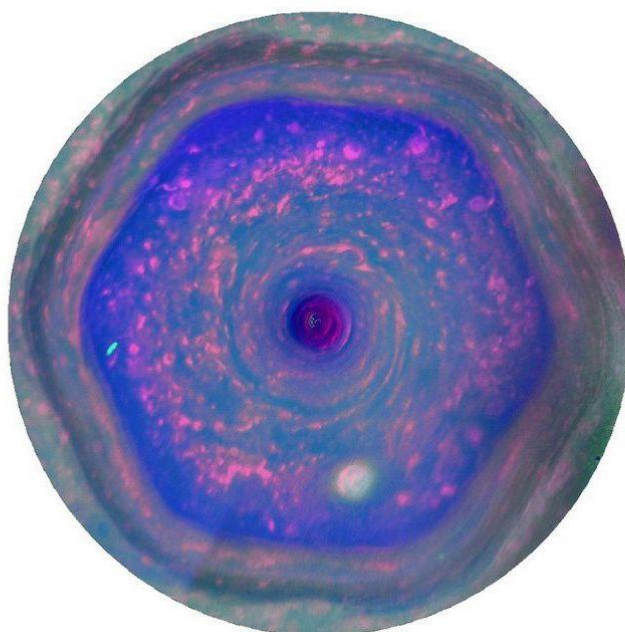


# Foton

125  
Lato  
2014

Pismo dla nauczycieli i studentów fizyki oraz uczniów

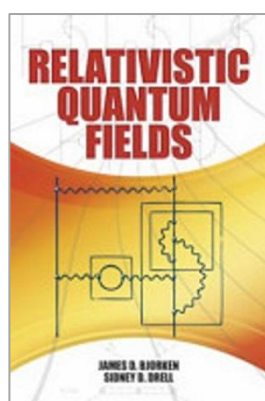
INSTYTUT FIZYKI  UNIwersytet Jagielloński  
SEKCJA NAUCZYCIELSKA POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO



Reaktory w lodziach podwodnych  
Sześciokąt na Saturnie  
Amper - jednostka natężenia prądu  
Bieguny magnetyczne - jak o nich uczyć



Toast na zakończenie uroczystości wręczenia J.D. Bjorkenowi (z prawej) i J. Feinbergowi Nagrody Pomeranczuka, Instytut Fizyki Teoretycznej i Doświadczalnej – Moskwa, 27.11.2000 („CERN Courier”, 26 January 2001)



Klasyczny podręcznik relatywistycznej teorii pola autorstwa Jamesa D. Bjorkena i Sidneya D. Drella wydany po raz pierwszy w 1965 roku. Obok okładka książki z 2012 roku

Zdjęcie na okładce pochodzi ze strony internetowej: [www.jpl.nasa.gov](http://www.jpl.nasa.gov)



## Wzajemnie rozumienie – wspólny język

Aby porozumiewać się należy posługiwać się tym samym językiem. Uczniowie porozumiewają się językiem potocznym, niekoniecznie tym samym, co my dorośli. Nauczyciele fizyki używają języka potocznego skażonego językiem fizyki.

Pomimo, iż język nauki (fizyki) przeniknął do języka potocznego, to niekoniecznie jest to ułatwienie, czasami jest źródłem tzw. miskoncepcji, czyli błędnych wyobrażeń. W nauczaniu chodzi o to, by to, co uczeń zrozumiał było prawdziwe z punktu widzenia fizyki. Jest to trudne, bywa że niemożliwe, i często skazane na niepowodzenie, bowiem dające ułudę zrozumienia. Musimy dążyć, by tej ułudy było jak najmniej.

Problem nasunął się przy lekturze zadania postawionego przez internautę (związanego ze zderzeniem samochodu z drzewem) i komentarzy innych internautów, pomagających autorowi rozwiązać problem. Pomimo używania języka potocznego, niepoprawnego z punktu widzenia fizyki, dyskutujący porozumiewają się z sobą i dążą do poprawnego rozwiązania. Inny przykład pochodzi z kolekcji filmików *SciFun* na YouTube, gdzie autor przedstawia trudne i dla wielu zagadkowe zagadnienie perpetuum mobile. Używa przy tym nieprecyzyjnego języka potocznego. Kolosalna liczba odsłon filmiku pokazuje głód zrozumienia tego zagadnienia. Sadzę, że autor przemawia językiem odbiorców i mimo braku precyzji w używaniu języka fizyki przedstawia poprawnie zagadnienie. Język i formalizm fizyki bywa „obcy” dla początkujących uczniów. Wyraża to cytowane w artykule A. Zięby pytanie licealisty o sens definicji ampera. Z kolei felietonista L. Lehman porusza problem związany z nauczaniem pojęcia pola magnetycznego. Przedstawia swoją propozycję, a Redakcja – komentarz.

Mamy nadzieję, że w zeszycie *Fotonu* znajdą państwo ciekawe artykuły, m.in. o renesansie reaktorów chłodzonych ciekłym ołowiem, o tajemniczym sześciokącie na Saturnie, kolejny artykuł o cząstce Higgsa oraz historyczny – o fizyku Jamesie Bjorkenie. Polecamy analizę zadania z kolekcji „Lwiątko” i opis zmagania drużyny z Krakowa w Turnieju Młodych Fizyków.

W zeszycie znajdą też państwo krótki i dowcipny dramat K. Maślanki zapożyczający z pojęciami Ogólnej Teorii Względności.

Zachęcamy do lektury zeszytów *Fotonu* i *Neutrino* oraz odwiedzania nas na Facebooku.

Z.G-M



## Contents

Mutual understanding – a common language <i>Zofia Gołąb-Meyer</i> .....	1
Nuclear renaissance – on the lead-cooled fast reactors <i>Mikołaj Oettingen</i> .....	4
Saturn’s north pole hexagon <i>Andrzej Odrzywółek</i> .....	13
Nobel 2013. Higgs – a missing particle in the Standard Model <i>Cao Long Van, Wiesław Leoński</i> .....	18
BJ (James Bjorken) the physicist who discovered quarks <i>Krzysztof Fiałkowski</i> .....	27
The ampere – definition and realization in classical physics <i>Andrzej Zięba</i> .....	31
Problems. Noises from the cave <i>Piotr Goldstein</i> .....	41
Unclear play with monopoles <i>Ludwik Lehman</i> .....	49
The magnetic poles – comments on the Lehman’s feature article <i>Bernard Jancewicz, Zofia Gołąb-Meyer, Paweł F. Góra</i> .....	51
Cosmologist – script of the drama from the life of scientific aristocracy <i>Krzysztof Maślanka</i> .....	53
How we participated in Physics Tournament 2014 <i>Konrad A. Kopański</i> .....	57
What to read .....	63



## Spis treści

Wzajemnie rozumienie – wspólny język <i>Zofia Gołąb-Meyer</i> .....	1
Powrót do przeszłości – o reaktorach jądrowych chłodzonych ciekłym ołowiem <i>Mikołaj Oettingen</i> .....	4
Sześciokąt na biegunie Saturna <i>Andrzej Odrzywółek</i> .....	13
Nobel 2013. Cząstka Higgsa – ostatnia obserwowana cegiełka teorii prawie wszystkiego <i>Cao Long Van, Wiesław Leoński</i> .....	18
„BJ” (Bidżej), człowiek, który odkrył kwarki – James D. Bjorken <i>Krzysztof Fiałkowski</i> .....	27
O definicji i realizacji ampera w fizyce klasycznej <i>Andrzej Zięba</i> .....	31
Odgłosy z jaskini <i>Piotr Goldstein</i> .....	41
Nocne rozmyślenia fizyka szkolnego – Niejasna gra w monopole – felieton <i>Ludwik Lehman</i> .....	49
Bieguny magnetyczne – komentarze do felietonu Ludwika Lehmana <i>Bernard Jancewicz, Zofia Gołąb-Meyer, Paweł F. Góra</i> .....	51
Kosmolog (dramat w jednym akcie z życia arystokracji naukowej) <i>Krzysztof Maślanka</i> .....	53
Piątka z Krakowa, czyli nasza reprezentacja w XXV Jubileuszowym Ogólnopolskim Turnieju Młodych Fizyków <i>Konrad A. Kopański</i> .....	57
Co czytać .....	63



## Powrót do przeszłości – o reaktorach jądrowych chłodzonych ciekłym ołowiem

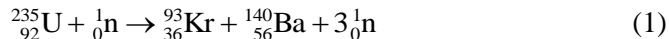
Mikołaj Oettingen

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw

Katedra Energetyki Jądrowej

### Origo<sup>1</sup>

W 1938 roku dwaj niemieccy uczeni Otton Hahn i Fritz Strassman wykonali serię eksperymentów naświetlania naturalnego uranu wiązką neutronów. Uczni oczekiwali utworzenia się pierwiastków cięższych od uranu (transuranowców) na drodze transmutacji jądrowej. Ku ich zaskoczeniu, analiza chemiczna naświetlonej próbki uranu wykazała również obecność o około połowę lżejszego izotopu baru. Rok później Lise Meitner oraz Otto Frisch wyjaśnili pochodzenie baru. Jego źródłem okazał się proces rozpadu jądra izotopu uranu  $^{235}\text{U}$  obecnego w naturalnym uranie na dwa lżejsze jądra pod wpływem oddziaływania z neutronem o małej energii (1). Nazwali ten proces rozszczepieniem, a energię w nim wydzieloną oszacowali na 200 MeV, czyli 50 milionów razy większą niż w przypadku reakcji spalania paliw kopalnych. Rozpoczęła się era energii jądrowej [1].



Rys. 1. Aparatura wykorzystana do przeprowadzenia pierwszego rozszczepienia jądra atomowego [2]

### Technologia<sup>2</sup>

Naukowcy zauważyli również, że w procesie rozszczepienia emitowane są neutrony, które mogą zainicjować kolejne rozszczepienia, a tym samym doprowa-

<sup>1</sup> Łac. początek.

<sup>2</sup> Łac. technologia.

dzić do osiągnięcia samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej generującej ciągłą produkcję energii. Rozpoczęły się prace nad budową „pieca” jądrowego zdolnego do zapewnienia warunków fizycznych dla reakcji łańcuchowej.

Reakcja łańcuchowa zachodzi, gdy liczba neutronów w rdzeniu reaktora jądrowego w danym pokoleniu jest równa liczbie neutronów w pokoleniu poprzednim. Zjawisko to można sobie wyobrazić jako następujące po sobie pokolenia lub fale neutronów. Jeśli następna fala jest bliźniaczym odbiciem poprzedniej, to mówimy, że reaktor jądrowy znajduje się w tzw. stanie krytycznym. Jeśli liczba neutronów w rdzeniu reaktora spada, to reaktor wchodzi w stan podkrytyczny, a gdy rośnie, to mamy do czynienia ze stanem nadkrytycznym. Produkcja stałej mocy polega na utrzymywaniu rdzenia reaktora dokładnie w stanie krytycznym, tzn. zapewnieniu niezmiennego liczebności populacji neutronów. Nie wszystkie neutrony wyprodukowane podczas rozszczepienia powodują kolejne rozszczepienie. Niektóre z nich uciekają z rdzenia reaktora i są bezpowrotnie tracone, inne są tracone w procesie absorpcji pasywno-żywniczej w materiałach konstrukcyjnych. Nawet jeśli neutron zostanie zaabsorbowany w rozszczepialnym jądrze  $^{235}\text{U}$ , nie mamy pewności, że spowoduje jego rozszczepienie – może na przykład spowodować utworzenie się  $^{236}\text{U}$  na drodze reakcji jądrowej, nazywanej wychwytem rezonansowym. Prawdopodobieństwo rozszczepienia po pochłonięciu neutronu zależy od nuklidu oraz od energii kinetycznej neutronu. Dla izotopu  $^{235}\text{U}$  prawdopodobieństwo jest bardzo duże – a o to nam przecież chodzi – tylko dla neutronów o energiach termicznych, tzn. o rozkładzie Boltzmanna-Maxwella, odpowiadającym temperaturze kilkuset kelwinów. Średnia energia takich neutronów wynosi około 0,025 eV. Reaktory jądrowe wykorzystujące neutrony termiczne do stymulacji rozszczepień nazywają się reaktorami termicznymi. Z powyższego wynika, że dwoma głównymi czynnikami decydującymi o możliwości osiągnięcia stanu krytycznego, są skład materiałowy oraz geometria rdzenia reaktora. W pierwszym przypadku wiodącą rolę pełni rodzaj paliwa jądrowego, moderatora i reflektora neutronów oraz chłodziwa.

**Paliwo jądrowe** w reaktorach termicznych bazuje na nieparzystych izotopach uranu i plutonu:  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  w formie metalicznej, tlenkowej lub azotkowej. Udział wymienionych izotopów występujących w naturalnym uranie może, a najczęściej musi być sztucznie zwiększony (wzbogacanie uranu), aby w ogóle dało się osiągnąć stan krytyczny. **Moderatorem**, inaczej spowalniczem neutronów, nazywamy materiał o dużym prawdopodobieństwie rozproszenia neutronów przez jądra atomowe. Jeśli jest to materiał zawierający lekkie jądra, to neutrony w zderzeniach szybko tracą energię i stają się „termiczne”. Najczęściej używanymi moderatorami są: lekka woda zawierająca głównie prot<sup>3</sup>, cięż-

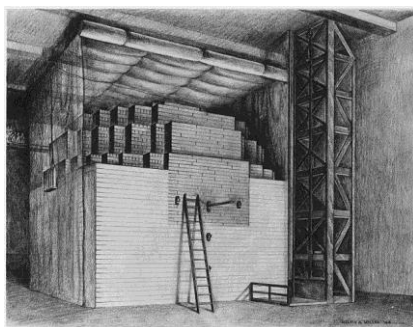
---

<sup>3</sup> Izotop wodoru zawierający tylko proton i nie zawierający neutronów.

ka woda zawierająca większą od naturalnej frakcję deuteru<sup>4</sup> oraz grafit zawierający izotopy węgla. **Reflektor** stanowią wszystkie warstwy materiałowe okalające rdzeń reaktora. Charakteryzują się one dużym prawdopodobieństwem rozproszenia wstecznego neutronu, co zmniejsza ucieczkę neutronów z rdzenia reaktora. Produkty rozszczepienia hamują w rdzeniu reaktora, a ich energia zamienia się na ciepło, odbierane przez **chłodziwo**.

Kolejnym ważnym problemem projektowym jest sposób rozmieszczenia paliwa jądrowego w rdzeniu reaktora, czyli jego geometria. Pionierzy energetyki jądrowej rozpatrywali dwie opcje. Pierwsza z nich polegała na zmieszaniu moderatora i paliwa oraz budowy tzw. rdzenia homogenicznego. W drugiej opcji konstruowano tzw. rdzeń heterogeniczny przez umieszczenie elementów z paliwem jądrowym w matrycy stworzonej z materiału moderatora. Ta opcja okazała się korzystniejsza w osiąganiu stanu krytycznego. Obecnie buduje się tylko reaktory heterogeniczne z wyraźnym wydzieleniem paliwa i moderatora.

2 grudnia 1942 roku pod kierownictwem Enrico Fermiego został uruchomiony pierwszy w historii tzw. jądrowy „stos” CP-1 (*Chicago Pile Number One*), będący pierwowzorem obecnych reaktorów jądrowych. Miał on kształt spłaszczonej elipsoidy o wysokości 6 m i szerokości 7,5 metra, zbudowanej z cegieł grafitowych, zawierających paliwo jądrowe w formie kul tlenku uranu oraz walców uranu metalicznego o małych rozmiarach. Użycie grafitu jako moderatora umożliwiło przeprowadzenie reakcji łańcuchowej bazującej na uranie naturalnym, nie wzbogaconym w izotop <sup>235</sup>U. Rdzeń reaktora zawierał około 350 ton grafitu, 36 ton tlenku uranu oraz 5,5 tony uranu metalicznego. Nie posiadał on sztucznego systemu chłodzenia ani osłon radiacyjnych. Mechanizm kontrolny stanowiły pręty wykonane z kadmu silnie pochłaniającego neutrony. Za pierwszym razem stos pracował 28 minut z mocą 0,5 W [3]. Był to pierwszy w historii reaktor jądrowy uruchomiony przez człowieka. Naturalne reaktory jądrowe powstały w formacjach skalnych około 2 miliardy lat temu w okolicach Oklo na terenie dzisiejszego Gabonu [4].



Rys. 2. Szkic reaktora CP-1 [5]

<sup>4</sup> Izotop wodoru zawierający proton i neutron.



### Aqua<sup>5</sup>

Lata pięćdziesiąte i sześćdziesiąte XX wieku były okresem najbardziej dynamicznego rozwoju militarnych jak i cywilnych technologii jądrowych. W tym czasie powstały też pierwsze komercyjne elektrownie jądrowe. W 1954 roku uruchomiono elektrownię w rosyjskim Obnińsku, wykorzystującą pierwowzór reaktora RBMK (*Reaktor Bolszoy Moszczynosti Kanalnyj* – Reaktor Kanałowy Wielkiej Mocy), która miała moc elektryczną 5 MW. W roku 1956 ruszyła brytyjska elektrownia Calder Hall wyposażona w cztery reaktory typu MAGNOX (*Magnesium non-oxidising* – nazwa od stopu magnezu w koszulkach paliwowych) o mocy elektrycznej 60 MW każdy, a amerykańska elektrownia Shipping Port uruchomiona w grudniu 1957 roku posiadała reaktor typu PWR (*Pressurized Water Reactor* – reaktor wodny ciśnieniowy) o mocy elektrycznej 60 MW [6]. Każde z państw rozwijało inny typ reaktora jądrowego przeznaczonego do produkcji energii elektrycznej, szukając najbardziej optymalnej technologii pod względem bezpieczeństwa oraz efektywności pracy systemu. Najbezpieczniejszą oraz najbardziej dopracowaną technologią okazały się reaktory typu PWR chłodzone i moderowane lekką wodą. Następujący po tych wydarzeniach okres uważa się za czas komercjalizacji energetyki jądrowej. Jednak nic, co piękne, nie trwa wiecznie. Stagnacja w branży energetyki jądrowej rozpoczęła się pod koniec lat siedemdziesiątych. Liczba zamówień na nowe reaktory systematycznie się zmniejszała, do czego przyczyniły się dwie awarie reaktorów jądrowych: w amerykańskiej elektrowni Three Mile Island w 1979 roku oraz w radzieckiej elektrowni w Czarnobylu w roku 1986 [7].

### Plumbum<sup>6</sup>

Uwolnienie energii uwiecznionej w jądrze atomu otworzyło zupełnie nowy dział nauki i techniki. Jednym z atrakcyjnych zastosowań energii jądrowej stały się systemy napędowe jednostek pływających, szczególnie okrętów podwodnych. Pierwszy w historii okręt podwodny o napędzie atomowym, bazującym na reaktorze typu PWR, został opracowany na zlecenie amerykańskiej marynarki wojennej i zwodowany 31 stycznia 1954 roku. Okręt został nazwany USS Nautilus, podobnie jak fikcyjny okręt podwodny z powieści Juliusza Verne'a *Dwaścieścia tysięcy mil podmorskiej żeglugi*. USS Nautilus pozostał w służbie do 1980 roku i przepłynął prawie 500 tysięcy mil morskich.

Opracowanie systemów jądrowego napędu okrętów podwodnych zapoczątkowało nowy wyścig pomiędzy Stanami Zjednoczonymi a Związkiem Radzieckim. Rozpoczęła się batalia o przewagę militarną na morzach i oceanach. Liczba wodowanych okrętów podwodnych o napędzie atomowym rosła lawinowo. W pierwszej połowie lat siedemdziesiątych w Związku Radzieckim został

---

<sup>5</sup> Łac. woda.

<sup>6</sup> Łac. ołów.

ukończony projekt o pseudonimie operacyjnym K 705 Lira [8]. Projekt dotyczył budowy myśliwskiej łodzi podwodnej o promieniu 9,5 m i długości 80 m, napędzanej energią jądrową. Jej uzbrojenie stanowiło sześć wyrzutni torped i min. Ku zdumieniu amerykańskiego wywiadu okazało się, że łodzie klasy K 705 są w stanie osiągnąć prędkość wynoszącą ponad 75 km/h w pełnym zanurzeniu, a tym samym mogą prześcignąć większość amerykańskich torped. W jaki sposób radzieccy konstruktorzy osiągnęli tak wysokie osiągi nowej jednostki podwodnej, wcześniej nie osiągalne dla konstruktorów zachodnich? Po pierwsze kadłub okrętu, jako pierwszy w historii, został wykonany ze stopów tytanu, charakteryzujących się wysoką wytrzymałością, co pozwoliło na znaczne zmniejszenie jego masy. Po drugie, okręty klasy K 705 Lira zostały wyposażone w nowy typ jądrowej jednostki napędowej – reaktor jądrowy na neutronach prędkich o mocy termicznej 155 MW chłodzony eutektyką<sup>7</sup> bismut-olów. Użycie eutektyki bismut-olów gwarantowało większą sprawność pracy systemu napędowego, co bezpośrednio przekładało się na osiąganą prędkość jednostki. Radzieccy konstruktorzy jako pierwsi w historii użyli jako chłodziwa reaktora związku bazującego na ołowiu. Jednak ich osiągnięcia nie zostały wykorzystane w komercyjnych elektrowniach jądrowych z powodu problemów eksploatacyjnych wynikających z ograniczonej wiedzy na temat nowej technologii (projekt wojskowy), jak i trwającej stagnacji w branży jądrowej. Pełne opanowanie technologii ołowiowej okazało się ambitnym wyzwaniem, któremu ówczesni naukowcy nie mogli poddać – była to technologia XXI wieku. Prace nad reaktorami chłodzonymi ołowiem zostały porzucone.



Rys. 3. Okręt podwodny projektu K 705 Lira [9]

<sup>7</sup> Eutektyka (grec. *eûtēktos* – łatwo topliwy), mieszanina eutektyczna, eutektyk, mieszanina 2 lub więcej faz stałych (np. kryształów czystych substancji, ich roztworów stałych) o określonym stałym składzie chemicznym, powstająca podczas krzepnięcia roztworu (o takim samym składzie) w określonej temperaturze, zwanej temperaturą eutektyczną (<http://encyklopedia.pwn.pl/haslo/3899255/eutektyka.html>).

**Reditus<sup>8</sup>**

Ludzkość wkraczająca w XXI wiek boryka się z poważnym problemem pokrycia ciągle rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną. Dzisiejsza energetyka w dużym stopniu opiera się na spalaniu paliw kopalnych, takich jak gaz ziemny, ropa naftowa, węgiel kamienny oraz węgiel brunatny. W niedalekim czasie przewiduje się znaczny spadek ich wydobycia z powodu ograniczonych zasobów. Dodatkowo produktem ich spalania jest dwutlenek węgla wzmagający efekt cieplarniany. Energetyka oparta na odnawialnych źródłach energii może zaspokoić potrzeby energetyczne lokalnych społeczności, ale wydaje się, że nie jest w stanie pokryć globalnego zapotrzebowania, ze względu na specyficzne warunki środowiskowe potrzebne do jej implementacji.

Energetyka jądrowa może zapewnić duże ilości energii, nie produkuje gazów cieplarnianych oraz zużywa małe ilości paliwa rozszczepialnego. Pragmatyczne podejście do energetyki jądrowej, wolne od obaw związanych z minionymi awariami, zaczęło stawiać ją w nowym pozytywnym świetle – energetyka jądrowa zaczęła się odradzać.

