięki temu, że światło z zakresu widzialnego doskonale rozpraszane jest na cząsteczkach atmosfery, dochodzi ono do naszych oczu z różnych kierunków i może być pochłaniane i odbijane przez przedmioty rozmaicie względem pierwotnego źródła – Słońca – usytuowane.

Aby stać się niewidocznym w zakresie światła widzialnego nie wystarczy nie być źródłem wtórnych – odbitych – sygnałów. Nie wolno też zdradzić się poprzez obecność cienia. Aby dany przedmiot nie rzucał cienia, musi w jakiś sposób zakrzywiać padające na nie promieniowanie świetlne (por. rys. 1c).

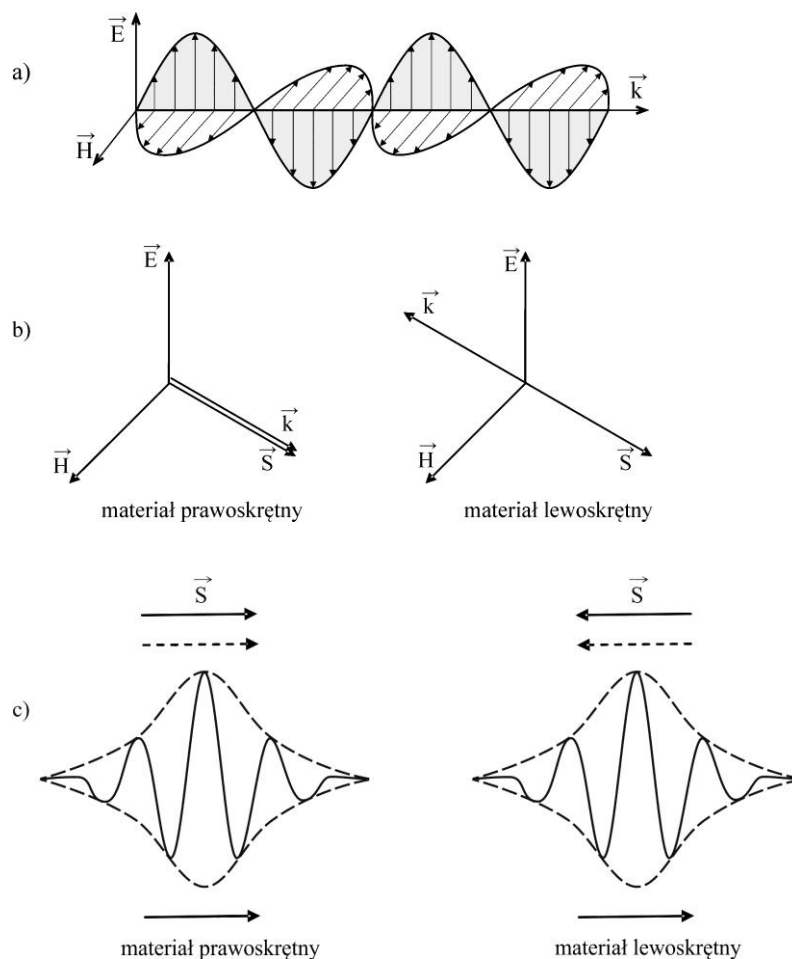
Po raz pierwszy idea materiału w tak nietypowy sposób zakrzywiającego promieniowanie pojawiła się w latach 60. ubiegłego wieku w artykule rosyjskiego fizyka, Wiktora Wiesiełago. Początkowo nie wzbudził on większego zainteresowania. Prawdopodobną przyczyną był prosty fakt, iż substancje takie w przyrodzie nie istnieją. Trzeba było poczekać, by nauka, od dawien dawna przekraczająca granice tego, co „naturalne”, zdecydowała się wkroczyć i na ten obszar.

Zanim jednakże przejdziemy do „elektrodynamiki materiałów z ujemnymi wartościami zarówno przenikalności elektrycznej jak i magnetycznej” (jak brzmiał tytuł pionierskiej pracy Wiesiełago), przypomnijmy pokrótce, jak promieniowanie elektromagnetyczne oddziałuje ze zwykłymi substancjami.

Światło i materia

Jak już wspominaliśmy, światło widzialne stanowi niewielki wycinek całego spektrum promieniowania elektromagnetycznego, czyli fal elektromagnetycznych. Fale te mają dwie składowe, wzajemnie do siebie prostopadłe i prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali – elektryczną i magnetyczną (rys. 2a). Energia fali zależy wprost proporcjonalnie od jej częstotliwości, czyli ilości oscylacji w określonym przedziale czasu. Dolną granicę stanowią fale radiowe, następnie mikrofałe, podczerwień, światło widzialne, nadfiolet, promieniowanie rentgenowskie i gamma, niosące największą energię.

Dopóki fala elektromagnetyczna rozchodzi się w próżni, jej prędkość równa jest słynnej stałej c , największej – zgodnie z teorią względności Einsteina – możliwej prędkości. Gdy fala wnika do ośrodka materialnego zmienia swoją prędkość. To, jak bardzo ją zmieni, zależy od elektromagnetycznych właściwości danego materiału.



Rys. 2. Fale elektromagnetyczne

- Pole elektromagnetyczne. Wektory natężenia pola elektrycznego (\vec{E}), natężenia pola magnetycznego (\vec{H}) i wektor rozchodzenia się czoła fali (\vec{k}) tworzą układ prawoskrętny;
- W materiałach prawoskrętnych wektor przepływu energii (\vec{S}) skierowany jest zgodnie z wektorem rozchodzenia się czoła fali (\vec{k}); w materiałach lewoskrętnych wektor przepływu energii (\vec{S}) skierowany jest przeciwnie do wektora rozchodzenia się czoła fali (\vec{k});
- W materiałach prawoskrętnych wektor prędkości fazowej (linia ciągła) skierowany jest zgodnie z wektorem prędkości grupowej (linia przerywana) i wektorem przepływu energii (\vec{S}); w materiałach lewoskrętnych wektor prędkości fazowej (linia ciągła) skierowany jest przeciwnie do wektora prędkości grupowej (linia przerywana) i wektora przepływu energii (\vec{S})

Właściwości te są z kolei określone przez dwie stałe: względną przenikalność elektryczną oraz względną przenikalność magnetyczną. Materia zbudowa-

na jest z cząsteczek, które posiadają określone właściwości elektryczne (ładunek) oraz magnetyczne. Jeśli weźmiemy dwa ładunki elektryczne, A i B, i umieścimy je w próżni w pewnej odległości od siebie, będą one ze sobą wzajemnie oddziaływały z siłą o określonej wartości. Jeśli te same ładunki przeniesiemy z próżni do ośrodka, który sam składa się z naładowanych cząstek, wówczas siła oddziaływania pomiędzy ładunkami A i B – nawet przy zachowanej takiej samej odległości – zmieni się. Istnienie innych ładunków w otoczeniu spowoduje ekranowanie tego oddziaływania, czyli – w najbardziej powszechnym przypadku – jego zmniejszenie. Względna przenikalność elektryczna jest właśnie miarą tego, ile razy siła oddziaływania elektrycznego w danej materii jest mniejsza od siły oddziaływania w próżni. Jest zatem również miarą tego, jak silnie ładunki elektryczne wewnątrz danej materii reagują na zewnętrzne pole elektryczne. Większość substancji charakteryzuje się dodatnią wartością przenikalności elektrycznej. Znany wyjątkiem są niektóre metale.

Elektrony walencyjne w metalach tworzą tak zwany gaz elektronów swobodnych. Gaz taki charakteryzuje się *częstością plazmową*, czyli jak gdyby „naturalną” (własną) częstością drgań, wykonywanych w nieobecności zewnętrznych sił wymuszających. O ile częstotliwość fali elektromagnetycznej nie przekroczy częstości plazmowej, drgania te na tyle skutecznie ekranują pole elektryczne fali, że nie pozwalają jej wnikać w głąb metalu, a wręcz wytwarzają pole skierowane przeciwnie do pola zewnętrznego. W rezultacie przenikalność elektryczna takiego metalu jest ujemna, i to tym bardziej ujemna, im dalej od częstości plazmowej. Opisuje to wzór: $\epsilon_{metal} = 1 - (\omega_{plazma}^2 / \omega^2)$, gdzie ϵ_{metal} oznacza przenikalność elektryczną, ω_{plazma} – częstotliwość plazmową, a ω – częstotliwość fali elektromagnetycznej. Jak widać, gdy częstotliwość fali jest mniejsza od ω_{plazma} ułamek w nawiasie jest większy od jedynki, a wynik odejmowania mniejszy od zera. Nie mogąc wnikać w głąb, promieniowanie ulega odbiciu od powierzchni metalu, a on sam uzyskuje charakterystyczny połysk.

Przejdźmy teraz do względnej przenikalności magnetycznej. Wielkość ta określa, jak zmienia się pole magnetyczne w przestrzeni wypełnionej danym materiałem w porównaniu do pola magnetycznego, jakie zaistniałoby w próżni – przy zachowaniu tych samych zewnętrznych źródeł pola magnetycznego. W odróżnieniu od elektrycznego odpowiednika, wartość przenikalności magnetycznej jest dla wszystkich substancji występujących w naturze dodatnia. Wynika to z faktu, iż nie istnieją – wedle dotychczasowej wiedzy – tak zwane monopole magnetyczne, punktowe, jednoimiennie „ładunki magnetyczne”, będące odpowiednikami swobodnych jednoimiennych ładunków elektrycznych. Choć istnieją teorie na temat obecności we wczesnych fazach ewolucji Wszechświata monopoli magnetycznych, to obecnie obserwować możemy jedynie dipole – w których jednemu z biegunów zawsze towarzyszy biegun odmienny. Jeśli przetniemy dipol magnetyczny na dwie części, w rezultacie otrzymamy nie dwa

monopole, ale... wciąż dwa dipole! Na krańcach obu części pojawiają się bowiem bieguny komplementarne. Zatem jeśli chodzi o magnetyzm, nie istnieje analog gazu elektronów swobodnych ani podobny mechanizm ekranowania pola magnetycznego.

Załamane światło

Iloczyn przenikalności elektrycznej i magnetycznej równy jest kwadratowi wielkości, która jest znacznie lepiej znana przeciętnemu nie-fizykowi niż same przenikalności. Wielkością tą jest współczynnik załamania światła. Mówi on, ile razy prędkość światła w danym ośrodku jest mniejsza od prędkości światła w próżni. Konsekwencją tej zmiany prędkości jest „załamanie” promienia światła na granicy dwóch ośrodków, co wyjaśnia nazwę współczynnika. Większość z nas pamięta proste szkolne doświadczenia, widok łyżeczki w szklance z wodą, która wydaje się załamana na powierzchni styku cieczy i powietrza. Być może pamiętamy też przepiękną wstęgę barw, na jakie rozszczepia białe światło zwykły pryzmat. Jeśli nie, na pewno każdy choć raz w życiu widział na niebie zjawisko opierające się na tych samych zasadach optycznych: tęczę.

Zarówno rozszczepienie światła przez pryzmat jak i zjawiskowa tęcza zawdzięczają swoje istnienie zależności przenikalności – a więc i współczynnika załamania – od częstotliwości fali. W próżni każda fala elektromagnetyczna, niezależnie od swojej długości, ma taką samą prędkość c . Jak już wspominaliśmy, wnikając do wnętrza materii fala spowalnia. Ale każda z częstotliwości spowalniana jest inaczej! W przypadku światła widzialnego oznacza to, że każda z barw podąża „swoją własną drogą”. Czasem całkiem dosłownie: z pryzmatu różne kolory wydostają się z powrotem do powietrza pod innymi kątami, co skutkuje rozszczepieniem. Tęcza także opiera się na tej samej zależności drogi, jaką podąża światło, od jego koloru. Tyle, że tym razem rolę pryzmatów odgrywają miliony drobniutkich kropelek wody, które unoszą się w powietrzu. Pamiętajmy o zależności przenikalności od częstotliwości fali elektromagnetycznej, gdyż okaże się ona sporą trudnością do pokonania przy próbach skonstruowania niewidzialnej peleryny.

Jeśli zarówno przenikalność elektryczna jak i magnetyczna są dodatnie, mamy do czynienia z dobrze nam znanymi z codziennego życia materiałami. Obowiązuje prawo Snelliusa, dotyczące załamania promienia świetlnego na granicy dwóch ośrodków, pryzmaty rozszczepiają, wypukłe soczewki skupiają, a wklęsłe rozpraszają światło. W przypadku, gdy przenikalność elektryczna jest ujemna, a magnetyczna dodatnia, jak we wspomnianym przykładzie niektórych metali, wówczas fale elektromagnetyczne nie są w stanie wniknąć w głąb takich materiałów – charakteryzują się one wysokim połyskiem i całkowitą nieprzezroczystością. A co by było w przypadku, gdyby obie przenikalności miały znak ujemny?

Ujemne załamanie?

Jeśli wiemy, ile wynosi kwadrat jakiejś liczby, wiemy również, ile wynosi jej wartość bezwzględna. Możliwe są jednak dwa znaki: dodatni i ujemny. Przykładowo, jeśli kwadrat pewnej wielkości równy jest 4, to ona sama równa jest +2 lub -2. Pamiętamy, że kwadrat współczynnika załamania równy jest iloczynowi przenikalności elektrycznej i magnetycznej. Wiemy, że dla wody iloczyn względnych przenikalności wynosi 1,77. Teoretycznie zatem, możliwe są dwie wartości współczynnika załamania: +1,33 lub -1,33. Ponieważ jednak obie przenikalności są dla wody wartościami dodatnimi, bez większego namysłu przyjmowany był zawsze znak dodatni współczynnika załamania. Łatwo udowodnić, że jest to wybór prawidłowy. Wystarczy przepuścić światło przez pryzmat lub soczewkę i pokazać, że faktycznie zachowuje się ono zgodnie z prawami optyki dla dodatniego współczynnika. Ale co by było, gdyby obie przenikalności były ujemne? Ich kwadrat przyjmuje wartość dodatnią, i znowu mamy dwie możliwości wyboru znaku. Czy również prawidłowe byłoby wybranie znaku dodatniego? Ponieważ pytanie to zostało postawione w czasie, gdy eksperymentalna weryfikacja współczynnika załamania dla takich niekonwencjonalnych substancji była niemożliwa, odpowiedź wymagała pewnych obliczeń.

Opisując – wówczas jedynie teoretyczny – przypadek takich substancji Wiktor Wiesiełago nazwał je „lewoskrętnymi”. W przypadku konwencjonalnych ośrodków wektory natężenia pola elektrycznego, natężenia pola magnetycznego i falowy (wskazujący kierunek i zwrot prędkości czoła fali) tworzą układ prawoskrętny, co wynika z podstawowych równań elektrodynamiki, równań Maxwella (i co widać na rys. 2a). Te same równania jednakże wskazują na to, że w przypadku, gdy ośrodek ma ujemne przenikalności: elektryczną i magnetyczną, wektory te tworzą układ lewoskrętny! Ponieważ w każdego rodzaju ośrodku wektor przepływu energii tworzy z wektorami natężeń pól układ prawoskrętny, wynika z tego, iż w ośrodkach lewoskrętnych energia płynie w kierunku przeciwnym do czoła fali (por. rys. 2b). Ta konkluzja wydawała się tak niefizyczna, że wielu naukowców negowało możliwość podobnego zachowania fali elektromagnetycznej, kwestionując wyniki pierwszych eksperymentalnych potwierdzeń istnienia materiałów lewoskrętnych. Aby lepiej zrozumieć, w czym tkwi problem, musimy dokonać rozróżnienia na prędkość fazową i prędkość grupową fali.

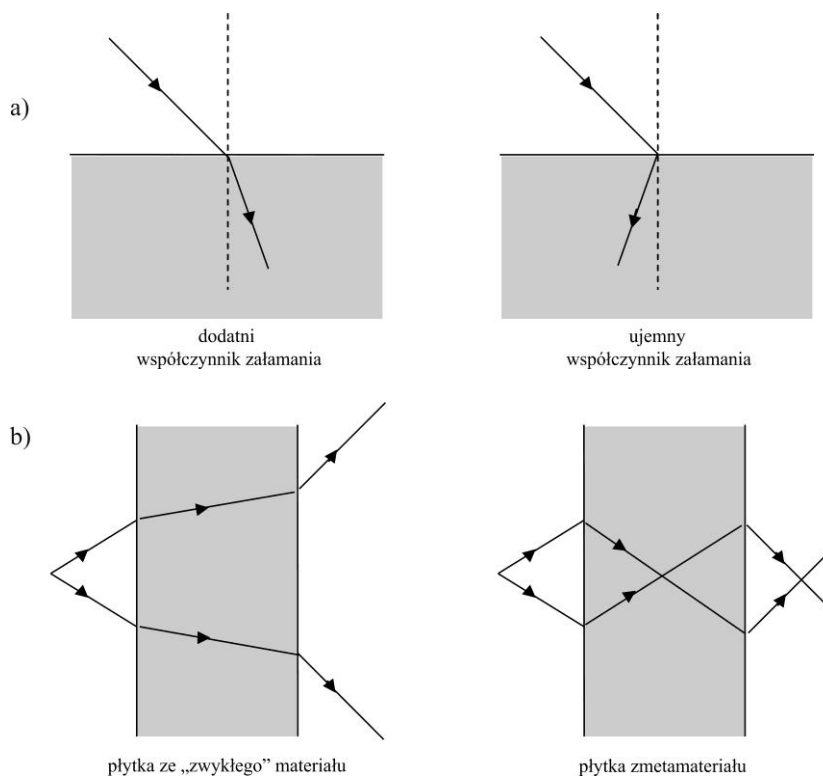
Tak zwana fala płaska, będąca rozwiązaniem równań Maxwella, na których opiera się elektrodynamika, rozciąga się w przestrzeni w nieskończoność, mając wszędzie taką samą amplitudę (por. rys. 2a). Jednakże, dowolna kombinacja fal płaskich jest również rozwiązaniem tych równań, przeważnie bardziej realistycznym. Dlaczego? Pojedyncza fala jest niezmienna w przestrzeni i w czasie, i nie może nieść ze sobą żadnej informacji. W rzeczywistości światło występuje raczej w formie impulsów, ograniczonych przestrzennie i czasowo. Przecież

w jednym miejscu jest jasno, w innym ciemno. A za chwilę może być na odwrót. Efekt takiego przestrzennego i czasowego zlokalizowania można osiągnąć nakładając na siebie wiele fal płaskich, różniących się częstotliwościami i fazami. Fale takie w większości miejsc wygaszają się wzajemnie, pozostawiając niezerową amplitudę jedynie w ograniczonym obszarze przestrzeni. Powstaje w ten sposób tak zwana *paczka falowa*. Pozwala ona uczynić paradoksalną falowo-korpuskularną dualność elektromagnetyzmu nieco bardziej zrozumiałą. Jak wiadomo, światło można traktować jako falę, co przejawia się w zjawiskach interferencji, dyfrakcji i innych podobnych, ale również jako zbiór cząstek, zwanych fotonami. To ostatnie zostało udowodnione przez Alberta Einsteina poprzez wyjaśnienie efektu fotoelektrycznego. Taki zwarty przestrzennie pakiet złożony z nieskończenie rozciągniętych fal stanowi pomost pomiędzy rozumieniem światła jako fali a koncepcją punktowej cząstki. Prędkość poruszania się paczki falowej nazywana jest *prędkością grupową*. Nie musi być ona taka sama jak prędkości frontów poszczególnych fal płaskich, z których się składa, czyli *prędkości fazowych*. W szczególnym przypadku materiałów lewoskrętnych prędkości fazowe skierowane są przeciwnie niż prędkość grupowa (rys. 2c). Stąd bierze się przeciwny zwrot wektora przepływu energii – zawsze zgodnego z prędkością grupową, i wektora falowego – zgodnego z prędkością fazową. Ostatecznie, przeciwne zwroty tych dwóch prędkości wskazują, że dla współczynnika załamania należy przyjąć znak ujemny.

Tak dziwne efekty...

Teraz spójrzmy, jak będzie załamywał się promień światła, gdy biegnąc w powietrzu napotka na powierzchni materiału o ujemnym współczynniku załamania. Wciąż obowiązuje prawo Snelliusa, które mówi o tym, iż stosunek sinusów kąta promienia padającego i załamanego równy jest współczynnikowi załamania. Abstrahując od matematycznych szczegółów wystarczy powiedzieć, że ujemny znak współczynnika załamania powoduje bieg promienia „po drugiej stronie” (w porównaniu ze „zwykłym” przypadkiem) prostej prostopadłej do powierzchni materiału (rys. 3a). Łyżeczka zanurzona w cieczy o ujemnym współczynniku załamania nie byłaby optycznie delikatnie „złamana” względem części nad powierzchnią, ale wydawałaby się mierzyc w kierunku patrzącego. Ryba pływająca w cieczy o ujemnym współczynniku załamania wydawałaby się przemieszczać nad powierzchnią. Soczewka wypukła, wykonana z materiału o ujemnym współczynniku załamania rozprasza światło, wklęsła zaś – skupia! Czyli zupełnie na odwrót niż w przypadku zwykłych, znanych nam soczewek. Co więcej, mogą pojawić się efekty, które w ogóle nie występują w materiałach o dodatnim współczynniku załamania. Płaskie równoległościennne płytki wykonane z takich egzotycznych substancji mogłyby skupiać promieniowanie (rys. 3b), czego w żadnych warunkach nie czynią zwykłe płytki. Takie cudaczne soczewki nie byłyby tylko ciekawostką naukową, ale miałyby spore zastosowa-

nie praktyczne. Okazuje się bowiem, że ich właściwości byłyby znacznie korzystniejsze niż tradycyjnych soczewek. Z tego też powodu zyskały miano „supersoczewek”. Najciekawszą z tych właściwości jest teoretycznie dowolnie duża zdolność rozdzielcza, która może być mniejsza niż długość fali skupianego światła. Tradycyjne przyrządy optyczne ograniczone są zawsze długością stosowanego promieniowania. Żaden z nich nie ukaże kształtów mniejszych niż ta długość, a każdy obraz uzyskiwany jest z dokładnością tego właśnie rzędu. I nie jest to spowodowane ułomnością wykonywanych przez człowieka przyrządów, ale fundamentalnymi prawami optyki – zjawiskiem dyfrakcji. To ono jest przyczyną tego, że mikroskopy optyczne nie nadają się do badania struktur o rozmiarach poniżej kilkuset nanometrów. W mniejszych skalach używane być muszą mikroskopy elektronowe. Tymczasem podobne teoretyczne ograniczenie nie obowiązuje supersoczewek.



