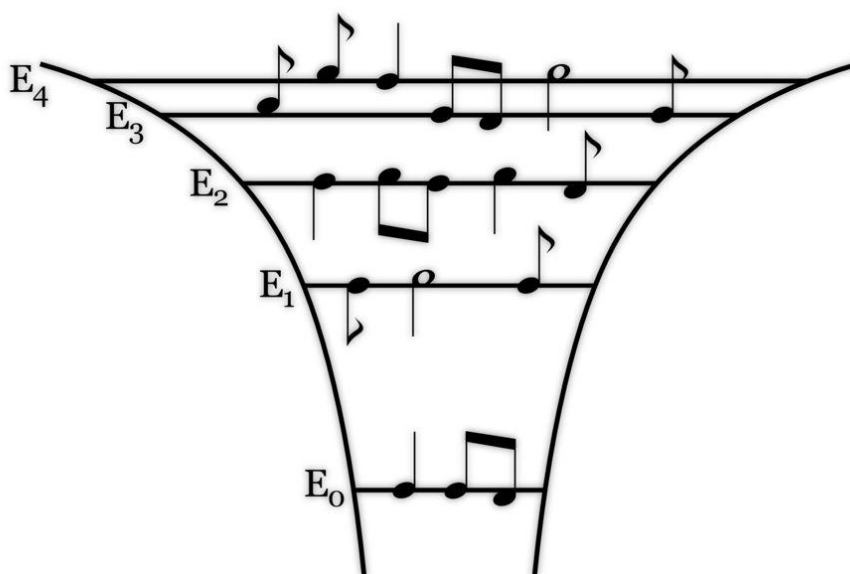


Foton

115
Zima
2011

Pismo dla nauczycieli i studentów fizyki oraz uczniów

INSTYTUT FIZYKI  UNIWERSYTET JAGIELLOŃSKI
SEKCJA NAUCZYCIELSKA POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO



Muzyka kwantów
Neutrino nadświetlne
Jaki będzie los Wszechświata
Jan Czochralski - rehabilitacja po latach

Jan Czochralski
23.10.1885–22.04.1953



Jan Czochralski



Dom rodzinny Jana Czochralskiego
w Kcyni na Pałukach



Czochralski z rodziną



Willa Margowo w Kcyni

Redakcja dziękuje panu Sylwestrowi Czochralskiemu za wyrażenie zgody na zamieszczenie zdjęć.



Nowinki w nauczaniu?

Jak zwykle jesienią wzrasta zainteresowanie problemami edukacji. Eksperti spędzają godziny na ważnych konferencjach, na których od dziesiątków lat głosi się postulaty, które są oczywiste, ale „ubierane” w coraz to nowe słowa, pojawiające się w preambułach programów nauczania, a następnie „sprzedawane” społeczeństwu. Nikt jednak nie analizuje, dlaczego te rozmaite, ze wszech miar słuszne postulaty, są realizowane jedynie w wyjątkowych sytuacjach, a nie powszechnie.

Przyczyna tego wydaje się trywialna: zbyt skromne budżety na edukację, w rezultacie czego klasy są nadal zbyt liczne (fizyka wymaga małych grup), nauczyciele często niedokształceni i rekrutujący się z negatywnej selekcji (słabe zarobki, mały prestiż zawodu), młodzież intelektualnie rozleniwiona, centralne rozliczanie wyników nauczania poprzez zbiurokratyzowane procedury. Dobry nauczyciel w nieprzeludnionej klasie z umotywowanymi do nauki uczniami uczyni cuda. Mamy na to tak wiele przykładów, iż można twierdzić, że jest to warunek *sine qua non*.

Kolejne hasło na międzynarodowej konferencji w Warszawie związanej z naszym przewodnictwem w Unii brzmi „uczniowie muszą nauczyć się wykorzystywać wiedzę teoretyczną nabytą w szkole”. Toż niczego innego nie głosił sto lat temu Marian Smoluchowski, to samo było i jest postulowane na kolejnych konferencjach GIREPu. Warto się przyjrzeć, dlaczego to jest tak trudne do realizacji, iż cel nie zostaje osiągnięty? Może nauczyciele nie potrafią tak uczyć? Miejmy nadzieję, że idzie ku lepszemu, bo ogłoszono duży grant europejski poświęcony kształceniu nauczycieli.

Fizyków i melomanów zachęcamy do artykułu Piotra Zielińskiego o analogii fizyki kwantowej i świata dźwięków. Krzysztof Fiałkowski objaśnia zasady pomiaru szybkości neutrin w eksperymencie OPERA oraz konsekwencje otrzymanego wyniku dla teorii, a o tym, czy Wszechświat czeka śmierć lodowa, i co o tym mówią prace noblistów z fizyki, dowiedzą się Państwo z artykułu Sebastiana Szybki. Artykuł Bernarda Jancewicza zapozna Państwa z pojęciem pseudowektorów i ich ewentualnymi korzyściami w dydaktyce. Janowi Czocharalskiemu, jednemu z największych polskich fizyków, niesłusznie skazanemu przez jakiś czas na infamię, poświęcony jest artykuł Pawła Tomaszewskiego.