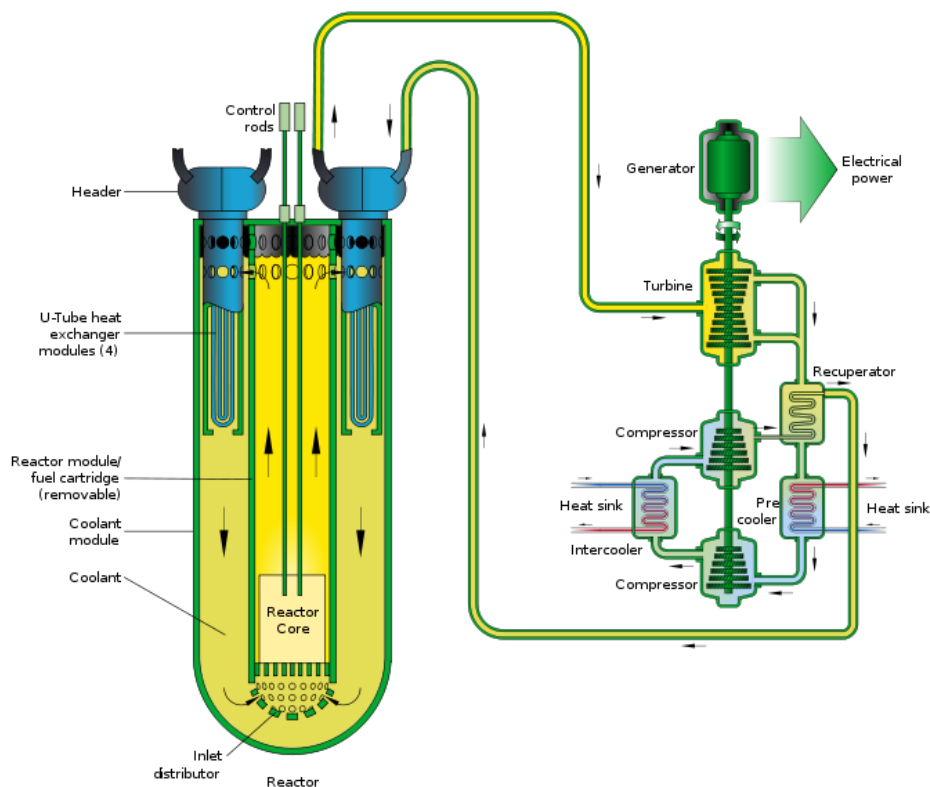
W roku 2000 pod patronatem amerykańskiego Departamentu Energii zostało powołane międzynarodowe forum, mające na celu określenie przyszłych kierunków rozwoju technologii jądrowych. W wyborze najbardziej innowacyjnych technologii ponad 100 międzynarodowych ekspertów kierowało się kilkoma decydującymi kryteriami: zwiększone bezpieczeństwo pracy systemu, zmniejszone koszty produkcji energii elektrycznej, możliwość generacji ciepła przemysłowego wykorzystywanego do produkcji wodoru lub paliw syntetycznych do zastosowań transportowych, redukcja wolumenu odpadów jądrowych poprzez wykorzystanie tzw. zamkniętego cyklu paliwowego oraz ograniczenie proliferacji materiału rozszczepialnego [10].

Z ponad 130 zaproponowanych koncepcji reaktorów jądrowych zostało wybranych sześć typów najbardziej optymalnych do wdrożenia komercyjnego. Są to: reaktor wysokotemperaturowy chłodzony helem (VHTR – *Very High Temperature Reactor*), reaktora na paliwo w postaci stopionych soli uranu (MSR – *Molten Salt Reactor*), reaktor lekko-wodny chłodzony lekką wodą w stanie nadkrytycznym (SCWR – *Supercritical Water-cooled Reactor*), reaktor na neutronach prędkich chłodzony gazem (GFR – *Gas-cooled Fast Reactor*), reaktor na neutronach prędkich chłodzony sodem (SFR – *Sodium-cooled Fast Reactor*) oraz reaktor na neutronach prędkich chłodzony ciekłym ołowiem (LFR – *Lead-cooled Fast Reactor*). Wybrane reaktory zostały nazwane reaktorami IV generacji (Gen IV). Po ponad 25 latach w ramach inicjatywy Gen IV, ponownie rozpoczęły się prace nad wdrożeniem technologii ołowiowej. Do tego czasu wszystkie łodzie podwodne klasy K 705 Lira zostały już wycofane ze służby i zezłomowane – ostatnia w roku 1996.

---

<sup>8</sup> Łac. powrót.

Reaktory chłodzone ciekłym ołowiem charakteryzują się kilkoma unikalnymi cechami, które przyczyniły się do ich wyboru jako jednego z jądrowych systemów energetycznych IV generacji. Po pierwsze, ołów bardzo słabo oddziałuje z neutronami, co umożliwia uzyskanie spektrum neutronów szybkich, niezbędnego do „dopalania” (transmutacji) zużytego paliwa jądrowego zawierającego radioaktywne transuranowce głównie z komercyjnych reaktorów jądrowych typu PWR. Umożliwiłoby to systematyczne zmniejszanie globalnego wolumenu. Ołów charakteryzuje się niską temperaturą topnienia ( $328^{\circ}\text{C}$ ) oraz wysoką temperaturą wrzenia ( $1749^{\circ}\text{C}$ ), co jest atrakcyjne dla charakterystyki bezpieczeństwa.



Rys. 4. Schemat reaktora na szybkich neutronach, chłodzonego ciekłym ołowiem [11]. Compressor – kompresor, Control rods – pręty kontrolne, Coolant – chłodziwo, Electrical power – zasilanie elektryczne, Fuel cartridge – kaseta paliwowa, Generator – generator, Header – głowica, Heat sink – radiator, Inlet distributor – separator przepływu, Intercooler – chłodnica międzystopniowa, Pre-cooler – chłodnica pierwszego stopnia, Reactor – reaktor, Reactor module – moduł reaktora, Recuperator – rekuperator, Turbine – turbina, U-tube heat exchanger – wymiennik ciepła typu U

Posiada on właściwości ekranowania przed promieniowaniem gamma oraz może wiązać niektóre radioaktywne produkty rozszczepienia i tym samym

uniemożliwić ich uwolnienie do otoczenia – ołów wypływa poza rdzeń, aż do wymiennika ciepła. Dobre właściwości przewodzenia ciepła umożliwiają osiągnięcie wysokich sprawności cyklu termodynamicznego oraz częściowy odbiór ciepła powyłączeniowego na drodze naturalnej konwekcji. Dodatkowo ołów słabo reaguje chemicznie z powietrzem oraz z wodą, co eliminuje prawdopodobieństwo zapłonu podczas jego wycieku z systemu chłodzenia reaktora w sytuacjach awaryjnych. W przypadku reaktorów chłodzonych sodem podczas reakcji z wodą wydzielają się duże ilości energii, co może doprowadzić do zniszczenia reaktora [12].

### Polonia<sup>9</sup>

Prace badawcze nad reaktorami prędkimi chłodzonymi ciekłym ołowiem prowadzone są również w Polsce na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. W 2006 roku Katedra Energetyki Jądrowej AGH została partnerem międzynarodowego projektu ELSY (*European Lead-cooled System*), sponsorowanego przez Europejską Wspólnotę Energii Atomowej EURATOM i mającego na celu opracowanie koncepcji europejskiego reaktora jądrowego chłodzonego ciekłym ołowiem [12]. Moc elektryczna reaktora wynosiłaby 600 MW przy sprawności cyklu termodynamicznego powyżej 40%. Zadanie badawcze realizowane w Polsce polegało na zaprojektowaniu rdzenia reaktora bazującego na innowacyjnym paliwie azotkowym, zawierającym izotopy uranu, plutonu oraz transuranowce z wypalonego paliwa jądrowego: izotopy neptunu, ameryku i kiuru. Korzystając z metod Monte Carlo został zaprojektowany rdzeń reaktora spełniający wszystkie wymagania projektowe. Efektem rzetelnego wykonania powierzonego zadania było zaproszenie do kolejnego projektu LEADER (*Lead-cooled European Advanced Demonstration Reactor*), mającego na celu zaprojektowanie prototypu reaktora chłodzonego ciekłym ołowiem oraz współpracę z konsorcjum dążącym do budowy demonstracyjnego reaktora o pseudonimie roboczym ALFRED (*Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator*) [13–14]. Katedra prowadzi również badania nad podkrytycznymi systemami jądrowymi, sterowanymi akceleratorem (ADS – *Accelerator Driven System*), przeznaczonymi do utylizacji zużytego paliwa jądrowego [15]. Systemy ADS stanowią połączenie akceleratora cząstek z reaktorem jądrowym i mogą być również chłodzone ciekłym ołowiem..., ale to już zupełnie inna historia.

Obecnie Polska nie posiada elektrowni jądrowej, jednak polscy naukowcy są w stanie współpracować z zagranicznymi kolegami na równym poziomie, nawet w dziedzinach tak skomplikowanych, jak rozwój technologii reaktorów IV generacji.

---

<sup>9</sup> Łac. Polska.

### **Futurum**<sup>10</sup>

Komercyjne wdrożenie reaktorów chłodzonych ciekłym ołowiem przewidziane jest po roku 2030 roku – 60 lat po uruchomieniu pierwszych reaktorów tego typu napędzających radzieckie łodzie podwodne. Czy naukowcy opanują technologię ołowiową w stopniu zapewniającym najwyższe standardy bezpieczeństwa? Czy technologia pierwotnie opracowana jako źródło energii dla łodzi podwodnych znajdzie zastosowanie komercyjne? Czy w przyszłości będziemy używać elektryczności wyprodukowanej w reaktorach jądrowych IV generacji chłodzonych ciekłym ołowiem? Przekonamy się w ciągu następnych 15 lat – prace nad tą technologią nadal trwają.

### **Literatura**

- [1] *Historia Fizyki – Od czasów najdawniejszych do współczesności*, Andrzej Kajetan Wróblewski, PWN, 2011
- [2] *Nuclear Fission Experimental Apparatus*, J. Brew, Wikimedia Commons, 2006
- [3] <http://www.atomicarchive.com/>
- [4] <http://mragheb.com>
- [5] *Drawing of the reactor*, Melvin A. Miller of the Argonne National Laboratory, Wikimedia Commons, 2009
- [6] <http://www.world-nuclear.org/>
- [7] <http://www.swiadomieoatomie.pl/>
- [8] <http://www.fas.org/>
- [9] *Alpha class submarine*, Departament Obrony Stanów Zjednoczonych, Wikimedia Commons, 1983
- [10] <https://www.gen-4.org>
- [11] *Lead-Cooled Fast Reactor Schemata*, Idaho National Library, Wikimedia Commons, 2009
- [12] *LFR Lead Fast Reactor*, L. Cinotti, C. Fazio, J. Knebel, S. Monti, H. Ait Abderahim, FISA 2006 EU Research and Training in Reactor Systems, Conference Proceedings, 2006
- [13] [http://cordis.europa.eu/projects/rcn/96603\\_en.html](http://cordis.europa.eu/projects/rcn/96603_en.html)
- [14] *The ALFRED project on Lead-cooled Fast Reactor*, Alessandro Alemberti, ESNI Conference: Advanced fission research in Horizon 2020, 2012
- [15] <http://freya.sckcen.be/>

---

<sup>10</sup> Łac. przyszłość.

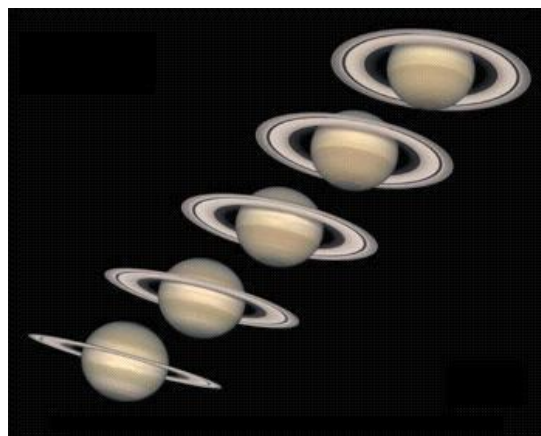


## Sześciokąt na biegunie Saturna

*Andrzej Odrzywołek*

*Instytut Fizyki UJ*

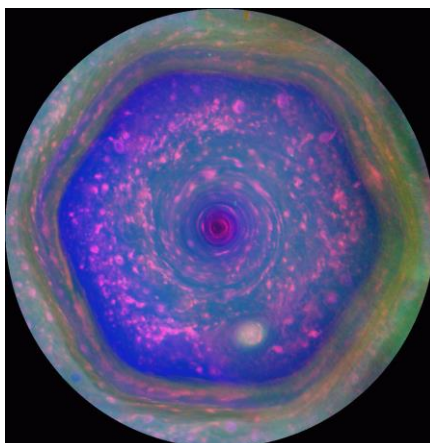
Trasę przelotu słynnych sond Voyager 1 i 2 zaplanowano tak, aby szczegółowo zbadać rejon równika Saturna oraz jego spektakularne pierścienie. Nie jest więc wielkim zaskoczeniem, że dopiero 8 lat później, w 1988 roku, udało się przeanalizować i opublikować dane zebrane w rejonie biegunowym. Po zastosowaniu projekcji korygującej zniekształcenie obrazu, okazało się, że chmury na **biegunie północnym** wyglądają jak... sześciokąt [1]. Regularny, geometryczny kształt na „powierzchni” planety, nie kojarzy się z procesami naturalnymi. W przypadku gazowych gigantów wydaje się to wręcz niemożliwe. Można zrozumieć sceptycyzm badaczy, którzy przez kolejne 8 lat kompletnie zignorowali pracę na ten temat. Najpotężniejsze teleskopy, w tym Kosmiczny Teleskop Hubble’a, były w rozwiązaniu zagadki bezużyteczne w latach 1996–2010, gdyż na północnym biegunie Saturna trwała wieloletnia zima i można było obserwować wyłącznie biegun przeciwległy (patrz fot. 1). Chmury nad biegunem południowym wyglądają zwyczajnie, a symetria obracającej się gazowej elipsoidy wydaje się sugerować, że oba rejonby polarne powinny zachowywać się identycznie.



Fot. 1. Widok pierścieni Saturna w poszczególnych latach (źródło: NASA)

W 1997 roku wystartowała sonda Cassini-Huyghens, której głównym celem było zbadanie Saturna i jego księżycy Tytana. To ostatnia tak spektakularna i zaplanowana z rozmachem misja międzyplanetarna [2]. W 2004 roku sonda

weszła na orbitę, a rok później wysłany z niej lądownik opadł na powierzchnię Tytana. Sonda Cassini kontynuuje badania do dziś. Dzięki nim, obecnie nie ma żadnych wątpliwości co do istnienia sześciokąta (fot. 2).



Fot. 2. Saturniański heksagon (źródło: NASA)

Sześciokąt jest stabilny, istnieje od przynajmniej 30 lat (pełny rok saturniański to 29,4 lat). Odporny jest również na zmiany pór roku, co oznacza, że promieniowanie słoneczne nie ma z nim bezpośredniego związku [3]. Jego okres obrotu wydaje się równy okresowi obrotu rdzenia planety, aczkolwiek pomiary tego ostatniego są trudne i niedokładne [4]. Sześciokąt to struktura głęboka, sięgająca obszarów o ciśnieniu przynajmniej od 2 do 4 atmosfer. Jego bok mierzy 13 800 km, czyli nieco więcej niż średnica Ziemi. Dane Voyagera pokazywały istnienie przynajmniej jednego wiru po zewnętrznej stronie boku sześciokąta [1]. Sugerowano, że każdy bok posiada powiązany wir, ale współczesne obserwacje nie potwierdzają ich stałej obecności [3]. Heksagon pojawia się na szerokości planetograficznej około  $75^\circ$ . W centrum znajduje się cyklon (wir) o promieniu około  $3^\circ$  z prędkością wiatru rzędu 135 m/s. Podobną wartość i zwrot ma wiatr w rejonie sześciokąta, podczas gdy w oku cyklonu i wewnątrz jest znacznie spokojniej. Prędkość wiatru zależy od wysokości, ale dokładna pionowa struktura nie została zbadana. Sam sześciokąt tworzą dwie linie chmur oddzielone pustym pasem o szerokości około  $3^\circ$ .

Porównanie obszaru bieguna północnego i południowego wykazuje daleko idące podobieństwa geometryczne i fizyczne. Nieliczne różnice są jednak bardzo rzucające się w oczy. I tak, oko cyklonu południowego jest czyste od chmur, tak jak w przypadku ziemskich huraganów. Północne oko jest zasłonięte. Wnętrze sześciokąta, którego nie ma na biegunie południowym, jest pełne punktowych chmur, będących analogiem naszych chmur burzowych typu cumulonimbus.



Powstało sporo teorii wyjaśniających istnienie sześciokąta. Jego odkrywca sądził, że ma on związek z polem magnetycznym planety. Inna hipoteza mówi, że jest to komórka konwekcyjna, która dosyć często przyjmuje heksagonalny kształt<sup>1</sup>. Najprostsze jest założenie o istnieniu na zewnątrz heksagonu stałego „wiru”, podobnego do Wielkiej Czerwonej Plamy na Jowiszu, który okresowo zaburza normalny, pasmowy układ chmur, z częstością sześciokrotnie mniejszą niż okres obrotu [5]. Obecnie uważa się, że wir to raczej uboczny efekt istnienia heksagonu niż przyczyna jego powstania. Na ostatnich zdjęciach takich wirów nie znaleziono. Sporym zaskoczeniem było odtworzenie wielokątnych struktur w bardzo prostych eksperymentach [6], wychodzących niewiele dalej niż obracające się wiadro z wodą. Powstawanie sześciokątnych (wielokątnych) stacjonarnych struktur zaobserwowano także w bardziej realistycznych badaniach teoretycznych i eksperymentalnych nad niestabilnością nieciągłości kontaktowej na granicy strumieni gazu o różnych prędkościach, w tym o przeciwnym zwrocie [4].

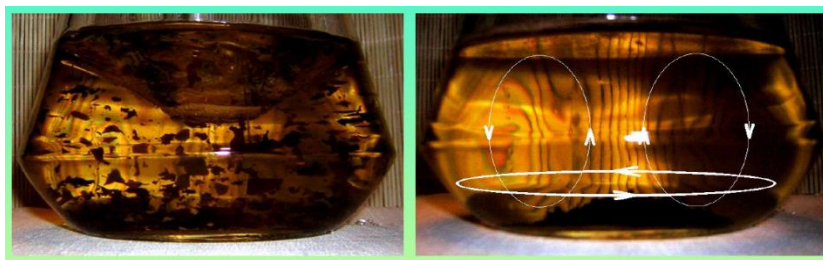
Przy okazji omawiania saturniańskiego heksagonu, trudno nie wspomnieć o napomkniętej wyżej serii interesujących prac nad ruchem płynu w cylindrycznych naczyniach. Już Newton posłużył się przykładem obracającego się wiadra z wodą w celu uzasadnienia istnienia wyróżnionych, z punktu widzenia obrotów, układów odniesienia. Jeżeli ciecz obraca się razem z wiadrem, to powierzchnia cieczy przyjmuje kształt paraboloidy obrotowej. Fakt ten wykorzystano w konstrukcji zwierciadeł teleskopów z płynnej rtęci. Jest to przykład tzw. rotacji sztywnej, gdyż płyn porusza się tak jak ciało stałe. W każdym innym przypadku, a jest ich w przyrodzie zdecydowana większość, mamy do czynienia z przepływami wirowymi. Dotyczy to zarówno mieszania herbaty w szklance, trąb powietrznych i huraganów na Ziemi jak i polarnego wiru na planetach Wenus czy Saturn. To, co rzuca się natychmiast w oczy, to lejkowata powierzchnia swobodna, często z dziurą w środku. To, czego na ogół nie widać gołym okiem, a wynika z równań ruchu płynu (równań Eulera), to cyrkulacja południkowa. Jest to przepływ, dla którego wektor prędkości mieści się w płaszczyźnie przechodzącej przez oś obrotu. Powoduje on m.in. zbieranie się cukru w mieszanej szklance herbaty w jej środku, wbrew intuicji (fot. 3). To ten sam przepływ, który powoduje, że tornado „zasysa” przedmioty w górę, a wir wodny w głąb rzeki. Przepływ bez cyrkulacji południkowej jest niemożliwy, gdy prędkość kątowna cieczy nie jest taka sama w całej objętości.

W każdym przypadku, powierzchnia swobodna i przepływ pozostają osiosymetryczne. Nawet gdy dochodzi do spontanicznego złamania symetrii, co jest możliwe przy dużych prędkościach obrotowych, spodziewamy się co naj-

---

<sup>1</sup> Być może ktoś zauważył sześciokątne wzory na dnie garnka przypalonego mleka – to właśnie utrwalone komórki konwekcyjne.

wyżej wydłużonych, elipsoidalnych deformacji lub zupełnie niestacjonarnego przepływu. Taka opinia istniała w fizyce przez dziesiątki lat.



Fot. 3. Cyrkulacja południkowa w obracającej się cieczy (źródło: autor)

Pogląd ten obaliły prace duńskich fizyków [6]. Podobne eksperymenty wykonał wcześniej G. Vatistas [7], ale jego wyniki zignorowano. Okazało się, że w pewnych sytuacjach powierzchnia swobodna rotującej cieczy przyjmuje kształt... **wielokąta foremnego!** Warto opisać ten niezwykle prosty eksperyment [6]. Otóż, na dnie cylindrycznego naczynia o promieniu kilkunastu centymetrów znajdowała się płyta w kształcie koła, której prędkość kątową precyzyjnie regulowano. Dla niewielkich okresów obrotu dna, poniżej 1 s, powierzchnia swobodna cieczy (wody lub glikolu etylenowego) była, zgodnie z oczekiwaniami, osiowosymetryczna. Już dla częstości powyżej 2 Hz środkowa część dna staje się wolna od płynu, a granica suchego obszaru zaczyna przyjmować zaskakujące kształty. Początkowo widoczna elipsa w miarę wzrostu prędkości kątowej staje się trójkątem równobocznym, następnie kwadratem, pięciokątem, a wreszcie sześciokątem foremnym. Dzieje się tak przy obrotach o częstości około 5 Hz [6]. Wielokąt obraca się z prędkością mniejszą niż rotor. Filmy i fotografie pokazujące niestabilność są nadal dostępne [8, 9].

Niektórzy naukowcy bagatelizują znaczenie odkrycia sześciokąta na Saturnie. Pojawiły się nawet niewybredne rysunkowe dowcipy na jego temat, których wyszukanie w Internecie pozostawiam czytelnikom. Odkrycie tego rodzaju przepływów, a także odtworzenie ich w prostych, szkolnych wręcz eksperymentach laboratoryjnych uważam jednak za ważne i ciekawe. Pokazuje to, że założenia, które wydają się oczywiste, nie zawsze są prawdziwe. Proste, geometryczne wzory pojawiają się w rotujących płynach [10]. Fizyka nie przestaje nas zaskakiwać i, jak widać na tym przykładzie, niekoniecznie musi to być związane z teorią kwantową lub relatywistyczną, egzotyczną materią czy ultranowoczesną aparaturą.