Rys. 3. Materiały o dodatnim i ujemnym współczynniku załamania

- Załamanie światła na granicy powietrza i ośrodka o dodatnim lub ujemnym współczynniku załamania.
- Przechodzenia światła przez płytkę równoległościenną wykonaną z materiału o dodatnim lub ujemnym współczynniku załamania.

Te i inne jeszcze niezwykle efekty pozostawały przez dziesięciolecia jedynie naukowymi ciekawostkami, interesującymi nieliczne grono fizyków-teoretyków. Nawet wojskowi po obu stronach żelaznej kurtyny przeoczyli ich potencjał. To prawda, że w Naturze nie istnieją materiały z ujemnym współczynnikiem załamania światła. Ale czyż wielokrotnie wcześniej człowiek nie sięgał po przekraczanie granic tego, co Natura ofiarowała mu w stanie gotowym do użycia? Czy mogłoby się udać konstruować takie substancje?

A jednak to możliwe!

W połowie lat dziewięćdziesiątych XX wieku w środowisku naukowym odżyło zainteresowanie hipotetycznymi materiałami o ujemnym współczynniku załamania. Było to zasługą głównie Johna B. Pendry'ego (Imperial College, Londyn), któremu zawdzięczają one sporą część opisu teoretycznego. Za swoje badania w obszarze nowopowstałego działu fizyki, Pendry uhonorowany został tytułem szlacheckim. W ślad za pracami teoretycznymi pojawiły się pierwsze próby zaobserwowania opisywanych efektów w eksperymentach, i już na samym początku nowego millenium odnotowano pierwsze sukcesy.

Przenikalność elektryczna i magnetyczna materiału nie są wielkościami charakteryzującymi atomy lub cząsteczki, z których materiały te są zbudowane. Są one pewnymi uśrednieniami, opisującymi oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego z daną substancją – pod warunkiem, że uśrednianie jest zasadne, czyli tylko wówczas, gdy długość fali promieniowania jest na tyle duża, że nie „zauważa” ono pojedynczych atomów czy cząsteczek, a jedynie ich kolektywną odpowiedź. Może można by zatem skonstruować sztuczne „cząsteczki” i skomponować je w taki sposób, by ich uśrednione interakcje z falą elektromagnetyczną mogły być opisane za pomocą ujemnych wartości obu przenikalności? Okazało się, że owszem, można, a tak utworzone materiały zyskały miano „metamateriałów”. Przedrostek „meta” oznacza w języku greckim „po”, „poza” i wskazuje na następstwo. Metamateriały są tymi, które przyszły po zwykłych, przez Naturę stworzonych substancjach, a zbudowane są z „metacząsteczek”, sztucznych tworów wykreowanych przez człowieka dla swoich potrzeb. Jak wspomniano powyżej, aby móc opisywać oddziaływanie materii z promieniowaniem za pomocą przenikalności elektrycznej i magnetycznej, części składowe materii muszą być rozmiarów małych w porównaniu z długością fali promieniowania. Nic dziwnego zatem, że jako pierwsze powstały metamateriały, które zachowywały się jak materiały z ujemnym współczynnikiem załamania w interakcjach z mikrofalami, czyli falami o dużych – w porównaniu ze światłem widzialnym – długościach. Pierwszy taki eksperyment został przeprowadzony przez zespół Davida R. Smitha z Uniwersytetu Kalifornijskiego w San Diego. Wkrótce przyszła pora i na mniejsze struktury.

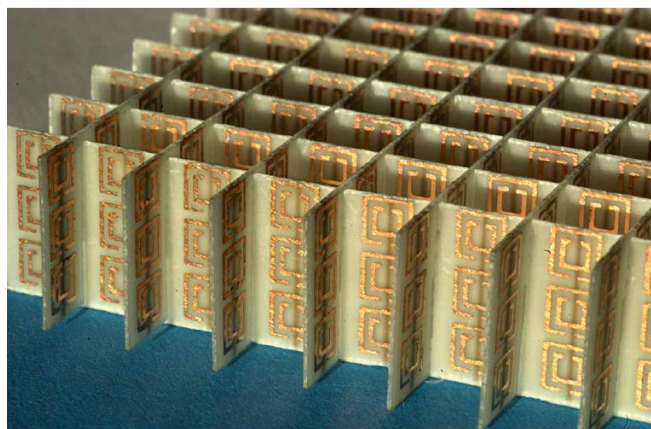
Szczegóły konstrukcji poszczególnych metamateriałów potrafią być wielce skomplikowane. Spróbujmy przyjrzeć się ogólnej idei przedstawionej teoretycznie przez Johna Pendry'ego, a zrealizowanej następnie przez Davida Smitha.

Poza (zwykle) materiały

Jak widzieliśmy powyżej, niektóre metale same z siebie mają – dla określonych częstotliwości fali – ujemną przenikalność elektryczną. Jednakże ich przenikalność magnetyczna jest zawsze dodatnia, zatem lity kawałek metalu nie może odegrać roli materiału o ujemnym współczynniku załamania. Trzeba „zostawić miejsce” na elementy, które będą dawały ujemną odpowiedź na przyłożone pole magnetyczne. Ponadto, jeśli zamiast jednorodnej bryłki weźmiemy wiele cienkich metalowych drucików i ułożymy z nich sześcienną kratownicę, wówczas możemy – zmieniając średnicę drucików i odległości pomiędzy nimi – regulować wartości częstości, dla których taka struktura będzie miała ujemną przenikalność elektryczną. Uzyskanie pożądanej odpowiedzi na elektryczną składową fali elektromagnetycznej było łatwiejszą częścią zadania. Jak pamiętamy, w przyrodzie nie występują żadne substancje o ujemnej przenikalności magnetycznej, które moglibyśmy poddać odpowiedniej inżynierii i włączyć w skład konstruowanego materiału. Okazało się jednak, że potrzebne „magnetyczne molekuly” można sprokurować z materiałów, które same w sobie własności magnetycznych nie posiadają. Najprostsza taka konstrukcja składa się z dwóch przerwanych pierścieni, wykonanych z dobrego przewodnika, i rozdzielonych warstwą innego materiału. Fachowo układ taki nazywany jest rozszczepionym rezonatorem kołowym (SRR, *split-ring resonator*). Dzięki przerwom w pierścieniach i odstępowi pomiędzy nimi ma on pewną pojemność (jak kondensator), a ponieważ pierścienie wykonane są z materiału przewodzącego ma też określoną indukcyjność. Zachowuje się zatem jak rezonansowy układ LC, charakteryzując się specyficzną dla określonych wartości geometrii i rodzaju użytych materiałów częstością rezonansową. Zmiany zewnętrznego pola magnetycznego, których źródłem jest fala elektromagnetyczna, powodują, na mocy zasady indukcji, przepływ prądu w pierścieniach. Z kolei, jak wiadomo, prąd elektryczny wytwarza wokół przewodnika pole magnetyczne. Podobnie jak w przypadku częstości plazmowej i ujemnej przenikalności elektrycznej, kluczem do uzyskania negatywnej odpowiedzi magnetycznej jest częstość rezonansowa drgań układu SRR. Okazuje się, iż w pewnym zakresie częstości w pobliżu częstości rezonansowej wytworzone przez układ pole magnetyczne skierowane jest przeciwnie do pola zewnętrznego. Skutkuje to ujemną przenikalnością magnetyczną materiału zawierającego takie elementy. A ponieważ wartość częstości rezonansowej można regulować ustalając różne parametry układu i użyte materiały, zatem zakres częstości fal elektromagnetycznych, dla których uzyskać można w ten sposób ujemną odpowiedź magnetyczną, jest dość szeroki.

Naniesione na płytki z materiału izolującego elementy SRR wraz z prostoliniowymi przewodami tworzą strukturę, która dla fal o odpowiedniej długości zachowuje się jak materiał (metamateriał) z ujemnym współczynnikiem załamania (rys. 4). Jak już wspominaliśmy, po raz pierwszy zostało to potwierdzone

eksperymentalnie przez zespół Davida R. Smitha z Uniwersytetu Kalifornijskiego w San Diego. W ślad za tą poszły i inne grupy naukowców, konstruując coraz wymyślniejsze struktury o coraz mniejszych rozmiarach.



Rys. 4. Metamateriał (źródło zdjęcia: *Science* 305 [2004] 788)

Czapka-niewidka na dwa sposoby

Gdy wiadomo już było, że istnieją sposoby konstruowania „lewoskrętnych” materiałów, pojawiło się pytanie o ich zastosowanie przy skonstruowaniu czegoś w rodzaju czapki-niewidki. Choć na pierwszy rzut oka mogłoby to wydawać się fantasmagorią, jakby rodem z opowieści o Q (z filmów o Jamesie Bondzie), to z naukowego punktu widzenia wcale nie jest nierealne. Z jednej strony nastęczało to kolejnych trudności, z drugiej – mogło okazać się pod pewnymi względami prostsze. Nawet jeśli dysponowalibyśmy już materiałami o dowolnym współczynniku załamania dla dowolnych długości fal elektromagnetycznych, aby skonturować obszar niewidzialności musielibyśmy zapewnić, by całe widmo promieniowania widzialnego „opływało” dany przedmiot. Tylko to, jak wyjaśnialiśmy wcześniej, zapewniłoby niewidzialność (i brak śladów, w postaci cienia). Zatem współczynnik załamania na granicach ukrytego obszaru musiałby mieć różną wartość w różnych punktach; ponadto, musiałby być dostosowany do każdej z długości fal z zakresu widzialnego. Wygląda to na kilka stopni skomplikowania więcej, niż kwestia stworzenia metamateriału wykazującego określone właściwości dla konkretnej długości fali. I tak jest w istocie. Z drugiej strony – czy do konstrukcji takich niewidzialnych schowków nie dałoby się użyć czegoś, co stworzyła sama przyroda, zamiast zaprzęgać naukę do konstruowania coraz bardziej wymyślnych materiałów? Taką drogą podążył Baile Zhang z Singapuru, który wraz ze swoim zespołem po raz pierwszy zaprezentował w 2011 roku niewidzialność makroskopowego obiektu. Zauważył on, że zjawisko dwójłomności, które występuje w kalcycie, zazwyczaj będące utrud-

nieniem dla potencjalnego zastosowania tego materiału, może zostać wykorzystane do konstrukcji czapki-niewidki. W kryształach dwójłomnych prędkość i współczynnik załamania światła zależą od orientacji tego kryształu względem padającego promienia. Zestawiając ze sobą dwa kawałki kalcytu udało się ukryć przed ludzkim wzrokiem stalowy klin o kilkucentymetrowej długości. Co prawda, doświadczenie to przeprowadzone zostało pod wodą, ale inny zespół, Shuanga Zhanga, skonstruował podobną, opartą na kryształach kalcytu, czapkę-niewidkę działającą w powietrzu.

Ograniczeniem czerpania z zasobów natury jest jednak fakt, że choć niezwykle bogate, nie są one nieograniczone w swej różnorodności. Dlatego próby tworzenia metamateriałów odpowiednich do konstrukcji obszarów niewidzialności wciąż trwają. Dotychczas największym sukcesem pochwalić się może amerykański zespół Xianga Zhanga². Choć udało się skonstruować materiały działające w szerokim zakresie długości fal, to jak dotąd, użycie ich w charakterze peleryny zapewniającej niewidzialność jest wysoce problematyczne. W wykonywanych dotychczas doświadczeniach udawało się bowiem ukryć „przedmioty” o rozmiarach rzędu kilku do kilkuset długości fali, nie są to zatem rozmiary obiektów, które moglibyśmy lub mogłoby wojsko chcieć ukryć. Ponadto, konstruowane enklawy niewidzialności nie były „przenośne”, stanowiły bowiem jedną całość: ukrywany obiekt, „peleryna-niewidka” i otoczenie. Nawet gdyby udało się pokonać te przeszkody, wciąż jeszcze nie można oczekiwać, że już w przyszłym sezonie przed szkolnym bale przebierańców rodzice szyć będą dzieciom na domowej maszynie peleryny Harry’ego Pottera. Otrzymany przez Zhanga materiał nie nadawałby się choćby z tego powodu, iż jest bardzo kruchy. Znając historię dotychczasowego rozwoju nauki i udoskonalień jej aplikacji, nikt rozsądny nie powinien się jednak zakładać, że nie będzie to wkrótce możliwe.

Niewidzialność

Mamy już dziś samoloty niewidzialne dla radarów. Coraz bardziej realne wydają się konstruowane z nanomateriałów peleryny-niewidki. Czy te odkrycia znajdą praktyczne zastosowanie...? Częścią z nich zainteresowała się już – niestety – armia. Ale nawet jeśli okazałoby się, że konstruowanie i użytkowanie urządzeń opartych na tych odkryciach nauki nie jest z jakichś powodów możliwe czy opłacalne, to czy sama radość eksplorowania granic możliwości współpracy Przyrody z ludzkim Rozumem nie jest wystarczającą nagrodą za te starania? I czyż droga ku niewidzialności – która co najmniej kilku naukowców uczyniła widzialnymi, i to nawet bardzo – nie jest celem samym w sobie, jakkolwiek daleki byłby cel ostateczny?

² Zhang to jedno z najpopularniejszych chińskich nazwisk, które nosi kilkaset milionów osób rozproszonych obecnie po całym świecie.



„Boska cząstka” odkryta?

Krzysztof Fiałkowski
Instytut Fizyki UJ

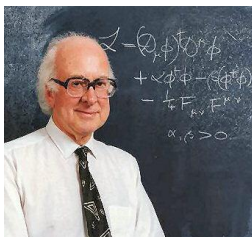
4 lipca 2012 roku w wielkiej sali seminaryjnej CERNu w Genewie odbyło się nadzwyczajne seminarium. Organizatorzy umożliwili chętnym z całego świata wysłuchanie i obejrzenie tego zdarzenia w internecie, a uczestnicy corocznej konferencji fizyki wysokich energii, która odbywała się w tym czasie w Melbourne, mogli nawet brać udział w dyskusji po referatach. Dlaczego to seminarium zostało potraktowane w tak szczególny sposób? Przyczyną był temat dwóch referatów wówczas wygłoszonych: nowe dane z obu największych eksperymentów w LHC (CMS i ATLAS) dowodzące istnienia cząstki Higgsa.



Sala seminaryjna, referat na temat bozonu Higgsa. Od lewej stoi Fabiola Gianotti (ATLAS), Rolf-Dieter Heuer – dyrektor generalny CERNu, i Joe Incandela (CMS)

<http://www.nature.com/news/higgs-triumph-opens-up-field-of-dreams-1.10970>

Cząstka ta stanowi ostatnią niezbadaną jeszcze „cegiełkę” Modelu Standardowego, teorii, która opisuje jednocznie oddziaływania elektromagnetyczne, słabe i silne cząstek elementarnych. Oddziaływanie innych cząstek z polem cząstki Higgsa powoduje, że uzyskują one niezerową masę. Skoro masy cząstek stanowią ich podstawową identyfikującą cechę, rola cząstki Higgsa jest wyjątkowa. Skłoniło to laureata Nagrody Nobla Leona Ledermana do nadania przed dwudziestu laty swojej popularnej książki tytułu *Boska cząstka*. Takie określenie cząstki Higgsa przyjęło się powszechnie w popularnych tekstach.



Sir Peter Higgs

Jednak sama idea cząstki Higgsa jest znacznie starsza. Pół wieku temu fizyk brytyjski Peter Higgs zauważył, że wprowadzenie do teorii oddziaływań nowego pola o szczególnych własnościach stanu podstawowego pozwala na nowy typ łamania symetrii, bardzo przydatny do opisu słabych oddziaływań cząstek elementarnych¹. Podobne pomysły zgłaszało zresztą wówczas jeszcze kilku fizyków, ale tylko Higgs podkreślił fakt, że temu polu powinna odpowiadać nieznaną dotąd cząstka. Słusz-

nie więc chyba pole i cząstkę nazwano jego imieniem. Od pół wieku trwały też dyskusje, czy i jak można stwierdzić doświadczalnie istnienie cząstki Higgsa.

Problem polegał na tym, że teoria nie pozwalała przewidzieć wartości masy tej cząstki. Można było wprawdzie wykorzystać istniejące dane, aby pośrednio wnioskować o pewnych ograniczeniach na tę wartość, ale wnioskowanie to nie było niezawodne. Większość fizyków oczekiwała, że cząstkę Higgsa można będzie odkryć w akceleratorze LEP, w którym zderzano wiązki elektronów i pozytonów o energiach przekraczających 100 GeV (czyli ponad sto energii spoczynkowych protonu). Tuż przed zamknięciem tego akceleratora w roku 2000 pojawiły się dane sugerujące, że w zderzeniach tych równocześnie ze znaną już cząstką Z o energii spoczynkowej około 91 GeV powstaje „coś” o energii spoczynkowej około 115 GeV. Jednak konieczność rozpoczęcia budowy nowego akceleratora LHC, który miał działać w tym samym tunelu, nie pozwoliła na dalsze zbieranie danych i rozstrzygnięcie, czy to „coś” jest poszukiwaną cząstką Higgsa, czy tylko efektem fluktuacji statystycznej.

W LHC zderza się wiązki protonów o znacznie większej energii, obecnie po 4 TeV (4000 GeV) każda. Na pozór więc sprawdzenie, czy w zderzeniach produkowane są obiekty o energii spoczynkowej „zaledwie” niewiele ponad 100 GeV powinno być bardzo łatwe. Dlaczego tak nie jest? Aby na to odpowiedzieć, musimy sobie uzmysłowić, co to znaczy „odkryć nową cząstkę”.

Cząstki tak ciężkie, jak cząstka Higgsa, żyją niezwykle krótko. Nawet lecąc z szybkością niemal równą szybkości światła nie zdążą przed rozpadem zostawić żadnego śladu w materii. O ich istnieniu możemy więc wnioskować tylko na podstawie analizy rozkładu sumy energii i pędów produktów rozpadu. Teoria mówi, że najbardziej prawdopodobne powinny być rozpady na pary możliwie najcięższych cząstek. Gdyby więc masa m_H cząstki Higgsa była co najmniej dwukrotnie większa od masy cząstek W, Z albo kwarku t, dominować powinien rozpad na pary tych cząstek. Przy odpowiedniej masie niezmienniczej takiej pary powinniśmy zaobserwować wyraźne maksimum przy wartości m_H , o charakterystycznym kształcie tzw. krzywej Breita-Wignera.

¹ Obszerniejszą popularną dyskusję symetrii i jej łamania można znaleźć w artykule Michała Przaszłowicza: „Po co nam LHC?” zamieszczonym w nr 108 *Fotonu*.

Masa niezmiennicza pary cząstek dana jest wzorem

$$m_{12} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 / c^4 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2 / c^2}$$

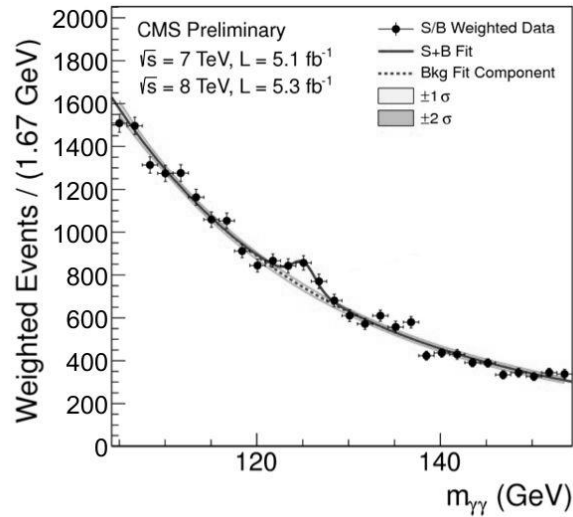
(\mathbf{p}_i oznaczają tu trójwymiarowe wektory pędu). Wzór ten można łatwo uogólnić na układ dowolnej liczby cząstek, zastępując obie sumy w nawiasach sumami odpowiednio większej liczby członów. Masa niezmiennicza jest niezmiennikiem relatywistycznym, co oznacza, że jej wartość nie zależy od wyboru układu odniesienia. Co więcej, dla izolowanego układu cząstek jest to wielkość zachowana, czyli nie zmienia się w czasie.

Wynika stąd, że dla układu produktów rozpadu dowolnej cząstki X masa niezmiennicza układu jest równa masie cząstki X (z dokładnością do rozmycia kwantowego i niepewności doświadczalnych). Na wykresie prawdopodobieństwa uzyskania różnych wartości masy niezmienniczej danego układu cząstek pochodzącego z wszystkich możliwych procesów, przypadki, w których układ ten pochodzi z rozpadu cząstki o masie m , dadzą „górkę” wokół wartości m .

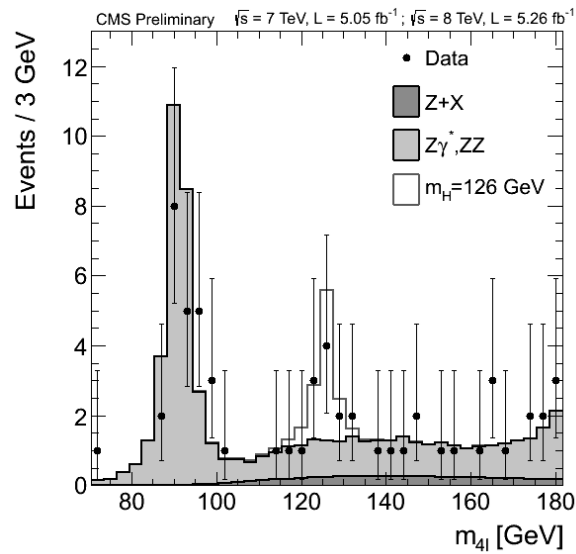
Niestety, natura okazała się złośliwa i energia spoczynkowa cząstki Higgsa jest z pewnością niższa niż podwojona energia spoczynkowa cząstki W (164 GeV). Należało więc szukać efektów innych, znacznie mniej prawdopodobnych rozpadów. Paradoksalnie, najłatwiejsze do identyfikacji okazały się rozpady na obiekty najlżejsze: parę wysokoenergetycznych fotonów $\gamma\gamma$, albo na dwie pary leptonów (elektron-pozyton, albo mion-mion).

Już w grudniu 2011 roku dane z eksperymentów CMS i ATLAS wykazały pewną nadwyżkę liczby przypadków dla obu tych układów cząstek przy masie niezmienniczej około 125 GeV/c². Dane nie były jednak jednoznaczne, bo przypadków było niewiele, a ponadto wyniki obu eksperymentów nie były dokładnie takie same. W marcu 2012 roku przedstawiono wyniki analizy danych z zamkniętego we wrześniu 2011 roku akceleratora Tevatron z Batavii w USA, które wydawały się również sugerować istnienie cząstki Higgsa o podobnej masie. Wciąż jednak nikt nie odważył się ogłosić odkrycia.

Kolejne kilka miesięcy zbierania danych w LHC pozwoliło na podwojenie liczby rejestrowanych przypadków i doprowadziło do decyzji przedstawienia wyników przez obie grupy eksperymentalne. Jak wspomniano, nastąpiło to 4 lipca. Na rys. 1 i 2 pokazano dane z eksperymentu CMS (<http://cms.web.cern.ch/news/observation-new-particle-mass-125-gev>).

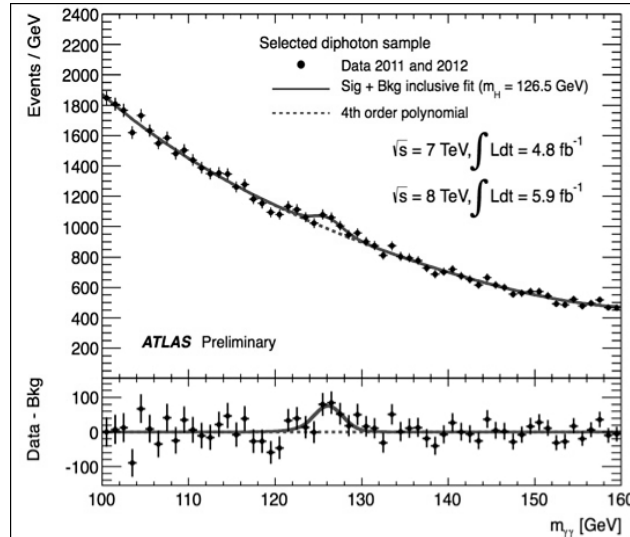


Rys. 1. Rozkład masy niezmienniczej dla pary $\gamma\gamma$ z eksperymentu CMS. Przerywana linia oznacza tło, ciągła – tło z dodanym sygnałem rozpadu cząstki Higgsa

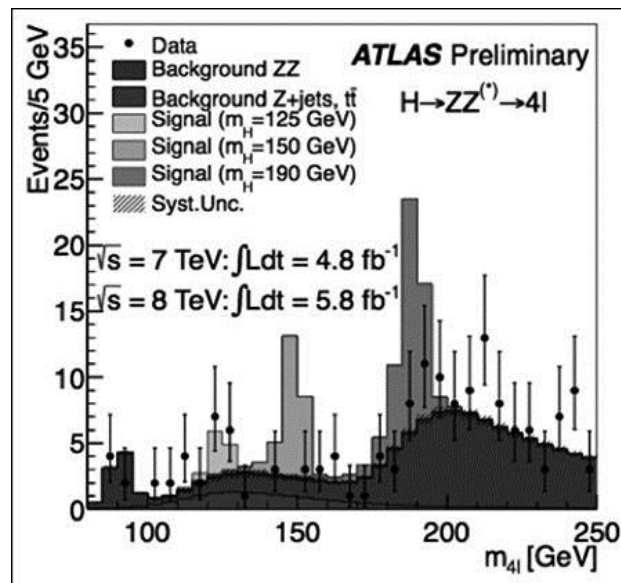


Rys. 2. Rozkład masy niezmienniczej czterech leptonów z eksperymentu CMS. Gruba linia oznacza oczekiwane tło, cienka – tło z dodanym sygnałem rozpadu cząstki Higgsa o masie $126 \text{ GeV}/c^2$

Na rys. 3 i 4 pokazano analogiczne dane z eksperymentu ATLAS (<http://www.atlas.ch/news/2012/latest-results-from-higgs-search.html>).



Rys. 3. Rozkład masy niezmienniczej dla pary $\gamma\gamma$ z eksperymentu ATLAS. Przerywana linia oznacza tło, ciągła – tło z dodanym sygnałem rozpadu cząstki Higgsa. Dolny wykres przedstawia różnicę między danymi a krzywą tła



Rys. 4. Rozkład masy niezmienniczej czterech leptonów z eksperymentu ATLAS. Gruba czarna linia oznacza tło, szara jasna – tło z dodanym sygnałem rozpadu cząstki Higgsa o masie $125 \text{ GeV}/c^2$, dwie pozostałe – tło z dodanymi sygnałami cząstki Higgsa o innych masach

Wyjaśnijmy nieco dokładniej, co przedstawiają wykresy. Na rys. 1 i 3 odłożono na osi x wartości masy niezmienniczej pary fotonów. W eksperymencie CMS

badano zakres od 105 do 155 GeV/c^2 , a w eksperymencie ATLAS od 100 do 160 (zwyczajowo masę podano tu w jednostkach energii – GeV – co oznacza przyjęcie układu jednostek, w którym $c = 1$). Na osi y przedstawiono liczbę przypadków, w których znaleziono parę fotonów o masie z przedziału o szerokości odpowiednio 1,67 lub 1 GeV wokół wartości z osi x . Zauważmy, że tych przypadków jest zaledwie kilkadziesiąt tysięcy na całym wykresie, co stanowi małą ułamek wszystkich przypadków zderzeń, które zaszły w akceleratorze – mniej niż jedną dziesięciomiliardową. Nadal jednak w ogromnej większości tych przypadków para fotonów nie pochodzi z rozpadów cząstki Higgsa, ale z innych źródeł, czyli tła. Wykres ATLASA uzyskany po odjęciu przewidywanego tła zawiera zaledwie około dwustu przypadków, a w CMS jest ich jeszcze mniej. Linie przerywane na wykresie są dopasowane do danych dominowanych przez tło, a ciągłe do tła z dodanymi przewidywaniami dla sygnału cząstki Higgsa o masie odpowiednio 126 i 126,5 GeV.

Na rys. 2 i 4 odłożono na osi x masę niezmienniczą dwu par leptonów, dla CMS w zakresie od 70 do 180 GeV, a dla ATLASA od 80 aż do 250. Na osi y przedstawiono liczbę przypadków z przedziału o szerokości 3 GeV (CMS) lub 5 GeV (ATLAS) wokół wartości z osi x . Tym razem przypadków na całym wykresie jest o wiele mniej – kilkadziesiąt dla CMS, a sto kilkadziesiąt dla ATLASA. Znaczna część tła to przypadki, w których leptony pochodzą z rozpadu jednej lub dwóch cząstek Z . Te i inne przypadki podsumowane są ciągłą linią odgradzającą obszar szary (CMS), albo ciemniejszy (ATLAS). Jak widać, kilka przypadków „wystaje” ponad tę linię. W przypadku CMS widać, że ich rozkład zgadza się doskonale z cienką linią, przedstawiającą przewidywania dla produktów rozpadu cząstki Higgsa o masie 126 GeV. ATLAS przedstawił aż trzy przewidywania: dla cząstki Higgsa o masie 125, 150 i 190 GeV. Dane zgadzają się z krzywą odpowiadającą 125 GeV, a wykluczają obecność leptonów z rozpadu cząstki Higgsa o znacznie większej masie.

Jak widać, mimo długiego czasu trwania eksperymentów i przeprowadzenia wielu bilionów zderzeń, nadal zarejestrowano niewiele przypadków, w których obserwowane cząstki można uważać za produkty rozpadu cząstki Higgsa. Jednak zgodność rozkładów dla obu eksperymentów i jednakowe położenie maksimum dla obu rozpadów sprawiają, że istnienie cząstki Higgsa o masie około 125 GeV/c^2 nie ulega już właściwie żadnej wątpliwości. **Prawdopodobieństwo pojawienia się takich sygnałów w wyniku przypadkowej fluktuacji statystycznej jest rzędu jednej dziesięciomilionowej.**

Nie oznacza to, że fizycy mogą już spocząć na laurach. Dopiero teraz znacznie się żmudne poszukiwanie innych rozpadów i sprawdzanie przewidywań Modelu Standardowego. Jak dotąd, wydaje się, że dane są całkowicie zgodne z tym modelem i nie ma żadnych wskazówek sugerujących konieczność jego modyfikacji lub uogólnienia. Nikt jednak właściwie nie wątpi, że wcześniej czy później takie wskazówki pojawią się!



Odbicie fali od granicy ośrodków

Jerzy Ginter

Uniwersytet Warszawski

Kiedy światło się odbija?

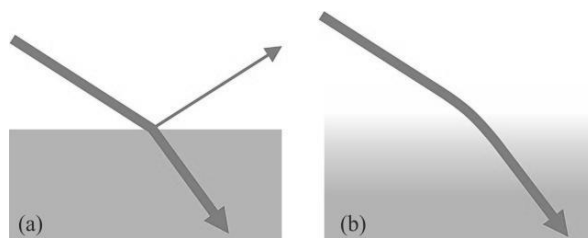
Znamy doskonale zjawisko załamania światła na granicy dwóch ośrodków o różnych współczynnikach załamania. Przebiega ono jednak istotnie różnie w dwóch skrajnych przypadkach:

1. Zmiana współczynnika załamania zachodzi w warstwie powierzchniowej o grubości małej w porównaniu z długością fali („skokowo”, rys. 1a). Wtedy oprócz promienia załamanego pojawia się promień odbity.

Jako przykład może służyć odbicie światła od szyby szklanej. Długość fali światła zielonego w powietrzu jest równa w przybliżeniu $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$. Współczynnik załamania zmienia się od 1 dla powietrza do 1,5 dla szkła w warstwie o grubości porównywalnej z promieniem atomu, czyli rzędu $d \approx 0,1 \text{ nm} = 0,0001 \mu\text{m}$. Zatem stosunek $\lambda/d \approx 5000$.

2. Zmiana współczynnika załamania zachodzi płynnie w warstwie przejściowej o grubości znacznie większej od długości fali (rys. 1b). Wtedy promień odbity się nie pojawia!

Obserwację tego rodzaju przeprowadza się na granicy wody (na górze) i nasyconego roztworu soli kuchennej (na dole). Przypuśćmy, że na skutek zjawiska dyfuzji grubość warstwy przejściowej jest równa $d = 1 \text{ cm} = 10\,000 \mu\text{m}$. Jeżeli długość fali w powietrzu jest równa $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, w wodzie jest mniejsza i równa $\lambda_w = 0,5 \mu\text{m}/1,33 \approx 0,38 \mu\text{m}$. Stosunek λ_w/d jest więc równy około 0,00004.



Rys. 1.

Gdyby światło padało na granicę ośrodków nie pod kątem, ale prostopadle:

- (a) W przypadku 1 fala odbita znalazłaby się w tym samym obszarze, co fala padająca i nastąpiłaby jej interferencja z falą padającą. Gdyby odbicie było całkowite, powstałaby fala stojąca. Kiedy odbicie jest częściowe, powstaje fala „półstojąca”, którą można potraktować jako superpozycję fali stojącej

i fali biegnącej. W obu przypadkach amplituda fali świetlnej nie jest stała, ale periodycznie zależy od położenia.

(b) W przypadku 2 fali odbitej nie ma – a więc nie ma i interferencji fal.

Można więc zadać pytanie: jak gruba musi być „płynna” warstwa dzieląca ośrodki, aby od zachowania granicznego (a) przejść do zachowania granicznego (b)? Opis dla fal elektromagnetycznych byłby dość skomplikowany. Można jednak prześledzić problem na prostym modelu mechanicznym. Można do rozwiązania zagadnienia zastosować prostą metodę numeryczną. Zanim jednak do tego przejdziemy, musimy przypomnieć kilka spraw.

Odbicie na granicy dwóch ośrodków ciągłych

Przypomnijmy na początek, jak zachodzi odbicie na granicy dwóch ośrodków ciągłych. Przyjmijmy, że granica znajduje się w punkcie $x = 0$. Mówi się więc tak (rys. 2):

1. Na lewo od granicy istnieją dwie fale biegnące:

padająca:

$$U_P(x, t) = P \cos(q_1 x - \omega t), \quad (1)$$

i odbita:

$$U_R(x, t) = R \cos(q_1 x + \omega t). \quad (2)$$

gdzie

$$q_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}.$$

2. Na prawo jest jedna fala przechodząca, biegnąca ($1 \rightarrow 2$):

$$U_Q(x, t) = Q \cos(q_2 x - \omega t). \quad (3)$$

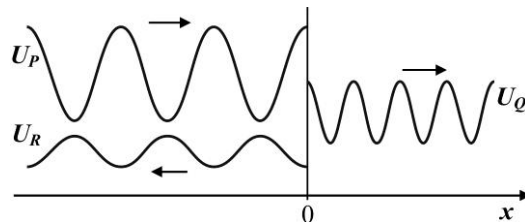
Warunek ciągłości funkcji na granicy ośrodków prowadzi do relacji:

$$P + R = Q. \quad (4)$$

Warunek ciągłości pochodnej na granicy ośrodków prowadzi do związku:

$$P - R = \frac{q_2}{q_1} Q = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} Q = nQ; \quad (5)$$

gdzie n jest współczynnikiem załamania światła ośrodka 2 względem ośrodka 1.



Rys. 2.

Zwykle amplitudę fali padającej P traktuje się jako wielkość znaną. Korzystając ze wzorów (4) i (5) oblicza się amplitudy fali odbitej R i fali przechodzącej Q . My jednak teraz postąpimy trochę inaczej. Powiemy: znamy falę w obszarze prawym. Jaka jest fala w obszarze lewym? Fala ta jest superpozycją fal U_P i U_R , ma więc postać:

$$\begin{aligned} U_1(x,t) &= P \cos(q_1 x - \omega t) + R \cos(q_1 x + \omega t) = \\ &= P [\cos(q_1 x) \cos(\omega t) + \sin(q_1 x) \sin(\omega t)] + R [\cos(q_1 x) \cos(\omega t) - \sin(q_1 x) \sin(\omega t)] = \\ &= (P + R) \cos(q_1 x) \cos(\omega t) + (P - R) \sin(q_1 x) \sin(\omega t) = \\ &= Q \cos(q_1 x) \cos(\omega t) + nQ \sin(q_1 x) \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (6)$$

Wyrażenie to ma postać sumy dwóch fal stojących, przesuniętych w fazie o ćwierć okresu.

Dla określonego x fala ta opisuje zmienność harmoniczną z częstością kołową ω . Wyrażenie to można przedstawić w postaci:

$$U_1(x,t) = Q \sqrt{\cos^2(q_1 x) + n^2 \sin^2(q_1 x)} \cdot \left(\frac{\cos(q_1 x)}{\sqrt{\cos^2(q_1 x) + n^2 \sin^2(q_1 x)}} \cos(\omega t) + \frac{n \sin(q_1 x)}{\sqrt{\cos^2(q_1 x) + n^2 \sin^2(q_1 x)}} \sin(\omega t) \right). \quad (7)$$

Jest to więc ruch o amplitudzie, zależnej od x :

$$A(x) = Q \sqrt{\cos^2(q_1 x) + n^2 \sin^2(q_1 x)} = Q \sqrt{1 + (n^2 - 1) \sin^2(q_1 x)}. \quad (8)$$

Fazę $\psi(x)$ tego ruchu określa związek:

$$\operatorname{tg} \psi(x) = \frac{n \sin(q_1 x)}{\cos(q_1 x)} = n \operatorname{tg}(q_1 x) \quad (9)$$

Fazę w dalszym ciągu nie będziemy się zajmować.

Powróćmy do amplitudy, określonej wzorem (8). Widać z niego, że głębokość jej oscylacji może być potraktowana jako miara intensywności fali odbitej. Na przykład:

- dla $n = 2$ amplituda oscyluje pomiędzy 1 a 2;
- dla odbicia od ostrej granicy nie ma oscylacji, czyli nie pojawia się fala odbita, jeżeli $n = 1$. Jest to jednak przypadek trywialny.

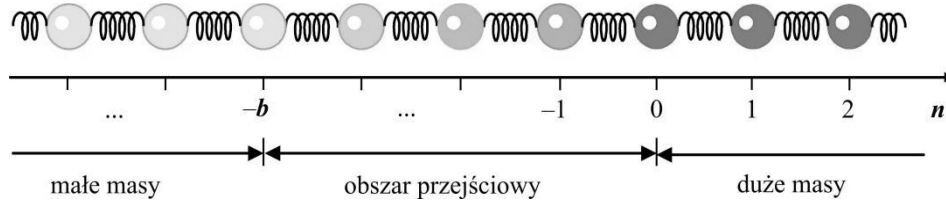
Model mechaniczny

Rozważmy teraz model mechaniczny, o którym wspomnieliśmy na początku. Będzie to układ kul, które mogą się poruszać wzdłuż prostej (rys. 3). Kule te połączone są jednakowymi sprężynami, natomiast masy kul:

- po prawej stronie, dla $n \geq 0$, masy kul są jednakowe i równe 1;
- po lewej stronie, dla $n \leq -b$, masy kul są jednakowe i równe 0,25. Zakładając będziemy dla uproszczenia, że b jest całkowite.
- w środkowym obszarze przejściowym masy zmieniają się płynnie pomiędzy skrajnymi wartościami. W obliczeniach numerycznych przyjęto masy opisane poniższym wzorem (wykres widoczny jest w górnej części rys. 5):

$$m_n = 0,25 + 0,375 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{b} n \right) \right]. \quad (10)$$

Nawias tej funkcji jest równy 2 dla $n = 0$, a równy zero dla $n = -b$. Jeżeli położymy $b = 1$, obszar przejściowy zniknie.



Rys. 3.

Równania ruchu

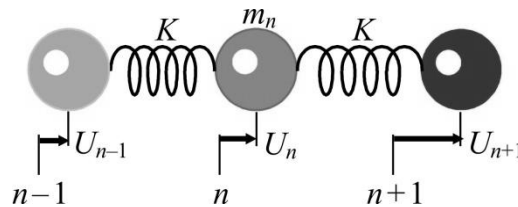
Ruch kul naszego modelu opisują równania Newtona

$$F_n = m_n a_n, \quad (11)$$

gdzie F_n oznacza siłę działającą na n -tą kulę, m_n masę tej kuli, a a_n jej przyspieszenie.

- Niech U_n oznacza wychylenie n -tej kuli z położenia równowagi n (rys. 4). Przyspieszenie a_n jest drugą pochodną U_n względem czasu, czyli:

$$a_n = \frac{d^2 U_n(t)}{dt^2}. \quad (12)$$



Rys. 4.

- Siła działająca na n -tą kulę zależy od wychyleń trzech kul: U_n , U_{n-1} i U_{n+1} . Jest ona różna od zera wtedy, kiedy lewa sprężyna ma inną długość, niż

sprężyna prawa. Kula prawa działa na kulę środkową siłą proporcjonalną do wydłużenia sprężyny:

$$F_p = K(U_{n+1} - U_n); \quad (13)$$

gdzie K jest współczynnikiem sprężystości każdej ze sprężyn. Podobnie kula lewa działa na środkową siłą:

$$F_l = K(U_{n-1} - U_n). \quad (14)$$

Ich wypadkowa jest więc równa:

$$F_n = K(U_{n+1} - U_n) + K(U_{n-1} - U_n) = K(U_{n+1} + U_{n-1} - 2U_n). \quad (15)$$

Podstawmy wzory (12) i (15) do (11) i podzielmy od razu obie strony przez K . Dostajemy układ powiązanych ze sobą równań, opisujących ruch kul:

$$U_{n+1}(t) + U_{n-1}(t) - 2U_n(t) = \frac{m_n}{K} \frac{d^2 U_n(t)}{dt^2}. \quad (16)$$

Fale harmoniczne

Ograniczmy się teraz do fal harmonicznnych o określonej częstotliwości kołowej ω . W takim przypadku każda z kul porusza się ruchem periodycznym, który można opisać funkcją:

$$U_n(t) = A_n \cos(\omega t + \varphi_n). \quad (17)$$

Nieujemna wielkość A_n oznacza amplitudę, a φ_n fazę tego ruchu.

Korzystając ze wzoru na sumę cosinusów wyrażenie to możemy zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} U_n(t) &= A_n \cos(\omega t + \varphi_n) = A_n [\cos(\omega t) \cos(\varphi_n) - \sin(\omega t) \sin(\varphi_n)] = \\ &= [A_n \cos(\varphi_n)] \cos(\omega t) + [-A_n \sin(\varphi_n)] \sin(\omega t) = C_n \cos(\omega t) + S_n \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (18)$$

Wprowadziliśmy w tym wzorze wielkości

$$C_n = A_n \cos(\varphi_n), \quad (19)$$

$$S_n = -A_n \sin(\varphi_n). \quad (20)$$

Zauważmy przy okazji, że $(\cos^2 \varphi_n + \sin^2 \varphi_n = 1)$:

$$A_n = \sqrt{C_n^2 + S_n^2}. \quad (21)$$

Podstawmy wyrażenie (18) do (16). Dostajemy:

$$\begin{aligned} (C_{n+1} + C_{n-1} - 2C_n) \cos(\omega t) + (S_{n+1} + S_{n-1} - 2S_n) \sin(\omega t) = \\ = -\frac{m_n}{K} \omega^2 C_n \cos(\omega t) - \frac{m_n}{K} \omega^2 S_n \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (22)$$

W równaniu tym muszą być równe po obu stronach odpowiednio współczynniki przy $\cos \omega t$ i przy $\sin \omega t$, bo są to dwie funkcje liniowo niezależne. Prowadzi to do dwóch równań o identycznej postaci:

$$C_{n+1} + C_{n-1} - 2C_n = -\frac{m_n}{K} \omega^2 C_n, \quad (23)$$

$$S_{n+1} + S_{n-1} - 2S_n = -\frac{m_n}{K} \omega^2 S_n. \quad (24)$$

Pierwsze z nich wiąże ze sobą tylko wielkości C_n , a drugie tylko wielkości S_n .