**Referencje**

- [1] D.A. Godfrey, *A hexagonal feature around Saturn's north pole*, *Icarus* **76**, 1988, 335–356; [http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(88\)90075-9](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(88)90075-9)
- [2] A. Odrzywółek, *Astronomia i astrofizyka na orbicie*, Prace Komisji Astrofizyki PAU (ISSN 1732-2677), Nr 15, s. 9–14, 2013; [http://ribes.if.uj.edu.pl/homepage/publications/PDF/AA\\_na\\_orbicie.pdf](http://ribes.if.uj.edu.pl/homepage/publications/PDF/AA_na_orbicie.pdf)
- [3] Kevin H. Baines, Thomas W. Momary, Leigh N. Fletcher, Adam P. Showman, Maarten Roos-Serote, Robert H. Brown, Bonnie J. Buratti, Roger N. Clark, Philip D. Nicholson, *Saturn's north polar cyclone and hexagon at depth revealed by Cassini/VIMS*, *Planetary and Space Science*, Volume 57, Issues 14–15, December 2009, Pages 1671–1681, ISSN 0032-0633, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2009.06.026>
- [4] Ana C. Barbosa Aguiar, Peter L. Read, Robin D. Wordsworth, Tara Salter, Y. Hiro Yamazaki, *A laboratory model of Saturn's North Polar Hexagon*, *Icarus*, Vol. 206, Issue 2, April 2010, Pages 755–763, ISSN 0019-1035, <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2009.10.022>
- [5] M. Allison, D.A. Godfrey, R.F. Beebe, *A Wave Dynamical Interpretation of Saturn's Polar Hexagon*, *Science* 2 March 1990: 247 (4946), 1061–1063 [DOI:10.1126/science.247.4946.1061]
- [6] Thomas R.N. Jansson, Martin P. Haspang, Kåre H. Jensen, Pascal Hersen, Tomas Bohr, *Polygons on a Rotating Fluid Surface*, *Phys. Rev. Lett.* 96, 174502 – Published 3 May 2006
- [7] G.H. Vatistas, *A note on liquid vortex sloshing and Kelvin's equilibria*, *J. Fluid Mech.* (1990) **217**, 241–248
- [8] <https://dcwww.fysik.dtu.dk/~tbohr/RotatingPentagon.mov>
- [9] <https://dcwww.fysik.dtu.dk/~tbohr/RotatingPolygon/index.html>
- [10] Philip Ball, *Geometric whirlpools revealed*, *Nature News*, Published online 19 May 2006 <http://www.nature.com/news/2006/060519/full/news060515-17.html>, doi:10.1038/news060515-17



## Nobel 2013. Cząstka Higgsa – ostatnia obserwowana cegielka teorii prawie wszystkiego

*Cao Long Van, Wiesław Leoński*

*Zakład Optyki i Inżynierii Kwantowej,  
Instytut Fizyki, Uniwersytet Zielonogórski*

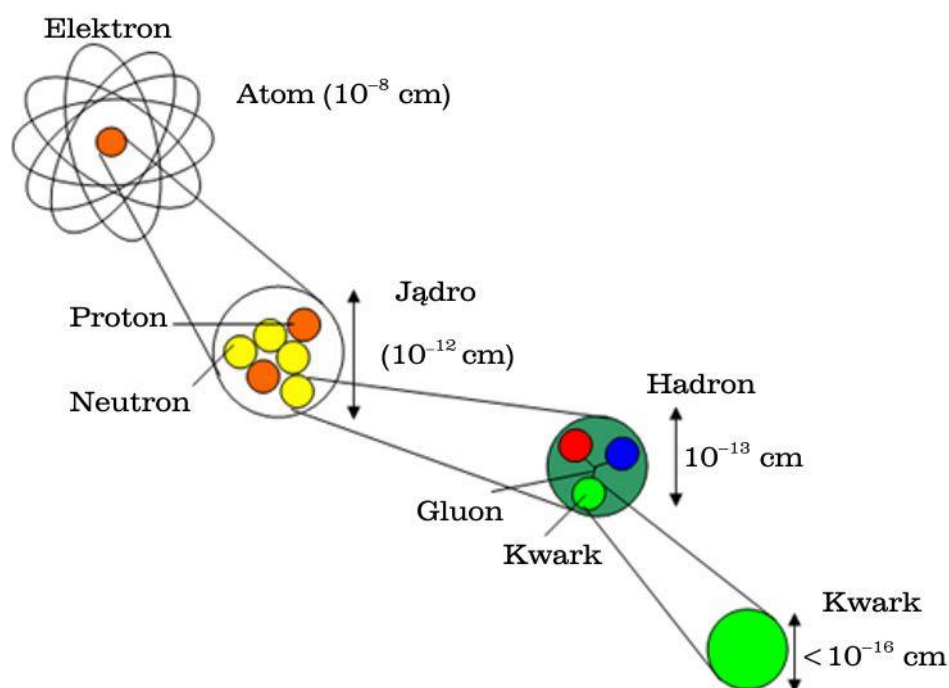
Każdego roku, 8 października, cały świat patrzy na Sztokholm, gdzie przyznawana jest kolejna Nagroda Nobla z dziedziny fizyki. Zeszłorocznymi laureatami tej prestiżowej nagrody zostali fizycy: François Englert z Belgii i pochodzący ze Szkocji Peter W. Higgs. Są oni autorami teorii tłumaczącej fakt, że cząstki elementarne będące podstawowymi cegiełkami, z których zbudowana jest nie tylko otaczająca nas materia, ale i my sami, obdarzone są masą. Teoria ta, zwana *Modelem Standardowym* pokazuje, w jaki sposób wszystkie cząstki elementarne będące budulcem naszego Wszechświata powstały z połączenia kilku cegiełek materii oraz jak oddziałują one pomiędzy sobą, doprowadzając Wszechświat od momentu tzw. *Wielkiego Wybuchu* do tego stanu, w jakim istnieje obecnie. Model Standardowy jest teorią unifikującą trzy podstawowe oddziaływania obecne w przyrodzie. Są to: oddziaływanie elektromagnetyczne, oddziaływanie silne – utrzymujące w spójności jądra atomowe i oddziaływanie słabe – odpowiedzialne za procesy rozpadu tych jąder. Tak więc jest to teoria łącząca ze sobą trzy z czterech znanych nam oddziaływań. Czwarte z nich, oddziaływanie grawitacyjne, nie jest opisywane przez ten model. Aż do roku 2012 cząstka będąca kluczowym elementem tej teorii, tzw. bozon Higgsa, nie została zaobserwowana w eksperymentach fizycznych. Polowanie na nią trwało przez prawie pięćdziesiąt lat i kosztowało wiele wysiłku ze strony fizyków oraz pochłonęło ogromne kwoty pieniędzy. W końcu, dzięki wynikom uzyskanym za pomocą tzw. Wielkiego Zderzacza Hadronów (ang. Large Hadron Collider – LHC) w laboratorium CERN pod Genewą, cząstkę tę udało się zaobserwować. Obserwacja ta stanowiła kluczowy moment, w którym Model Standardowy uzyskał swe potwierdzenie.

Aby zrozumieć istotę Modelu Standardowego oraz rolę, jaką pełni w nim bozon Higgsa, należy wrócić do idei wielkiego fizyka Alberta Einsteina. Jak napisał znakomity popularyzator nauki, Michio Kaku – „Nawet okrucieństwa informacji ze stołu Einsteina stwarzają nauce nowe możliwości”. Można powiedzieć, że utorowały one drogę dla innych uczonych, którzy otrzymali Nagrodę Nobla. Jeszcze nie tak dawno pojawiały się głosy, że prowadzone przez Einsteina w ciągu ostatnich trzydziestu lat życia poszukiwania „zunifikowanej teorii pola” były tylko stratą czasu. Pomimo tego, te pionierskie pomysły stały się inspiracją dla wielu zdolnych, często młodych naukowców, a poszukiwanie tzw. teorii wszystkiego zostało uznane za centralny problem fizyki. Zaczniemy od podstawowej koncepcji nowoczesnej fizyki – koncepcji dualizmu korpuskularno-falo-

wego, w ramach której światło może objawiać nam swoją podwójną naturę – falową, jak twierdził James Clerk Maxwell, bądź też jak sugerował to już Izaak Newton – cząsteczkową.

### Cząstki i pola

Obserwując historię rozwoju fizyki zauważamy tendencję zarówno do zmniejszania liczby podstawowych cegiełek będących budulcem materii, jak i do unifikacji oddziaływań pomiędzy nimi. Idea budowy materii składającej się z kilku podstawowych składników jest znana od prawie dwóch i pół tysiąca lat, kiedy to starożytny grecki filozof Demokryt z Abdery twierdził, że wszystko składa się z atomów (grec. *átomos* – coś niepodzielnego). Pojęcie atomu jako najmniejszej i niepodzielnej cząstki materii przetrwało przez stulecia i dopiero w XX wieku ta niepodzielność została „naruszona”. Odkryto mianowicie, że każdy atom jest właściwie prawie pusty, gdyż składa się z bardzo małego jądra i jeszcze dużo mniejszych elektronów poruszających się w przestrzeni je otaczającej. Stwierdzono, że elektrony należą do klasy bardzo lekkich cząstek zwanych obecnie leptonami, a jądra atomowe składają się z protonów i neutronów. Obecnie twierdzimy, że protony i neutrony składają z najmniejszych cegiełek materii zwanych kwarkami (patrz rys. 1).



Rys. 1. Struktura podstawowych składników materii

Kwarki są to takie cząstki elementarne, które posiadają nie tylko własności i cechy podobne do tych, spotykanych u wcześniej znanych cząstek (takich jak np. masa w przypadku protonów czy neutronów), ale są opisane przez „kolory” czy też „zapachy”. Oczywiście, nie mają one nic wspólnego z kolorami i zapachami, jakie znamy z życia codziennego; po prostu fizycy często wymyślają takie nazwy dla nowych, czasami bardzo egzotycznych i specyficznych własności nowo odkrywanych obiektów fizycznych. Ostatecznie, w ramach Modelu Standardowego przyjęto, że elementarnymi cegiełkami materii są leptony (np. elektron) oraz kwarki.

Równocześnie wraz z badaniami podstawowych składników materii, interesowano się też problemami oddziaływań pomiędzy nimi. Pierwszym typem tego rodzaju oddziaływań jest oddziaływanie grawitacyjne pomiędzy cząstkami obdarzonymi masą. Było ono już znane i opisywane w ramach mechaniki Newtona opartej na pojęciu sił. Mechanika Newtona była fundamentalną teorią fizyki, uważaną za jej jedyną podstawę przez prawie dwa stulecia. Zmieniło się to dopiero w drugiej połowie XIX w., kiedy dla wyjaśnienia tajemniczych dla ówczesnych badaczy sił elektrycznych i magnetycznych, J.C. Maxwell wprowadził pojęcia pola jako niewidzialnego układu linii sił penetrujących całą pustą przestrzeń. Z jego teorii elektromagnetyzmu wynika, że w odróżnieniu od koncepcji sił newtonowskich, zaburzenia elektromagnetyczne nie przenoszą się natychmiast na dowolną odległość, lecz przemieszczają z pewną prędkością. W ramach swojej teorii, Maxwell obliczył wartość tej prędkości. Okazało się, że jest ona dokładnie równa wartości prędkości rozchodzenia się światła w próżni. Ogłaszając swą teorię Maxwell nie tylko wyjaśnił falową naturę światła, ale dokonał też pierwszej unifikacji dwóch oddziaływań – elektrycznego i magnetycznego. Tak więc w XIX w. fizyka opierała się na dwóch filarach – mechanice Newtona oraz na teorii elektromagnetyzmu Maxwella. Twierdzono wtedy, że dzięki nim można opisać wszystkie zjawiska fizyczne obecne w przyrodzie. Na przełomie wieków XIX i XX twierdzono nawet, że dalszy postęp fizyki będzie polegać tylko na poprawianiu wartości różnych mierzonych wielkości fizycznych na kolejnych miejscach po przecinku.

W „cudownym” roku 1905, Einstein opublikował kilka fundamentalnych prac, które zmieniły całkowicie obraz fizyki. Jedną z nich dotyczyła zjawiska fotoelektrycznego. W pracy tej pojawiła się hipoteza mówiąca, że światło składa się z cząstek – kwantów, którym później nadano nazwę fotonów. Na podstawie przedstawionych rozważań w 1909 roku Einstein na zjeździe fizyków w Salzburgu wygłosił referat zatytułowany *Rozwój naszych poglądów na naturę i strukturę promieniowania*. Historycznie była to pierwsza prezentacja koncepcji dualizmu w fizyce. Z tych idei Einsteina powstał później formalizm kwantowania klasycznego pola elektromagnetycznego, w wyniku którego pojawiło się pojęcie kwantów pola, zwanych fotonami. Z drugiej strony, inspirowany ideami związanymi z dualizmem natury światła francuski fizyk Louis de Bro-

glie w 1924 roku zaproponował teorię, w której dwoistą naturą obdarzone są inne, traktowane dotychczas tylko jako cząstki, elementy materii. Stwierdził on, że takie obiekty świata mikroskopowego jak elektrony czy też protony zachowują się podobnie do fotonów: w pewnych eksperymentach objawiają swoją falową naturę, a w innych sytuacjach zachowują się jak cząstki. Te idee stanowiły istotną część jednego z fundamentów rodzącej się fizyki współczesnej – teorii kwantowej.

We współczesnej teorii kwantów odpowiednikami klasycznych pól są cząstki – kwanty. Niewidzialnym dla naszych zmysłów polem, wypełniającym całą otaczającą nas przestrzeń, odpowiadają różne cząstki materii, będące nośnikami znanych nam oddziaływań. Przykładowo, cząstka Higgsa, o której była mowa na wstępie, jest kwantem tzw. pola Higgsa. Cztery znane nam podstawowe oddziaływania fizyczne posiadają swoje nośniki, będące kwantami odpowiednich pól. Na przykład fotony są kwantami pola elektromagnetycznego, natomiast bozony pośrednie  $W$  i  $Z$  – kwantami oddziaływań słabych, a gluony – oddziaływań silnych. Pojawia się tu koncepcja pól cechowania, których szczególnym przypadkiem są pola silne, słabe czy elektromagnetyczne. Tak naprawdę idzie tu o to, że pola te związane są z pewną podstawową symetrią Natury, symetrią względem tzw. cechowania. Aby omówić rolę różnego rodzaju symetrii w rozwoju fizyki, musimy znowu wrócić do idei zaproponowanych przez Einsteina.

### **Unifikacja przez symetrię**

Jak wspomnieliśmy wcześniej, jednym z filarów dziewiętnastowiecznej fizyki była mechanika Newtona. W 1905 roku Albert Einstein opublikował kolejną pracę, w której przedstawił swoją nową teorię, teorię względności. Teoria ta spowodowała zawalenie się jednego z filarów ówczesnej fizyki – mechaniki Newtona i stała się kolejnym fundamentem fizyki współczesnej. Jest ona oparta na założeniu niezmienniczości postaci równań fizycznych względem tzw. grupy transformacji Lorentza, które łączą z sobą czas i przestrzeń. Przed odkryciem Einsteina, lokalizacja i czas dowolnego zdarzenia były traktowane zupełnie niezależnie. Dopiero Hermann Minkowski (nauczyciel Einsteina podczas jego studiów matematyki, który kiedyś nazwał go „leniwym psem”, gdyż młody Einstein często opuszczał wykłady z tego przedmiotu) skonstruował ramy matematyczne dla późniejszej teorii Einsteina, wprowadzając czterowymiarową czasoprzestrzeń. W ten sposób powiązał ze sobą czas i przestrzeń w jedną piękną czterowymiarową strukturę. Należy pamiętać, że praca Minkowskiego to nie jest tylko propozycja nowego formalizmu matematycznego. Wykazał on, że można unifikować dwie, wydawałoby się zupełnie różne, koncepcje za pomocą jednej symetrii: przestrzeń i czas mogą być traktowane jako różne stany tego samego obiektu w pewnej czterowymiarowej strukturze. Jak podkreślił to Michio Kaku – „Unifikacja stała się jedną z najważniejszych zasad Einsteina na

resztę jego życia, wskazówką dla następnych pokoleń w poszukiwaniu jednolitej teorii”.

W życiu codziennym dobrze znamy pojęcie symetrii pojawiających się w przestrzeni trójwymiarowej. Na przykład w czasie zbliżającej zimy z pewnością będziemy obserwowali piękne płatki śniegu. Zauważymy, że po obrocie płatka o kąt  $60^\circ$  (obrót jest właśnie przykładem transformacji), będzie wyglądał on tak samo jak przed obrotem. Minkowski pokazał, że równania Einsteina zachowują swoją postać przy transformacji Lorentza, które są obrotami w czterowymiarowej czasoprzestrzeni, podobnie jak obracane płatki śniegu. Korzystając z różnych zaawansowanych pojęć matematycznych związanych z teorią grup i geometrią różniczkową pokazał, że korzystając z symetrii transformacji Lorentza można zbudować cały formalizm opisujący elektrodynamikę i w konsekwencji optykę. Na przykład, można pokazać, że równania Maxwella są najprostszymi możliwymi równaniami pozwalającymi opisać światło jako falę elektromagnetyczną.

Fizycy zajmujący się fizyką teoretyczną w ciągu kolejnych lat, uogólnili teorię związaną z obrotami i innymi transformacjami Lorentza na przypadki czasoprzestrzeni z większą liczbą wymiarów. Nowo powstające teorie dotyczyły różnych operacji typu odbicia, obrotu, przesunięcia w czasie i przestrzeni oraz symetrii w różnorodnych, bardzo abstrakcyjnych przestrzeniach, które trudno zobrazować sobie za pomocą naszej wyobraźni. Wykorzystanie takich symetrii służy obecnie systematycznemu uporządkowaniu świata cząstek elementarnych. Na przykład symetria obrotowa w doświadczanej przez nas przestrzeni trójwymiarowej, pozwala uporządkować różne stany kwantowe, w jakich może znajdować się atom i, w konsekwencji, pomóc zrozumieć strukturę układu okresowego pierwiastków Mendelejewa. Natomiast wspomniana już wcześniej symetria cechowania pozwoliła na zdefiniowanie Modelu Standardowego.

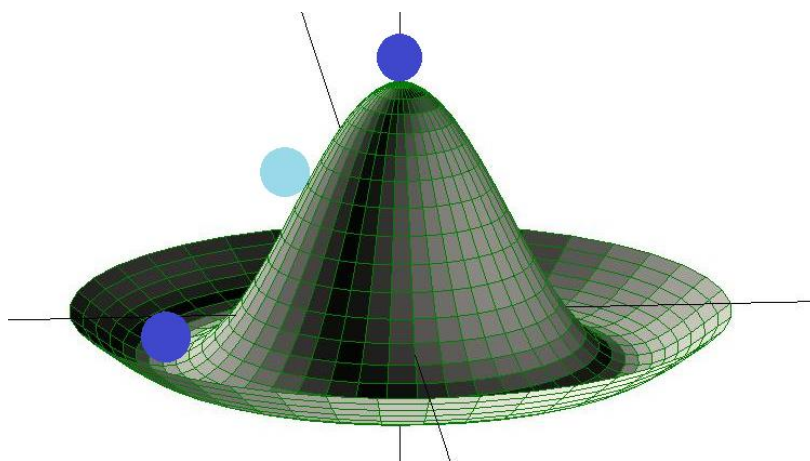
### **Model oddziaływań elektroślabych. Bozon Higgsa**

Zachęteni sukcesami, jakie święciła elektrodynamika kwantowa (teoria elektromagnetyzmu oparta na połączeniu teorii kwantowej i teorii względności), fizycy przystąpili do konstrukcji nowych teorii opisujących również inne oddziaływania w Naturze. Okazało się, że Natura jest tak łaskawa, że posiada wiele symetrii, które ułatwiałyby jej opis, pozwalając w przyszłości na unifikację wszystkich znanych nam oddziaływań.

Realizując marzenie Einsteina o jednolitej teorii opisującej wszystkie oddziaływania, Sheldon Glashow (laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1979 r.) podjął w 1961 roku próbę konstrukcji teorii łączącej oddziaływanie elektromagnetyczne z oddziaływaniem słabym. W ramach tej teorii nośniki oddziaływania słabego – cząstki nazywane bozonami pośrednimi  $W$  oraz  $Z$ , nie posiadają masy, podobnie jak ma to miejsce w przypadku fotonów. Jednak przeprowadzone doświadczenia pokazały, że gdyby istniały, musiałyby jednak posiadać jakąś



masę. Gdybyśmy chcieli unifikować oddziaływanie elektromagnetyczne ze słabym, czyli wyprowadzić równania opisujące foton i cząstki  $W$  oraz  $Z$  tworzące jedną rodzinę z fotonem, musielibyśmy stworzyć odpowiedni mechanizm pozwalający na uzyskanie mas przez bozony pośrednie. Taki mechanizm w zaproponowanej przez Glashowa teorii nosi nazwę spontanicznego łamania symetrii, wprowadzonego po raz pierwszy przez Higgsa. Łamanie to musiałyby zostać spowodowane przez wprowadzenie dodatkowego pola – pola Higgsa, którego nośnikiem jest właśnie cząstka nazywana obecnie bozonem Higgsa. Jeśli chcemy wyobrazić sobie łamanie symetrii, to można je przedstawić za pomocą dna butelki szampana, lub jak kto woli, meksykańskiego sombrero. Jeżeli umieścimy na szczycie takiego kapelusza kulkę, to na początku mamy sytuację w pełni symetryczną – mówimy tu o tzw. symetrii obrotowej. Jednak kulka w tym miejscu jest w położeniu nietrwałym i może się stoczyć na dół w dowolnym kierunku. Dno butelki (lub sombrero) jest nadal obrotowo symetryczne, lecz pozycja kulki, która się stoczyła łamie tę symetrię (rys. 2). W swojej słynnej pracy opublikowanej w 1964 roku w prestiżowym czasopiśmie *Physical Review Letters* i zatytułowanej *Łamane symetrie i masy bozonów cechowania*, Peter Higgs z University of Edinburgh wprowadził podobny mechanizm łamania symetrii. Pokazał, że zaproponowane przez niego pole, znane obecnie jako pole Higgsa, łamie symetrię pojawiającą się w rozważaniach teoretycznych, związanych z oddziaływaniami słabymi i elektromagnetycznymi. Co ciekawe, taki mechanizm łamania symetrii został wprowadzony jeszcze przez naukowców z dwóch innych grup badawczych, zupełnie niezależnie od siebie – przez Roberta Brouta i François Englerta z Université Libre de Bruxelles w Belgii oraz Geralda Guralnika, Carla Hagena i Toma Kibble’a z Imperial College w Londynie.



Rys. 2. Sombrero meksykańskie z zaznaczonymi położeniami kulki staczającej się z punktu o najwyższej energii („fałszywej próżni”) do punktu o energii minimalnej („rzeczywista próżnia”)

W 1967 roku Steven Weinberg i niezależnie od niego (rok później) Abdus Salam kontynuowali prace nad tym modelem, istotnie go rozwijając. Również i w ich pracach wyraźna była ważna rola, jaką pełnił bozon Higgsa w rozwijanej przez nich teorii łączącej oddziaływania słabe z elektromagnetycznymi. Zgodnie ze sławnym wzorem fizyki wyprowadzonym przez Einsteina  $E = mc^2$ , w wyniku przejścia ze stanu tzw. „fałszywej próżni” (szczyt sombrero) do „rzeczywistej” (dolina sombrero), energia wyzwolana przez pola Higgsa zostaje wykorzystana do tworzenia mas bozonów odpowiadających oddziaływaniu słabemu.

W teorii zaproponowanej przez Weinberga i Salama pojawiają się cztery tzw. pola rzeczywiste Higgsa (dublet pól zespolonych). Trzy z nich są odpowiedzialne za pojawienie się mas bozonów pośrednich – bozonów  $W$  oraz  $Z$ . Pozostaje zatem jedno pole skalarne odpowiadające właśnie bozonowi Higgsa. W 1979 roku Glashow wraz z Salamem i Weinbergiem zostali uhonorowani Nagrodą Nobla „za wkład do zunifikowanej teorii elektroślabych, w tym przewidzenie istnienia słabych prądów neutralnych”. Od momentu opracowania stworzonej przez nich teorii, właściwie mówimy o oddziaływaniach elektroślabych.

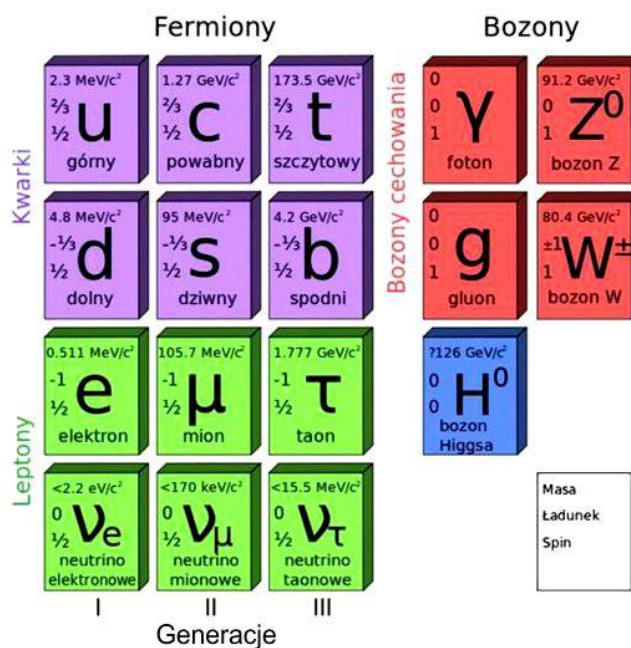
### **Teoria oddziaływań silnych – chromodynamika kwantowa**

W latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku, równoległe z rozwojem teorii oddziaływań elektroślabych rozwijała się teoria oddziaływań silnych, oparta również na istnieniu w przyrodzie określonych symetrii związanych z polami cechowania. Wspomniane wcześniej cząstki elementarne nazywane są leptonami i kwarkami, a z badaniami tych cząstek związanych jest również kilka przyznanych Nagród Nobla z dziedziny fizyki, np. nagroda dla Murraya Gell-Manna, twórcy idei kwarków, przyznana w 1969 roku. Kwarki, najbardziej podstawowe cegiełki budujące inne cząstki materialne, oprócz ładunku elektrycznego (co ciekawe, będącego ułamkiem najmniejszego wyodrębnionego i zaobserwowanego ładunku elektrycznego, ładunku elektronu – zwanego ładunkiem elementarnym) są jeszcze obdarzone innym rodzajem ładunku – ładunkiem koloru. Kwarki oddziałują między sobą poprzez wymianę tzw. gluonów (rys. 1), nośników oddziaływania silnego, również obdarzonych ładunkiem koloru. Obecnie znamy sześć rodzajów kwarków: górny, dolny, dziwny, powabny, wysoki (prawdziwy) oraz niski (piękny). W literaturze anglojęzycznej są one nazywane odpowiednio: up, down, strange, charm, top (true) oraz bottom (beauty). Analogicznie do elektrodynamiki kwantowej opisującej oddziaływania elektromagnetyczne poprzez fotony, stworzono teorię zwaną chromodynamiką kwantową opisującą oddziaływania silne. Okazało się, że podobnie do przypadków pól związanych z oddziaływaniami elektroślabymi (pola fotonowe, pola  $W$  oraz  $Z$  – mówimy tu też o tzw. polach bozonowych), pola leptonowe i kwarkowe (zwane też fermionowymi) można również sprzęgać z polem Higgsa. W rezultacie,

podobnie jak miało to miejsce w przypadku oddziaływań elektroślabych, poprzez spontaniczne złamanie symetrii, bezmasowe cząstki uzyskują swoje masy. Tak więc inne fundamentalne cząstki materii – kwarki i leptony – posiadają masę również dzięki oddziaływaniu z polami Higgsa. Co jest ważne, w wyniku każdego z tych oddziaływań powstaje też odpowiednia cząstka Higgsa.

### Model Standardowy – bozon Higgsa obserwowany

W latach sześćdziesiątych ubiegłego stulecia obserwowaliśmy równoległy rozwój dwóch teorii: teorii oddziaływań elektroślabych (łączyących ze sobą oddziaływanie słabe i elektromagnetyczne) i teorii oddziaływania silnego. Zostały one połączone w końcu lat siedemdziesiątych w jeden model – Model Standardowy, a wyniki teoretyczne wyprowadzone w ramach tego modelu zostały w większości sprawdzone eksperymentalnie w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku. Praktycznie wszystkie cegiełki tego modelu zostały zaobserwowane w przeprowadzonych eksperymentach z wyjątkiem jednej z nich, o kluczowym znaczeniu. Chodzi tu oczywiście o cząstkę Higgsa, niezbędną do tego, by uzyskane na drodze rozważań teoretycznych wartości mas obserwowanych przez nas cząstek kwantowych były takie same, jak masy wyznaczone w eksperymentach.



Bozony Higgsa są jedynymi cząstkami, które istniały w epoce Wielkiej Unifikacji tuż po Wielkim Wybuchu, zanim pojawiły się kwarki i inne cząstki Modelu Standardowego. Tak więc, by zaobserwować cząstki Higgsa, uczeni mu-

sieli stworzyć za pomocą potężnych urządzeń do nadawania ogromnych energii cząstkom elementarnym (akceleratorów) takie warunki, które odpowiadałyby warunkom panującym w epoce Wielkiej Unifikacji. Takim urządzeniem jest właśnie Wielki Zderzacz Hadronów LHC, skonstruowany w Europejskim Ośrodku Badań Jądrowych CERN koło Genewy. Został on zbudowany na terytorium Szwajcarii oraz Francji w kołowym tunelu o długości 27 kilometrów. Należy podkreślić, że przy jego budowie liczący udział mieli też fizycy z Polski. Właśnie dzięki wynikom uzyskanym w laboratorium LHC, istnienie cząstki Higgsa można uznać za potwierdzone. Cząstka ta, jak widzimy, pełni kluczową rolę we współczesnej teorii cząstek elementarnych, pozwalającej połączyć w jedną całość opis trzech z czterech znanych nam oddziaływań. Peter W. Higgs oraz François Englert, twórcy idei pola i cząstki, pozwalających na uzyskanie masy przez znane nam inne cząstki elementarne, zostali w ubiegłym roku uhonorowani przyznaniem Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki. Należy jednak pamiętać, że – jak podkreśla znakomity polski fizyk i historyk nauki profesor Andrzej Kajetan Wróblewski – Model Standardowy nie jest „teorią ostateczną ani fundamentalną, ponieważ zawiera jeszcze zbyt wiele parametrów swobodnych, które muszą być wzięte z doświadczenia”. Ponadto, należy pamiętać jeszcze o czwartym oddziaływaniu obecnym w naturze – oddziaływaniu grawitacyjnym, które jest poza zasięgiem Modelu Standardowego. Wyścig do Wielkiej Unifikacji wszystkich czterech oddziaływań – marzenia Alberta Einsteina – wciąż trwa, ale to już może być tematem osobnego artykułu.



## „BJ” (Bidzej), człowiek, który odkrył kwarki – James D. Bjorken

Krzysztof Fiałkowski  
Instytut Fizyki UJ

Tytuł tego artykułu może zaskoczyć niemal wszystkich, którzy znają pobieżnie historię fizyki. Na liście laureatów Nagrody Nobla łatwo przecież znaleźć osoby, którym przypisuje się stworzenie modelu kwarków i wykazanie jego słuszności. W 1969 roku nagrodę otrzymał Murray Gell-Mann „Za jego wkład i odkrycia związane z fizyką cząstek elementarnych i ich oddziaływań”, przy czym np. Wikipedia precyzuje, że Gell-Mann, i niezależnie George Zweig, w roku 1964 wysunęli hipotezę istnienia kwarków, czyli cząstek, z których zbudowane są hadrony. W roku 1990 nagrodę otrzymali Jerome I. Friedman, Henry Kendall i Richard E. Taylor „Za ich pionierskie badania dotyczące głęboko nieelastycznego rozpraszania elektronów na protonach i związanych neutronach, co miało istotny wpływ na rozwój modelu kwarkowego w fizyce cząstek”. Cóż więc takiego zrobił James D. Bjorken, zwany powszechnie „BJ”, czyli „Bidzejem”, którego nazwiska próżno szukać na liście laureatów, że nie tylko autor tego artykułu, ale i np. Frank Close, autor znakomitych książek popularyzujących fizykę cząstek, przypisuje mu tak ogromne zasługi?

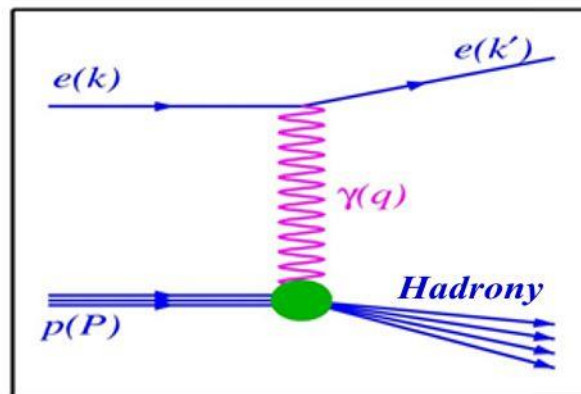


W ostatniej książce Close’a *The infinity puzzle* opisującej precyzyjnie rozwój fizyki cząstek po II wojnie światowej czytamy m.in.: „It would be the work of an American, James D. Bjorken, that would turn this theoretical promise into confirmed law, leading to Nobel Prizes for Glashow, Salam and Weinberg in 1979, and for Veltman and ‘t Hooft in 1990”, czyli „praca Amerykanina, Jamesa D. Bjorkena, miała zmienić teoretyczne obietnice (mowa tu o opartej na modelu kwarków teorii oddziaływań elektroslabych) w potwierdzoną teorię, prowadząc do Nagród Nobla dla Glashowa, Salama i Weinberga w 1979 roku, a dla Veltmana i ‘t Hoofta w 1990 roku”. A więc Close przypisuje Bjorkenowi przekształcenie modelu kwarków i opartych na nim spekulacji teoretycznych w „solidną” teorię. Skoro tak, dlaczego osiągnięcia te nie zostały wyróżnione Nagrodą Nobla, dlaczego Bjorken został „twórcą noblistów”, a nie noblistą? W przeddzień osiemdziesiątych urodzin „Bidzeja” (urodzonego 22 czerwca 1934 roku) warto chyba wyjaśnić polskim czytelnikom tę zagadkę.

James Bjorken, Amerykanin pochodzenia norweskiego, wykazał swoje zdolności już jako student MIT, sławnej uczelni ze stanu Massachusetts, otrzymując stypendium Putnama. Stypendia te są przyznawane od 1938 roku corocz-

nie pięciu najlepszym matematykom wśród studentów USA, Kanady i Uniwersytetu Tel Aviv. Wśród stypendystów znajdujemy nazwiska późniejszych laureatów Nagrody Nobla z fizyki, jak Richard Feynman czy Kenneth Wilson, i najwybitniejszych matematyków. W 1966 roku Bjorken, już jako profesor Uniwersytetu Stanforda, wpadł na pomysł, jak dowieść istnienia kwarków w hadronach. Przypomnijmy, że od 1964 roku trwały bezskuteczne próby znalezienia kwarków poza hadronami, gdzie ułamkowy ładunek powinien pozwolić na łatwą identyfikację kwarków. Jednak ani poszukiwania kwarków wśród produktów zderzeń hadronów, ani w stabilnej materii, nie dały żadnych efektów. Doprowadziło to nawet twórcę modelu kwarków Murraya Gell-Manna do publicznych oświadczeń, że kwarki należy uznać za pojęcia teoretyczne, ułatwiające zapamiętanie struktury hadronów, a nie za rzeczywiste byty fizyczne. Niemniej to właśnie Gell-Mann sformułował na podstawie modelu kwarków cały system relacji między wielkościami fizycznymi, zwany algebrą prądów.

Bjorken zauważył, że z algebry prądów wynikają szczególnie proste relacje dla procesów tzw. głęboko nieelastycznego rozpraszania leptonów na hadronach. Proces ten przedstawiony jest na rys. 1 na przykładzie rozpraszania elektron-proton.



Rys. 1. Schemat rozpraszania nieelastycznego  $e^-p$ . W nawiasach podano odpowiednie czteropędy. Obowiązują oczywiście prawa zachowania, więc  $q = k' - k$

Okazuje się, że dla analizy procesu nie musimy badać w szczegółach stanu fizycznego, w który przekształcił się proton. Wystarczy pomiar przekazu pędu i energii od pierwotnego do wyjściowego elektronu. Dla rozpraszania elastycznego energia w układzie środka masy nie zmienia się. Jeśli zmiana energii jest duża w porównaniu z energią spoczynkową protonu, rozpraszanie nazywamy głęboko nieelastycznym.

Bjorken pokazał, że z algebry prądów (a zatem z modelu kwarków) wynika skalowanie zależności od przekazu energii i pędu. Prawdopodobieństwo proce-

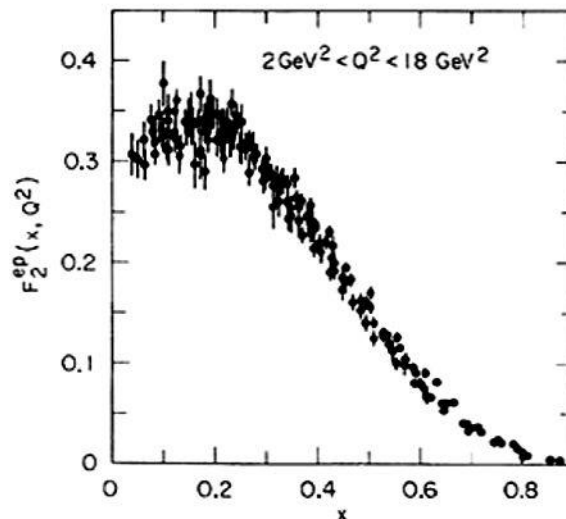
su nie zależy osobno od przekazu kwadratu czteropędu i iloczynu czteropędu protonu i przekazu czteropędu, ale tylko od ich stosunku  $x$

$$x = -q^2/(2P \cdot q).$$

Dla układu spoczynkowego protonu mianownik wyraża się prosto przez przekaz energii  $\nu$

$$x = -q^2/(2m\nu).$$

Doświadczenia prowadzone w Stanford wykazały, że dane są rzeczywiście zgodne z takim skalowaniem. Warto dodać, że pierwotnie autorzy doświadczenia, wspomniani powyżej późniejsi laureaci Nagrody Nobla, Friedman, Kendall i Taylor nie mogli znaleźć w wynikach żadnej regularności i dopiero Bjorken zalecił im sprawdzenie skalowania.



Rys. 2. Funkcja  $F_2$ , która jest miarą prawdopodobieństwa rozproszenia głęboko nieelastycznego  $e p$ . Dla szerokiego zakresu  $Q^2 = q^2$  dane leżą na jednej krzywej zależnej tylko od  $x$

W porównaniu z rozpraszaniem elastycznym prawdopodobieństwo rozproszenia nieelastycznego z dużym przekazem pędu jest znacznie większe. Jest to zjawisko analogiczne do rozpraszania Rutherforda i sugeruje, że elektrony rozpraszają się na punktowych składnikach protonu.

Richard Feynman wykazał, że po przetłumaczeniu algebry prądów na naiwny model kwarków można wyprowadzić skalowanie z prostego założenia, że kwarki są cząstkami punktowymi i elektrony rozpraszają się na nich niezależnie i elastycznie. Nie opublikował on jednak tego wyniku, bo uznał, że nie zrobił nic nowego w porównaniu z wynikami Bjorkena. Zatem i on uznał, że to

Bjorkenowi należy przypisać odkrycie, że kwarki są rzeczywistymi obiektami fizycznymi.

Dodajmy, że dziś wiemy, że skalowanie jest wynikiem przybliżonym, skoro traktowanie protonu jako zbioru niezależnych kwarków jest też tylko przybliżeniem. Oddziaływanie kwarków opisuje chromodynamika kwantowa, która opisuje odchylenia od skalowania i tłumaczy, dlaczego są one niewielkie. Dla konstrukcji tej teorii wyniki Bjorkena stanowiły podstawowy punkt wyjścia.

Niestety Komitet Nagrody Nobla nie docenił osiągnięć Bjorkena, choć przyznał nagrodę trzem wymienionym powyżej doświadczalnikom. Krzywdę tę postanowił wynagrodzić komitet innej prestiżowej nagrody, przyznając mu w 2004 roku Medal Diraca Międzynarodowego Centrum Fizyki Teoretycznej. Regulamin tej nagrody zakazuje zresztą przyznania jej laureatom Nagrody Nobla, ale na liście medalistów znajduje się wielu noblistów (np. David Gross, Frank Wilczek, Daniel Friedman, Martinus Veltman), dla których przyznanie Medalu stało się zapowiedzią Nagrody Nobla. Może i w przypadku Bjorkena Komitet dostrzeże w końcu swoje zaniedbanie? Krakowskim fizykom zależy na tym szczególnie, bo Bjorken jest zaprzyjaźniony z wieloma z nich i wielokrotnie odwiedzał Polskę, biorąc udział w Zakopiańskich Szkołach Fizyki Teoretycznej i innych konferencjach lub sympoziach.





## O definicji i realizacji ampera w fizyce klasycznej

Andrzej Zięba

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, Kraków

Jednostki układu SI stanowią – w globalizującym się świecie – wspólny dla wszystkich zbiorów jednostek miary. Zrozumienie definicji jednostek podstawowych SI, będących przedmiotem nauki w szkołach, nie jest łatwe. Problem kandydów i innych jednostek oświaty omawiałem poprzednio [1, 2].

Tematem artykułu jest amper – jednostka natężenia prądu w układzie SI. Został on napisany na „zamówienie” Zofii Gołąb-Meyer – redaktor *Fotonu* – aby odpowiedzieć na dociekliwe pytania Karola Wydrycha, licealisty z Nowego Sącza.

*W definicji ampera użyta jest siła  $2 \times 10^{-7}$  niutona. Dlaczego w definicji jednostki podstawowej międzynarodowego układu jest tak niepodstawowa jednostka? Znane są kłopoty z ustaleniem jednostek miary takich jak metr czy sekunda, jednostka atomowa masy i jednostka temperatury. W starszych podręcznikach technicznych przeważa KM i KG. A jak ustalono ampera – czym się kierowano, że występuje mnożnik 2?*

### 1. Zasada spójności przy konstruowaniu układu jednostek

W podręcznikach przestrzega się zasady, by prawa fizyki wyrażać za pomocą słowa „proporcjonalny”. Na przykład druga zasada dynamiki: *Jeżeli na ciało działa siła, to porusza się ono z przyspieszeniem, którego wartość jest proporcjonalna do wartości działającej siły, a odwrotnie proporcjonalna do masy ciała* [3]. Przy zastosowaniu znaku proporcjonalności prawo to można zapisać jako:

$$\mathbf{a} \propto \frac{\mathbf{F}}{m} \quad (1)$$

gdzie  $\mathbf{a}$  oraz  $\mathbf{F}$  są wektorami przyspieszenia i siły, masa  $m$  jest wielkością skalarną. Sformułowanie wykorzystujące słowo „proporcjonalny” ma cenną właściwość: określa Prawo Przyrody niezależnie od dokonanego przez człowieka wyboru jednostek miary.

W drugiej zasadzie dynamiki mamy w istocie *cztery* wielkości: położenie, czas, masę i siłę, gdyż wektor przyspieszenia definiowany jest poprzez położenie i czas). Jeżeli zasady dynamiki Newtona przyjmiemy jako podstawę konstrukcji spójnego układu jednostek dla zjawisk mechaniki, trzy z wymienionych wielkości mogą być wybrane dowolnie. Wybór jednostek długości, czasu i ma-

sy jako podstawowych mamy zarówno w układzie CGS jak i SI. Znak proporcjonalności we wzorze (1) można zastąpić przez znak równości

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m}, \quad (2)$$

jeżeli jednostka siły (w układzie SI – niuton) nie jest dowolna, lecz zdefiniowana przez metr, sekundę i kilogram, przy wykorzystaniu właśnie drugiej zasady dynamiki.

Alternatywnie można siłę mierzyć w kilogramach siły, definiowanych jako siła, z jaką Ziemia przyciąga masę jednego kilograma. W konsekwencji, kilogram siły  $\text{kgf} = g \cdot \text{N}$  (przyjęty obecnie skrót to  $\text{kgf}$ , dawniejsze oznaczenie  $\text{kG}$ ). Aby definicja kilograma siły była niezależna od przyspieszenia ziemskiego  $g$  zależnego nieco od szerokości geograficznej, przyjęto, że jego relacja do niutona wyraża umowna wartość  $g_0 = 9,80665 \text{ m/s}^2$ . Przy stosowaniu kilograma siły druga zasada przyjmuje postać

$$\mathbf{a} = \frac{g_0 \mathbf{F}}{m}. \quad (3)$$

Zapamiętajmy: wprowadzenie do układu jednostek (poprzednio spójnego) dodatkowej, niezależnej jednostki podstawowej (tu:  $\text{kgf}$ ) powoduje pojawienie się dodatkowego współczynnika we wzorze, który określa układ jednostek. Współczynnik  $g_0$  pojawi się też w wielu pochodnych wzorach mechaniki, np. wyrażeniach na moment siły lub na pracę mechaniczną.

Zasada spójności układu jednostek zapewnia prostotę opisu zjawisk fizycznych i zapisu wzorów. Cena, jaką płacimy, jest jednak wysoka. Społeczeństwo Polski (i innych krajów) nie zaakceptowało niutona jako jednostki siły. Pomimo usunięcia kilograma siły z podręczników, siła (np. na siłowni) jest wyrażana potocznie w kilogramach, zaś autor artykułu w niekrótkim już życiu, ani razu nie usłyszał słowa „niuton” w rozmowach prywatnych. Eliminacja kilograma siły powoduje trudności ze zrozumieniem konia mechanicznego, który jest jednostką mocy zdefiniowaną jako praca 75 kilogramów siły wykonanych w ciągu sekundy na drodze jednego metra. Koń mechaniczny bywa postrzegany potocznie jako jednostka mocy silników spalinowych, która to moc jawi się miłośnikom samochodów jako wielkość innej natury niż, wyrażana w kilowatach, moc silników elektrycznych. Więcej nt. jednostek pozaukładowych i ich stanu prawnego pisałem w [4].

W opinii autora, eliminacja niektórych wygodnych i zakorzenionych w społeczeństwie jednostek pozaukładowych skutkuje obniżeniem kultury technicznej społeczeństwa. Niewielki zestaw tych jednostek jest cennym uzupełnieniem zestawu jednostek układu SI i powinien wrócić do szkół. Treść listu do redakcji dowodzi, że sprawy te interesują dociekliwych uczniów.

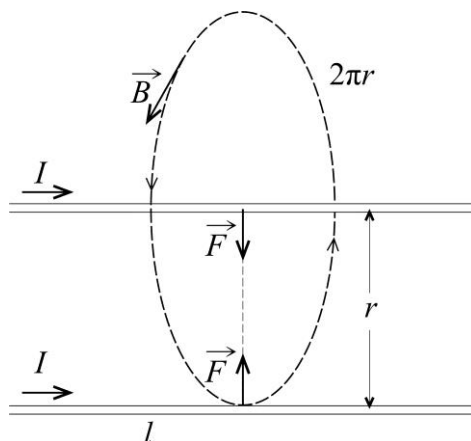
## 2. Definicja ampera w świetle podstawowych praw elektromagnetyzmu

Podobnie jak cała mechanika może być wyprowadzona z praw dynamiki Newtona, tak wszystkie zjawiska klasycznego elektromagnetyzmu można opisać wykorzystując: (i) cztery równania Maxwella, (ii) wyrażenia na siłę elektryczną i magnetyczną (definiują wektory pól elektrycznego  $\mathbf{E}$  i magnetycznego  $\mathbf{B}$ ) oraz (iii) prawo zachowania ładunku. Równania te stanowią złożony zespół równań różniczkowych. Na szczęście dla dyskusji definicji jednostki prądu wystarczy rozpatrywać dwa z tych równań, i to w uproszczonym zapisie algebraicznym.

Prawo Ampera wiąże z sobą *stały* prąd  $I$  i wytworzone przezeń pole  $\mathbf{B}$ . Dla przypadku przewodnika prostoliniowego może być zapisane w postaci równania:

$$2\pi r B = \mu_0 I \quad (4)$$

Iloczyn  $2\pi r$  to długość kołowej linii pola magnetycznego (rys. 1), zaś  $\mu_0$  jest arbitralnie wybranym współczynnikiem nazwanym *stałą magnetyczną*.



Rys. 1. Oddziaływanie magnetyczne dwóch przewodów z prądem

Drugie potrzebne prawo to wyrażenie na siłę, z jaką pole magnetyczne działa na prostoliniowy przewodnik o długości  $l$ , przez który płynie prąd  $I$ ,

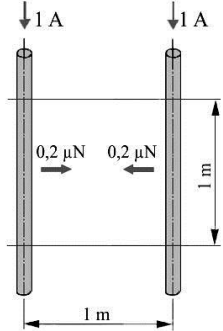
$$F = BIl \quad (5)$$

Można teraz wyprowadzić wzór na siłę między dwoma prostoliniowymi drutami odległymi o  $r$ , występującymi w definicji ampera. Prąd płynący przez pierwszy drut wytwarza pole o indukcji danej wzorem (4). Podstawienie tego pola do wyrażenia (5) daje wzór na siłę oddziaływania drutów.

$$F = \frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi r} \quad (6)$$

Siła ta jest odpychająca, gdy zwroty prądów jest przeciwne, a przyciągająca, gdy są zgodne (odwrotnie niż w przypadku oddziaływania ładunków). Istnienie tej siły może być łatwo zademonstrowane. Wzór (6) jest podstawą aktualnej definicji ampera (wg źródłowego dokumentu Konwencji Metrycznej, jakim jest *SI brochure* [5]):

Amper – stały prąd elektryczny, który, płynąc w dwóch równoległych prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju kołowym znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 metra od siebie, wywołałby między tymi przewodami siłę  $2 \cdot 10^{-7}$  niutona na każdy metr długości.