Jednakowe masy: rozwiązanie analityczne

Jeżeli wszystkie masy kul m_n są jednakowe, równanie (23) ma proste rozwiązanie analityczne, odpowiadające fali stojącej w układzie:

$$C_n = \cos(qn). \quad (25)$$

Wielkość $q = \frac{2\pi}{\lambda}$, gdzie λ oznacza długość fali wyrażoną w jednostce równej odległości między kulami, znajdującymi się w położeniach równowagi.

Podstawiając (16) do lewej strony (14) otrzymujemy – stosując wzory na sumę cosinusów i na kwadrat sinusa:

$$\begin{aligned} \cos[q(n+1)] + \cos[q(n-1)] - 2\cos(qn) &= 2\cos(qn)\cos(q) - 2\cos(qn) = \\ &= 2[\cos(q) - 1]\cos(qn) = -4\sin^2\left(\frac{q}{2}\right)\cos(qn). \end{aligned} \quad (26)$$

Wstawiając ten wynik oraz (16) do (14) otrzymujemy:

$$-4\sin^2\left(\frac{q}{2}\right)\cos(qn) = -\frac{m_n}{K} \omega^2 \cos(qn). \quad (27)$$

Skróćmy to wyrażenie przez $-\cos(qn)$. Dostaniemy związek pomiędzy q a ω :

$$\sin^2\left(\frac{q}{2}\right) = \frac{m_n}{4K} \omega^2, \quad (28)$$

czyli

$$\sin\left(\frac{q}{2}\right) = -\frac{1}{2}\sqrt{\frac{m_n}{K}} \omega. \quad (29)$$

Związek ten podawany jest przy omawianiu drgań sieci krystalicznej w każdym elementarnym podręczniku fizyki ciała stałego.

Załóżmy jeszcze, że q jest małe, czyli długość fali w ośrodku jest znacznie większa od odległości między kulami (patrz też dalej, rys. 5). Możemy wtedy zastosować przybliżenie $\sin x \approx x$, co prowadzi do równości:

$$q = \sqrt{\frac{m_n}{K}} \omega. \quad (30)$$

Powróćmy do naszego zagadnienia i zauważmy: masy m_n w obszarze lewym są cztery razy mniejsze, niż w obszarze prawym. Wynika stąd w naszym przybliżeniu, że wartość q w obszarze lewym jest dwa razy mniejsza, niż w obszarze prawym. A więc długość fali w obszarze lewym jest dwa razy większa, niż w obszarze prawym. Oznacza to, że współczynnik załamania jest równy 2.

Czytelnik może sprawdzić samodzielnie, że rozwiązania równania (15) można poszukiwać w postaci

$$S_n = \sin(qn). \quad (31)$$

Prowadzi to ponownie do związków (29) i (30).

Niejednakowe masy, algorytm obliczeń numerycznych

Jeżeli masy kul nie są równe, można wyznaczyć wielkości C_n i S_n numerycznie. Wielkości C_n wyznaczymy następująco:

1. Przyjmiemy, że obszar prawy odpowiada $n \geq 0$. W obszarze tym przyjmiemy dla C_n rozwiązanie (25), w którym q wyrazimy przez ω wzorem (30).
2. Dla obszaru lewego i przejściowego, czyli dla $n < 0$, wzór (23) potraktujemy jako podstawę algorytmu obliczenia numerycznego, w którym kolejne C_{n-1} będziemy wyrażać przez C_n i C_{n+1} (wędrujemy od $n = 0$ w lewo):

$$C_{n-1} = \left(2 - \frac{m_n}{K} \omega^2 \right) C_n - C_{n+1}. \quad (32)$$

W algorytmie tym trzeba przyjąć dwie wielkości wyjściowe, czyli C_0 i C_1 . Obliczymy je ze wzoru (25), obowiązującego dla obszaru prawego. Wielkości

te są więc odpowiednio równe $C_0 = 1$ i $C_1 = \cos\left(\sqrt{\frac{m_n}{K}} \omega\right)$.

Podobnie obliczymy wielkości S_n .

1. Przyjmiemy dla obszaru prawego $n \geq 0$ rozwiązanie (31), w którym q wyrazimy przez ω wzorem (30).
2. Natomiast dla obszaru lewego i przejściowego wzór (24) potraktujemy jako podstawę algorytmu

$$S_{n-1} = \left(2 - \frac{m_n}{K} \omega^2 \right) S_n - S_{n+1}. \quad (33)$$

W algorytmie tym do obliczenia S_0 i S_1 zastosujemy wzór (31). Wielkości te są więc odpowiednio równe $S_0 = 0$ i $S_1 = \sin\left(\sqrt{\frac{m_n}{K}} \omega\right)$.

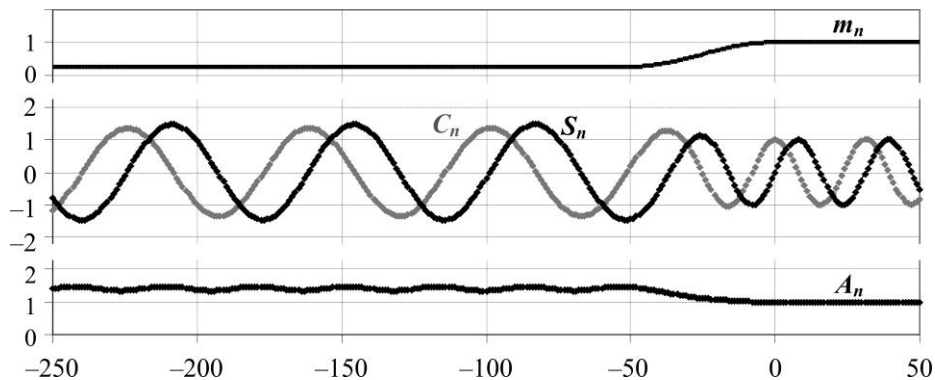
Wyniki obliczeń numerycznych

Szczegółowe obliczenia numeryczne znajdują się w excelowskim pliku [zmiennie n](#). W programie tym przyjęto $K = 1$, $\omega = 0,2$. Można w nim dowolnie zmieniać szerokość obszaru przejściowego, czyli b .

Przytoczmy tu przykładowe wyniki dla $b = 50$ (rys. 5).

1. Krzywa górna przedstawia zależność m_n od n . Zgodnie z wyjściową umową w prawej części $m_n = 1$, w lewej $m_n = 0,25$.
2. Zależności obliczonych C_n i S_n od n przedstawiają krzywe – odpowiednio szara i czarna – w środkowej części rys. 5. Zauważamy, że w obu przypadkach długość fali w obszarze lewym jest dwa razy większa niż w obszarze prawym, czego należało oczekiwać na podstawie wzoru (31). W obszarze przejściowym płynnie zmieniają się zarówno długość fali, jak i jej amplituda.

Krzywą dolną przedyskutujemy poniżej.



Rys. 5.

Uzyskane fale stojące

Powróćmy do wzoru (19). Wyrażenia $C_n \cos(\omega t)$ dla różnych n , z obliczonymi powyżej wartościami C_n , odpowiadają pewnej fali stojącej. Jest ona trochę różna od typowo omawianej w szkole, bo jej długość fali zmienia się od miejsca do miejsca. Ponadto różne są amplitudy drgań w różnych strzałkach. „Przyzwoicie” zachowuje się tylko w obszarach skrajnych, w których masy kul m_n są stałe. Niemniej zależność czasową w każdym punkcie opisuje ta sama funkcja: $\cos \omega t$. Podobny charakter ma i człon $S_n \sin \omega t$, jego ruch jest w stosunku do zależności poprzedniej przesunięty w fazie o $\frac{1}{4}$ okresu.

Budujemy falę biegnącą

Nas jednak właściwie interesowało coś innego: oczekiwaliśmy, że w obszarze prawym powinna istnieć tylko fala biegnąca w prawo (por. rozważania na początku artykułu). Dopuszczaliśmy przy tym możliwość, że w obszarze lewym będzie istniała i biegnąca w prawo fala padająca i biegnąca w lewo fala odbita – które w sumie dają falę „półstojącą”.

Takie rozwiązanie możemy sobie zbudować z fal omówionych powyżej. Musimy tylko zauważyć, że falę biegnącą można uzyskać przez superpozycję fal stojących. Napiszmy wzór na falę biegnącą w prawo w obszarze prawym i zastosujmy do niego wzór na cosinus sumy:

$$U_n(t) = A \cos(qn - \omega t) = A \cos(qn) \cos(\omega t) + A \sin(qn) \sin(\omega t). \quad (34)$$

We wzorze tym amplituda A nie zależy od n . Utwórzmy zatem we wszystkich obszarach funkcję

$$U_n(t) = C_n \cos \omega t + S_n \sin \omega t. \quad (35)$$

1. W obszarze prawym $C_n = A \cos(qn)$ (wzór 25). W pozostałych obszarach „doczepiliśmy” do tego cosinusa wielkości C_n obliczone numerycznie.
2. Podobnie w obszarze prawym $S_n = A \sin(qn)$ (wzór 31), w pozostałych – znamy S_n z obliczeń numerycznych.

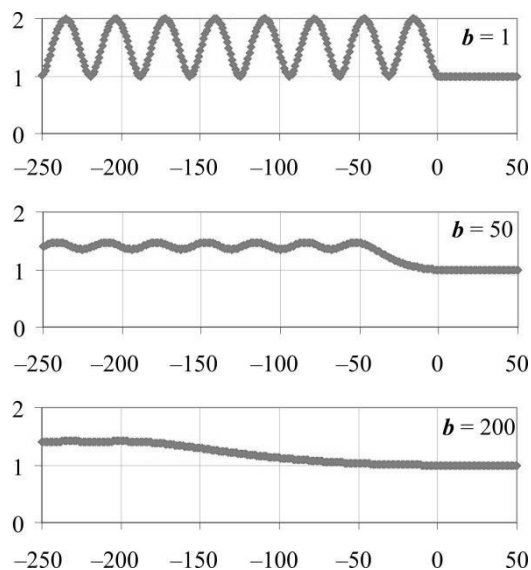
Na podstawie wzoru (34) widzimy, że kombinacja (35) daje w prawym obszarze falę biegnącą w prawo o amplitudzie jednostkowej.

Musimy się zastanowić, jaka jest ta fala w pozostałych obszarach. Możemy na to pytanie odpowiedzieć, obliczając zależność amplitudy fali od n , posługując się wyrażeniem $A_n = \sqrt{C_n^2 + S_n^2}$ (21). Jeżeli mamy do czynienia z falą „półstojącą”, amplituda ta nie powinna być stała, ale quasi-periodycznie zależeć od n . Przedstawia to dolny wykres na rys. 5. W prawym obszarze przyjęta została amplituda $A = 1$. Widać, że dla $b = 50$ wyraźnie widoczne są „zafalowania”.

Rysunek 6 przedstawia już tylko zależności amplitudy A_n od n dla trzech wartości parametru b .

1. Dla $b = 1$ nie ma obszaru przejściowego, masy dla $n \geq 0$ mają wartość równą 1, dla $n < 0$ wartość równą 0,25. Zgodnie z tym, czego należało oczekiwać, amplituda dla $n < 0$ zmienia się w funkcji n pomiędzy 1 i 2 (patrz wyżej, rozważania dla ośrodków ciągłych). Oznacza to, że w omawianym przypadku pojawiła się fala odbita.
2. Dla $b = 50$ zafalowanie jest słabsze, ale jeszcze wyraźnie widoczne.
3. Dla $b = 200$ zafalowanie jest już tylko ledwo widoczne. Oznacza to, że dla tak szerokiego obszaru prawie nie pojawia się fala odbita, czyli osiągnęliśmy sytuację (b) z rozważań wstępnych. Sięgając do programu komputerowego łatwo stwierdzić, że w obszarze przejściowym mieści się około 5 „zmiennych” długości fali.

Czytelnik może problem prześledzić szczegółowo, zmieniając dowolnie parametr b w programie komputerowym *Zmienne n*.



Rys. 6.

Podsumowanie

Znaleźliśmy numerycznie odpowiedź na pytanie postawione na początku artykułu. Stwierdziliśmy, że odbicie fali znika, jeżeli grubość płynnej warstwy przejściowej jest rzędu 10 długości fali. Oznacza to – w języku znanym z mechaniki kwantowej – przejście do sytuacji, w której można stosować przybliżenie WKB.

Jak zawsze w obliczeniach numerycznych wynik ten zależy od zespołu wybranych parametrów. Rozszerzenie ich zakresu pozostawiamy inwencji Czytelnika.



Lew D. Landau i jego szkoła fizyki teoretycznej

Maria Pawłowska
Biblioteka IF UJ

Jedni uważają, że nauczyciele okradają uczniów, inni sądzą, że to uczniowie okradają nauczycieli. A ja uważam, że rację mają i jedni i drudzy, a to wzajemne okradanie jest cudowne (L.D. Landau)

Jeśli czegoś nie zrozumiałeś – przeczytaj jeszcze raz. Ale jeśli nie zrozumiałeś przeczytawszy pięć razy – jesteś głupcem! (L.D. Landau)

W 1931 roku Landau wrócił do kraju i nadal pracował w Leningradzkim Instytucie Fizyczno-Technicznym (LFTI). W tym czasie dyrektor Instytutu, akademik Abram Joffe, zajmował się problemami izolacji cienkowarstwowej. Landau miał pewne wątpliwości co do słuszności wniosków Joffego i udowodnił, że przedstawiona przez niego teoria jest całkowicie bezpodstawna. Dyrektor poczuł się urażony opinią młodego uczonego i pewnego razu oświadczył w gniewie, że nie widzi żadnego sensu w ostatniej pracy Landaua. „Fizyka teoretyczna to skomplikowana nauka, odpowiedział Landau, i nie każdy może ją zrozumieć”¹. Gdy Joffe dał odczuć zarozumiałemu młodzieńcowi, że jego dalszy pobyt w Instytucie jest niepożądany, Dau² odszedł z LFTI, by latem 1932 roku objąć kierownictwo grupy teoretycznej w nowo utworzonym Ukraińskim Instytucie Fizyczno-Technicznym (UFTI) w Charkowie. Jednocześnie kierował katedrą fizyki teoretycznej na wydziale fizyczno-mechanicznym Charkowskiego Instytutu Mechaniczno-Budowlanego. W Charkowie Landau rozpoczął swoją pracę pedagogiczną i właśnie tutaj bierze początek jego szkoła fizyki teoretycznej. Okazało się, że jest wybitnym nauczycielem, pedagogiem z powołania. Problemy związane z nauczaniem fizyki zajmowały go od dawna, dlatego rozpoczął prace nad przebudową programu nauczania tego przedmiotu. Dla najlepszych studentów opracował program „teoretycznego minimum”, które obejmowało podstawową wiedzę z fizyki teoretycznej niezbędną dla fizyków doświadczalnych, zaś osobny program przeznaczony był dla tych, którzy chcieli poświęcić się pracy w zakresie fizyki teoretycznej.

Lew otrzymał mieszkanie służbowe tuż obok instytutu w budynku przy ulicy Czajkowskiego 16. Na drzwiach swojego gabinetu wywiesił tabliczkę:

*L.D. LANDAU
Ostrożnie, gryzie!*

¹ Artykuł opracowano m.in. na podstawie książki M. Bessarab, *Landau. Stranicy žizni*, Moskwa 1971 (tłum. M. Pawłowska). Stamtąd pochodzą również cytaty zamieszczone w artykule.

² Tak nazywali Landaua fizycy z całego świata (patrz *Foton* 117, Lato 2012).

Zarówno w życiu osobistym, jak i naukowym, Landau był wrogiem lizusostwa, nie znosił próżnego mędrkowania przysłoniętego pseudonauką, a ponieważ miał niezwykle krytyczny umysł dyskusje z nim były interesujące i pożyteczne. O pomoc i radę mógł się do niego zwrócić każdy, niezależnie od naukowych zasług i tytułów, ale musiało to dotyczyć spraw naprawdę poważnych. Szczerze i chętnie pomagał innym na drodze do osiągnięcia sukcesu naukowego i gorąco takie sukcesy aprobował. Był największym naukowym autorytetem dla swoich uczniów i kolegów. W Instytucie Fizyki w Charkowie panowała twórcza atmosfera, dlatego młody Landau przebywał w pracy aż do późnych godzin nocnych, pracował chętnie i z wielkim entuzjazmem. Ponieważ klucz do biblioteki instytutowej miał każdy pracownik instytutu, Landau zaglądał do niej nie tylko w ciągu dnia, ale również nocą, słowem – był szczęśliwy.

Właśnie w Charkowie Lew Dawidowicz po raz pierwszy wystąpił jako wykładowca. Na pierwszych zajęciach pojawił się w sandałach na bosych stopach, szerokich wymiętych spodniach z płótna żaglowego i niebieskiej marynarce. Ubranie młodego uczonego zrobiło furorę.

Wygłaszał wspaniałe wykłady. Dogłębna znajomość materiału i niezwykła błyskotliwość powodowały, że dla studentów stał się ulubionym wykładowcą. Gdy rozpoczynała się sesja egzaminacyjna następował jednak kres studenckich zachwyty. Spośród wszystkich studentów trzeciego roku Landau przepuścił na czwarty rok tylko jednego. Pozostali oblali. Niesłychany skandal! Zwołano natychmiast radę wydziału, a egzaminatorowi zarzucono, że to jego wina, bo przecież wiadomości studentów zależą od jakości wykładów.

– „Nie! To znaczy, że w szkole źle uczono algebry – odpierał zarzuty Landau.

– Jakiej algebry? Przecież pan egzaminował z fizyki!

– Jeśli człowiek nie zna algebry to nie potrafi wyprowadzić żadnego wzoru. Jakim więc będzie inżynierem?”.

Było jasne, że młodego wykładowcy nie da się przekonać. Wyznaczono więc innego egzaminatora, u którego przestraszeni studenci pomyślnie zdali egzamin i przeszli na czwarty rok.

W 1934 roku Landau otrzymał stopień doktora nauk fizyczno-matematycznych bez konieczności obrony pracy doktorskiej, a w 1935 przyznano mu tytuł profesora. Prace dwudziestosześcioletniego uczonego i jego kolegów z UFTI wzbudziły zainteresowanie zarówno rosyjskich, jak i zagranicznych teoretyków, a Charków przekształcił się w duże centrum fizyki. Tutaj odbywały się konferencje fizyki teoretycznej, w których brali udział Bohr, Pauli, Płaczek, Weisskopf, Peierls. Również w Charkowie zaczął się ukazywać w języku rosyjskim i niemieckim „Fizičeskij Žurnal’ Sovetskogo Sojuza”, gdzie publikowali swoje prace naukowe rosyjscy i zagraniczni uczeni.

W Charkowie pojawili się pierwsi uczniowie Landaua. Początkowo było ich niewielu. Prawie wszyscy byli rówieśnikami Lwa Dawidowicza, a kilku z nich

było starszych od niego. Tym, którzy chcieli zdać „teoretyczne minimum” profesor proponował dziewięć egzaminów: dwa z matematyki i siedem z fizyki teoretycznej. Egzamin można było zdawać do trzech razy, ale jeśli student nie zdał po raz trzeci, Lwa Dawidowicza nie można było przekonać, by zechciał dać nieszczęśnikowi kolejną szansę. W takich sytuacjach wykazywał się twardym charakterem, dlatego często uważano go za bezwzględny. Potrafił powiedzieć studentowi, który trzykrotnie nie zdał egzaminu: „Fizyka z pana nie będzie. Trzeba nazywać rzecz po imieniu. Byłoby gorzej, gdybym wprowadzał pana w błąd. Proszę więcej nie przychodzić. Mam serce z kamienia i nie będę udawał, że jest mi przykro”. Za to ile radości sprawiali mu zdolni studenci! Pojętny młodzieniec na długo zajmował jego myśli. I w czasie obiadu, i wieczorem, wciąż od nowa wspominał swojego gościa, uśmiechał się i powtarzał: „Bardzo zdolny chłopiec przyszedł dzisiaj do mnie”.

Pewnego razu na zebraniu studenckiego koła naukowego student trzeciego roku fizyki Aleksander (Szura) Kompaniejec wygłaszał referat. Ledwie skończył, wstał Lew Dawidowicz i udowodniwszy, że tezy zawarte w referacie są całkowicie bezpodstawne, wyszedł. Szura w ślad za nim. Chłopiec zupełnie nie pamiętał tego, że opuścił salę wykładową, ani dokąd szedł. Ktoś go zawołał i założył mu palto na ramiona. Wtedy zauważył go Landau i zaprosił do siebie. Mieszkanie profesora zaskoczyło Szurę. Stół, szafa, krzesła w wesołej kolorystyce: różowej, czerwonej i niebieskiej, jak w przedszkolu, w kącie tapczan z olbrzymimi poduszkami w jaskrawych powłoczkach, pod sufitem – pstrokaty abażur własnej roboty. Szura Kompaniejec jako pierwszy zdał u profesora teoretyczne minimum. Kolejnymi zdającymi byli: I. Pomieranczuk, I. Lifszyc, A. Achiezer. W ciągu 25 lat egzamin z teoretycznego minimum zdało tylko czterdziestu trzech studentów. Wkrótce siedmiu z nich zostało członkami Akademii Nauk, a szesnastu doktorami nauk.