Jeżeli z definicji ampera weźmiemy wartość siły  $2 \cdot 10^{-7}$  N oraz  $r = l = 1$  m, otrzymujemy z wzoru (6) wartość i jednostkę stałej elektrycznej:

$$\mu_0 = \frac{2\pi r F}{I^2 l} = \frac{2\pi \times 1 \text{ m} \times 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}}{(1 \text{ A})^2 \times 1 \text{ m}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}^2 \text{ s}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} \quad (7)$$

(W wyprowadzeniu skorzystaliśmy z tożsamości  $[\text{N} \cdot \text{m}] = [\text{J}] = [\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}]$ ).

Miejmy nadzieję, że czytelnik zauważył analogię do dodania kilograma siły jako jeszcze jednej, wygodnej jednostki podstawowej. Układ jednostek mechanicznych staje się wtedy niespójny i wymaga wprowadzenia do równań mechaniki dodatkowej stałej  $g_0$ , posiadającej zarówno wartość, jak i wymiar. Cel wprowadzenia stałej  $\mu_0$  do równań elektromagnetyzmu jest taki sam – uzyskanie wygodnej co do wartości jednostki prądu oraz powiązanych z amperem innych jednostek elektrycznych, przede wszystkim wolta i oma.

Co stanie się, jeżeli stała  $\mu_0$  zostanie usunięta? Zjawiska fizyczne będą przebiegać tak samo, ale z równania (6) wynika, że trzeba będzie się posługiwać jednostką prądu – oznaczmy ją doraźnie  $\text{A}^*$  – o wartości:

$$1 \text{ A}^* = \frac{1 \text{ A}}{\sqrt{4\pi \cdot 10^{-7}}} \cong 892 \text{ A} \quad (8)$$

Co gorsza, w tym samym stosunku zostanie zmniejszona jednostka napięcia, gdyż wartość wata będącego iloczynem ampera i wolta musi pozostać niezmienną. Napięcie typowej baterii równe 1,5 V, stanie się równe 0,00168  $\text{V}^*$ , co jest raczej niepraktyczne. Właściwy dobór wielkości jednostek elektrycznych

w układzie SI powoduje, że nie ma dla nich współcześnie żadnych jednostek alternatywnych.

Wróćmy jeszcze do oficjalnej definicji ampera. Jego niekonsekwencja polega też na tym, że mówi o „nieskończonych” przewodach o „znikomo małym” przekroju. Dlaczego nie „bardzo długie przewody” o „nieskończenie małym przekroju”? W świetle przedstawionej wyżej analizy można zaproponować definicję:

Amper jest jednostką natężenia prądu, jaka wynika z przyjęcia w równaniach elektromagnetyzmu wartości stałej magnetycznej  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$ , zgodną z mechanicznymi jednostkami układu metr–kilogram–sekunda.

Taka definicja implikuje, że do doświadczalnego wyznaczenia ampera można użyć eksperymentów wykorzystujących różne zjawiska elektromagnetyczne (rozd. 4).

### 3. Wycieczka w przeszłość, czyli jak doszło do obowiązującej definicji ampera

Koncepcję spójnego układu jednostek mechanicznych i elektrycznych przedstawił Gauss w roku 1832. Jego powszechnie przyjętą realizacją był „magnetyczny” układ centymetr-gram-sekunda (CGSM). Co ciekawe, układ ten został opracowany przez wielkich uczonych brytyjskich, Jamesa C. Maxwella i Williama Thomsona<sup>1</sup>, i wypromowany w latach 70. XIX wieku przez *British Association for the Advancement of Science* (BAAS). W układzie CGSM jednostka natężenia prądu była równa 10 A, zaś jednostka napięcia  $10^{-8}$  V. Zauważmy, że iloczyn tych jednostek i sekundy jest równy ergowi, czyli jednostce pracy i energii w układzie CGS ( $1 \text{ erg} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}^2 = 10^{-7} \text{ J}$ ).

Układ CGS został przyjęty przez fizyków, ale nie uzyskał akceptacji przedstawicieli nauk technicznych. Mechanicy na kontynencie europejskim używali m.in. kilograma siły, kilogramometra (jednostka pracy), konia mechanicznego i atmosfery technicznej, zaś w krajach anglosaskich skodyfikowano zbiór miar anglosaskich. (Obok znanych jednostek długości i masy zawiera liczne jednostki pochodne, jak np. jednostka ciśnienia 1 psi = 1 funt siły na cal kwadratowy). Inżynierowie dynamicznie rozwijającej się wtedy elektrotechniki też poszuki-

---

<sup>1</sup> William Thomson (1824–1907) był pierwszym uczonym brytyjskim, który otrzymał w roku 1892 tytuł lordowski. Odtąd znany jako Lord Kelvin. Obok licznych odkryć w dziedzinie fizyki był również aktywny jako inżynier (budowa pierwszego kabla transatlantyckiego) wszechstronny jako naukowiec. Nazwa jednostki temperatury bezwzględnej – kelwin – upamiętnia odkrycia Thomsona w dziedzinie termodynamiki.

wali wygodniejszych jednostek. Na pierwszej Międzynarodowej Konferencji Elektryków (IEC) w 1881 roku przegłosowano wprowadzenie obecnego ampera i wolta przez arbitralne zmniejszenie jednostki prądu CGSM o czynnik 10 i powiększenie jednostki napięcia CGSM o czynnik 100 000 000.

Stosowanie różnych zbiorów jednostek w różnych dziedzinach nauki i jej zastosowań było na dłuższą metę niewygodne. Sposób wyjścia z patowej sytuacji zaproponował w roku 1901 włoski inżynier Giovanni Giorgi. Zauważył on, że można zdefiniować kwazispójny układ jednostek mechanicznych i elektrycznych przez:

- (i) przyjęcie metra, sekundy i kilograma jako podstawy spójnego układu jednostek mechanicznych. Jest to możliwe, gdyż wynikająca z niego jednostka mocy  $1 \text{ W} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$  jest, szczęśliwym zbiegiem okoliczności, równa iloczynowi ampera i wolta.
- (ii) wprowadzenie dodatkowej stałej  $\mu_0$  do równań elektromagnetyzmu o tak dobranej wartości, by jednostka natężenia prądu (amper) pozostała niezmienną.

Układ MKSA (metr-kilogram-sekunda-amper) został najpierw przyjęty przez IEC (w 1935 r.), później (w 1946 r.) przez organa Konwencji Metrycznej. Układ SI powstał przez dodanie do układu MKSA kolejnych jednostek podstawowych – kelwina, kandeli i mola.

#### 4. Eksperymentalna realizacja ampera

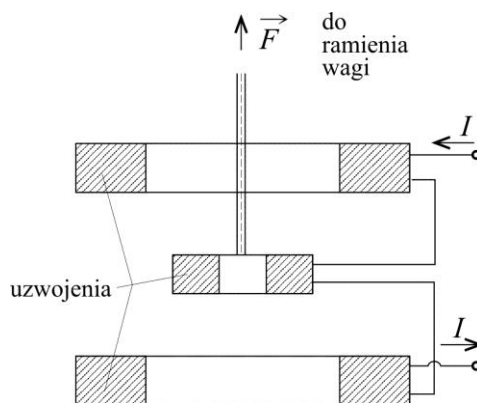
Wykonanie dokładnych pomiarów dla równoległych przewodów jest praktycznie niemożliwe. Niemniej, definicja ampera sugeruje drogę postępowania: trzeba te długie przewody zwinąć w dwie cewki i zmierzyć siłę ich wzajemnego oddziaływania przy wykorzystaniu odpowiednio przystosowanej wagi. W ten sposób dochodzimy do koncepcji *wagi prądowej* – przyrządu wynalezionej również przez W. Thomsona.

Rysunek 2 przedstawia najczęściej stosowaną wagę prądową Rayleigha<sup>2</sup>. Zamiast jednej, mamy dwie identyczne cewki nieruchome oraz, umieszczoną w środku, mniejszą ruchomą cewkę zawieszoną na jednym z ramion dokładnej wagi. Zwróćmy uwagę na kierunek prądu płynącego przez uzwojenia: cewka ruchoma jest jednocześnie przyciągana przez cewkę górną oraz odpychana (z taką samą siłą) przez cewkę dolną. Symetria układu wagi zapewnia, że siła jest słabo zależna od błędu wynikającego z małego przemieszczenia cewki środkowej. W analogii do wzoru (6) wypadkową siłę można zapisać jako

$$F = \text{const} \cdot I^2 \quad (9)$$

<sup>2</sup> Lord Rayleigh (1842–1919) – właściwie John William Strutt. Właściciel 7000 akrów włości i jednocześnie wybitny i wszechstronny fizyk, laureat Nagrody Nobla w 1904 roku za odkrycie argonu.

Współczynnik *const* obliczany jest teoretycznie ze ścisłych praw elektromagnetyzmu, dlatego waga taka zapewnia pomiar absolutny. Niepewność wyznaczenia tej stałej, wynikająca głównie z niedoskonałej znajomości geometrii uzwojeń, wnosi największy przyczynek do niepewności realizacji jednostki prądu.



Rys. 2. Zasada wagi prądowej Rayleigha

Na podstawie pomiarów wykonanych przy użyciu wagi prądowej, jak i szeregu pomiarów pośrednich (związanych z wyznaczeniem wartości wolta i oma), powstała inna, łatwiejsza do realizacji definicja jednostki prądu<sup>3</sup>:

Międzynarodowy amper – natężenie prądu elektrycznego, który w procesie elektrolizy roztworu azotanu srebra powoduje wydzielenie masy 1,118 miligrama srebra na sekundę.

Został nazwany „amperem międzynarodowym” by odróżnić go od „ampera absolutnego” (omawianego w rozdz. 2). Wiele osób z mojego pokolenia tej właśnie definicji ampera uczyło się w szkole. Opisany sposób realizacji ampera był praktyczny w czasach, gdy najdokładniejszym przyrządem w laboratorium naukowym była waga analityczna.

Powrót do ampera absolutnego nastąpił w wyniku eksperymentów wykonanych w latach 30. w Narodowym Biurze Wzorców USA<sup>4</sup> oraz innych laboratoriach metrologicznych. Ich analiza [6] doprowadziła do ustalenia, że „amper międzynarodowy” jest mniejszy od prawdziwego ampera o 0,015%, czyli

<sup>3</sup> Definicja przedstawiona w 1892 r. na posiedzeniu BAAS w Edynburgu, następnie zatwierdzona na czwartym kongresie IEC w Chicago w roku 1893.

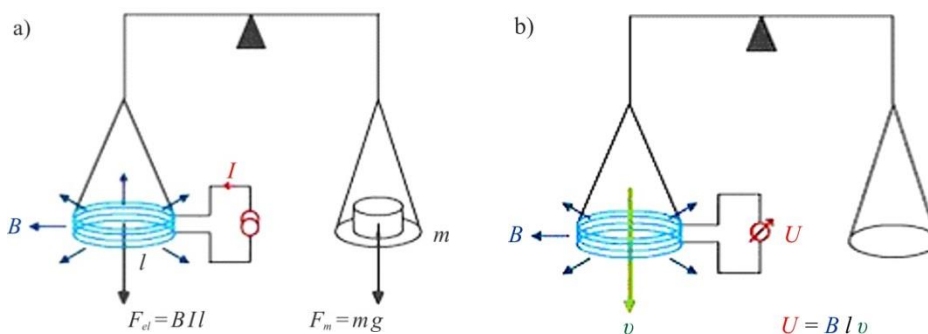
<sup>4</sup> National Bureau of Standards (NBS) to dawna nazwa głównej instytucji metrologicznej USA; od 1988 roku National Institute of Standards and Technology (NIST).

$150 \cdot 10^{-6}$ . Stało się to podstawą decyzji organów Konwencji Metrycznej o przyjęciu w roku 1948 definicji obecnie obowiązującej.

W latach 50. XX wieku dokładność pomiaru z użyciem wagi Rayleigha udało się podnieść do  $6 \cdot 10^{-6}$ . Ponadto wykonano pomiar za pomocą tzw. wagi Pelletta, w przypadku której mamy jedną nieruchomą cewkę cylindryczną i umieszczoną w środku małą cewkę ruchomą o osi prostopadłej do osi cewki nieruchomej. Zamiast siły mierzy się moment siły wytwarzany przez cewkę ruchomą. Dokładność jest tego samego rzędu ( $8 \cdot 10^{-6}$ ), ale ważne jest to, że do wyznaczenia ampera można było użyć dwóch różnych przyrządów. I to był kres możliwości wagi prądowej.

Można zapytać, jaka jest współcześnie najdokładniejsza metoda wyznaczenia ampera i innych jednostek elektrycznych w ramach fizyki klasycznej? Okazuje się, że najwyższą dokładność daje wykorzystanie dwóch aparatów. Pierwszą jest tzw. *obliczalny kondensator*. Jego konstrukcja i działanie opiera się na względnie nowym twierdzeniu elektrostatyki (udowodnionym w roku 1956 przez Thompsona i Lamparda), dzięki któremu pomiar zmian pojemności tego kondensatora można sprowadzić do pomiaru przesunięcia jednej z jego elektrod. Dzięki temu można wyznaczyć jednostki pojemności i oporności elektrycznej z bardzo małą niepewnością około  $0,02 \cdot 10^{-6}$ .

Drugim instrumentem jest waga Watta, której zasadę zaproponował w 1975 roku B.P. Kibble z brytyjskiego National Physical Laboratory. Zasadę działania ilustruje rys. 3. Ruchoma cewka z uzwojeniem o długości  $l$  znajduje się w stałym radialnym polu magnetycznym  $B$  (podobną konfigurację pola i cewki mamy w głośnikach).



Rys. 3. Schemat dwóch eksperymentów wykonywanych przy użyciu wagi Watta:  
 a) eksperyment statyczny, b) eksperyment dynamiczny (według *Wiki pictures*)

Wykonywane są dwa eksperymenty. Eksperyment statyczny (a) jest podobny jak w przypadku wagi prądowej. Przez nieruchomą cewkę płynie prąd  $I$ . Powstająca siła elektrodynamiczna (5) jest równoważona przez odważnik o masie  $m$ , co wyraża równanie



$$B l l = mg \quad (10)$$

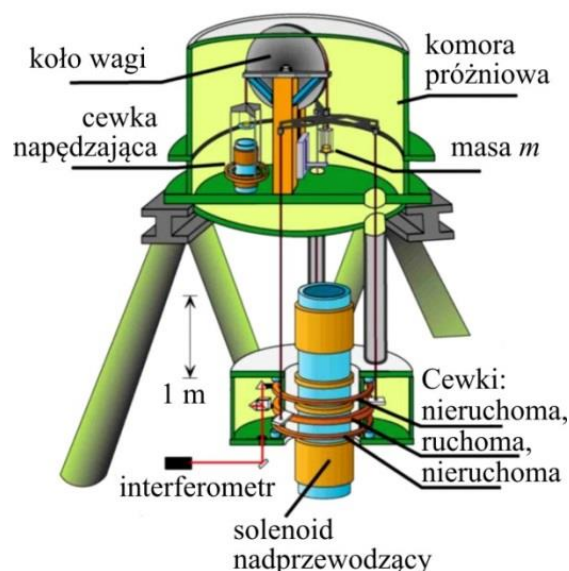
Eksperyment dynamiczny (b) polega na tym, że ta sama cewka porusza się w tym samym polu magnetycznym ze znaną prędkością  $v$ , przy czym prąd przez cewkę nie płynie. Zgodnie z prawem indukcji Faradaya indukowane napięcie  $U$  można zapisać jako

$$U = B l v \quad (11)$$

Można teraz wyznaczyć iloczyn  $B l$  z jednego z ww. równań i podstawić do drugiego. Otrzymuje się podstawowe równanie wagi Watta

$$U I = m g v \quad (12)$$

Lewa strona równania to wyrażenie na moc elektryczną, prawa – moc mechaniczną. Obydwie wyrażane są w watach – stąd nazwa przyrządu. Źródłem wysokiej dokładności wagi Watta jest to, że wynik (12) jest niezależny od  $l$  i  $B$ , co można uogólnić na niezależność tego równania zarówno od geometrii cewki, oraz wartości i rozkładu pola magnetycznego. Iloczyn prądu i napięcia jest wyznaczony, zgodnie z równaniem (12) na podstawie pomiarów masy, prędkości i przyspieszenia ziemskiego. Wystarczająco dokładny pomiar dwóch ostatnich wielkości ( $v$  i  $g$ ) jest możliwy przy wykorzystaniu zautomatyzowanych interferometrów.



Rys. 4. Schemat aktualnej wagi Watta w NIST. Górna część urządzenia i ruchome cewki znajdują się w komorze próżniowej, nadprzewodzący solenoid – w kriostacie helowym. Skala „1 m” daje pojęcie o rozmiarach urządzenia

Pierwsze wagi Watta, pracujące w powietrzu i z klasycznym solenoidem jako źródłem pola zapewniały dokładność rzędu  $1 \cdot 10^{-6}$ . Wykorzystanie solenoidu nadprzewodzącego i umieszczenie całego układu w próżni (rys. 4) umożliwiło uzyskanie dokładności poniżej  $0,1 \cdot 10^{-6}$ , czyli zmniejszenie niepewności pomiaru o niemal dwa rzędy wielkości w porównaniu do wagi prądowej [7].

#### 4. Podsumowanie

Celem artykułu było przedstawienie definicji ampera i sposobów jego technicznej realizacji w ramach praw fizyki klasycznej. Dalszy wzrost dokładności pomiarów wielkości elektrycznych stał się możliwy przy wykorzystaniu makroskopowych zjawisk kwantowych – efektu Josephsona i kwantowego efektu Halla. Wykorzystanie tych zjawisk dało impuls do propozycji „kwantowego układu SI”, czyli zdefiniowaniu makroskopowych jednostek, w tym ampera, w oparciu o uznane za stałe wartości podstawowych stałych fizycznych. Waga Watta pełni kluczową rolę w tym przedsięwzięciu – ma zastąpić użycie dotychczasowego wzorca kilograma. Ale to temat osobnego artykułu, zaplanowanego w następnym numerze *Fotonu*.

#### Literatura

- [1] Zięba A. (2008), *O świecy zwanej kandelą*, *Foton* 102 (jesień 2008), 34–38.
- [2] Konkluzją artykułu [1] było, że kandela, lumen i luks są jednostkami wielkości pozafizycznych, zatem organa Konwencji Metrycznej nie powinny się nimi zajmować i powinny zostać z układu SI usunięte. Pragnę poinformować, że pierwszy z dezyderatów został zrealizowany. Na mocy porozumienia z 2007 r. Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM) uznało odpowiedzialność Międzynarodowej Komisji Oświetlenia (CIE) za definicje jednostek oświetlenia i dalsze prace nad ich rozwojem. Patrz [5], Appendix 2.
- [3] Ginter J. (1996), *Fizyka 7. Podręcznik dla klasy siódmej szkoły podstawowej*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 1996.
- [4] Zob. rozdz. 1 podręcznika: A. Zięba, *Analiza danych w naukach ścisłych i technice*, PWN, 2013.
- [5] *SI brochure* to skrótowa nazwa (przydatna do wyszukiwarki) dla dokumentu: Bureau International des Poids et Mesures (2006). *The International System of Units (SI)*. 8<sup>th</sup> edition.
- [6] H.R. Curtis (1944), Review of recent absolute determinations of the ohm and the ampere. *J. Res. Natl. Bur. Stand.* **33**, 235–254.
- [7] Steiner R.L., Williams E.R., Liu R. i Newell D.B. (2007). Uncertainty improvements of the NIST electronic kilogram. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **56**, 592–596.



## Odgłosy z jaskini

*Piotr Goldstein*

*Zakład Fizyki, Narodowe Centrum Badań Jądrowych  
Warszawa*

W tegorocznym Polsko-Ukraińskim Konkursie Fizycznym „Lwiątko” pojawiło się następujące zadanie dla klasy III licealnej, za pięć punktów (a więc trudne):

21. Ciężarek o masie 100 g, zawieszony na praktycznie nieważkiej nici, porusza się tak, że nie odchyła się od pionu maksymalnie o  $60^\circ$ . Ile co najmniej jest równa wytrzymałość nici? Przyjmij wartość przyspieszenia ziemskiego  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .

A. 0,5 N, B. 1 N, C. 1,5 N, D. 2 N,

E. Wynik zależy od tego, czy są to wahania w jednej płaszczyźnie.

To zadanie jest wpadką autorów i recenzentów „Lwiątko”. I to pomimo, że zarówno zadanie, jak i podana później odpowiedź E są poprawne.

Intencją autora było sprawdzenie, czy uczestnicy czytają zadania ze zrozumieniem i czy umieją połączyć wiedzę o ruchu wahadła z wiedzą o ruchu jednostajnym po okręgu. Jednym słowem, autor liczył na to, że uczestnik (1) zauważy zawartą w odpowiedzi E sugestię, że ruch nie musi polegać na wahaniami w jednej płaszczyźnie; (2) że potem porówna naprężenie nici dla wahań w płaszczyźnie pionowej z jej naprężeniem, gdy ciężarek zatacza poziome okręgi. W rezultacie przekona się, że te wytrzymałości są różne i wybierze w związku z tym odpowiedź E. Zadanie było pomyślane dla kąta  $45^\circ$ . Niestety autor w ostatniej chwili zdecydował zmienić kąt na – jak się wydawało – łatwiejszy, czyli  $60^\circ$  (jego cosinus nie zawiera pierwiastka). Jak to często bywa, gdy poprawia się coś w ostatniej chwili, autor przeoczył bardzo ważny szczegół: dla kąta  $60^\circ$  (i tylko dla niego!) w obu wymienionych przypadkach naprężenia są jednakowe, równe  $2 \text{ N}$ . Tego faktu nie zauważył ani autor, ani żaden z recenzentów! Zwrócił na to uwagę dopiero wieloletni uczestnik „Lwiątko” Marek Mystkowski z Białegostoku.

Odpowiedź E pozostała poprawna, ale uzyskanie jej stało się bardzo trudne, praktycznie niemożliwe w czasie dostępnym podczas konkursu. Dlatego organizatorzy postanowili – wyjątkowo – uznać uczestnikom dwie odpowiedzi, E i D, nie uznając pozostałych. To pierwsza taka decyzja w dwunastoletniej historii „Lwiątko”, ale też pierwszy przypadek, gdy zadanie wymaga nadzwyczajnej akcji ze strony organizatorów, mimo że jest poprawne.

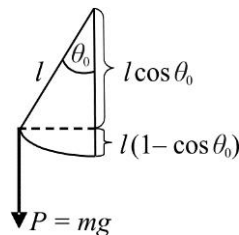
Rozwińmy najpierw zadanie dla dowolnego kąta, tak jak miało wyglądać w zamysle autora. Użyjemy typowych oznaczeń –  $m$  to masa ciężarka,  $v$  – jego prędkość chwilowa,  $l$  – długość nici,  $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $N$  – siła naprężająca nić, zwana dalej w skrócie „naprężeniem”.

Gdy ciężarek waha się w płaszczyźnie pionowej, to największe naprężenie jest w najniższym punkcie, bo wtedy nić musi zrównoważyć całą siłę ciężarową i nadać ciężarkowi przyspieszenie dośrodkowe (w dodatku przyspieszenie dośrodkowe jest wtedy największe, bo największa jest prędkość ciężarka). II zasada dynamiki ma wtedy postać

$$N - mg = m \frac{v^2}{l} \quad (1)$$

(tę równość można też interpretować w układzie poruszającego się ciężarka jako warunek równowagi trzech sił: naprężenia nici, ciężarowa i siły odśrodkowej).

Prędkość w najniższym położeniu możemy znaleźć z prawa zachowania energii. Ponieważ siła naprężająca nić jest prostopadła do kierunku ruchu ciężarka, nie wykonuje ona pracy, więc cała energia potencjalna, jaką wahadło ma przy największym wychyleniu  $\theta_0$ , zmienia się w energię kinetyczną. Stąd (rys. 1)



Rys. 1

$$mgl(1 - \cos \theta_0) = m \frac{v^2}{2}, \quad (2)$$

czyli

$$m \frac{v^2}{l} = 2mg(1 - \cos \theta_0). \quad (3)$$

Wstawiając tę wartość do wzoru (1), otrzymujemy w przypadku ruchu płaskiego

$$N = mg + 2mg(1 - \cos \theta_0) = mg(3 - 2\cos \theta_0) \quad (4)$$

Gdy ciężarek zatacza poziome okręgi, najłatwiej obliczyć naprężenie w układzie obracającym się wraz z nim, z warunku równowagi naprężenia nici  $N$ , siły ciężarowej  $P = mg$  i siły odśrodkowej  $F_{od} = mv^2/l$  (rys. 2a). Można też

zsumować siły w układzie inercyjnym (rys. 2b), żądając, by wypadkowa  $F_{\text{wyp}}$  sił  $P$  i  $N$  była skierowana poziomo do środka okręgu.



Rys. 2

W obu przypadkach mamy  $\cos \theta = \frac{P}{N}$ , skąd

$$N = \frac{mg}{\cos \theta} \quad (5)$$

przy czym przez cały czas  $\theta = \theta_0$ .

Jak widać, wzory na naprężenie są inne dla ruchu po okręgu niż dla wahań płaskich. Dla kąta  $45^\circ$  mielibyśmy z wzoru (4)  $N = (3 - \sqrt{2})mg \approx 1,59mg$ , a z wzoru (5) byłoby  $N = \sqrt{2}mg \approx 1,41mg$ . Tyle powinna wtedy w przybliżeniu wytrzymać nici. Ponieważ te dwie wartości są różne, poprawna byłaby odpowiedź E.

Niestety, dla kąta  $60^\circ$  w obu przypadkach dostajemy  $N = 2mg$ , co przy  $m = 100 \text{ g}$  i  $g = 10 \text{ m/s}^2$  daje  $N = 2 \text{ N}$ , czyli wskazuje na odpowiedź D. Przyrównując prawe strony dwóch wzorów na naprężenie (4) i (5) i rozwiązując otrzymane równanie trygonometryczne, możemy przekonać się, że w przedziale  $(0, 90^\circ)$  te dwa naprężenia są sobie równe tylko dla kąta  $60^\circ$ . Pech!

Jednak nawet dla kąta  $60^\circ$  istnieją ruchy ciężarka, dla których maksymalne naprężenie jest mniejsze od  $2mg$ . Dzieje się tak zawsze, gdy maksymalnie wychylonemu ciężarkowi nadamy pewną prędkość poziomą, większą od zera, ale mniejszą od prędkości potrzebnej do zataczania poziomych okręgów. Dowód tego jest jednak trudny, na pewno niemożliwy do przeprowadzenia w ciągu paru minut, jakie uczestnik miał przeznaczone na to zadanie podczas konkursu. Dlatego postanowiliśmy uznać również odpowiedź D.

A oto dowód:

W związku z dodatkową prędkością poziomą, oprócz prawa zachowania energii, do wyznaczenia prędkości i naprężenia ciężarka w jego najniższym położeniu (teraz nie będzie to punkt równowagi!) będziemy potrzebowali jeszcze jednego prawa zachowania – jednej ze składowych momentu pędu.

Rozpoczynamy od równania dynamiki Newtona

$$m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a} \quad (6)$$

Dla składowych sił w kierunku nici odchylonej od pionu o kąt  $\theta$ , wynika równanie

$$N - mg \cos \theta = m \frac{v^2}{l}, \quad (7)$$

ponieważ przyspieszenie ciężarka w kierunku nici jest przyspieszeniem prostopadłym do kierunku ruchu, a więc dośrodkowym (tor ruchu naszego ciężarka jest krzywą na powierzchni sfery  $l = \text{const}$ ).

$$\text{Stąd} \quad N = mg \cos \theta + m \frac{v^2}{l}. \quad (8)$$

Drugie równanie dostajemy z prawa zachowania energii (0 w dolnym indeksie odnosi się do maksymalnego wychylenia):

$$mgl(1 - \cos \theta_0) + m \frac{v_0^2}{2} = mgl(1 - \cos \theta) + m \frac{v^2}{2}, \quad (9)$$

jeśli energię potencjalną mierzymy względem punktu równowagi wahadła (rys. 1). Po odjęciu  $mgl$  od obu stron równania (9) dostaniemy prostsze prawo zachowania energii. Można je było otrzymać od razu, gdybyśmy energię potencjalną mierzyli względem punktu zawieszenia (jest ona ujemna)

$$-mgl \cos \theta_0 + m \frac{v_0^2}{2} = -mgl \cos \theta + m \frac{v^2}{2}. \quad (10)$$

Korzystając z tego prawa, możemy wyrazić naprężenie nici odchylonej o kąt  $\theta$  albo tylko przez kąt odchylenia  $\theta$ , albo tylko przez prędkość  $v$ . Wybieramy to pierwsze. Dzieląc równanie (10) przez  $l$  i mnożąc je przez 2, dostajemy wzór na siłę dośrodkową  $m \frac{v^2}{l}$ . Wynika z niego, po podstawieniu do wzoru (3)

$$N = 3mg \cos \theta - 2mg \cos \theta_0 + m \frac{v_0^2}{l} \quad (11)$$

Jak widać, naprężenie jest największe w punkcie o najmniejszym wychyleniu  $\theta$ .

Oprócz prawa zachowania energii, skorzystamy z prawa zachowania momentu pędu. Tylko jedna jego składowa jest zachowana, bo w tym kierunku nie działa na ciężarek moment siły. Jest to składowa momentu pędu opisująca obrót wokół osi pionowej przechodzącej przez punkt zawieszenia wahadła. Momenty

sił wokół tej osi są równe zero, bo siła ciężenia jest do niej równoległa, a naprężenie nici działa wzdłuż prostej przechodzącej przez punkt zawieszenia. Oznaczając tę składową momentu pędu przez  $L_z$ , dostajemy

$$L_z = mr^2\omega = ml^2 \sin^2 \theta \omega = ml^2 \sin^2 \theta_0 \omega_0, \quad (12)$$

gdzie  $r$  jest promieniem okręgu zataczanego przez ciężarek, czyli odległością ciężarka od osi obrotu, a  $\omega$  – prędkością kątową tego obrotu.

Aby wykorzystać wzór (12), w prawie zachowania energii rozłożymy prędkość na składową poziomą i pionową. Pierwsza z nich opisuje właśnie obrót wokół osi pionowej i jest równa  $r\omega = l\omega \sin \theta$ . Druga składowa prędkości, zmienia kąt odchylenia  $\theta$  (jeśli kropką nad symbolem wielkości fizycznej oznaczamy jej pochodną czasową, to można tę składową zapisać jako  $l\dot{\theta}$ , ale nie będzie nam to potrzebne). Zauważmy, że zarówno przy maksymalnym, jak i przy minimalnym wychyleniu wahadła, ta składowa prędkości jest równa zero, bo wtedy ciężarek „zawraca”. Wyjątkiem jest sytuacja, gdy minimum wychylenia jest przejściem wahadła przez punkt równowagi, przejście to odbywa się z niezerową prędkością. Tak jest dla wahań w płaszczyźnie pionowej.

Rozpatrzmy tę sytuację oddzielnie. Mamy wówczas  $L_z = 0$ , a przy maksymalnym wychyleniu prędkość chwilowa,  $v_0 = 0$ . Wzór (11) na naprężenie przybiera wtedy postać

$$N = 3mg \cos \theta - 2mg \cos \theta_0$$

Dla  $\theta_0 = 60^\circ$  i  $\theta = 0$  (wtedy naprężenie jest największe), mamy

$$N = 3mg - mg = 2mg, \quad (13)$$

Dla ciężarka 100 g,  $N = 2$  N, co zgadza się z przewidywaniami.

Z wyjątkiem przypadku przechodzenia przez położenie równowagi, zarówno dla maksymalnego, jak i minimalnego wychylenia pionowa składowa prędkości jest równa zero, tak że z prędkości  $v$  pozostaje tylko składowa pozioma  $l\omega \sin \theta$ . Prawo zachowania energii ma wtedy postać

$$-mgl \cos \theta_0 + m \frac{l^2 \omega_0^2 \sin^2 \theta_0}{2} = -mgl \cos \theta + m \frac{l^2 \omega^2 \sin^2 \theta}{2}. \quad (14)$$

Z prawa zachowania momentu pędu (12) dostajemy  $\omega$  jako funkcję kąta  $\theta$

$\omega = \omega_0 \frac{\sin^2 \theta_0}{\sin^2 \theta}$ . Podstawiając tę wartość do prawa zachowania energii (9), dostajemy równanie na kąt  $\theta$

$$-mgl \cos \theta_0 + m \frac{l^2 \omega_0^2 \sin^2 \theta_0}{2} = -mgl \cos \theta + m \frac{l^2 \omega_0^2 \sin^4 \theta_0}{2 \sin^2 \theta}. \quad (15)$$

Oznaczając, dla uproszczenia zapisu,  $s = \cos \theta$ ,  $s_0 = \cos \theta_0$ , i korzystając z jedynki trygonometrycznej, aby pozbyć się funkcji  $\sin \theta$ , otrzymujemy równanie

$$-2gs_0 + l\omega_0^2(1-s_0^2) = -2gs + \frac{l\omega_0^2(1-s_0^2)^2}{(1-s^2)}. \quad (16)$$

Mnożąc obie strony tego równania przez mianownik  $(1-s^2)$ , przenosząc  $-2gs$  na lewą stronę, a  $l\omega_0^2(1-s_0^2)$  na prawą i wyciągając wspólne czynniki przed nawias, otrzymujemy

$$2g(s-s_0)(1-s^2) = l\omega_0^2(1-s_0^2)(s^2-s_0^2). \quad (17)$$

Jak widać, obie strony mają wspólny czynnik  $(s-s_0)$ , dzięki czemu, równanie trzeciego stopnia można sprowadzić do kwadratowego, dzieląc je przez ten wspólny czynnik, przy założeniu  $s \neq s_0$ . W związku z tym założeniem, trzeba rozpatrzeć oddzielnie przypadek  $s=s_0$  (stałego kąta odchylenia), czyli przypadek zataczania przez ciężarek poziomego okręgu. Ale ten przypadek rozpatrzyliśmy już wcześniej, otrzymując wzór (5).

Jeśli kąt odchylenia nie jest stały, to dzieląc obie strony równania (17) przez  $(s-s_0)$ , dostajemy równanie kwadratowe na  $s$

$$2g(1-s^2) = l\omega_0^2(1-s_0^2)(s+s_0). \quad (18)$$

Po uporządkowaniu według potęg  $s$ , otrzymujemy równanie

$$s^2 + \frac{p}{2}(1-s_0^2)s + \frac{p}{2}(1-s_0^2)s_0 - 1 = 0, \quad (19)$$

gdzie dla uproszczenia zapisu wprowadziliśmy dodatni parametr  $p = \frac{\omega_0^2 l}{g}$ . Aby prędkość pozioma była mniejsza od prędkości ruchu po okręgu,  $p$  powinno być mniejsze od  $\frac{1}{\cos \theta_0}$  (sprawdzenie pozostawiamy Czytelnikom).

Wyróżnik

$$\Delta = \frac{p^2}{4}(1-s_0^2)^2 - 2p(1-s_0^2)s_0 + 4 = \left[ \frac{p}{2}(1-s_0^2) - 2 \right]^2 + 2p(1-s_0^2)(1-s_0)$$



jest zawsze dodatni, ponieważ  $s_0 < 1$  jako cosinus kąta różnego od zera (przypadek  $\cos \theta = 1$ , odpowiadający przejściu przez położenie równowagi, rozpatrzyliśmy oddzielnie wcześniej, por. wzory (4) i (13)). Równanie ma więc dwa rozwiązania.

Fizycznie sensowne rozwiązanie odpowiada dodatniemu  $s$  (kąt mniejszy od  $90^\circ$ ). Jest ono równe

$$s = -\frac{p}{4}(1-s_0^2) + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{p^2}{4}(1-s_0^2)^2 - 2p(1-s_0^2)s_0 + 4} \quad (20)$$

Drugie rozwiązanie różni się znakiem przy wyrazie zawierającym pierwiastek kwadratowy, jest więc ujemne, a zatem niefizyczne: odpowiada odchyleniu nici o kąt większy od  $90^\circ$ , a przy takim odchyleniu nie przestałaby być napięta i nasz opis ruchu byłby nieprawdziwy.

Wracając do pierwotnych oznaczeń (dla wygody zostawimy  $p$ )

$$\cos \theta = -\frac{p}{4}\sin^2 \theta_0 + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{p^2}{4}\sin^4 \theta_0 - 2p\sin^2 \theta_0 \cos \theta_0 + 4}. \quad (21)$$

Wstawiając tę wartość  $\cos \theta$  do wzoru na naprężenie (11), do którego wstawimy  $v_0 = l\omega \sin \theta$  otrzymujemy

$$N = 3mg \left[ -\frac{p}{4}\sin^2 \theta_0 + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{p^2}{4}\sin^4 \theta_0 - 2p\sin^2 \theta_0 \cos \theta_0 + 4} \right] - 2mg \cos \theta_0 + mgp \sin^2 \theta_0. \quad (22)$$

Dla  $\theta_0 = 60^\circ$ , wzór (22) przybiera postać

$$N = 3mg \left[ -\frac{3}{16}p + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{9}{64}p^2 - \frac{3}{4}p + 4} \right] - mg + \frac{3}{4}mgp. \quad (23)$$

Ciekawe, że gdy podstawimy za  $p$  zero (wahania w płaszczyźnie pionowej) lub 2 (ruch po okręgu poziomym), okazuje się, że wyrażenie (23) – wbrew wcześniejszym zastrzeżeniom – pozostanie poprawne również dla takich wahań a także dla ruchu po okręgu. Jak bowiem łatwo zauważyć, dla  $p = 0$ , mamy  $N = 3mg - mg = 2mg$ , a dla  $p = 2$  dostajemy także  $2mg$ :

$$N = 3mg \left[ -\frac{3}{8} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{9}{16} - \frac{3}{2} + 4} \right] - mg + \frac{3}{2}mg = 2mg.$$

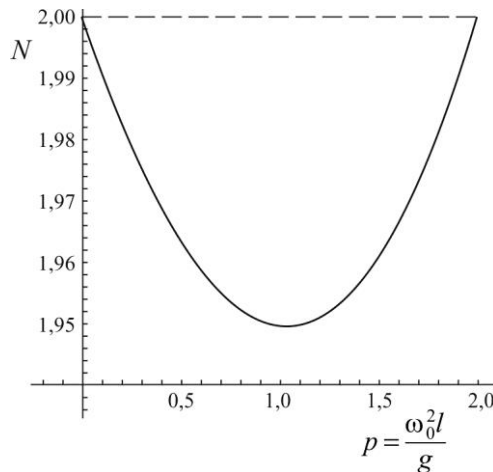
Co więcej, właściwość tę ma rozwiązanie (22) dla dowolnych kątów odchylenia, nie tylko dla  $60^\circ$ , gdy za parametr  $p$  podstawimy odpowiednio 0 lub  $1/\cos \theta$  (sprawdzenie pozostawiamy Czytelnikom). Można to wytłumaczyć ciągłością  $N$  jako funkcji kąta

i początkowej prędkości poziomej: gdy nieznacznie zmieniamy parametry ruchu, przechodząc od małych kątów do kąta zero, a także gdy przechodzimy od prędkości poziomych bliskich prędkości ruchu po okręgu do prędkości zapewniającej taki ruch, nie ma skokowej zmiany naprężenia.

Nietrudno obliczyć naprężenie dla wartości pośrednich,  $p \in (0; 2)$ . Na przykład dla  $p = 1$  otrzymujemy

$$N = mg \left( -\frac{13}{16} + \frac{3}{16} \sqrt{217} \right) \approx 1,94955.$$

Dokładniejsze zbadanie wyrażenia (23) jako funkcji  $p$  (wykres)



wskazuje, że osiąga ona minimum dla  $p = \frac{2}{3}(4 - \sqrt{6}) \approx 1,03367$  i że minimum to odpowiada naprężeniu  $N = mg \left( -\frac{1}{2} + \sqrt{6} \right) \approx 1,4949 mg$ . Dowód pozostawiamy Czytelnikom. Jak widać, nawet gdy najlepiej wybierzemy prędkość początkową i tor ruchu ciężarka, wytrzymałość nici może być tylko niewiele mniejsza od 2 N. Niemniej, różnica istnieje, więc poprawna jest odpowiedź E.

Tak oto, przez nieodpowiedni dobór kąta, proste zadanie zmieniło się w skomplikowane i przestało nadawać się na konkurs „Lwiątko”, mimo że pod względem poprawności niczego nie można mu zarzucić.



## Nocne rozmyślenia fizyka szkolnego – Niejasna gra w monopole – felieton

Ludwik Lehman

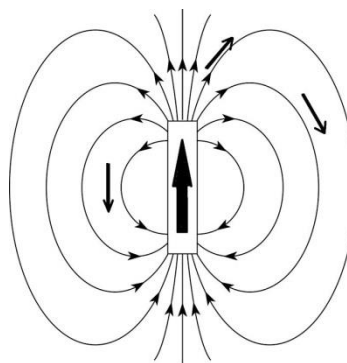
II LO im. M. Kopernika w Głogowie

W Poznaniu organizowane są – przez fizyków i filozofów wspólnie – ciekawe konferencje dotyczące filozofii fizyki. Faktycznie godne Poznania. Podczas tegorocznej jeden z wykładowców w trakcie wystąpienia stanowczo opowiedział się za przestrzeganiem w nauczaniu interesująco brzmiącej zasady: **trzeba uczniom mówić tylko prawdę... choć nie całą** (cytuję z pamięci, więc może niedokładnie). W dyskusji stwierdziłem, że co prawda zasada sprawia świetne wrażenie, ale prawdopodobnie nie ma na świecie ani jednej szkoły, która ją stosuje! Jako przykład podałem nauczanie magnetyzmu, które oparte jest na pojęciu biegunów magnetycznych, które się przyciągają lub odpychają. Jednak wszyscy świetnie wiemy, bieguny **nie istnieją**, zatem mówiąc o nich stwierdzamy **nieprawdę**. W dydaktyce stosujemy wręcz nagminnie – jak miemam – zupełnie inną zasadę: **żeby się zbliżyć do prawdy, trzeba mówić nieprawdę**. Najbardziej zdziwiła mnie reakcja wielu siedzących na sali. Gdy stwierdziłem, że bieguny magnetyczne nie istnieją, wielu fizyków zwróciło w moją stronę zaskoczone, wręcz oburzone twarze!

Jak to? Czyżby niektórzy z nas naprawdę wierzyli w realność biegunów magnetycznych?! Lub raczej tak się przyzwyczaili do ciągłego mówienia o nich, że traktują je jako istniejące obiekty? Jaka jest prawda?

Biegun to miejsce, skąd wychodzą (lub dokąd wchodzi) linie pola magnetycznego. Jedno z równań Maxwella stwierdza, że takie punkty nie istnieją. To ważne – nie znaleziono nigdy pojedynczego bieguna magnetycznego (tzw. monopolu). Także łącznie występujące dwa bieguny są tylko pojęciem pomocniczym (podobnie jak na przykład sfera niebieska) pomagającym zrozumieć oddziaływanie dwóch magnesów na wstępnym poziomie edukacji.

Czy można uczyć magnetyzmu nie wprowadzając w ogóle biegunów? No pewnie. Oto przykładowa propozycja. Zamiast zaznaczania biegunów oznaczamy magnes strzałką jak na rysunku. Tak rysuje się moment magnetyczny chyba we wszystkich działach fizyki współczesnej. Jest to na tyle proste i intuicyjne oznaczenie, że możemy od niego właśnie zaczynać naukę magnetyzmu. Magnes (miarą jego „mocy” jest moment magnetyczny) wytwarza pole magnetyczne o zamkniętych liniach. Trzeba je



pokazać uczniom doświadczalnie (żelazne opiłki) oraz na porządnym obrazku. Teraz pytamy, jak się zachowa inny mniejszy magnes umieszczony w polu tego większego? Otóż ustawi się zgodnie z liniami pola – przykłady na rysunku. A co z siłami przyciągania czy odpychania? Możemy stwierdzić, że magnes ustawiony zgodnie z liniami pola jest przyciągany przez ten drugi, a ściślej mówiąc jest wciągany w obszar silniejszego pola. Magnes ustawiony przeciwnie do linii pola będzie z niego wypychany czyli odpychany od drugiego magnesu.

To chyba dość proste ujęcie. Ma istotne zalety. Przede wszystkim kieruje uwagę od razu nie na przyciąganie czy odpychanie, lecz na pole magnetyczne. Poza tym jest to podejście bardzo „nowoczesne”. Uczeń tak wprowadzony w temat nie będzie później musiał zmieniać zasadniczo poglądów na zjawiska magnetyczne. Jednakowoż rozumiem dobrze, że wprowadzanie biegunów też ma swoje zalety. Jest z pewnością bardzo intuicyjne. Każdy łatwo sprawdzi przyciąganie i odpychanie się biegunów. Uporczywe przyłgnięcie fizyków do biegunów magnetycznych jest zresztą pięknym przykładem tezy mówiącej, że nauczanie musi w pewien sposób powtórzyć drogę, którą przeszła cała ludzkość – ontogeneza jest powtórzeniem filogenezy, jak może niedokładnie zapamiętałem ze szkolnej biologii. Bieguny magnetyczne wprowadzono kiedyś przez analogię do ładunków elektrycznych. Charles Coulomb sprawdził również doświadczalnie, że prawo oddziaływania ładunków nazwane dziś jego nazwiskiem stosuje się do oddziaływania biegunów magnetycznych. Wprowadzono nawet „masę magnetyczną” określającą „moc” biegunów. Jeszcze w wydaniu z 1970 roku podręcznika Arkadiusza Piekary „Elektryczność i magnetyzm” znajdziemy omówienie prawa Coulomba dla magnesów! Dziś wydaje się to zupełnym archaizmem. Jednak same bieguny trzymają się mocno. Nie słyszałem o próbach usunięcia tego pojęcia z podstawy programowej. Bieguny królują w dydaktyce chyba na całym świecie. Może nadejdzie czas, gdy znikną podobnie jak masa magnetyczna? Póki co można połączyć obie metody: oznaczać magnes „strzałką”, a na końcu dodać, że z przyczyn historycznych jej początek nazywamy biegunem magnetycznym południowym, a koniec biegunem północnym.

Z pewnością powinni za likwidacją biegunów gorąco optować wszyscy ci, którzy głoszą zacytowaną na początku zasadę. Do tej pory tego jakoś nie zauważyłem. Zresztą sama zasada byłaby bardzo wartościowa i godna stosowania pod warunkiem wprowadzenia drobnej poprawki: trzeba **się starać** uczniom mówić tylko prawdę... choć nie całą. Chociaż nie należy zapominać, że pojęcie **prawdy** nie jest w zasadzie używane w teoriach fizycznych, zatem nie należy nim szermować tak jak w niniejszym felietonie. Nie powinno też być bronią masowego rażenia w dyskusjach fizyków. Podobnie jak na przykład **bezwładność** czy **ilość materii**. To jednak będzie – jeśli Szanowna Redakcja pozwoli – tematem innych nocnych rozmyślań.



## Bieguny magnetyczne

– komentarze do felietonu Ludwika Lehmana

List Bernarda Jancewicza (Uniwersytet Wrocławski) do Redakcji *Fotonu*

Felieton mi się podoba. Stwierdza wyraźnie (jak zwykle ostro u tego autora), że fizycy posługują się pojęciem o zaszczości historycznej. Autor stawia pytanie: „Czy można uczyć magnetyzmu nie wprowadzając w ogóle biegunów?”. I odpowiada na nie: „No pewnie. Oto przykładowa propozycja”. Poza tym nie upiera się przy swojej propozycji jako jedynej słusznej, bo pisze dalej, że nauczanie może powtórzyć drogę, jaką przeszli fizycy w rozwijaniu swojej dziedziny.