Lew D. Landau (w środku)
z uczniami

1. Капитанов	33 д	22. Банахов	54 к
2. Лурин	34 д	23. Виден	55 к
3. Ахисер	35 (к)	24. Механид	55
4. Пауэрман	35 эк	25. Писелский	55 к
5. Мисса	35	26. Сидел	55 к
6. Левин	37 эк	27. + Безруков	55 к
7. Берестовский	39 д	28. Шаник	56 к
8. Сиродинский	40 д	29. Бондел	57 к
9. Хаамаков	41 д	30. Шанов	58
10. Хузымбин	д	31. Фараховский	59
11. Пер-Маринов	47 д	32. Арапов	59
12. Африков	47 д	33. Конраченко	59
13. Шорфе	49 д	34. Рудин	59
14. Жарков	50 к	35. Марков	60
15. Лавидис	50 к	36. Берков	60
16. Сидков	51 к	37. Мели-Бергман	60
17. Кая	51 к	38. Макаренко	61
18. Черный	52 к	39. Чумаков	61
19. Корнев	53 д	40. Будков	61
20. Дзюльманский	53 к	41. Манско	61
21. Аринел	54 к	42. Манкин	61
		43. Кона дзел	61

Lista uczniów Landaua, którzy zdali egzamin z „fizycznego minimum”

Marzeniem Landaua było przygotowanie podręczników do fizyki dla wszystkich poziomów nauczania – od podręcznika szkolnego do monografii naukowej obejmującej kurs fizyki teoretycznej dla specjalistów. Do momentu tragicznej katastrofy³ udało się skończyć prawie wszystkie tomy *Kursu fizyki teoretycznej*, a także pierwsze tomy *Kursu fizyki ogólnej* i *Fizyki dla wszystkich*. Współautorem wielotomowego *Kursu fizyki teoretycznej* jest Jewgienij Michajłowicz Lifszyc. Do tej pory historia fizyki nie знаła podobnej pracy. Pierwsze wydanie *Kursu* składało się z siedmiu książek (początkowo miało ich być dziesięć): *Mechanika*, *Teoria pola*, *Mechanika kwantowa*, *Fizyka statystyczna*, *Mechanika ośrodków ciągłych*, *Teoria sprężystości*, *Elektrodynamika ośrodków ciągłych*. Podręczniki były wiele razy przerabiane przez autorów, a każda przeróbka była równoważna napisaniu nowej książki. Książki L.D. Landaua

³ 7 stycznia 1962 roku miał miejsce tragiczny wypadek. Samochód, którym Lew Landau jechał z Moskwy do Dubnej zderzył się z ciężarówką. Dau w stanie krytycznym, z licznymi obrażeniami ciała trafił do szpitala. Heroiczny wysiłek lekarzy ratujących życie uczonego został uwieńczony sukcesem. Jednak poważne uszkodzenia mózgu miały tragiczne skutki – spowodowały zmianę osobowości uczonego i pozbawiły go naukowego geniuszu.

i I.E. Lifszycy mają wartość rzadko spotykaną w tego typu kursach. To przede wszystkim wyjątkowa koncentracja materiału, lakoniczność i rzadkie połączenie prostoty i głębi ujęcia. Czytelnik otrzymuje dokładne przedstawienie podstawowych zagadnień związanych z daną gałęzią fizyki teoretycznej, a także informacje o problemach, które wymagają jeszcze rozwiązania. Często podręczniki do fizyki teoretycznej napisane są w ten sposób, że czytelnik nawet rozumiejąc je, ze zdziwieniem odkrywa, że nie potrafi samodzielnie rozwiązać zadań z danego działu. Książki L.D. Landaua i E.M. Lifszycy przedstawiają czytelnikowi najefektywniejsze metody fizyki teoretycznej, a studiujący jest w stanie je wykorzystać do rozwiązania interesujących go zagadnień. W niemałym stopniu służą temu liczne zadania umieszczone na końcu większości rozdziałów poszczególnych kursów. Te przykłady, czasami zupełnie łatwe, czasami bardziej skomplikowane, ale zawsze błyskotliwe, absolutnie nie są ćwiczeniami z gotowymi rozwiązaniami, lecz wymagają przemyślenia i dobrego opanowania materiału. Do każdego zadania dołącza się proste objaśnienie, pomagające czytelnikowi sprawdzić swoje umiejętności. Wiele z tych zadań było w swoim czasie przedmiotem badań naukowych.

W Charkowie Landau zaproponował taką metodę pracy, w której współautor musiał pracować nie mniej niż on sam. Błędne byłoby jednak przypuszczenie, że praca zawsze przebiegała gładko i spokojnie. Było dokładnie na odwrót. Najpierw dyskutowano na temat niewielkich fragmentów tekstu. Po pewnym czasie współautor przynosił przepisany na maszynie urywek. Dau zaciekle rzucał się na każdy akapit, krytykując poszczególne sformułowania. Często zdarzało się, że współpracownik nie wytrzymał krytyki Landaua, jednak po jakimś czasie pojawiał się z przepisany na nowo tekstem. Rzuciwszy okiem na poprawiony fragment, Landau więcej już do niego nie wracał. Analizie podlegała kolejna część książki. I znów dążenie do szczegółowego przeanalizowania każdego akapitu, kolejna burza mózgów niepozostawiająca ani jednej niejasności. Ostateczny wariant musiał być nieskazitelny – łatwy, a zarazem kunsztowny w formie.

W instytucie Dau zdobył sobie sławę zawiadziaki. Był gotowy wdać się w bójkę z każdym mydlącym oczy, z każdym pochlebcą czy też, jak ich nazywał z ukraińska, z „pidlabuznyką”. Kiedyś pojawił się pewien „autor”, który przygotowywał pracę pod kierunkiem zagranicznego uczonego. Rękopis trafił do recenzji do profesora Landaua, który od razu ustalił, że praca jest plagiatem. „Praca” otrzymała odpowiednią recenzję, ale plagiator nie mógł się uspokoić. Co roku dzwonił do Lwa Dawidowicza wypowiadając tylko dwa słowa: „Kat! Obłudnik!”.

W Charkowie mieszkał niejaki *N*, człowiek do granic możliwości zarozumiały, który „pracował” bardzo dużo i opublikował mnóstwo artykułów. Ale często wykorzystywał cudze prace naukowe, po prostu, odpisywał od innych. Landau zrobił temu uczonemu złośliwy kawał: poprosił swoich przyjaciół

w Moskwie, żeby wysłali telegram zawiadamiający *N*, że Komitet Noblowski postanowił przyznać mu Nagrodę Nobla. Prosi więc profesora *N*, by do pierwszego kwietnia przedstawił Wydziałowi Fizyki Teoretycznej UFTI wszystkie swoje prace przepisane na maszynie w dwóch egzemplarzach. *N* stracił głowę. Czasu było niewiele, nie zwrócił więc uwagi na datę, jaką wyznaczono mu na dostarczenie rękopisów. Dusząc się z pychy i przekonania o własnej wielkości, przestał się witać ze starymi znajomymi. Czy trzeba opisywać, co się z nim działo, gdy położywszy na stole kierującego Wydziałem Fizyki Teoretycznej L.D. Landaua przepisane artykuły, nagle usłyszał: „Czyżby pan sądził, że za tę makulaturę mogą przyznać Nagrodę Nobla? Pierwszego kwietnia! Zaiste – Bóg stworzył durni i gęsi, żeby było kogo drażnić”.

Mimo wszystko przyjaciele czuli się z nim dobrze. Była w nim jakaś nieprawdopodobna swoboda i życzliwość. Zawsze starał się wyświadczyć innym koleżeńską przysługę. Nie pomóc, ale właśnie wyświadczyć przysługę. Cudzy ból odczuwał jak swój. Przyjaciele z Charkowa mówili o nim: „Dau cierpiący za wszystkich”.

Pewnego razu nowy rektor uniwersytetu wezwał Lwa Dawidowicza do swojego gabinetu i tonem pełnym niezadowolenia, powiedział:

– „Ma pan dziwne metody nauczania, profesorze. Na przykład zadaje pan studentom fizyki pytania o takie rzeczy, które wchodzą w zakres programu wydziału filologicznego, na przykład, kto napisał *Eugeniusza Oniegina* i inne temu podobne. Pedagogika nie dopuszcza niczego podobnego.

– W życiu nie słyszałem większej głupoty – odpowiedział Dau.

Rektor obruszył się: – Jeśli natychmiast nie odwoła pan swoich słów, będę zmuszony pana zwolnić”.

Tego samego dnia Landau dostał wypowiedzenie z pracy, mimo że rektor nie mógł zwolnić profesora bez zgody władz oświatowych. Lew uznał za bezsensowne tracić czas i siły, by udowodnić rektorowi bezprawność jego działania. Wyjechał do Moskwy. Po trzech tygodniach zakomunikował swoim przyjaciołom z Charkowa, że będzie pracował w Instytucie Problemów Fizycznych u P.L. Kapicy⁴. „A wy – pisali profesor – osiągnęliście już poziom klasy 3 i ½ i możecie pracować samodzielnie⁵”.

Życie w Instytucie Problemów Fizycznych w Moskwie było inspiracją, a praca była szczególnie interesująca. Dau miał szczęście, że trafił do „Kapicz-

⁴ Piotr Leonidowicz Kapica (1894–1984) wybitny fizyk rosyjski, uczeń i współpracownik E. Rutherforda, członek Królewskiego Towarzystwa Naukowego, badacz fizyki niskich temperatur, odkrywca zjawiska nadciekłości helu, laureat Nagrody Nobla (1978). *Jesienią 1934 roku, gdy pojechałem jak zwykle do Związku Radzieckiego, by odwiedzić matkę i przyjaciół, zostałem zupełnie niespodziewanie pozbawiony możliwości powrotu do Cambridge* – pisał Piotr Leonidowicz Kapica w swoich wspomnieniach opublikowanych w 1966 roku w czasopiśmie „Novyj mir”. Kapicę zatrzymano w Moskwie, by zorganizował nowy instytut fizyki.

⁵ Landau zaproponował klasyfikację fizyków przy użyciu skali logarytmicznej. Einstein osiągał w tej klasyfikacji poziom ½, Bohr, Dirac, Fermi – 1, Landau – 2.

nika” (tak nazywali instytut jego pracownicy). Szybko przyzwyczył się do nowego miejsca, gdzie całkowicie pochłonęła go praca naukowa. W instytucie panowała twórcza atmosfera i właśnie dzięki temu udało mu się stworzyć jedną z najlepszych prac dotyczącą nadciekłości ciekłego helu. W 1937 roku Piotr Leonidowicz Kapica odkrył, że hel wykazuje pewną paradoksalną właściwość: przy ochładzaniu do temperatur bliskich zera bezwzględnej ciekły hel nie tylko nie zmienia się w ciało stałe, ale traci lepkość, przechodząc w stan nadciekłości. Zero bezwzględne to temperatura, w której ustaje chaotyczny ruch atomów, a zatem w zerze bezwzględnym wszystkie ciała powinny być ciałami stałymi. Ciekły hel to jedyna substancja, która w zerze bezwzględnym nie zmienia się w ciało stałe.

Prace nad teorią nadciekłości zostały przerwane, gdy pod koniec kwietnia 1938 roku Landau został aresztowany. Były to lata wielkiego stalinowskiego terroru, okres tzw. „wielkiej czystki”⁶. „Na podstawie nedorzecznego donosu – pisał po latach w «Komsomolskiej Prawdzie» – zostałem aresztowany. Oskarżono mnie o to, że jestem niemieckim szpiegiem. Dzisiaj wydaje mi się to nawet zabawne, ale wtedy, uwierzcie mi, nie było mi do śmiechu. Spędziłem rok w więzieniu i było jasne, że nie wytrzymam tam ani pół roku dłużej: zwyczajnie umierałem. Kapica pojechał na Kreml i oświadczył, że jest mu potrzebne moje zwolnienie, bo w przeciwnym razie będzie zmuszony opuścić instytut. Uwolniono mnie. Nie trzeba wyjaśniać, że w tym czasie taki czyn wymagał niemałej odwagi i krystalicznej uczciwości”.

W przeddzień wojny zmarła matka Landaua. Dau nie posiadał się z żalu, z pogrzebu wrócił starszy o dziesięć lat. Żona uważała, że przez pewien czas nie powinien pracować, ale w czwartek za pięć jedenastą, Dau jak zwykle wyszedł z domu i zajęcia rozpoczęły się bez opóźnienia⁷. Wiedział, że wielu studentów przyjeżdża na seminarium z innych, czasami odległych, miast.

W tym czasie prace Landaua zaczęły być tak popularne, że profesorowie z innych miast przysyłali do niego swoich studentów. Jesienią 1940 roku do Moskwy przyjechało dwóch studentów piątego roku z Uniwersytetu w Dniepropietrowsku. Landau przywitał się z młodymi ludźmi, zaprosił ich do gabinetu, podyktował każdemu z nich całość i gdzieś wyszedł. Po godzinie wpadł do pokoju i w sekundzie ocenił sytuację: jeden z nowych rozwiązał zadanie jak

⁶ Wielki terror – okres w historii ZSRR szczególnego nasilenia terroru policyjnego NKWD w latach 30. XX wieku. W efekcie zaplanowanych i zorganizowanych represji zamordowano miliony niewinnych ludzi.

⁷ Przez ponad dwadzieścia lat, w czwartek punktualnie o godzinie 11.00, rozpoczynało się seminarium prowadzone przez L.D Landaua. To była „święta godzina”. Dau nigdy nie zaczynał zajęć ani minutę wcześniej, ani minutę później. Był dumny z tego, że w ciągu całego życia nigdy nigdzie się nie spóźnił. Ostatni moment przed jedenastą nosił nazwę „migdałowej minuty”, bo zwykle w ostatniej chwili na seminarium pojawiał się największy kawalarz wśród fizyków A. Migdał. W latach pięćdziesiątych w spotkaniach fizyków uczestniczyło ok. 50 seminarzystów, wśród nich znalazło się kilka kobiet.

należy, drugi nie otrzymał dobrego wyniku. Pierwszy z nich nazywał się Chałatnikow. Wkrótce wyśmienicie zdał fizyczne minimum i został pełnoprawnym uczestnikiem seminariów Lwa Dawidowicza. Nieco wcześniej pojawił się w Kapiczniku inny utalentowany młodzieniec – Arkady Migdał. Podszedł do Lwa Dawidowicza podczas przerwy w obradach konferencji naukowej i zapytał czy może pokazać mu swoje prace, które tak spodobały się profesorowi, że zwolnił go z obowiązku zdawania fizycznego minimum i od razu dołączył do grona seminarzystów.

Pewnego razu Landau odwiedził nauczyciel gimnazjalny w dość podeszłym wieku. Lew Dawidowicz z rozrzuwaniem patrzył na wysokiego starca z dostojną siwą bródką. Nauczyciel wzruszył się z radości. Dau nie wiedział gdzie posadzić gościa, cały czas rozpływał się w zachwytach, podczas gdy nauczyciel, uspokoiwszy się nieco, powiedział: „Lwie Dawidowiczu, dopiero teraz mogę uczciwie powiedzieć, jak bardzo bałem się ciebie, to znaczy pana... Landau wykonał ręką taki ruch, jakby chciał zaprotestować – to znaczy odpytywać ciebie. Bo nigdy nie mogłem zrozumieć jak, w jaki sposób, ty rozwiązujesz zadania. A to ci uczeń był, taki uczeń...”

Do Landaua nadal przyjeżdżało wielu studentów i aspirantów. Kiedyś rano w jego mieszkaniu rozległ się dzwonek. Na progu stał przestraszony chłopiec Alosza Abrikosow, który przywitawszy się z profesorem powiedział, że jest studentem trzeciego roku fizyki. „Czy ma pan pióro? – zapytał Landau. Proszę rozwiązać całkę”. Podyktował całkę i wyszedł. Po pewnym czasie wrócił. Był bardzo zadowolony z ucznia; na kartce zapisał nazwisko kandydata na seminarium i według sobie tylko znanych zasad wystawił mu ocenę. Później przedstawił studentowi program fizycznego minimum. Wkrótce Alosza zaczął uczestniczyć w seminariach Landaua. Po osiemnastu latach Lew Dawidowicz głosował na swojego ucznia w wyborach do Akademii Nauk SSSR.

Wiele nerwów, czasu i sił kosztował go każdy uczeń. Trzeba było pokazać mu jak pracować, nauczyć oszczędzać czas, wpoić samodyscyplinę. Najcenniejsze dla pracy twórczej godziny poranne oddawał Dau swoim uczniom. Jeśli studentowi udało się dodzwonić do Landaua przed południem, spotykał się z nim tego samego dnia. Na telefony po południu profesor odpowiadał: „Proszę przyjść jutro rano”. Gdy nabrawszy śmiałości zadzwonił do niego jeden ze studentów przygotowujący się do egzaminu, usłyszał: „Proszę przyjść o dziewiątej. Muszę mieć zupełnie jasną głowę, żeby rozmawiać na tematy naukowe”. Egzaminy z teoretycznego minimum odbywały się, oczywiście, tylko rano.

„Najważniejsza w życiu jest prawda – i w imię prawdy człowiek powinien być bezlitosny dla samego siebie. Prawda i praca. Baczcie, by nie roztrwonić danego wam czasu na rzeczy błahe, poniżające człowieka” – powtarzał Lew Dawidowicz swoim studentom.

Uczniowie Landaua wiedzieli, że można w stosunku do niego popełnić dwa poważne wykroczenia: oświadczyć, że uważa się profesora *N* za poważnego

człowieka i drugie przewinienie – przedstawić zły referat na seminarium. Zbesztać winowajcę mógł bardziej niż ktokolwiek inny. Kolejny słaby referat pozbawiał ucznia możliwości wystąpienia na seminarium w przyszłości.

Początkowo na seminarium analizowano treść artykułów teoretycznych. W latach 50. ta zasada uległa zmianie: tematami referatów stały się wyłącznie prace doświadczalne – dla nich przedstawiano wyjaśnienia teoretyczne. Uczestnicy seminariów pracowali bardzo dużo, do wystąpień zobowiązani byli wszyscy. Na początku referujący powinien przedstawić wyniki swojej pracy, zasygnalizować zasadnicze tezy, a później przystąpić do szczegółowego omówienia tematu. Wykładającemu nieustannie przerywano, co chwilę wszczynano dyskusję i kiedy już nikt nikogo nie słuchał, a każdy chciał coś powiedzieć, włączał się Landau.

Uczestnicy seminarium nie przepuścili żadnej wartościowej pracy, niezależnie od tego, na którym krańcu świata była opublikowana. Dla Landaua było to podwójnie pożyteczne: twórcza młodzież – jego uczniowie – uczyli orientować się w literaturze naukowej, a równocześnie sam zapoznawał się z nowymi pracami, dzięki czemu oszczędzał czas. Jewgienij Michajłowicz Lifszyc, który z Landauem przepracował ramię w ramię ćwierć wieku, pisze: „Nieustanny kontakt z mnóstwem uczniów i kolegów był dla Lwa Dawidowicza źródłem wiedzy”. Ta wiedza docierała w czasie wielogodzinnych dyskusji i poprzez referaty wygłaszane na prowadzonym przez niego seminarium. SeminaRIA odbywały się regularnie, raz na tydzień, w ciągu prawie trzydziestu lat, a w ostatnim okresie przybrały charakter spotkań fizyków-teoretyków z całej Moskwy.

Dla Lwa Dawidowicza wysłuchanie wykładu nigdy nie było formalnością. Nie uspokoił się dopóki w pełni nie została wyjaśniona istota zagadnienia i dopóki nie odrzucono wszelkich śladów „filologii” – bezpodstawnych twierdzeń lub przypuszczeń wysuwanych według zasady: „a dlaczego by nie tak?”. W wyniku dyskusji i wnikliwej krytyki wiele prac okazywało się „patologicznymi” i Lew Dawidowicz tracił dla nich wszelkie zainteresowanie. Z drugiej strony artykuły, które rzeczywiście zawierały nowe idee lub interesujące wyniki badań, zaliczano do tzw. „złotych zasobów” i Dau zapamiętywał je na zawsze. Wystarczyło mu poznać tylko podstawowy problem, by móc odtworzyć wszystkie zawarte w pracy wyniki. Było mu łatwiej otrzymać je samodzielnie niż śledzić szczegóły w rozumowaniu autora. W ten sposób przeanalizował i głęboko przemyślał większość podstawowych zagadnień ze wszystkich dziedzin fizyki teoretycznej. Landau zawsze dążył do uczynienia rzeczy skomplikowanych prostymi, by jasno pokazać prostotę zasad przyrody leżących u podstaw wszelkich zjawisk. Ta umiejętność „trywializowania” rzeczy, jak sam powtarzał, stanowiła przedmiot jego osobistej dumy.

Uczniowie Landaua wiedzieli: na seminarium nikt za nich nie będzie myślał, trzeba ciężko pracować, ale równocześnie nie odstępowało ich przeświadczenie, że trud nie jest daremny, bo pracują nad tym samym zagadnieniem, co ich nauczyciel, a umiejętność doboru zadań była jedną z najwspanialszych cech Lan-

daa. W tym tkwił jeden z sekretów popularności jego szkoły. Nic dziwnego, że fizycy czuli olbrzymi respekt dla twórczego geniuszu Landaua, ale jego blask (do niego bardzo pasuje to słowo), życzliwość i dobroć podziwiali jeszcze bardziej. Gdy sami zostawali naukowcami mogli ocenić Landaua jako fizyka i ta ocena była bardzo wysoka. Żaden z jego uczniów nie widział w nim patriarchy, dla nich był zwykłym człowiekiem. Z czasem seminarium przekształciło się w ścisłą przyjaźń, braterstwo. Kierowano się jedną zasadą – każda nowość natchmiasztawała się dobrem ogólnym. Uczestnicy seminarium stali się podobni do siebie: można ich było poznać po tym, że zawsze dążyli do prawdy.

Dla Landaua seminarium było przede wszystkim szkołą, w której uczył, szkołą, która wypracowywała nowe metody badawcze. Ich znaczenie Landau określał w ten sposób: „Metoda jest ważniejsza niż odkrycie, bowiem właściwa metoda prowadzi do nowych, jeszcze cenniejszych odkryć. Nigdy nie warto pracować z myślą o celach ubocznych, z myślą o tym, by dokonać wielkiego odkrycia i uzyskać sławę, bo w ten sposób nikt niczego nowego nie odkryje”.

22 stycznia 1958 roku w Instytucie obchodzono pięćdziesiąte urodziny L.D. Landaua. Dau wyglądał na szczęśliwego. Oczy mu błyszczały, uśmiechał się radośnie jak dziecko. Zasypano go prezentami. I to jakimi! Przygotowywano je długo, z wielką miłością do jubilata. Przedstawiono żartobliwy życiorys pięćdziesięciolatka, do którego dołączono nie mniej błyskotliwy „Leksykon”, gdzie znalazły się między innymi takie zapisy:

„Aspiranci – gęsi pletwonogie.

Bohra zasada – zbieżność nieprawdziwej teorii z doświadczeniem niczego nie dowodzi, lecz wśród głupich teorii zawsze znajdzie się pewna ich ilość zgodnych z doświadczeniem.

Vežlivost’ (Uprzejmość) – charakterystyczna cecha teoretyków ze szkoły Landaua.

Grafomani – wszyscy teoretycy oprócz E.M. Lifszycy.

Dokładčik (Referent) – twarz odpowiedzialna personalnie za wszystkie błędy *Physical Review*.

Eres’ (Herezja) – różne postacie patologii.

Žul’ničestvo (Kręactwo) – prośbę spytać doświadczalników.

Zawiść – o niej wiedzą nawet teoretycy.

Idolopoklonstvo (Bałwochwalstwo) – miłość do wykładowcy.

Książki (naukowe) – teoretycy piszą je chętnie, ale ich nie czytają.

Naukoobrazie (Pseudonaukowość) – upiększenie artykułu naukowego.

Rogi – ozdabiają mężczyznę.

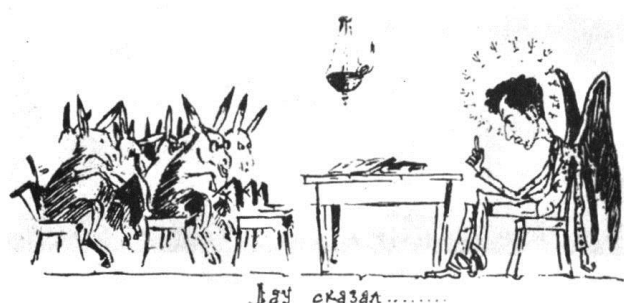
Sumassestvie (Wariactwo) – dopada człowieka po przeczytaniu *Elektrodynamici ośrodków ciągłych*.

Teoretycy – ślepe kocięta.

Učeba (Nauka) – ulubione zajęcie kobiety.

Har’kov (Charków) – księstwo wasalne.

Sześciu autorów – nie za wielu? Itd., itp.



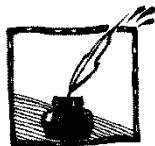
„Dau powiedział” – żartobliwy rysunek przygotowany z okazji 50. urodzin Wielkiego Teoretyka

Dau był zachwycony ikoną z jego podobizną, cudownym znaczkiem pocztowym z jego portretem, ale najbardziej spodobała mu się ciężka marmurowa tablica – „Dziesięć przykazań Landaua”, na której wygrawerowano jego dziesięć najbardziej znaczących odkryć.



Ci, którzy mieli zaszczyt należeć do grona uczniów i przyjaciół Landaua uważali często, że Dau w ogóle się nie starzeje. Nikt nigdy nie nudził się w jego towarzystwie, nie słabła potęga jego umysłu, a osobowość nie traciła blasku. Tym bardziej bezsensownym i okrutnym wydaje się wypadek, który na zawsze przerwał jego działalność naukową i nie pozwolił powrócić do pełni sił twórczych.

1 listopada 1962 roku Królewska Akademia Nauk Szwecji postanowiła przyznać temu wybitnemu uczonemu Nagrodę Nobla z fizyki za pionierskie prace w dziedzinie teorii materii skondensowanej, w szczególności ciekłego helu.



Zadanie z mechaniki w arkuszu maturalnym

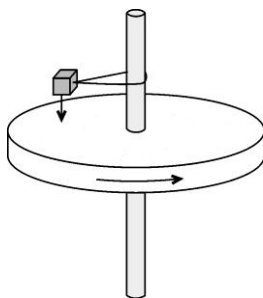
Jadwiga Salach

Podczas tegorocznej matury w arkuszu przeznaczonym dla poziomu rozszerzonego znalazło się zadanie dotyczące niesprężystego zderzenia ciężarka z obracającym się krążkiem. W poleceniach nie żądano od uczniów dogłębnej analizy tego zjawiska, należało jedynie obliczyć wartość prędkości kątowej układu po zderzeniu, czas, po którym ta wspólna prędkość została osiągnięta i stratę energii mechanicznej. Sam problem jest jednak ciekawy i może być pouczający ze względu na możliwość rozpatrywania ruchu ciężarka w różnych układach odniesienia, a także możliwość pokazania, że w opisanym zjawisku oprócz zasady zachowania momentu pędu łatwo jest zastosować trzecią zasadę dynamiki dla ruchu obrotowego, co rzadko się w takich przypadkach czyni. Polecenie obliczenia czasu trwania zderzenia sugeruje potrzebę rozważenia, co w tym czasie dzieje się z krążkiem lub/i z ciężarkiem, czego nie musi się robić, stosując zasadę zachowania momentu pędu.

Przytoczmy najpierw w całości (i dosłownie) temat zadania 1, zawartego w arkuszu maturalnym:

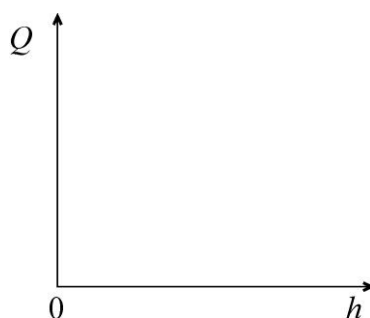
Zadanie 1.

Krążek o momencie bezwładności $0,01 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ obracał się bez tarcia wokół swojej osi z prędkością kątową 32 rad/s . Na ten krążek spadł ciężarek o masie $0,6 \text{ kg}$, upuszczony bez prędkości początkowej. Ciężarek był połączony z osią krążka nitką ślizgającą się po osi bez tarcia (rys. 1). Po chwili ciężarek zaczął się obracać razem z krążkiem, pozostając w odległości 10 cm od osi obrotu. Rozmiary ciężarka można pominąć.



Rys. 1.

- 1.1. Napisz nazwę zasady zachowania, która pozwala wyznaczyć wspólną prędkość kątową krążka i ciężarka. Oblicz wartość tej prędkości kątowej.
- 1.2. Współczynnik tarcia ciężarka o krążek wynosi 0,3. Ponadto zakładamy, że można pominąć efekty uderzenia przy upadku (tzn. przyjąć, że wysokość spadku była bardzo mała). Korzystając z powyższych informacji wyprowadź wzór na moment siły oddziaływania ciężarka na krążek oraz oblicz, po jakim czasie od upadku ciężarka jego poślizg ustał i prędkość kątowa krążka osiągnęła wartość końcową 20 rad/s.
- 1.3. Początkowo ciężarek znajdował się na wysokości 40 cm nad krążkiem. Oblicz całkowitą energię mechaniczną układu
- w sytuacji początkowej,
 - po upadku ciężarka oraz zmniejszeniu prędkości kątowej krążka do wartości 20 rad/s.
- Oblicz ciepło wydzielone w czasie upadku.
- 1.4. Doświadczenie opisane w informacji wstępnej wykonano kilkakrotnie, zmieniając wysokość spadku ciężarka. Naszkicuj wykres zależności wydzielonego ciepła Q od wysokości spadku h (rys. 2). Na wykresie nie nanos wartości liczbowych.

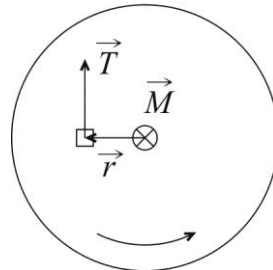


Rys. 2.

Nie komentując samego sposobu sformułowania tematu, odniosę się krytycznie jedynie do użytego dwukrotnie pojęcia „wydzielone ciepło”. Podczas niesprężystego zderzenia ciężarka z krążkiem część energii mechanicznej układu została zamieniona na jego energię wewnętrzną (co objawiło się niewielkim wzrostem temperatury ciężarka i krążka) i proces ten nie ma nic wspólnego z ciepłem. Dopiero w następstwie wzrostu temperatury układu część jego energii wewnętrznej została przekazana chłodniejszemu otoczeniu w postaci ciepła. W dalszych rozważaniach pominię tę część tematu, zajmę się oddziaływaniem ciężarka z krążkiem.

Autor zadania, formułując polecenie 1.2 wyraźnie ukierunkowuje ucznia na zajęcie się ruchem opóźnionym krążka.

widok z góry



Rys. 3.

Moment siły tarcia działającej na krążek (zwrócony pod rysunek 3):

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{T},$$

a jego wartość: $M = \mu mgr,$

gdzie μ jest współczynnikiem tarcia, a m masą ciężarka. Korzystając z drugiej zasady dynamiki dla ruchu obrotowego krążka

$$\varepsilon = \frac{M}{I}$$

i z definicji wartości przyspieszenia kąowego

$$\varepsilon = \frac{\omega_0 - \omega}{t},$$

możemy łatwo obliczyć czas zmniejszania się prędkości kąowej:

$$\frac{\mu mgr}{I} = \frac{\omega_0 - \omega}{t}, \quad t = \frac{(\omega_0 - \omega)I}{\mu mgr}.$$

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymujemy:

$$t = \frac{(32 - 20) \frac{1}{s} \cdot 0,01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{0,3 \cdot 0,6 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,1 \text{ m}} = \frac{2}{3} \text{ s}.$$

Po takim czasie ustali się prędkość kąowa układu, tzn. krążek przestanie zwalniać, a ciężarek przestanie przyspieszać, zatem ustanie poślizg.

Zadanie można rozwiązać inaczej, stosując trzecią zasadę dynamiki dla ruchu obrotowego – momenty sił wzajemnego oddziaływania ciężarka i krążka mają

takie same wartości i przeciwne zwroty. Pod działaniem momentu siły tarcia pochodzącego od krążka ciężarek (który początkowo spoczywał w układzie laboratoryjnym) doznał przyspieszenia kąтового $\vec{\varepsilon}_c$ o wartości $\varepsilon_c = \frac{\omega}{t}$.

Drugą zasadę dynamiki stosujemy teraz do ruchu przyspieszonego ciężarka:

$$\varepsilon_c = \frac{M}{I_c},$$

$$\frac{\omega}{t} = \frac{\mu m g r}{m r^2}, \quad t = \frac{r \omega}{\mu g}.$$

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymamy wynik:

$$t = \frac{0,1 \text{ m} \cdot 20 \frac{1}{\text{s}}}{0,3 \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \frac{2}{3} \text{ s}.$$

Obydwa ruchy (krążka i ciężarka) zostały opisane w układzie laboratoryjnym.

Rozważmy ruch ciężarka w układzie odniesienia, związanym z krążkiem. W czasie t odważnik ślizga się po krążku, jego początkowa prędkość kątowa w tym układzie ma wartość ω_0 , a liniowa $v_0 = \omega_0 r$; końcowa prędkość jest równa zero (ustaje poślizg). Zatem względem krążka ciężarek porusza się ruchem jednostajnie opóźnionym z przyspieszeniem o wartości

$$\varepsilon_{c, \text{wzgl}} = \frac{\omega_0}{t} \text{ zwróconym w górę.}$$

Aby skorzystać z drugiej zasady dynamiki, tak jak robiliśmy to w poprzednich rozumowaniach, musimy ustalić, jaka jest wartość momentu siły hamującej ruch ciężarka w tym układzie odniesienia. Układ związany z krążkiem to układ nieinercjalny, więc oprócz rzeczywistej siły tarcia na ciężarek działa jeszcze siła bezwładności unoszenia \vec{F}_b^* (rys. 4), której wartość jest równa iloczynowi masy m i wartości przyspieszenia stycznego punktu krążka odległego o r od osi, tzn. $\varepsilon_k \cdot r$, gdzie

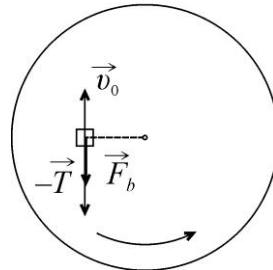
$$\varepsilon_k = \frac{\mu m g r}{I}$$

(patrz początkowa część rozwiązania). Ostatecznie

$$F_b = m \frac{\mu m g r}{I} \cdot r = \frac{\mu g m^2 r^2}{I}.$$

* Siła odśrodkowa bezwładności jest zrównoważona przez siłę sprężystości nitki.

widok z góry



Rys. 4.

Teraz możemy zapisać drugą zasadę dynamiki dla ruchu ciężarka po okręgu w układzie krążka:

$$\varepsilon_{c, \text{wzgl}} = \frac{(F_b + T)r}{mr^2} = \frac{F_b + T}{mr},$$

$$\frac{\omega_0}{t} = \frac{\frac{\mu g m^2 r^2}{I} + \mu m g}{mr} = \mu g \left(\frac{mr}{I} + \frac{1}{r} \right) = \mu g \frac{mr^2 + I}{Ir},$$

skąd

$$t = \frac{\omega_0 I r}{\mu g (mr^2 + I)}.$$

Otrzymaliśmy trzeci wzór na czas zderzenia, inny niż dwa poprzednie, jednak po podstawieniu wartości

$$t = \frac{32 \frac{1}{s} \cdot 0,01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 0,1 \text{ m}}{0,3 \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (0,6 \cdot 0,01 + 0,01) \text{ kg} \cdot \text{m}^2} = \frac{2}{3} \text{ s}$$

wynik liczbowy jest taki sam!

Spójrzmy jeszcze na ten problem z punktu widzenia względności ruchu. Przyspieszenie kątowe ciężarka w układzie laboratoryjnym powinno być równe sumie przyspieszeń ciężarka względem krążka i przyspieszenia krążka. Sprawdzimy, że tak jest istotnie. Obliczmy wartości liczbowe tych przyspieszeń:

- Przyspieszenie ciężarka w układzie odniesienia krążka ma wartość:

$$\varepsilon_{c, \text{wzgl}} = \frac{\omega_0}{t} = \frac{32 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{\frac{2}{3} \text{ s}} = 48 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}.$$

$\vec{\varepsilon}_{c,wzgl}$ jest zwrócone w górę – ruch opóźniony, dla osoby patrzącej z góry zgodny z ruchem wskazówek zegara.

- Przyspieszenie krążka (w układzie laboratoryjnym) ma wartość:

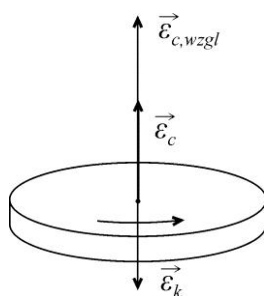
$$\varepsilon_k = \frac{\omega_0 - \omega}{t} = \frac{(32 - 20) \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{\frac{2}{3} \text{s}} = 18 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}.$$

$\vec{\varepsilon}_k$ jest zwrócone w dół – ruch opóźniony, dla osoby patrzącej z góry zgodny z ruchem wskazówek zegara.

- Przyspieszenie ciężarka w układzie laboratoryjnym ma wartość:

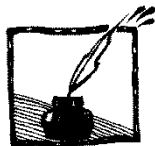
$$\varepsilon_c = \frac{\omega}{t} = \frac{20 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{\frac{2}{3} \text{s}} = 30 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}.$$

$\vec{\varepsilon}_c$ jest zwrócone w górę – ruch przyspieszony, dla osoby patrzącej z góry zgodny z ruchem wskazówek zegara (rys. 5).



Rys. 5.

Istotnie $\vec{\varepsilon}_c = \vec{\varepsilon}_{c,wzgl} + \vec{\varepsilon}_k$.



Co znaczy wiedzieć – błędne wyobrażenia uczniów

Marcin Braun*

Ten artykuł powstał z dwóch powodów. Po pierwsze, na świecie przeprowadzono wiele badań, których rezultaty pomogą skuteczniej uczyć optyki. Chciałbym przedstawić je polskim nauczycielom. Mam nadzieję, że bardziej zainteresowani Czytelnicy sięgną do cytowanych prac. Można je znaleźć w bibliotekach wielu wyższych uczelni. Po drugie, jako autor podręcznika do gimnazjum, spotykałem się z zarzutami: „Po co pisać, że w procesie widzenia światło wpada do oka? Inni nie piszą, bo to oczywiste”. Albo: „Po co wykazywać doświadczalnie, że światło odbija się od dłoni? Przecież jakby się nie odbijało, to byśmy jej nie widzieli”. Nie wszystkim miałem okazję odpowiedzieć osobiście, może więc wątpliwości innych osób rozwieję w tej formie.

Wiedza potoczna, „wiedza ujemna”

Gdyby uczniowie przychodzili na pierwszą lekcję z zerową wiedzą, od razu byłoby wiadomo, czego ich trzeba nauczyć: wszystkiego. Tak jednak nie jest. Z jednej strony często mają już wiadomości, do których na lekcjach można się odwoływać. Z drugiej, niestety, utrwaliли sobie różne błędne przekonania. „Wiedzą” na przykład, że aby ciało poruszało się ze stałą prędkością, potrzebna jest siła. W końcu, gdy zdejmujemy nogę z gazu, samochód zmniejsza prędkość. Nauczyciel musi nie tylko wprowadzać nowe wiadomości, ale też wykorzeniać tę nieprawidłową wiedzę potoczną. O ile jednak przytoczony wcześniej przykład nieznamośności zasady bezwładności jest dosyć znany, o tyle rzadziej mówi się o wiedzy potocznej w dziedzinie optyki.

Widzenie aktywne – oko jako radar

„Tam sięgaj, gdzie wzrok nie sięga” – radzi Mickiewicz, a i my na co dzień mówimy „sięgnąć wzrokiem”, podobnie jak „skierować *na coś* wzrok” czy choćby „popatrzeć *na coś*”. Nie myślimy zwykle o tym, że te sformułowania są sprzeczne z naszą wiedzą z fizyki. Sugerują one bowiem, że w procesie widzenia zachodzi jakiś ruch *od oka do przedmiotu*. I nic dziwnego: wywodzą się one z czasów, gdy tak właśnie wyobrażano sobie proces widzenia.

Dziś wiemy, że jest przeciwnie. Widzimy dzięki światłu, ono zaś wychodzi z przedmiotu (niezależnie od tego, czy jest przezeń emitowane, czy tylko odbijane) i trafia do oka.

* Marcin Braun jest współautorem podręczników do nauczania fizyki w gimnazjum (*To jest fizyka*), w szkole ponadgimnazjalnej (*Odkryć fizykę*), a także przyrody w szkole podstawowej (*Na tropach przyrody*).

Ten fakt bywa często traktowany jako tak oczywisty, że nie trzeba nawet o nim pisać w podręcznikach ani mówić na lekcji. Nic bardziej błędnego! Dopóki uczniowie nie dowiedzą się, na czym naprawdę polega widzenie, ich wyobrażenia są takie, jak przed wiekami – i jak to sugeruje język potoczny.

Na początku lat dziewięćdziesiątych przeprowadzono w Polsce badania opisane w pracy [1]. Pytano w nich uczniów m.in. „jak to się dzieje, że widzisz trzymany w ręku długopis”. Z częścią uczniów (36 osób przed nauczaniem optyki i 24 po zakończeniu tego działu) przeprowadzono dłuższe wywiady, aby lepiej zrozumieć ich odpowiedzi.

Okazało się, że prawidłowe wyjaśnienie przedstawiło prawie 2/3 uczniów po kursie optyki i ani jeden przed tym kursem. Niestety, grupa uczniów rozumujących błędnie była spora. Aż 19% uczniów przed nauczaniem optyki uważało, że jakiś promień lub impuls wychodzi z oka do przedmiotu, a następnie wraca do oka. Tak więc wyobrażali sobie oni nasz narząd wzroku jako rodzaj radaru. A teraz najciekawsza – i najbardziej niepokojąca – wiadomość. Wśród uczniów, którzy już się uczyli optyki, taki pogląd prezentowało **więcej** osób, bo aż 25%.

Na marginesie wspomnijmy, że z całą książką, w której znajduje się praca [1], warto zapoznać się z jeszcze jednego powodu. Otóż słyszymy coraz częściej, jak wysoki poziom fizyki mieliśmy dawniej i jak strasznie spadł on w ostatnich latach. Gdy zamiast polegać na własnej pamięci zajrzemy do wyników badań, okaże się, że w „dawnych dobrych czasach” wcale nie było tak różowo. Poziom był wysoki w programach nauczania i podręcznikach, ale nie w głowach uczniów.

Oko jako radar

Wróćmy jednak do problemu z mechanizmem widzenia. Dotyczy on nie tylko Polski. Podobne wyniki otrzymali badacze w wielu krajach (niektóre z nich omówiono w pracach [1] i [2]). Oprócz zwolenników „aktywnego widzenia” wśród uczniów można znaleźć i takich, którzy wiedzą, że światło musi paść na przedmiot, nie rozumieją jednak, że następnie musi się ono odbić i trafić do oka. Według nich bieg światła kończy się na przedmiocie, który zmienia właściwości – staje się oświetlony i dzięki temu widoczny. Inni z kolei uważają, że światło jest potrzebne po to, aby oświetlić oko. Wreszcie niektórzy uważają, że „widzimy po prostu dlatego, że mamy oczy” i nie dostrzegają związku widzenia ze światłem.

Skąd ta sytuacja? Autorzy pracy [2] piszą:

Oko wspomiane jest w podręcznikach w kontekście urządzeń optycznych, jako przykład „gadżetu” z zastosowaniem soczewki, wśród innych przyrządów optycznych. (...) W nauczaniu optyki często przyjmuje się za oczywisty fakt, że światło musi wpaść do oka, aby nastąpiło widzenie. Rzadko zauważa się, że uczenia trzeba do tego przekonać.

Czy kartka odbija światło?

Skoro uczniowie nie kojarzą widzenia z odbiciem światła, to możliwość zobaczenia dłoni czy kartki papieru wcale nie jest dla nich dowodem na to, że światło odbija się od tych ciał. Dzieci na ogół sądzą, że światło odbija się tylko od zwierciadła, bo światłem odbitym od zwierciadła można coś oświetlić. Przeglądanie się w zwierciadle wcale nie musi być dla dziecka dowodem na odbicie światła, ale „puszczanie zajęczków” już tak.

„Światło odbija się od lustra, ale od papieru się nie odbija. Ono tam zostaje” – mówi czternastolatka w badaniach opisanych w książce [3]. „Światło nie odbija się od waty, ona jest zbyt miękka” – mówi inny uczeń. Co zrobić, aby przeciwdziałać takim poglądom? Radę znajdziemy w tej samej książce:

„Można za podstawę przyjąć przypadek zwierciadła, bo większość dzieci doskonale wie, że odbija ono światło. Dzieci tłumaczą to faktem, że za pomocą lusterka można oświetlić inny przedmiot albo skierować światło na kogoś. Z białą kartką papieru możemy powtórzyć podobne doświadczenia: w letnie południe biała kartka lśni w świetle słonecznym; w zaciemnionym pokoju łatwo zobaczyć, jak jasny przedmiot oświetlamy światłem odbitym od kawałka białego papieru”.