Od Redakcji

Podejście proponowane przez autora jest interesujące i z pewnością bliższe prawdy – rozumianej jako zgodność z doświadczeniem (nie znaleziono monopoli magnetycznych), jak i jako wewnętrzna spójność teorii fizycznych (równania Maxwella). Cierpi jednak na dwie, powiązane z sobą, wady: odrywa fizykę od innych nauk przyrodniczych, przede wszystkim od geografii, a także od pojęć, jakimi posługują się media.

Co pokazuje kompas? Uczeń na lekcji geografii powinien odpowiedzieć, że północ. Nieco lepiej przygotowany uczeń, że kierunek do północnego bieguna magnetycznego Ziemi. No, ale przecież autor zaleca zrezygnowanie z posługiwania się pojęciem biegunów magnetycznych. Czyli że na lekcji geografii mówimy o innym magnetyzmie, niż na lekcji fizyki? Może więc lepiej powiedzieć, że strzałka kompasu ustawia się równolegle do linii sił dipola magnetycznego, jakim w przybliżeniu jest Ziemia? Tylko ilu uczniów to zrozumie?

Także samo jakościowe wytłumaczenie działania magnesów – dlaczego dwa magnesy sztabkowe się przyciągają, a gdy jeden z nich odwrócić, zaczynają się odpychać – staje się trudniejsze na poziomie szkolnym. Odradzałbym na poziomie szkolnym tłumaczenie tego zjawiska w oparciu o równania Maxwella...

Media ze swej strony straszą nas od czasu do czasu „przebiegunowaniem Ziemi”. Przebiegunowaniem, czyli czym, skoro biegunów magnetycznych nie ma? Fizyk nie będzie miał problemu ze zinterpretowaniem tego stwierdzenia, nawet jeśli przestanie posługiwać się pojęciem biegunów. Uczeń lub osoba, która swoją edukację w zakresie fizyki zakończyła na poziomie szkoły średniej, nie poradzi sobie. Rezygnując z wyjaśnienia zasady działania kompasu czy też zjawiska „przebiegunowania” – które, jak dobrze wiadomo, w geologicznej historii Ziemi nie raz występowało – sprawiamy, że fizyka staje się, jako

przedmiot szkolny, jeszcze bardziej niezrozumiała, oderwana od rzeczywistości, zbędna. A przecież chyba wolelibyśmy tego unikać.

Rekapitułując, należy oczywiście zapomnieć o „prawie Coulomba dla mas magnetycznych”, ale z samego pojęcia biegunów magnetycznych – nie. Trzeba mówić, że niekiedy (bo przecież nie zawsze, na przykład nie wtedy, gdy mówimy o falach elektromagnetycznych) jest to pojęcie przydatne, ale należy pamiętać, że każdemu „biegunowi N” koniecznie musi odpowiadać stowarzyszony z nim „biegun S”, i *vice versa*.

*Paweł F. Góra*

Kolega Lehman w swoim felietonie powołuje się na często przywoływaną maksymę spopularyzowaną przez Marka Kaca, iż należy uczyć prawdy, tylko prawdy, lecz niecałej. Maksyma ta, jak i inna, może nawet częściej przywoływana, iż „usłyszeć – zapomnieć, zobaczyć – zapamiętać, zrobić samemu – zrozumieć”, choć zawiera ważne dydaktyczne przesłanie, które spełnia ważną rolę, niewolniczo stosowane – nie sprawdza się, a może dawać jedynie iluzję dobrego nauczania. Druga maksyma daje np. złudną nadzieję, że doświadczenie własnoręcznie wykonane przez ucznia zapewnia jego zrozumienie, podczas gdy obserwacja tego, co robi nauczyciel, ma mniejszą wartość. Niekoniecznie! To, co jest istotne, to **samodzielne przemyślenie** doświadczenia. To tylko przykład.

Podobnie ma się sprawa z maksymą pierwszą. Problem zaczyna się już na poziomie „zrozumienia”, bo przecież chodzi o poznanie i zrozumienie. Zrozumienie nie jest na ogół procesem natychmiastowym. Dochodzi się do niego czasami bardzo długo. Do tego dochodzenia potrzebny jest odpowiedni język. Uczniowie go jeszcze nie mają. Ścisłej prawdy, nawet niepełnej można nauczać, gdy obie strony posługują się tym samym językiem.

W przypadku elektrodynamiki w szkole, czyli nauki o oddziaływaniach elektrycznych i magnetycznych, o ładunkach, magnesach i prądach elektrycznych, odkrywa się przed uczniami wiedzę na raty i to bez ścisłego języka. I tak musi być. Używa się analogii, opisu uproszczonego, pomija wyjątki i sytuacje rzadko występujące. Należy przy tym baczyć, by nie wprowadzić tzw. błędnych koncepcji.

W toku nauki pole „prawdy” i ścisłości poszerza się w miarę jak uczący jest w stanie zapoznać się z coraz bardziej abstrakcyjnymi pojęciami matematycznymi.

Uważam, że nauczanie elektromagnetyzmu, niewątpliwie trudne, oparte na starym kanonie wypracowanym w początkach XX wieku, wymaga zmiany. Zapewne istnieje niejedna droga (można znaleźć różne ciekawe propozycje). Widzę potrzebę rzetelnych badań dydaktycznych dotyczących tego zagadnienia. Współcześni uczniowie mają inne doświadczenia, obracają się w innym środowisku, używają innego języka, niż ich koledzy sprzed 50 lat.

*Zofia Gołqb-Meyer*



## Kosmolog<sup>1</sup>

(dramat w jednym akcie z życia arystokracji naukowej)

*Krzysztof Maślanka*  
*Instytut Historii Nauki PAN*  
*Warszawa–Kraków*

Występują:

Hrabina – egzaltowana dama w słusznym wieku

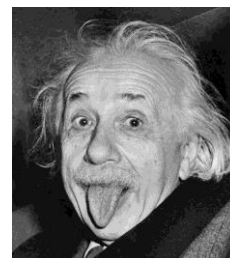
Adalbert – jej zblazowany bratanek, skądinąd genialny teoretyk odnoszący też wielkie sukcesy na polu eksperymentów

Chłop pańszczyźniany – poddany Hrabiny, niesprawiedliwie przez nią uciskany, spragniony wiedzy analfabeta

Model kosmologiczny – próżnia kwantowa, czyli nicłość w proszku zrobiona w balona

oraz

Portret Einsteina (gościnnie)



Huk potężnej eksplozji. Po podniesieniu kurtyny czuć swąd przypalonej zupy kwarkowo-gluonowej i widać rozwiewające się gęste opary, z których wylania się staroświecki salon. Pośrodku wielki stół pełen zabazgranych wzorami szpargałów, zawalony aparaturą naukową: kłębowiska rur, kable, oscyloskopy, komputery i inne rupiecie. W licznych retortach bulgoczą jakieś podejrzane ciecze. Po kątach walają się porozbijane butelki lejdejskie tudzież flaszki Kleina. Na ścianie wielki Portret Einsteina z wywalonym jęzorem, w złożonych ramach.

W oddali, na tle idyllicznego krajobrazu wiejskiego i zachodzącego Słońca, majestatycznie unosi się i ekspanduje imponujących rozmiarów balon.

Hrabina (płaczliwie): – Adalbercie, zlituj się! To już szósty Wielki Wybuch w tym tygodniu. Do czego to wszystko doprowadzi?

Chwiejnym krokiem wchodzi Adalbert. Osmalony na twarzy, odzież w strzępach, włosy w nieładzie, wzrok błędny

Adalbert (bełkocze w uniesieniu):  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$ . Poezja... czysta poezja...

Hrabina (oburzona do głębi): Ile razy ci mówiłam, żebyś się nie wyrażał tak brzydko? Proszę natychmiast przeprosić swoją ciocię!

Adalbert (nie zwracając na nią uwagi, cały w ekstazie):

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R(t)^2 \left[ dr^2 / (1 - kr^2) + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right].$$

<sup>1</sup> Miłośnicy literatury pięknej bez trudu rozpoznają w tym tekście wpływy teatryku *Zielona Gęś* Gałczyńskiego. Z kolei zwolenników powagi w literaturze naukowej uspokajam, że ma to być tylko delikatna zachęta do głębszych studiów nad kosmologią. Jak dotąd dramat ten nie był wystawiony na scenie; podejrzewam, że z powodu trudności ze znalezieniem odpowiedniego odtwórcy kluczowej roli Modelu Kosmologicznego.

Ach, jakie to cudowne. (Kłęką z szacunkiem przed portretem Einsteina) Albercie, jesteś wielki!

Portret Einsteina (zadowolony chowa jęzor i deklamuje patetycznie basem): *Raffiniert ist der Herr Gott...*

Hrabina (patrząc ze zdumieniem na Portret Einsteina): Co on plecie?! (do Adalberta, trzymając się za głowę): Twój biedny świętej pamięci ojciec... Pamiętasz jak go strułeś blinami Zeldowicza?

Adalbert: Ile jeszcze razy będzie mi ciocia to wypominać? Czy to moja wina, że te bliny tak mu smakowały? Zakradał się w nocy do mojej pracowni i masowo je wyjadał! A potem jeszcze upijał się do nieprzytomności cieczą doskonałą...

Hrabina: Mniejsza z tym. No więc twój biedny ojciec tak bardzo chciał, żebyś wyszedł na ludzi i wreszcie zdobył uczciwy zawód. Radcy prawnego, hydraulika, ambasadora. Albo chociaż pianisty-wirtuoza. A ty co? Kosmolog! Ha ha ha! Toż to wstyd i hańba na honorze całej naszej zacnej rodziny!

Adalbert: (flegmatycznie) Ależ ciociu! Teraz jest równouprawnienie. Żaden zawód nie hańbi. Kosmolog w końcu też człowiek.

W oddali słychać jakiś osobliwy, narastający syk. Obydwoje nasłuchują z niepokojem

Hrabina (zgroźliwie): Coś mi się zdaje, drogi Adalbercie, że twój nowy kosmos właśnie zaczął się kurczyć. Erę Plancka tudzież inflację zaliczył dość gładko. Bariogenezę jeszcze jakoś zmęczył. Ale nukleosyntezy pierwotnej już nie doczekał. Że o uczciwej rekombinacji atomów nie wspomnę. A gdzie galaktyki? Planety, radioźródła i czarne dziury? Gdzie życie i człowiek?!

Portret Einsteina: Właśnie. (do Adalberta) Po coś tam jeszcze złośliwie wepchał stałą kosmologiczną?! Nie wiedziałeś, że zakazałem jej używania? *Lambda ist verboten!*

Hrabina (do Portretu Einsteina): Zamknij się. To wszystko przez ciebie!

Adalbert (do Hrabiny, z oburzeniem) Trochę szacunku! On ma rację. Przesadziłem z tą stałą...

Portret Einsteina (obrażony wywala z powrotem jęzor w stronę Hrabiny)

Adalbert (do Portretu Einsteina): Wybacz mój drogi. To nie miała być stała kosmologiczna, tylko ciemna energia. Pomyliłem strony w twoich równaniach.

Za sceny dobiega coraz głośniejszy tupot bosych nóg

Chłop pańszczyźniany (wpada zziębnięty, z zaferowaniem): Jaśnie panie, pański *Big Bang* spadł za plebanią pod lasem, skolapsował i zniknął. Ale wcześniej przestraszył krowy naszego sąsiada na pastwisku. Pewnie przestaną dawać mleko. Możemy mieć nieliczne kłopoty.

Adalbert (zażenowany milczy posępnie)

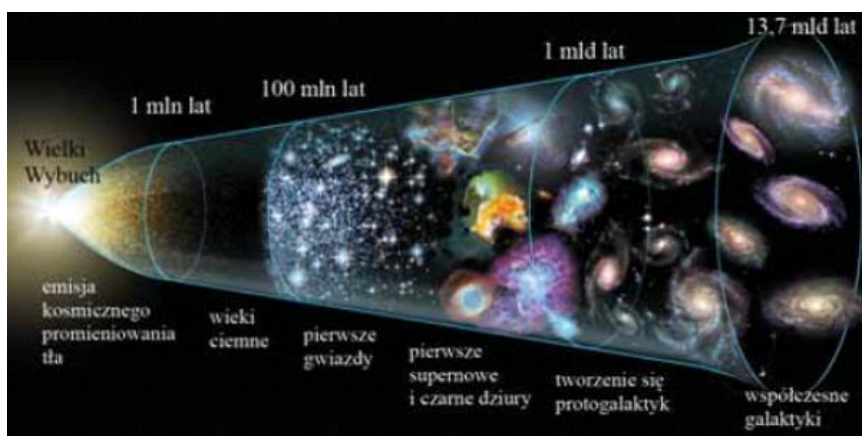
Hrabina (załamując ręce): A nie mówiłam! (płacze rozdzierającą)

Koniec (świata)



*Wszystkie osoby występujące w dramacie są fikcyjne, a wszelkie podobieństwo do znanych postaci jest czysto przypadkowe. Natomiast nieprzypadkowe – i jak najbardziej poważne – są użyte terminy. Oto kilka niezbędnych wyjaśnień:*

**Big Bang** (Wielki Wybuch) – gwałtowny początek ekspansji, czyli rozszerzania się Wszechświata od stanu skrajnie gęstego i gorącego. Nazwa w zamierzeniu (podobno) ironiczna, użyta przez Freda Hoyla w audycji radiowej BBC w roku 1949. Trzeba podkreślić, że jest ona myląca: nie był to bowiem wybuch podobny do ziemskich eksplozji w przestrzeni, ale ekspansja samej przestrzeni, w tym sensie, że wszystkie kosmiczne obiekty oddalają się nawzajem od siebie. Obecnie, po upływie 13,7 miliarda lat, Wszechświat nadal się rozszerza – jest wielki, zimny, niemal ciemny i praktycznie pusty: gdyby całą znaną materię rozmasować równomiernie w przestrzeni, to na  $1 \text{ m}^3$  przypadłby raptem jeden atom. O takiej „próżni” w laboratorium technicy nie mogą nawet marzyć.



Etapy ewolucji Wszechświata. Czas na osi poziomej (źródło: Internet)

**Równania Einsteina** – równania pola grawitacyjnego (1915), które wiążą geometryczne własności czasoprzestrzeni (jej krzywiznę) z rozkładem i ruchem materii. Dopuszczają wiele różnych rozwiązań, w tym modeli kosmologicznych, z pomocą których można opisać ewolucję całego Wszechświata. Większość z tych modeli albo żyje stosunkowo krótko i zapada się, albo rozszerza się bardzo szybko. W żadnej z tych sytuacji nie powstaną pierwiastki czy gwiazdy. Natomiast realny Wszechświat jest dość wyjątkowy i nieprzypadkowy – z jakichś powodów tempo jego rozszerzania jest „subtelnie dostrojone”, a dzięki temu on sam jest przyjazny dla powstania pierwiastków chemicznych oraz życia. Fakt ten inspirował filozofów przyrody, ale jego wyjaśnienia należy się spodziewać ze strony fizyków.

**Stała kosmologiczna  $\Lambda$**  – stała lambda, dodatkowy, logicznie dopuszczalny człon w równaniach Einsteina, modyfikacja jego równań pola w celu uzyskania rozwiązania opisującego model statyczny, czyli niezmienny w czasie (1917). Po odkryciu ekspansji Wszechświata (1929 r.) stała ta okazała się niepotrzebna i sam Einstein odciął się zdecydowanie od swego pomysłu. Ostatnio jednak, po odkryciu (1998) przyspieszonej ekspansji Wszechświata, stała kosmologiczna odżyła w kosmologii, gdzie, jako tzw. ciemna energia, ma interpretację uniwersalnej siły odpychającej. Jednak wszelkie próby teoretycznego obliczenia wartości tej stałej na gruncie fundamentalnych praw fizyki prowadzą, jak dotąd, do rekordowych i frustrujących niezgodności z obserwacjami.

**Zupa kwarkowo-gluonowa** – plazma kwarków (składników protonów i neutronów) i gluonów (nośników sił jądrowych, analogicznych do fotonów) – stan materii jądrowej występujący w warunkach odpowiednio wysokich temperatur i dużych gęstości.

**Ciecz doskonała** – bardzo uproszczony rodzaj materii wypełniającej model kosmologiczny; mało realistyczny (nie posiada lepkości, tylko gęstość oraz izotropowe ciśnienie), ale z pomocą równań Einsteina pozwala ściśle policzyć np. tempo rozszerzania się modelu kosmologicznego.

**Era Plancka** – najwcześniejszy etap ewolucji Wszechświata (miał on wtedy zaledwie  $10^{-44}$  sekundy życia), gdzie jeszcze można sensownie, choć tylko jakościowo, stosować znaną fizykę; w tym czasie gęstość materii była skrajnie wielka:  $10^{93}$  g/cm<sup>3</sup>. O tym, co było jeszcze wcześniej nie można obecnie nic powiedzieć.

**Bariogeneza** – hipotetyczny proces, który musiał zajść na bardzo wczesnych etapach kosmicznej ewolucji, ponieważ inaczej nie byłoby teraz we Wszechświecie materii (oraz inteligentnych obserwatorów); wypełniałoby go wyłącznie tzw. promieniowanie reliktowe. Proces ten polegał na pojawieniu się niewielkiej asymetrii pomiędzy ilością barionów (głównych składników materii) i antybarionów (antymaterii). Nadwyżka barionów, która nie uległa anihilacji z antybarionami tworzy obecnie znaną nam materię.

**Nukleosynteza pierwotna** – powstanie kilku lekkich pierwiastków, głównie deuteru, helu, litu i berylu, które nastąpiło w ciągu ok. trzech pierwszych minut życia Wszechświata. Zgodność przewidywań teorii z obserwacjami obfitości tych pierwiastków stanowi przekonujące potwierdzenie modelu gorącego wczesnego Wszechświata.

**Rekombinacja atomów** – połączenie się w pierwotnej plazmie swobodnych elektronów z jądrami w neutralne atomy. Rekombinacja nastąpiła wówczas, gdy Wszechświat miał ok. 380 tysięcy lat i był już na tyle chłodny, że mogły powstać stabilne atomy (wcześniej ulegały one częstej jonizacji tworząc plazmę). Wtedy też Wszechświat stał się przezroczysty – dostępny dla obserwacji optycznych. Pozostałością po tej chwili jest tzw. promieniowanie reliktowe tła o temperaturze wynoszącej teraz ok. 3 K. Od ponad dwudziestu lat intensywnie badane są drobne fluktuacje w rozkładzie temperatury tego promieniowania. Są to, jak się przypuszcza, ślady załączków późniejszych wielkoskalowych struktur – galaktyk.

**Bliny Zeldowicza** (ang. *pancakes*) – nieformalna nazwa pewnych płaskich struktur kosmicznych uformowanych z pierwotnej materii pod wpływem grawitacji (1970).

**Kolaps Wszechświata** – hipotetyczny gwałtowny koniec jego ewolucji poprzedzony etapem kurczenia się, „Wielkie Zgniecenie” (ang. *Big Crunch*).

**Raffiniert ist der Herr Gott, aber boshaft ist Er nicht** („Bóg jest wyrafinowany, ale nie jest złośliwy (perfidny)”) – głęboka maksyma Einsteina, podkreślająca to, że rzeczywistość fizyczna może być skutecznie i ze zrozumieniem opisana matematycznie, mimo że jest to proces mozolny oraz rozpisany na wiele pokoleń badaczy. Ale w zasadzie mogłoby tak nie być. Powstałyby wówczas tylko nauki jakościowe, czysto opisowe, takie jak np. botanika czy geografia; jednak nie byłaby możliwa fizyka teoretyczna. Słowem: moglibyśmy tylko klasyfikować zjawiska i odpowiadać na proste pytanie „jak?”, ale nie na docieklive pytanie „dlaczego?”. Niemożliwe byłyby też skuteczne (a niekiedy bardzo zaskakujące) ilościowe przewidywania nowych zjawisk. Większość podatników nie zauważyłaby tego wcale, bo nie miałyby to zapewne większego wpływu na rozwój techniki, ale dla stosunkowo nielicznych fizyków-teoretyków świat byłby niedostępny – po prostu nudny.



## **Piątka z Krakowa, czyli nasza reprezentacja w XXV Jubileuszowym Ogólnopolskim Turnieju Młodych Fizyków**

*Konrad A. Kopański  
Instytut Fizyki UJ*

*Aleksander Kostuch, Bartłomiej Waśniowski  
Uczniowie II LO w Krakowie*

W lutym 2014 roku poproszono mnie, abym w ramach zajęć kółka olimpijskiego przy Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ dla młodzieży szkół średnich, spotkał się z grupą uczniów klasy maturalnej z II Liceum Ogólnokształcącego im. Króla Jana III Sobieskiego w Krakowie, celem omówienia „pewnego projektu”. Brzmiało to bardzo tajemniczo, jednak natychmiast ochoczo podjąłem wyzwanie, jak się później okazało – turniejowe. Zajmuję się fizyką doświadczalną więc tym bardziej doceniam zwłaszcza młodych ludzi podejmujących trud realizacji projektu doświadczalnego. Kilka dni później miałem przyjemność poznać Grażynę Adamek, Natalię Kostrzewę, Aleksandra Kostucha, Bartłomieja Waśniowskiego oraz Oskara Ziębę – grupę uczniów, która zgłosiła się do udziału w XXV Turnieju Młodych Fizyków i zakwalifikowała do półfinału. Natychmiast przystąpiliśmy do działania, gdyż czasu na ostatecznie dopracowanie doświadczeń było już bardzo niewiele, a pracy bardzo dużo. Szybko okazało się, że moja grupa składa się nie tylko z ambitnych, ale przede wszystkim bardzo pracowitych i uzdolnionych młodych ludzi, umiających stawiać trudne pytania i poszukujących na nie odpowiedzi. Tutaj pozwolę sobie wyjaśnić genezę tytułu artykułu – Piątka z Krakowa. Wielokrotnie w pracy zespołowej pojawiają się trudności występujące w niemalże każdej większej grupie osób, gdzie zazwyczaj każdy ma inną wizję współpracy i swojego udziału w przedsięwzięciu. Tutaj było zupełnie inaczej, okazało się, że grupa doskonale z sobą współpracuje. Co najważniejsze, zespół tworzyli ludzie z pozoru zupełnie różni, jednak doskonale się uzupełniają. Każdy z członków zespołu mógł liczyć na wsparcie i pomoc ze strony pozostałych osób. Możliwość pracy z tak zgraną grupą doprawdy należy do rzadkości. Uczniowie podzielili się zadaniami tak, aby każdy realizował zagadnienie, które najbardziej go frapuje i w którym najlepiej może się zrealizować, co nie zmienia faktu, iż tak naprawdę wszyscy członkowie zespołu realizowali wszystkie zagadnienia. Chodziło o to, aby jak najwięcej zrozumieć i jak najlepiej poznać ciekawe zjawiska, tak jak na prawdziwych badaczy przystało – poprzez obserwację i eksperyment.