Światło jako spoczywająca substancja

Okazuje się, że nie tylko proces widzenia, ale samo pojęcie światła bywa przez uczniów rozumiane w różny sposób. Wielu uczniów wyobraża je sobie na podobieństwo powietrza, jako substancję wypełniającą przestrzeń. Mówimy przecież „tutaj jest więcej światła”, „stań w świetle”. W pracy [2], czytamy, że takie pojęcie o świetle ma nie tylko 61% uczniów przed kursem optyki, ale jeszcze 45% po takim kursie!

Inni utożsamiają światła z jego źródłem. Na pytanie, czy światło się porusza, odpowiadają, że to zależy: na przykład światła jadącego samochodu poruszają się, a światło w pokoju (tj. żyrandol) – nie.

Wreszcie „światło” może oznaczać poświatę wokół płonącego przedmiotu. Wedle takiego rozumienia świeczka wysyła światło, ale przebywa ono tylko kilka centymetrów i nie dochodzi do naszych oczu (co nie przeszkadza w jego widzeniu, skoro mechanizm widzenia uczniowie wyobrażają sobie zupełnie inaczej).

Doświadczenie

1. W ciemnym pokoju włącz tylko lampkę oświetlającą część stołu.
2. W zaciemnionej części stołu połóż książkę.
3. Sprawdź, czy używając białej kartki lub dłoni jako lusterka, możesz tak oświetlić książkę, aby była lepiej widoczna.



Doświadczenie z [4]

Czy światło widać z boku?

Według pracy [2] tak myśli połowa uczniów, i to zarówno przed kursem optyki, jak i po nim. Niestety, podręczniki do fizyki często nie tylko nie walczą z tym poglądem, ale jeszcze niechętnie go utrwalają. Przecież na wszystkich rysunkach przedstawia się promienie świetlne tak, jakbyśmy widzieli je z boku! Uczniom trzeba pokazać, dlaczego w rzeczywistości jest to niemożliwe. Wystarczy do tego proste doświadczenie ze wskaźnikiem laserowym. Jego światła także nie widać – dostrzec można tylko oświetloną przezeń plamkę na ścianie.

Sprawę pogarsza fakt, że w pewnych warunkach pozornie widzimy światło z boku. Dzieje się tak, gdy w powietrzu znajduje się kurz lub dym. Tak naprawdę oczywiście nie widzimy promienia światła bezpośrednio, ale światło rozproszone, które akurat trafiło do naszych oczu.

Czy po reformie będzie lepiej?

We wrześniu 2015 roku do gimnazjów dotrą uczniowie po nowej podstawie programowej przyrody w klasach 4-6. W odróżnieniu od poprzedniej, bardzo ogólnikowej podstawy, zawiera ona konkretne zapisy dotyczące optyki:

[8.7. Uczeń] bada właściwości ogniskujące lupy, powstawanie obrazu widzianego przez lupę i podaje przykłady zastosowania lupy.

[11.4. Uczeń] bada doświadczalnie prostoliniowe rozchodzenie się światła i jego konsekwencje, np. camera obscura, cień.

[11.5. Uczeń] bada zjawisko odbicia światła: od zwierciadeł, powierzchni rozpraszających, elementów odblaskowych; podaje przykłady stosowania elementów odblaskowych dla bezpieczeństwa.

Widzimy, że wszystkie te wymagania to obowiązkowe doświadczenia. Napisano przecież „uczeń bada” a nie np. „uczeń objaśnia”. Miejmy nadzieję, że nauczyciele wezmą to pod uwagę i uczniowie naprawdę wykonają solidną porcję doświadczeń, które później będzie można powtórzyć na lekcjach optyki, tym razem jednak oczekując głębszego zrozumienia.

Niestety, nigdzie na napisano wprost, że uczeń objaśnia związek widzenia ze światłem. Miejmy nadzieję, że ten temat zostanie poruszony przy okazji obowiązkowego badania odbicia światła od powierzchni rozpraszających.

Sądzę jednak, że nawet mimo zmian podstaw programowych dla klas 4–6, w gimnazjum warto będzie rozpoczynać nauczanie optyki od najbardziej podstawowych zagadnień. Trudno oczekiwać, że uczniowie pamiętają wszystko sprzed kilku lat.

I wcale nie są głupi!

Nauczyciel, od lat znający fizyczne wyjaśnienie procesu widzenia, może być zaszokowany pomysłami dzieci. Ale skąd one miałyby znać naukowe poglądy

na ten temat, jeśli nikt im ich wprost nie wyjaśnił? Nie oczekujemy od uczniów, że sami odkryją coś, co ludzkości zajęło wiele wieków. Chyba nie można ich uznać za głupich tylko dlatego, że nie są mądrzejsi od Platona:

[Bogowie] Sprawili, że ogień czysty, który jest wewnątrz nas i jest tej samej natury co ogień dnia, cieknie łagodnie i nieprzerwanie przez oczy. (...) Kiedy światło dzienne otacza ogień wypływający ze wzroku, wtedy podobne spotyka podobne, jednoczy się ściśle z nim i tworzy wzdłuż osi widzenia jedno spojone ciało. (...) Gdy teraz ten zespół dotknie jakiegoś przedmiotu, lub zostanie przezeń dotknięty, przesyła ruchy przez całe ciało aż do duszy i wywołuje to wrażenie zmysłowe, dzięki któremu mówimy, że widzimy [5].

Literatura

- [1] B. Śniadek, *Rozumienie procesu widzenia a wiedza potoczna z zakresu optyki* [w:] H. Szydłowski (red.), *Nauczanie fizyki a wiedza potoczna uczniów*, wyd. UAM, Poznań 1991, s. 50–59.
- [2] I. Galili, A. Hazan, *Learners' knowledge in optics: interpretation, structure and analysis*, International Journal of Science Education, 2000, vol. 22, no. 1, s. 57–88, http://sites.huji.ac.il/science/stc/courses_materials/85801_files/Optics-IJSE.pdf.
- [3] E. Guesne, *Light* [w:] R. Driver, E. Guesne, A. Tiberghien, *Children's ideas in science*, Open Univeristy Press, 1985.
- [4] M. Braun, W. Śliwa, *To jest fizyka. Podręcznik dla gimnazjum*, cz. 4, s. 13, wyd. Nowa Era, Warszawa 2011.
- [5] Platon, *Timajos* [w:] *Timajos. Kritias*, tłum. P. Siwek, PWN, Warszawa 1986 (cytowany fragment: 45 bcd, s. 56–57).

Lektury polecane:

- N.J. Selley, *Children's ideas of light and vision*, International Journal of Science Education, 18 (1996): 713–723.
- *Foton 45, O przeszkodach poznawczych* (żółty zeszyt dydaktyczny, Zeszyt 2, 1996).



Uczenie fizyki, czyli stąpanie nad przepaścią*

Barbara Sagnowska

Wydawnictwo ZamKor, Kraków

Kiedy na przełomie wieków, w związku z nową reformą, mieliśmy przystąpić do tworzenia podręczników, postanowiliśmy przygotować system pojęć, którym będziemy mogli się posługiwać w ciągu całego szkolnego nauczania fizyki i system zasad, których będziemy przestrzegać. Chodziło nam o to, by pojęcie, któremu nadaliśmy jakieś znaczenie na pierwszych stronach podręcznika, miało dokładnie takie samo znaczenie do jego ostatniej strony. By nauczyciel nie musiał w pewnej chwili mówić swoim uczniom: a teraz zapomnijcie jak was tego uczono dotychczas, bo tak naprawdę to jest inaczej.

Ten system pojęć i zasad miał być oparty na naszych polskich wypracowanych przez dziesięciolecia „obyczajach” związanych z uczeniem fizyki, ale miał być także niesprzeczny z systemami stosowanymi w strefie anglojęzycznej po to, by polski uczeń przystępujący np. do międzynarodowej matury potrafił się w niej łatwo odnaleźć.

System pojęć i zasad przygotowaliśmy i z żelazną konsekwencją do dziś staramy się go stosować w naszych podręcznikach. Nie twierdzimy, że jest idealny, na pewno można byłoby go udoskonalać, przeprowadzając badania dydaktyczne, stosując różne odmiany tego systemu i sprawdzając, które są najefektywniejsze.

Niestety w Polsce tego rodzaju badania nie są traktowane jako badania naukowe, nie można na ich podstawie zdobywać stopni naukowych, więc nikt ich nie prowadzi. Żaden młody ambitny fizyk rozpoczynający karierę naukową nie zajmie się problemami, które nie zapewnią mu stabilizacji, awansu, a co najwyżej wyrotowanie za kilka lat.

Czego więc w tym naszym systemie pojęć i zasad konsekwentnie przestrzegamy, czego unikamy i poprzez podręczniki próbujemy wyeliminować z polskiego uczenia fizyki. Oto przykłady:

- Unikamy posługiwania się żargonem fizycznym, staramy się by tekst fizyczny był równocześnie poprawny i elegancki w sensie czysto językowym.
- Tego samego słowa używamy tylko w jednym znaczeniu, by język, którym się posługujemy, był możliwie najbardziej precyzyjny. W różnych znaczeniach bywają używane np. słowa *pomiar*, *wyznaczanie*, *zależność*. Szczególnie nadużywane bywa słowo *określ*, którym zastępuje się inne bardziej precyzyjne czasowniki operacyjne np. *oblicz*, *wyraż*. Rozumienie

* Fragment wystąpienia na zakończenie Projektu Feniks, marzec 2012 r.

działu zwanego nauką o ciepłe niezwykle utrudnia uczniom używanie słowa *ogrzewanie* w dwóch zupełnie różnych znaczeniach: wzrostu temperatury i dostarczania ciepła. Gdy mówimy: ciała na skutek tarcia ogrzały się mamy na myśli wzrost temperatury. Gdy mówimy: ogrzewamy topniejący lód mamy na myśli dostarczanie ciepła. Jak widać dwa zupełnie różne zjawiska zostały nazwane tym samym słowem. Konsekwencje używania tego słowa w różnych znaczeniach ujawniają się w liceum, przy omawianiu przemian gazowych. W naszych podręcznikach ogrzewanie to zawsze wzrost temperatury.

Konsekwentnie rozróżniamy *szybkość* jako wielkość skalarną i *prędkość* jako wielkość wektorową. Ma to (obok wprowadzania współrzędnej wektora) fundamentalne znaczenie w rozumieniu przez uczniów wielu problemów mechaniki. Tego samego zdania są autorzy wybitnych pod względem dydaktycznym podręczników: David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker, *Fundamentals of Physics* i Paul G. Hewit, *Conceptual Physics*. W oryginalnych anglojęzycznych wersjach tych książek można zauważyć niezwykle pieczołowitość w rozróżnianiu tych dwóch pojęć (*speed, velocity*). Niestety z niewiadomych powodów polscy tłumacze nie respektowali woli autorów przez co teksty stały się miejscami niezrozumiałe.

- Unikamy sformułowań sprzecznych z wyrażanymi treściami. Np. od wielu lat do ilościowego opisu pola magnetycznego jako elementu badawczego używa się naładowanej, poruszającej się cząstki. Siła działająca na taką cząstkę w polu magnetycznym nie jest styczna do linii pola magnetycznego tylko do tych linii prostopadła. Nie można więc nieodpowiedzialnie nazywać tych linii *liniami sił pola magnetycznego*, wprowadzając ucznia w kompletną dezorientację. Nie znajdziecie Państwo w naszych podręcznikach sformułowania: *podczas tarcia wydziela się ciepło*, bo podczas tarcia w ogóle nie mamy do czynienia z ciepłem. Według szkolnej podstawy programowej pojęcie ciepła wprowadza się po wprowadzeniu pojęć energii wewnętrznej i temperatury. Przez ciepło lub ilość ciepła rozumie się tę część energii wewnętrznej, która jest przekazywana przez ciało o temperaturze wyższej, ciało o temperaturze niższej. Podczas tarcia dwóch ciał o siebie, na skutek wykonywanej pracy wzrasta ich energia wewnętrzna, co objawia się wzrostem temperatury. Temperatura obu ciał wzrasta jednakowo więc żadne nie przekazuje drugiemu ciepła. Jeśli temperatura otoczenia jest niższa od temperatury układu trących ciał, to później układ przekazuje otoczeniu ciepło, ale jest to już efekt wtórny. Innym przykładem bezrefleksyjnego używania wydzielenia się ciepła jest odpowiedź na pytanie *dlaczego wzrasta temperatura przewodnika przez który płynie prąd? Bo wydziela się ciepło*. Jeśli zgodzimy się na taką odpowiedź całkowicie zaprzepaszczamy rozumienie przemian

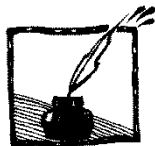
energii, które zachodzą przy przepływie prądu w przewodniku. Uczeń powinien sobie uświadamiać, że energia elektryczna uległa w przewodniku zamianie w energię wewnętrzną, a wzrost energii wewnętrznej objawia się wzrostem temperatury. I dopiero na skutek różnicy temperatury przewodnika i otoczenia następuje przekazanie otoczeniu części energii, czyli ciepła.

Pewien rzymski senator wypowiedział słynną sentencję *Verba volant, scripta manent* (słowa ulatują, pismo zostaje). Wynika z niej, że granica dowolności językowej nauczyciela (który głównie mówi) jest nieco większa niż autora podręcznika (który głównie pisze, choć ostatnio także przemawia głosem lektora komentującego animacje i filmy dydaktyczne). Nauczyciel zawsze może się poprawić, autor – nie.

Często o zrozumiałości tekstu decyduje jedno właściwie lub niewłaściwie użyte słowo. Oto kilka autentycznych przykładów wybranych z podręczników:

- *Przyspieszenie jest wprost proporcjonalne do siły **niezrównoważonej**.* Uczeń może rozumieć, że to jedna z sił działających na ciało. Używając pojęcia **siły wypadkowej** wskazujemy na algorytm postępowania; najpierw należy dodać wszystkie siły działające na ciało.
- *W ruchu satelity po orbicie kołowej siła dośrodkowa **jest równa sile grawitacji**.* Uczeń może rozumieć, że na satelitę działają dwie równe sobie siły. Lepiej powiedzieć, że siła grawitacji **jest** siłą dośrodkową.
- *Siła nacisku ciała na podłoże **jest siłą ciężkości tego ciała**.* Nie jest to prawdą, bo każda z tych sił ma inną naturę i działa na inne ciało.
- *Pracę nazywamy iloczyn przesunięcia i siły **powodującej to przesunięcie**.* Niekoniecznie, może to być jakakolwiek siła działająca na ciało, towarzysząca przesunięciu. Pracę wykonuje siła lub ciało, które tą siłą działa. Stąd jeśli uczeń przeczyta w podręczniku o pracy wykonanej *przeciwko sile* jest nieco zdezorientowany.
- *Gdy źródło dźwięku zbliża się do obserwatora lub obserwator zbliża się do źródła, to częstotliwość odbieranego dźwięku **zwiększa się**.* Powinniśmy powiedzieć **jest większa**, bo uczniowie często sądzą, że w miarę zbliżania się źródła dźwięku do obserwatora, częstotliwość rośnie.
- Istotne nieporozumienia pojawiają się gdy pytamy o stan nieważkości. Rozróżnienia wymagają dwa pytania:
 - Co to znaczy, że układ ciał jest w stanie nieważkości? To znaczy, że ciała tego układu nie naciskają na siebie wzajemnie.
 - Kiedy taki stan występuje? Układ jest w stanie nieważkości, gdy porusza się w polu grawitacyjnym swobodnie, tzn. na układ działa tylko siła grawitacji.

Jak Państwo zauważyli wybrałam przykłady bardzo proste, bo chodziło mi tylko o pokazanie idei.



Nagrody dydaktyczne PTF w roku 2012

Jak co roku Polskie Towarzystwo Fizyczne przyznało nagrody wyróżniającym się nauczycielom fizyki w 2011 roku.

Nagrodę PTF I stopnia im. Grzegorza Białkowskiego i Medal im. Grzegorza Białkowskiego otrzymuje:

mgr Zenona Stojcka – nauczycielka w I Liceum Ogólnokształcącym im. Tadeusza Kościuszki w Wieluniu za wieloletnie i różnorodne osiągnięcia w nauczaniu fizyki.

Nagrodę PTF II stopnia otrzymuje:

mgr Mirosław Łoś – nauczyciel w Zespole Szkół Publicznych w Cząstkowie Mazowieckim za organizowanie innowacyjnych i efektywnych form pracy z młodzieżą.

Nagrodę PTF III stopnia otrzymują *ex aequo*:

mgr Barbara Dłużewska – nauczycielka XXVII Liceum Ogólnokształcącego im. Tadeusza Czackiego w Warszawie za rozbudzanie zainteresowań fizyką i astronomią wśród młodzieży;

mgr Adam Bartczak – nauczyciel w Zespole Szkół Ogólnokształcących w Turku za stworzenie i prowadzenie strony internetowej służącej nauczaniu fizyki – www.fizyka.net.pl

Wyróżnienia otrzymują:

mgr Witold Zawadzki – z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie za krzewienie zainteresowań fizyką w szkołach podstawowych i gimnazjach;

mgr Sławomir Żuber – nauczyciel w I Liceum Ogólnokształcącym w Białymstoku im. Adama Mickiewicza za wzorowe nauczanie fizyki.



Co lubię w swoim zawodzie

Zenona Stojecka, Adam Bartczak

Redakcja zadała laureatom nagród PTF dwa pytania: Co daje najczęściej satysfakcji i zadowolenia w Państwa pracy jako nauczyciela fizyki?; Czy dzisiejsza młodzież jest „trudniejsza” niż kiedyś?

Zenona Stojecka powiedziała:

W swoim zawodzie najbardziej lubię to, że mogę pracować bezpośrednio z młodzieżą. Dlatego, mimo upływającego czasu, ciągle czuję się młodo. Jednocześnie sprawia mi radość to, że pomagam młodym ludziom „rozwijać skrzydła”. Zainteresować uczniów fizyką, choćby poprzez doświadczenia, nie jest trudno. A praca z osobami zainteresowanymi – to przyjemność.



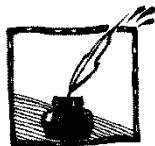
Nie uważam, aby dzisiejsza młodzież była trudniejsza niż kiedyś. Wręcz odwrotnie! Uważam, że mamy wartościową młodzież. Nie zdarzyło mi się, aby kiedykolwiek jakiś uczeń zachował się w stosunku do mnie niestosownie. Młodzież z mojej szkoły odbieram jako ambitną, pełną ciekawych planów na przyszłość i przekonaną, że realizacja tych planów nie jest możliwa bez własnej pracy.

Adam Bartczak powiedział:

Stając przed uczniami staram się jak najprościej opisać zjawiska fizyczne. Jest to swojego rodzaju gra. Jeśli wyjaśniam drugą zasadę dynamiki po raz setny, to jest to po raz pierwszy dla danej grupy. Traktuję to jako zabawę i w zależności od reakcji klasy lekcja może być kontynuowana na różne sposoby. Największą radość sprawia mi, gdy uczniowie dobrze rozumują i dochodzą do praw fizycznych sami. Zależy mi zarówno na uczniach zdolnych, jak również słabych, aby dla nich fizyka nie była kulą u nogi, ale by choć cząstkę zrozumieli. Jeśli humanista polubi fizykę to sprawia mu dużą radość.



Młodzież nie jest trudniejsza, ale jest inna niż dwadzieścia lat temu. Obecnie młodzi ludzie są bardziej bezpośredni, na ogół wiedzą, czego chcą i głośno o tym mówią. Nie mają kompleksów i bardziej otwarcie wyrażają swoje sądy. Zmusza ich do tego obecny świat, wymagający wszechstronności, komunikatywności i bezustannej walki o swoje. Przez to wydają się bezczelni i nieuznający żadnych autorytetów. Obecna młodzież wydaje się bardziej egoistyczna, ale to wynika z nastawienia na jednostkę i konieczność walki o swoją pozycję w gospodarce rynkowej. Zmiany młodzieży wynikają również z dostępu do środków masowego przekazu. Cały świat jest teraz otwarty dla młodych ludzi.



III Festiwal Szkolnych Kół Fizycznych w Łodzi

*Stanisław Bednarek
Uniwersytet Łódzki*

W dniu 15 czerwca odbył się III Festiwal Szkolnych Kół Fizycznych, zorganizowany przez Katedrę Modelowania Procesów Nauczania Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego. Tegoroczny festiwal nie był już obowiązkową częścią Studiów Podyplomowych dla Nauczycieli Fizyki, służących doskonaleniu działalności pozalekcyjnej. Ponadto spotkanie odbyło się w czasie, w którym uwaga znacznej części społeczeństwa była zwrócona na Mistrzostwa Europy w Piłce Nożnej, Euro 2012. Te dwa ostatnie uwarunkowania budziły początkowo niepokój organizatorów o powodzenie spotkania. Okazało się, że nieuzasadniony, ponieważ w festiwalu uczestniczyło ponad 150 uczniów wraz z opiekunami z Łodzi i regionu łódzkiego.

Zanim dr Piotr Skurski wypowiedział słowa powitania, do wypełnionej po brzegi auli wpłynęła gruba ryba o długości około półtora metra i... poszybowała pod sufit. Był to model sterowca wypełniony helem i kierowany falami radiowymi. Uczestnicy nagrodzili ten fakt oklaskami. Po powitaniu i krótkich przemówieniach przedstawicieli władz uczelni przystąpiono do realizacji programu festiwalu, na który złożyły się: prezentacje plenarne, sesja plakatowa, wykład prof. Tadeusza Wibiga, pokazy na świeżym powietrzu, quiz, rozstrzygnięcie konkursu, wręczenie nagród i podsumowanie.

Prezentacjom plenarnym oraz sesji plakatowej przewodniczył mgr Paweł Barczyński. Podczas prezentacji uczniowie z wybranych kół fizycznych opowiadali o swoich osiągnięciach w ostatnim roku działalności, który upłynął od poprzedniego festiwalu i co najciekawsze, pokazały doświadczenia oraz zbudowane modele. Niewątpliwie największe zainteresowanie wzbudził „Solarek”, czyli pojazd rowerowy napędzany energią elektryczną, uzyskiwaną z ogniw słonecznych, zamontowanych na jego dachu. Pojazd ten zbudowali uczniowie ze Szkolnego Koła Fizycznego „Fizykomania”, działającego w łódzkim Gimnazjum nr 8, pod kierunkiem mgra Andrzeja Rychtelskiego. Uczniowie z tego koła przedstawili również wyniki badań niezwyklego termogeneratora. Przyrząd ten pochodził z lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku i został wyprodukowany w ówczesnym Związku Radzieckim. W ramach „bratniej” pomocy takie termogeneratory trafiały również do Polski. Przyrządy te umożliwiały zasilanie odbiorników radiowych w tych rejonach, gdzie nie było jeszcze sieci elektrycznej. Składały się one z wielu połączonych w szereg kawałków blachy, wykonanych z odpowiednio dobranych metali i podgrzewanych w części środkowej. Podgrzewanie odbywało się palnikiem naftowym, który służył jednocześnie jako

oświetlenie. Całość przypominała elegancki, rosyjski samowar z gwiazdziście rozłożonymi skrzydłami. „Fizykomaniacy” zaprezentowali jeszcze wyniki pomiarów mocy i sprawności zbudowanych przez siebie modeli turbin wiatrowych.

Warto tu dodać, że w Katedrze Modelowania Procesów Nauczana dobiega końca realizacja oryginalnego projektu edukacyjnego, którego celem jest zdalne przeprowadzanie eksperymentów z aerodynamiki. Edukacyjny Tunel Aerodynamiczny „ETA_R” osiągnie pełną funkcjonalność we wrześniu i pozwoli za pośrednictwem internetu wykonywać doświadczenia wszystkim zainteresowanym z dowolnego miejsca (szczegóły dostępne są pod adresem: http://www.wfis.uni.lodz.pl/ptf/strona_KMPN/tunel.htm). Tunel posłużył już do badań rozstrzygających dwie edycje konkursu na skonstruowanie turbiny wiatrowej o największej sprawności, przy ograniczonych rozmiarach i szybkości przepływu. Trzecia edycja konkursu jest w toku.

Lista Szkolnych Kół Fizycznych nie jest zamknięta i wciąż tworzą się nowe. W festiwalu debiutowało Szkolne Koło Fizyczne, zorganizowane w Samorządowym Liceum Ogólnokształcącym w Zgierzu przez mgra Ireneusza Jakubowskiego. Jego członkowie za pomocą slajdów wyjaśnili budowę i zasadę działania radioteleskopów oraz pokazali przykłady tych urządzeń pracujące w różnych krajach. Oprócz tego pod kierunkiem opiekuna zbudowali detektor do wykrywania mionów. Sprzężony z komputerem układ mieścił się na szkolnej ławce i pracowicie zliczał przybyszów z Kosmosu przez cały czas festiwalu – naliczył ich 1126. Najmłodszą uczestniczką plenarnych prezentacji była uroczą Wiktoria z przedszkola, która pokazała lampę plazmową i opowiedziała o jej działaniu.

Następnym punktem festiwalu była sesja plakatowa, podczas której uczniowie z kilkunastu kół fizycznych również pokazali zbudowane przyrządy, obrazujące ich działalność w ostatnim roku. Po stanowiskach oprowadzał mgr Paweł Barczyński i zachęcał uczniów do opowiadania o swoich przygodach z fizyką. Jednym z ciekawszych przyrządów był generator van de Graffa wytwarzający napięcie 5 MV. Pokazano też modele turbin wiatrowych o oryginalnych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Inni uczniowie zajęli się przyczynami wytwarzania siły nośnej samolotu i wyjaśnianiem podstaw teorii względności, a nawet poszukiwaniem związku genialnych osiągnięć Alberta Einsteina ze szczegółami budowy jego mózgu.

Po sesji plakatowej prof. Tadeusz Wibig wygłosił wykład, którego przewodnim motywem była struktura ścietego dwudziestościanu. Jak na czas Euro przystało, zaczął od kształtu piłki futbolowej. Żeby się ją wygodnie kopało, powinna być kulista. Ze skończonej liczby płaskich wielokątów nie można jednak zbudować dokładnie kulistej piłki, dlatego przyjęto, że będzie ona ścietym dwudziestościanem – utworzonym z pozszywanych z sobą kawałków skóry w kształcie pięcio- i sześciokątów foremnych. Okazuje się, że taką strukturę ma wiele

obiektów w przyrodzie – począwszy od fulerenu, a skończywszy na rozmieszczeniu źródeł promieniowania mikrofalowego w całym Wszechświecie.

Popołudniowa sesja festiwalu rozpoczęła się na trawniku przed gmachem Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej. Tutaj uczniowie oddali serię strzałów armatnich – cichych i całkowicie bezpiecznych, bo pociskami były młode ziemniaki, wylatujące z plastikowych rur kanalizacyjnych, a materiałem wybuchowym kropla denaturatu. Potem uczestnicy wrócili do auli, gdzie rozstrzygnięto quiz i konkurs na najsprawniejszą turbinę wiatrową. Z quizem był mały problem, gdyż wszystkie drużyny uzyskały maksymalną liczbę punktów. Pomogła dogrywka, polegająca na odgadnięciu liczby mionów zarejestrowanych przez detektor towarzyszący festiwalowi. Zwycięzcy otrzymali nagrody, a wszyscy uczestnicy – potwierdzenia udziału w festiwalu. Na zakończenie mgr Paweł Barczyński podziękował wszystkim za udział w spotkaniu i zaprosił na następny festiwal z planowanym udziałem gości zagranicznych. W podsumowaniu dr Piotr Skurski powiedział słowa warte zacytowania: „Uczymy się nie tylko dla stopni, najważniejsze jest to, co zostaje w nas. Festiwal był świętem, które pozwoliło dostrzec piękno fizyki i piękno człowieka”.



Pojazd rowerowy napędzany energią słoneczną zbudowany przez uczniów Gimnazjum nr 8 w Łodzi pod kierunkiem mgra Andrzeja Rychtelskiego (fot. S. Bednarek)



CO CZYTAĆ

A amerykański Prometeusz, triumf i tragedia Roberta Oppenheimera

A amerykański Prometeusz, triumf i tragedia Roberta Oppenheimera, Kai Bird, Martin J. Sherwin, Wydawnictwo Książkowe Twój Styl, Warszawa 2007, oryginał angielski 2005.

Gruba książka (775 stron) z licznymi fotografiami dostępna w Księgarni Taniej Książki za 20 PLN, a w internecie jeszcze taniej.

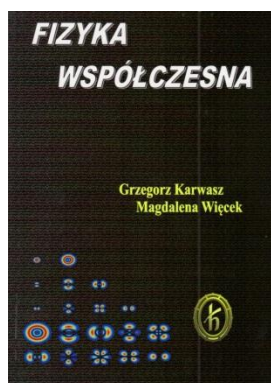
Niefizyk będzie czytał tę książkę jak polityczny thriller, fizyk – będzie śledził losy genialnego fizyka, który poprzez fizykę wplątał się w maszynę administracyjno-wojskową. Wbrew temu, co uważają moi młodzi studenci zapytani w ankiecie (2012), czy widzą jakieś problemy etyczne, które mogą wystąpić w pracy uczonego fizyka, odpowiedzieli, że nie widzą takich poza działaniami związanymi z biologią, uprawianiem nauki nie jest etycznie obojętne. I dotyczy to nie tylko dylematów związanych z przedmiotem badań, co wydaje się być oczywiste, ale również stosunków i postaw międzyludzkich, lojalności koleżeńskiej, odpowiedzialności za studentów i młodszych kolegów.

Książka o ojcu bomby jądrowej i jego czasach jest w pierwszym rzędzie ilustracją rzeczywistych rozmaitych problemów etycznych, z jakimi zmagają się współcześni uczeni.

Należy ją polecić młodym, żyjącym w szczęśliwym dla nich czasie, pozbawionym jeszcze moralnych wyborów w swojej karierze zawodowej.



Nadesłane do Redakcji





Konkurs Redakcji *Fotonu* „Jasne fale”

Redakcja *Fotonu* ogłasza konkurs dla uczniów na opracowanie rozwiązania problemu z Turnieju Młodych Fizyków 2012.



Problem pt. „Jasne fale”: Oświetl płaski zbiornik z wodą. Gdy na jej powierzchni zostaną wytworzone fale, można będzie zobaczyć jasne i ciemne wzory na dnie zbiornika. Zbadaj zależność między falami a obserwowanymi wzorami.



Forma artykułu musi być zgodna z zasadami TMF (dostępne na stronie internetowej turnieju), w szczególności: powinna być pisana zgodnie z regułami obowiązującymi dla publikacji naukowych, czyli zawierać takie elementy, jak analiza teoretyczna problemu, opis przeprowadzonych eksperymentów (ewentualnie fotografie, rysunki) oraz otrzymanych wyników (np. tabele, wykresy), analiza wyników (ewentualnie porównanie z danymi literaturowymi), wnioski końcowe, spis literatury. Praca powinna zostać napisana w języku polskim.

Autorem pracy może być jeden uczeń lub zespół liczący co najwyżej trzech uczniów. Prace prosimy nadsyłać pocztą elektroniczną (najlepiej w formacie Worda lub pdf) na adres: witold.zawadzki@uj.edu.pl do dnia **31.12.2012**.

Dla autorów najlepszych prac przewidziano nagrody książkowe. Najlepsza praca zostanie opublikowana na łamach *Fotonu*.

Przypominamy, że tematy wszystkich zadań turniejowych znajdują się na stronie internetowej: <http://ptf.fuw.edu.pl/tmf.html>. Dodatkowe wskazówki można znaleźć w Reference Kit dostępnym pod adresem:

http://ilyam.org/FDD_2012_IYPT_Reference_kit_IM_MM_MO.pdf

WZ



Sprawozdanie z warsztatów „Ostatni dzwonek przed maturą z fizyki i astronomii”

Daniel Dziob
Student fizyki IF UJ

23 kwietnia 2012 roku, na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego odbyły się praktyczne warsztaty dla maturzystów „Ostatni dzwonek przed maturą z fizyki i astronomii”. Ich celem było umożliwienie uczniom powtórzenia większości materiału, rozstrzygnięcia najbardziej problematycznych dla nich kwestii oraz pomoc przy rozwiązywaniu zadań na kilka tygodni przed egzaminem maturalnym.

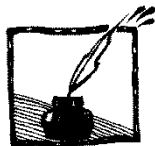
„Ostatni dzwonek...” był inicjatywą studentów współpracujących z Zakładem Fizyki Materiałów Organicznych UJ (Daniela Dzioba, Urszuli Górskiej), przy istotnym wsparciu członków studenckich Kół Naukowych: BMFM (Koło Naukowe Biofizyki Molekularnej i Fizyki Medycznej UJ), KNN (Koło Naukowe Nanotechnologów), NKF (Naukowe Koło Fizyków), NKSA (Naukowe Koło Studentów Astronomii) oraz doktorantów Wydziału FAIS UJ. W organizacji akcji uczestniczyło łącznie 18 studentów wszystkich stopni studiów.

W promocję „Ostatniego dzwonka...” włączyło się Biuro Karier i Promocji Wydziału FAIS UJ oraz Biuro Promocji UJ, zaś wsparcia finansowego udzielili Dziekan Wydziału oraz Dyrektor Instytutu Fizyki UJ. Honorowy patronat nad akcją objął prof. dr hab. Jerzy Szwed.

W warsztatach uczestniczyło aż 53 maturzystów, nie tylko z Krakowa, ale również z całego województwa małopolskiego, co jest znaczącą liczbą, zważywszy na liczbę osób zdających maturę z fizyki oraz fakt dość późnego rozpoczęcia akcji promocyjnej wydarzenia.

Uczestnicy wysłuchali wykładu mgra Witolda Zawadzkiego pt. „Najczęstsze błędy i pułapki na maturze” i uczestniczyli w sesjach poświęconych konkretnym działom fizyki. Każdy uczeń miał możliwość wyboru jednej z grup tematycznych w każdej sesji, dzięki czemu można było pracować komfortowo i efektywnie. W trakcie każdej z sesji uczniowie w małych grupach rozwiązywali przygotowane wcześniej zadania, pod aktywną opieką prowadzących warsztaty. Niejednokrotnie zadania te były wstępem do dyskusji nad nurtującymi uczniów pytaniami, na które prowadzący zawsze starali się udzielić wyczerpującej odpowiedzi.

Tegoroczne zainteresowanie uczniów „Ostatnim dzwonkiem przed maturą z fizyki i astronomii” oraz zaangażowanie organizatorów powoduje, że należy te warsztaty uznać za bardzo udany debiut niezwykle ważnej inicjatywy studentów naszego Wydziału, za co inicjatorom i organizatorom należą się serdeczne podziękowania. Mamy nadzieję, że w przyszłym roku akcja ta będzie kontynuowana, a druga edycja odniesie jeszcze większy sukces.



Konferencja studencka w Wilnie Open Readings

*Mariusz Tarnopolski
Student, Instytut Fizyki UJ*

W dniach 28–31 marca 2012 roku na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Wileńskiego odbyła się 55. Międzynarodowa Studencka Konferencja Naukowa (fizyka i nauki przyrodnicze) Open Readings. Organizatorem było Naukowe Stowarzyszenie Studentów Wileńskiego Wydziału Fizyki. Konferencja przyciągnęła w tym roku studentów z Białorusi, Ukrainy, Niemiec, USA, Szwecji, Łotwy, Polski oraz, najliczniej reprezentowanej, Litwy. Wśród współautorów prezentowanych prac były osoby z Singapuru, Szwajcarii, Chin, Wielkiej Brytanii, Kanady, Brazylii oraz Hiszpanii.

Konferencja zaczęła się od dwóch wykładów inauguracyjnych dotyczących poprawnego pisania artykułów naukowych oraz rzetelnego dokonywania ustnych prezentacji wyników badań. Było to doskonale wprowadzenie dla zgromadzonych studentów.

Dominowała tematyka związana z fizyką atomową, nanotechnologią, zastosowaniami wszelkich rodzajów spektroskopii (głównie ramanowskiej) w różnych dziedzinach fizyki i naukach pokrewnych. Stosunkowo liczne były też tematy z pogranicza nauk fizycznych i biologicznych, na przykład niezwykle ciekawy referat grupy z Warszawy na temat rozpoznawania gatunków bakterii na podstawie spektroskopii Ramana. Do bardziej oryginalnych tematów należy zaliczyć analizę niszczenia drewna szwedzkiego statku wojennego Vasa, zatopionego w 1628 roku. Równie ciekawa była prezentacja lampy służącej do oświetlania obrazów w muzeum. Lampa skanuje obraz mający być przez nią oświetlony i na tej podstawie dostosowuje kolor i intensywność światła tak, aby oświetlenie było jak najmniej szkodliwe dla dzieła oraz umożliwiło zwiedzającemu pełną jego percepcję.

Na Wydziale Fizyki VU (Vilnius Universitetas) mieści się Laser Research Centre, będący członkiem LASERLAB-EUROPE, zrzeszającym 26 ośrodków naukowych z całej Europy. Polska jest w nim reprezentowana przez Instytut Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Nic dziwnego, że tematyką wiodącą była fizyka laserów i dziedziny pokrewne. Dla osób zajmujących się tymi zagadnieniami Open Readings stało się prawdziwą gratką.

Kilka spośród prezentowanych tematów dotyczyło fizyki teoretycznej z dziedziny szeroko pojętej mechaniki kwantowej. Ja byłem jedynym reprezentantem astrofizyki.

Podczas konferencji odbyły się również dwie sesje plakatowe, na których zaprezentowano łącznie 114 plakatów. Trzy z nich dotyczyły symulacji formo-

wania się galaktyk karłowatych. Duża część prac dotyczyła bezpośrednio zagadnień poruszanych podczas referatów.

Konferencję kończył seans w planetarium oraz wykład na temat współczesnej kosmologii. Miłym gestem ze strony organizatorów było przywitanie przyjezdnych uczestników na dworcu, towarzyszenie w podróży trolejbusem do miejsca zakwaterowania, mieszczącego się w kampusie uniwersyteckim – około pięciu minut piechotą od Wydziału Fizyki. Każdy z uczestników otrzymał ładnie wydaną książkę abstraktów, zawierającą streszczenia referatów, jak i wszystkich plakatów.

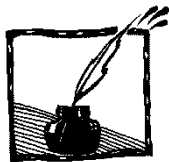
Konferencja Open Readings jest godna polecenia zwłaszcza osobom zajmującym się tematami na niej dominującymi, jednak, jak widać, nawet astrofizyk znajdzie tu miejsce dla siebie. Wystąpienie przed tak licznym, krytycznym, międzynarodowym audytorium jest z pewnością świetną okazją do sprawdzenia swoich sił na polu prezentacji wyników badań naukowych oraz okazją do poznania wielu zdolnych ludzi, z którymi być może uda nam się nawiązać bliższą współpracę naukową. Konferencja ta nie jest objęta opłatą rejestracyjną.

Nie można tutaj nie wspomnieć o samym Wilnie. Jest to piękne miasto, na którego zwiedzenie cztery dni, jakie tam spędziłem, są czasem stanowczo niewystarczającym. Mnogość muzeów i zabytków starego miasta, wszechobecne kościoły, cerkwie i synagogi oraz wiele urokliwych uliczek i zakątków z pewnością zachęcą do powrotu do Wilna – na następne konferencje i nie tylko.

Chciałbym podziękować profesorowi Jerzemu Jurkiewiczowi, dziekanowi WFAiS UJ, oraz profesorowi Edwardowi Malcowi, kierownikowi Zakładu Teorii Względności i Astrofizyki, za pomoc finansową, umożliwiającą mi uczestnictwo w konferencji.



Budynek biblioteki Uniwersytetu Wileńskiego



Projekt pwn.pl „Fizyka jest ciekawa”

Magia, mydlane bańki i fizyczna pasja. Podsumowanie projektu pwn.pl „Fizyka jest ciekawa”

Trzy lata temu pwn.pl postanowiło przekonać polskich licealistów, że fizyka to naprawdę fascynująca przygoda. Na tej podstawie zrodził się pomysł projektu „Fizyka jest ciekawa”, w którym wzięło udział 70 liceów ogólnokształcących. Aktualnie projekt dobiega końca, nadszedł więc czas na jego małe podsumowanie.

Czy fizyka jest ciekawa? Uczestnicy projektu pwn.pl jednym głosem odpowiadają, że tak. W dniach 24–26 marca, odbyła się konferencja, w trakcie której zaproszeni goście aktywnie uczestniczyli w warsztatach metodycznych, a także usłyszeli krótkie podsumowanie z ponad dwuletnich działań wydawnictwa i współpracujących z nim instytucji.

Wszystko zaczęło się w 2009 roku. Wtedy to pwn.pl rozpoczęło rekrutację do projektu pośród szkół z województw wielkopolskiego, lubuskiego i dolnośląskiego, gdzie procent zdawalności matury z fizyki był najniższy w Polsce. Głównym celem projektu stał się więc rozwój kompetencji uczniów w zakresie nauk matematyczno-przyrodniczych. Jak zakładali organizatorzy, umożliwić to miał empiryzm oraz specjalistyczny sprzęt.

Wkrótce w wybranych 70 szkołach zaczęły powstawać koła naukowe, których uczestnicy mogli poszerzać swoją wiedzę z fizyki i odkrywać jej prawa w otaczającym ich świecie. Pomocne w tym były otrzymane od organizatorów zestawy, w których skład wchodziło 5 laptopów, drukarka oraz 20 pomocy dydaktycznych – SOND (Skomputeryzowane Oprzyrządowanie Nowoczesnego Dydaktyka). Warto dodać, że SONDY zostały wyprodukowane w Polsce i są autorskim produktem pwn.pl. Wartość otrzymanych pomocy dydaktycznych przekracza 90 000 zł.

Do projektu przyłączyły się również wiodące uczelnie techniczne. Wykładowcy z Uniwersytetu Wrocławskiego, Politechniki Poznańskiej, Uniwersytetu Zielonogórskiego oraz Wydziału Fizyki Uniwersytetu w Poznaniu, odwiedzali uczestniczące w programie szkoły przybliżając im kolejne tajniki nauk przyrodniczych. Tym, co ich uderzyło, była początkowa ogromna nieśmiałość młodych adeptów fizyki. Jednak, jak wskazuje dr hab. Tomasz Martyński z Politechniki Poznańskiej, grupy uczestniczące w projekcie w ciągu tych trzech lat dorosły i nabrały sporej pewności siebie.

O zmianach, które dokonały się wśród uczniów, świadczą też wyniki ankiet przeprowadzanych w trakcie projektu. Nastąpił wzrost aktywności uczniów podczas prowadzonych zajęć. Zmiana dokonała się także w samych nauczycie-

lach, na co wskazywała Aleksandra Gołębiwska, opiekun merytoryczny projektu. Zachęcała przy tym do wykorzystania metody projektu także do nauczania klas humanistycznych.

Na czym opiera się metoda projektu? Przede wszystkim na doświadczeniach. Dr Bogusław Mól oraz mgr Kazimierz Paprzycki, prezentując przedziwne przygody drucianej rodziniki pokazali, jaki potencjał dydaktyczny i zabawowy ma w sobie najzwyczajniejszy drut. Uczestnicy konferencji mogli się o tym osobiście przekonać podczas aktywnego uczestnictwa w niedzielnych warsztatach. Okazały się one nie tylko świetnym ćwiczeniem, ale i okazją do wspólnej zabawy. Jeszcze większe zainteresowanie wzbudził pokaz dr Adama Buczka. Dzięki niemu przybyli goście na chwilę przenieśli się w świat magii i iluzji. Wskutek jego poczynań niektórzy z uczestników pokazu zostali zamknięci w mydlanych bańkach.

Chociaż na ostateczne podsumowanie projektu trzeba jeszcze trochę poczekać, jego uczestnicy już teraz oceniają go bardzo pozytywnie.

Więcej informacji:

Anita Murawska, Specjalista ds. rekrutacji i współpracy ze szkołami

pwn.pl sp. z o.o., ul. Romana Maya 1, 61-371 Poznań

tel.: 61 8736 278, tel. kom.: 503 061 520, fax: 61 8736 250

e-mail: anita.murawska@pwn.pl

Agata Robińska



Aleksandra Gołębiwska podczas pokazu dr Buczka



Pokaz dr Buczka

III Festiwal Szkolnych Kół Fizycznych w Łodzi