Ostatecznie wybraliśmy następujące zagadnienia z listy problemów TMF 2014, które postanowiliśmy dopracować:

- Bąbelkowy kryształ (problem nr 6)  
*Duża liczba bardzo małych bąbelków powietrza na powierzchni cieczy układa się w regularną strukturę podobną do sieci krystalicznej. Należało opracować metodę wytwarzania odpowiednich bąbelków i zbadać zjawisko, co z powodzeniem się udało.*
- Chłodziarka typu „garnek w garnku” (problem nr 7)  
*Jest to „urządzenie” zbudowane np. z dwóch doniczek, umieszczonych jedna w drugiej. Przestrzeń pomiędzy doniczkami wypełniona jest wilgotną substancją porowatą. Należało zoptymalizować konstrukcję tak, aby uzyskać jak najlepszy efekt chłodzenia. Bardzo istotny był tutaj pomiar i kontrola parametrów środowiskowych.*
- Zamrażanie kroplel wody (problem nr 8)  
*Uczniowie badali zjawisko powodujące, iż w pewnych warunkach kropla wody umieszczona na zimnym podłożu ( $\sim -20^{\circ}\text{C}$ ) zamarza, przybierając kształt zbliżony do stożka. Doświadczenie, chociaż z pozoru proste, wymagało od uczniów pomysłowości.*
- Współczynnik dyfuzji – ruchy Browna (problem nr 10)  
*Uczniowie, korzystając z dobrej jakości mikroskopu sprzężonego z kamerą CCD, obserwowali ruchy Browna dla wielu roztworów, różniących się rozmiarami i kształtem cząsteczek. Obserwacje zostały utrwalone cyfrowo, co umożliwiło ich dalszą analizę, prowadzącą do interesujących wniosków.*
- Elektrownia na świeczkę (problem nr 11)  
*To zagadnienie z pewnością wymagało największej kreatywności i dawało dużą swobodę rozwiązań. Uczniowie wykonali między innymi model łódki z napędem elektrycznym, zasilanej z dwóch modułów Peltiera. Podczas realizacji projektu pojawiło się, co było do przewidzenia, wiele trudności, jednak efekt końcowy był znacznie lepszy niż można było się tego spodziewać po tak prostym rozwiązaniu. Aby uzyskać w miarę możliwości dużą sprawność układu zasilanego z modułów Peltiera należy pokonać szereg problemów technicznych, których rozwiązanie wymaga wiedzy nie tylko z zakresu elektryczności, ale również termodynamiki i mechaniki.*
- Magnetyczne hamowanie (problem nr 16)  
*Uczniowie mieli za zadanie zbadać zjawisko hamowania ruchu silnego magnesu, spadającego wewnątrz metalowej, nieferromagnetycznej rurki. Wnikliwa obserwacja zjawiska pozwoliła na wiele interesujących spostrzeżeń i wniosków.*
- Czekoladowa histereza (problem nr 17)  
*Jak się okazało, wyjaśnienie tego zagadnienia nie było łatwe dla technologów oraz towaroznawców spożywczych, którzy chociaż wiedzieli o jego istnieniu, nie do końca byli przekonani, od czego tak naprawdę zależy. Wydaje się, że zjawisko będące tematem rozważań jest powiązane wyłącznie z fizyką „szkolną”, okazało się jednak, że wymaga od uczniów dużej wiedzy, którą*

*musieli zdobyć w celu rozwiązania problemu, także z zakresu technologii produkcji wyrobów czekoladowych, chemii oraz towaroznawstwa spożywczego.*

Oczywiście, jak już wspomniałem, pozostałe problemy nie były obce naszej drużynie. Pomimo dość ograniczonych środków, uczniowie zrealizowali niemalże wszystkie zagadnienia, zgłębiając genezę zjawisk i poznając problemy, jakie pojawiają się przy wykonywaniu eksperymentów, bardzo często przeprowadzanych na różne sposoby, aby wybrać najwłaściwszą metodę. Wiedza ta bardzo przydała się podczas „potyczek” turniejowych, gdzie należało wykazać się znajomością problemu, także w odniesieniu do zagadnień poruszanych przez konkurentów. Tutaj niesłuszne wydaje się założenie turniejowe, mówiące o tym, iż nie można korzystać ze zdobytych własnych doświadczeń podczas oceny konkurentów. Przecież na tym właśnie polega nauka.



13 marca 2014 roku nadszedł dzień próby. Stawiliśmy się wszyscy w Śląskim Międzyuczelnianym Centrum Edukacji i Badań Interdyscyplinarnych w Chorzowie, gdzie odbywały się zawody półfinałowe. Bardzo szybko okazało się, że mamy do czynienia z drużynami mającymi już wieloletnie doświadczenie w tym konkretnym konkursie. Poziom był bardzo wysoki, jednak – co muszę przyznać z przykrością – szanse nie były równe, o czym przekonał się już podczas przedstawiania uczestników. Przy pierwszej prezentacji, w której Grażyna Adamek pokazała film nakręcony w Krakowie, przedstawiający ruchy Browna, Organizator zarzucił nam (niestety podczas trwania prezentacji i to dość głośno), że eksperymenty nie były wykonywane przez młodzież, a... przez pracowników Instytutu Fizyki UJ! Był to zarzut nieprawdziwy, gdyż zarówno obserwacje, począwszy od preparatyki aż po etap rejestracji, prowadzone były w mojej obecności przez samych uczniów. Dzięki życzliwości personelu Pracowni Pokazów Fizycznych IF UJ oraz pana dr. Marka Gołąba, uczniowie mieli dostęp do mikroskopu sprzężonego z kamerą przemysłową (sztywno połączoną za pośrednictwem adaptera z wyciągiem okularowym), co umożliwiło im cy-

frową rejestrację zjawiska. Sam film montowany był również przez uczniów. Wszyscy wiemy, że nie da się wnikliwie zbadać tego zjawiska za pomocą szkła powiększającego. Jak wiadomo, współczesna nauka wymaga zastosowania niejednokrotnie bardzo zaawansowanych metod w celu uzyskania zadowalającego rezultatu, który można czytelnie i estetycznie zaprezentować. Z całą pewnością organizatorzy konkursu mieli świadomość tego, iż młodzież nie będzie miała bezpośredniego dostępu chociażby do przyzwoitej jakości mikroskopu optycznego, dobrej jakości kamery cyfrowej do obserwacji i rejestracji badanych zjawisk, oscyloskopu, generatora funkcyjnego czy innych urządzeń, powiedzmy sobie szczerze – rzadko spotykanych w szkołach czy tym bardziej w domach. Wszystkie drużyny biorące udział w tego typu konkursach mają zazwyczaj do dyspozycji profesjonalne zaplecze badawcze, zapewnione przez różnorakie instytucje. To, czy jest to Centrum Edukacji, dobrze wyposażona pracownia szkolna czy też instytut nie powinno mieć tutaj znaczenia – liczy się praca i bezcenne doświadczenie oraz umiejętności zdobyte przez młodzież. Naszym zadaniem jako opiekunów jest przecież udzielenie niezbędnych wskazówek i wsparcia w procesie opracowania danych oraz pomoc przy umiejętnym formułowaniu wniosków, płynących z obserwacji poczynionych przez młodych badaczy.

Z całą pewnością nasza „Piątka” stanęła na wysokości zadania i godnie reprezentowała Kraków. Podkreślam, że był to pierwszy publiczny występ drużyny w konkursie fizycznym, nie wspominając już o tym, że drużyna zajęła III miejsce w półfinale Turnieju, co samo w sobie jest ogromnym wyróżnieniem i sukcesem. Pragnę tutaj pogratulować zarówno zwycięzcom jak i drużynie, która znalazła się poza podium. Niewątpliwie o dobrym wyniku Krakowskiej drużyny zdecydowały bardzo szerokie, zarówno ściśle jak i humanistyczne, zainteresowania uczniów oraz udział w Mistrzostwach Polski Debat Oksfordzkich, co już stanowiło jakieś doświadczenie w kwestii wystąpień publicznych. Należy pamiętać o tym, iż w Turnieju Młodych Fizyków bardzo istotne znaczenie (o ile niedecydujące) ma taktyka. Nazwa nie jest tutaj przecież przypadkowa.

Nasza krakowska drużyna Sobieskiego zdobyła w ramach Turnieju Młodych Fizyków bardzo cenne doświadczenia, które z pewnością przekaże swoim następcom. Myślę jednak, że najcenniejszą nagrodą w tego typu konkursach jest sama satysfakcja płynąca z samodzielnego zgłębienia problemu i znalezienia odpowiedzi na postawione pytania. Eksperyment i obserwacja to przecież najcenniejsze i najpiękniejsze zarazem narzędzia poznania. Należy pamiętać o tym, że często nie sama wygrana, a właśnie droga, czasami bardzo długa i kręta, która do niej prowadzi, stanowi największą nagrodę i daje ogromną satysfakcję. Zachęcam tym samym wszystkich młodych czytelników do udziału w Turnieju, a także w innych konkursach. Pragnę również zachęcić tych nieco starszych czytelników, zarówno studentów jak i pracowników naukowych, do „podjęcia wyzwania” i wsparcia niezwykle zdolnej i chętnej młodzieży, której przecież

nie brakuje w krakowskich szkołach. Chociaż z pewnością wymaga to poświęcenia swojego czasu sam muszę przyznać, że daje niesamowitą satysfakcję, a zarazem radość z tego, że można przekazać zdobytą wiedzę i swoje doświadczenia młodszym kolegom. Czyż nie po to właśnie zajmujemy się nauką?

Ja sam będąc uczniem XX LO w Krakowie miałem szczęście trafić na wspaniałego nauczyciela fizyki, pana mgr. Alfreda Datę, który jako fizyk doświadczalny i co najważniejsze – pasjonat fizyki, przekazał mi swoją pasję do nauk przyrodniczych, a co najcenniejsze, nauczył mnie, że tej pasji nie wolno zatrzymywać tylko dla siebie, lecz należy się nią dzielić. Wierzę, wręcz jestem pewien, że nasza krakowska drużyna również podzieli się kiedyś swoją pasją i doświadczeniem z innymi. Życzę wszystkim, aby trafiali na tak zgrane zespoły, z jakim ja miałem przyjemność pracować. Wierzę, że nasz krakowski lokalny patriotyzm jest równie silny jak ten, z którym zetknęliśmy się na Śląsku. Jednocześnie jestem przekonany, że zarówno Uniwersytet Jagielloński, jak i pozostałe krakowskie uczelnie są w stanie wesprzeć młode talenty.

Myślę, że najlepszym obrazem wrażeń naszych reprezentantów będzie relacja Aleksandra Kostucha oraz Bartłomieja Waśniowskiego, którą pragnę się z czytelnikami podzielić.

*Konrad A. Kopański*

### **Walentynki z fizyką**

Nasze doświadczenia z Turniejem Młodych Fizyków zaczęły się 14 lutego 2013 roku. Wtedy odbył się Dzień Fizyki na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ, gdzie oprócz wielu interesujących pokazów zobaczyliśmy prezentację zachęcającą do wzięcia udziału w owym konkursie. Niestety, okazało się, że pierwszy etap Turnieju już został rozstrzygnięty, więc postanowiliśmy wziąć udział w XXV edycji. Dopiero po wakacjach zaczęliśmy się zastanawiać, kogo z całej utalentowanej matematyczno-fizycznej klasy wybrać do drużyny. Ze względu na turniejowy charakter tego konkursu wiedzieliśmy, że nie sama wiedza ma tutaj znaczenie, lecz również talent oratorski, kreatywność oraz oczywiście pracowitość. Biorąc te założenia pod uwagę wybraliśmy dwie koleżanki i kolegę: Grażynę Adamek, Natalię Kostrzewę i Oskara Ziębę.

W pierwszym etapie należało wybrać 10 spośród 17 przedstawionych problemów i wykonując wskazane doświadczenia, opracować je i udzielić odpowiedzi na stawiane pytania. Każdy z nas wybrał dwa problemy, które po prostu mu się podobały. Wiadomo, że nie wszyscy lubią te same dziedziny fizyki, dlatego nie było problemu z podziałem obowiązków. Większość prac wymagała znacznie szerszej wiedzy teoretycznej od tej znanej nam z liceum, czasami finansowej pomocy oraz wiele poświęconego czasu. Praca sprawiała nam jednak zawsze bardzo dużo przyjemności, szczególnie jeśli wyniki były takie, jakich

oczekiwaliśmy (choć te nieoczekiwane również potrafią cieszyć). Staraliśmy się wykonywać doświadczenia wspólnie, abyśmy mogli wyciągać z nich więcej wniosków i żeby każdy z nas „czuł temat”. Najciekawsze z nich to „Elektrownia na świeczkę” – projekt, który ewoluował w trakcie prac oraz „Chłodziarka pot-in-pot” – znacznie rozwijająca naszą wyobraźnię. Z kolei najtrudniejsze okazały się: „Czekoladowa histereza” oraz „Ruchy Browna”.

Powyższe doświadczenia trudno byłoby przeprowadzać w warunkach domowych, dlatego zwróciliśmy się o pomoc do Marcina Abrama prowadzącego Warsztaty Fizyczne dla licealistów. W ramach uczestnictwa w warsztatach poznaliśmy utalentowanego fizyka teoretycznego Kamila Ziemiana. Pomógł on nam w zrozumieniu wielu istotnych problemów m.in. wyznaczania niepewności pomiarowej metodą różniczki zupełnej. Dzięki niemu nawiązaliśmy również kontakt z naszym przyszłym opiekunem – Konradem Kopańskim. Jego doświadczalne umiejętności były niezbędne przy rozwiązywaniu naszych trudności. Co więcej, dzięki jego wsparciu mieliśmy dostęp do bardziej precyzyjnego sprzętu naukowego, którym dysponuje Instytut Fizyki UJ, m.in. mikroskopu z optyką Carl-Zeiss Jena wraz z kamerą przemysłową CCD do nagrywania obserwacji Ruchów Browna. Bez filmów wykonanych za pomocą tej aparatury nie moglibyśmy zaprezentować doświadczenia w trakcie pokazów. Oprócz tego duży wkład w powiększanie naszej pasji do fizyki miał nasz nauczyciel – Grzegorz Knapik. Niejednokrotnie udzielał nam wskazówek odnośnie problemów fizycznych oraz technicznych związanych z naszą pracą. Dzięki niemu mogliśmy pożyczyć ze szkolnego zaplecza sprzęt niezbędny do przeprowadzenia kilku doświadczeń.

Po ogłoszeniu wyników I etapu byliśmy zaskoczeni faktem, że zostaliśmy jedynym zespołem z Krakowa, który brał udział w tym konkursie i przeszedł do fazy turniejowej. Awans przyniósł nam wiele radości oraz wsparcie finansowe ze strony szkoły. Następny etap wymagał od nas przygotowania prezentacji do 10 wybranych przez komisje problemów. Po zaciętych starciach fizycznych, które odbyły się 13 marca 2014 roku w Chorzowie byliśmy bardzo zadowoleni z doświadczenia, które zdobyliśmy. Ostatecznie zajęliśmy III miejsce i wróciliśmy z brązowymi medalami do Krakowa.

Chcielibyśmy bardzo serdecznie zachęcić wszystkich licealistów, którzy nie boją się wyzwania, kochają fizykę i są gotowi szukać odpowiedzi na aktualne, nieproste (choć pozornie błahe) pytania. Ważne jest, żeby Kraków miał coraz większą reprezentację w tym konkursie, ponieważ mamy u nas w mieście mnóstwo zdolnych fizyków. Musimy pokazać, że mamy coś do powiedzenia w tym turnieju. Może już w następnym roku to krakowska drużyna będzie w stanie wygrać i zostać reprezentantem Polski na międzynarodowym etapie? Żeby tak się stało musimy kontynuować zaczetą przez naszą drużynę tradycję i wykorzystać zebrane już przez nas oraz naszą szkołę doświadczenie.

*Aleksander Kostuch, Bartłomiej Waśniowski*





## CO CZYTAĆ

Trzech naukowców – dwóch fizyków teoretyków Kazimierz Rzażewski (Centrum Fizyki Teoretycznej PAN) i Karol Życzkowski (Instytut Fizyki UJ i Centrum Fizyki Teoretycznej PAN) oraz informatyk Wojciech Słomczyński (Instytut Matematyki UJ) – napisało przystępnym językiem nadzwyczaj interesującą książkę *Każdy głos się liczy. Wędrowka przez krainę wyborów*, Wydawnictwo Sejmowe. Erudycja i wiedza merytoryczna pozwoliły na powstanie tej książki. Przeczy ona stereotypowi, że „ścisłowiec” nie jest również humanistą. Może być. Książka jest przeznaczona również i dla nich; <http://kazdyglos.eu/>

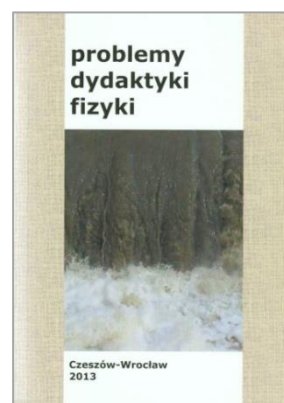


Z książki można się dowiedzieć, jak losowano urzędników w starożytnych Atenach, a jak wybierano dożę w średniowiecznej Wenecji? W jaki sposób konklawe dokonuje wyboru papieża? Jak wyłania się najlepszego w zawodach łyżwiarskich, a jak zwycięzcę Konkursu Chopinowskiego? Czy wynik wyborów prezydenckich może zależeć od rodzaju systemu wyborczego, a skład parlamentu od wielkości i kształtu okręgów wyborczych?

Jak wybieramy posłów do Parlamentu Europejskiego, a jak decyzje podejmuje Rada Unii Europejskiej? Czy statystyczna analiza protokołów wyborczych może potwierdzić przypuszczenia o fałszowaniu wyników? Bogato ilustrowana książka przystępnie odpowiada na te pytania przedstawiając szeroki wachlarz zagadnień dotyczących zbiorowego podejmowania decyzji i dokonywania wyborów w każdej dziedzinie życia.

*Problemy dydaktyki fizyki*, pod red. A. Krajny, L. Ryka, K. Sujak-Lesz, Oficyna Wydawnicza ATUT, Wrocławskie Wydawnictwo Oświatowe. Czeszów–Wrocław 2013

Książka zawiera materiały z konferencji pod tym samym tytułem i jest adresowana do wszystkich nauczycieli fizyki. Zawarte w niej artykuły poruszają szeroki zakres problemów związanych z nauczaniem fizyki, zarówno te bardziej teoretyczne, jak i „raporty” nauczycieli z ich działalności w szkole; chodzi nie tylko o klasyczne nauczanie na lekcjach.



Naszemu czytelnikom, starszym i tym młodszym, a zwłaszcza tym rozważającym możliwość studiowania fizyki czy astronomii, polecamy pełną dowcipu autobiografię Krzysztofa Maślanki *Od kosmologii do teorii liczb* (Andrzej Buda Wydawnictwo Niezależne, Kraków 2013).

Autor, zadowolony z uprawianego zajęcia, opisuje meandry swojej, chwilami nieco wyboistej, drogi do kariery naukowej. Wiemy, że nie na każdego czeka Nobel, ale każdy może w nauce znaleźć swoje miejsce (a te są przecież przeróżne) i pędzić interesujące (bo to nauka) i satysfakcjonujące życie.



*Nauka i rzeczywistość*, Waldemar Reńda, Warszawska Firma Wydawnicza, Warszawa 2014.

Polecamy nauczycielom, uczniom i studentom książkę Waldemara Reńdy *Nauka a rzeczywistość*; to książka o kulturotwórczej roli nauki.

We wstępie do książki autor pisze: „Proponuję Państwu zejście na chwilę z utartych ścieżek podręcznikowej wiedzy i udanie się na jej manowce. Proszę się nie niepokoić; nie będzie to wyprawa dla Państwa ryzykowna, choć – mam nadzieję – niepozbawiona intelektualnej przygody. Jeżeli istnieje jakiegokolwiek ryzyko tej podróży, to ponosi je jedynie autor tej książki, poruszając tak kontrowersyjne tematy, jak sensowność niektórych badań naukowych, futurologia czy pseudonaukowe chwasty pleniące się w kulturowych niszach naszej cywilizacji”.

Publikacja zawiera materiały pomocnicze do przedmiotu Przyroda w liceum ogólnokształcącym.



*Foton* – pismo dla nauczycieli i studentów fizyki oraz uczniów  
wydawane przez

Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie

ISSN 1234-4729

Biuletyn Sekcji Nauczycielskiej Polskiego Towarzystwa Fizycznego

Zespół Redakcyjny:

Zofia Gołąb-Meyer (red. nacz.), Katarzyna Cieślar,  
Katarzyna Dziedzic-Kocurek, Dagmara Sokołowska, Witold Zawadzki

Rada Redakcyjna:

Paweł Góra (przewodniczący), Jacek Bieroń, Ewa Dębowska, Leszek Hadasz,  
Jerzy Karczmarczuk, Piotr Tomczak, Jerzy Zachorowski

Adres Redakcji:

FOTON

Instytut Fizyki UJ, ul. Reymonta, 430-059 Kraków

tel. 0-12 663-55-63 lub 0-12 663-56-77

fax. 0-12 633-40-79 lub 0-12 633-70-86

e-mail: [foton@if.uj.edu.pl](mailto:foton@if.uj.edu.pl)

e-mail: [meyer@th.if.uj.edu.pl](mailto:meyer@th.if.uj.edu.pl)

**Nowy adres: <http://www.foton.if.uj.edu.pl>**

Sekcja Nauczycielska PTF <http://www.ptf.agh.edu.pl/SN>

Redakcja techniczna, opracowanie graficzne i skład:

Anna Gagatek, IF UJ

Projekt okładki:

Andrzej Cieślar

Druk i oprawa:

Poligrafia Inspektoratu Towarzystwa Salezjańskiego

ul. Konfederacka 6, 30-306 Kraków

tel. 12-266-40-00

**Warunki prenumeraty – *Foton* + *Neutrino*:**

Cena prenumeraty rocznej wynosi **tylko!** 31,50 zł. Pieniądze należy wpłacić na konto:

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ

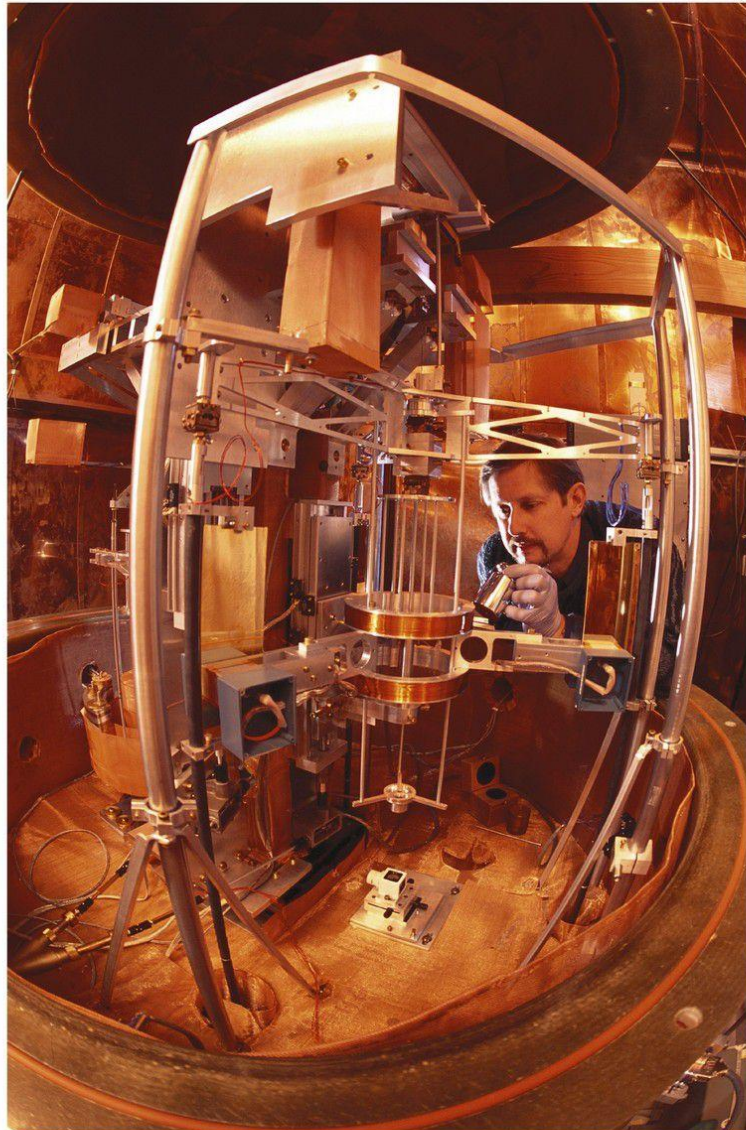
"FOTON"

Bank PEKAO S.A. O/Kraków

Nr r-ku: **07 1240 4722 1111 0000 4855 9692**

**Prosimy o poinformowanie Redakcji o dokonanej wpłacie i podanie NIP**

Elektromagnetyczna waga prądowa (waga Watta)  
do wyznaczania ampera



<http://www.nist.gov> © Robert Rathe