★ *W Nowym Roku 2012 życzymy sukcesów, radości i spełnienia marzeń* ★

Z.G-M



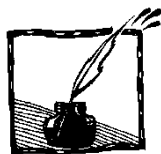
Contents

News in teaching?	
<i>Zofia Gołęb-Meyer</i>	1
Neutrinos faster than light?	
<i>Krzysztof Fiałkowski</i>	4
Some say the world will end in ice – Nobel Prize in physics 2011	
<i>Sebastian J. Szybka</i>	11
Playing quanta (I)	
<i>Piotr Zieliński</i>	17
Pseudovectors	
<i>Bernard Jancewicz</i>	31
Faces of Jan Czochoński	
<i>Paweł E. Tomaszewski</i>	44
„Maria Skłodowska-Curie 2011” – travelling exhibition	
<i>Maria Pawłowska</i>	52
CERN adventure	
<i>Barbara Górka</i>	58
What to read. <i>Astronomer's wife</i> by Kornelia Stepan	60
„Science on Stage 5”	
<i>Wojciech Nawrocik</i>	61



Spis treści

Nowinki w nauczaniu? <i>Zofia Gołąb-Meyer</i>	1
Neutrino szybsze od światła? <i>Krzysztof Fiałkowski</i>	4
Niektórzy twierdzą, że świat skończy się w lodzie – Nagroda Nobla z fizyki 2011 <i>Sebastian J. Szybka</i>	11
Muzyka kwantów (I) <i>Piotr Zieliński</i>	17
Pseudowektory <i>Bernard Jancewicz</i>	31
Oblicza Jana Czochralskiego <i>Paweł E. Tomaszewski</i>	44
„Maria Skłodowska-Curie 2011” – wędrująca wystawa planszowa o życiu niezwyklej Uczzonej <i>Maria Pawłowska</i>	52
Przygoda z CERNem <i>Barbara Górski</i>	58
Co czytać. <i>Żona astronoma</i>	60
„Nauki Przyrodnicze na Scenie 5” <i>Wojciech Nawrocik</i>	61



Neutrino szybsze od światła?

Krzysztof Fiałkowski

Instytut Fizyki UJ

Z końcem września cały świat obiegła sensacyjna wiadomość: wyniki eksperymentu OPERA (*Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus*, czyli *Projekt oscylacyjny z emulsyjnym rejestratorem śladów*) sugerują, że neutrino produkowane w laboratorium CERN pod Genewą zjawiają się w odległym o ponad 700 km detektorze umieszczonym w tunelu pod Gran Sasso wcześniej, niż oczekiwano. Jeśli te wyniki są poprawne, neutrino poruszają się z szybkością większą niż szybkość światła w próżni c , co wydaje się niezgodne z podstawowym założeniem szczególnej teorii względności. Fakt ten został skomentowany „na gorąco” przez Pawła Górę w poprzednim numerze *Fotonu*. Dziś chyba już pora na bardziej szczegółowe omówienie.

Powiedzmy tu od razu, że sensacyjność wyniku nie polega wcale na sugestii, że „Einstein mylił się!”, jak napisano w wielu gazetach. Fizycy wiedzą doskonale, że żadnej teorii nie można uważać za ostateczną i każda jest tylko pewnym przybliżonym opisem rzeczywistości. Nie dziwią ich więc tak bardzo (choć zawsze pasjonują) odkrycia, powodujące konieczność zmian opisu. Jednak w ciągu stu lat, które upłynęły od ogłoszenia teorii względności, wykonano nie tylko tysiące, ale wręcz miliony eksperymentów badających ruch różnych ciał z wielkimi prędkościami, zarówno w mikroświecie, jak i w skali kosmicznej. Nie obserwowano nigdy szybkości większych niż c , a nieliczne wyjątki dały się zawsze wyjaśnić subtelnymi efektami pomiarowymi. Co więcej, wszelkie pomiary zgadzały się zawsze doskonale z obliczeniami wykonanymi przy założeniu, że prędkość nie może mieć większej wartości. Jeśli więc nowy wynik jest prawdziwy, to trudno zrozumieć, dlaczego wcześniej nie zaobserwowano podobnych efektów. Do dyskusji tego faktu jeszcze wrócimy.

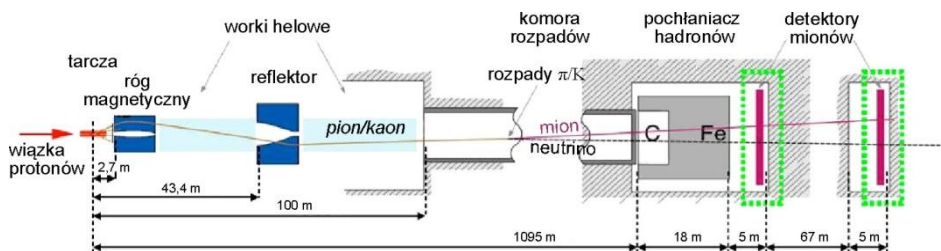
Podstawowe pytania, które trzeba wstępnie zadać, są oczywiste: czy szybkość neutrin zmierzona w eksperymencie OPERA była naprawdę większa niż c i jak dokładny był ten pomiar? Aby na nie odpowiedzieć, trzeba przeanalizować przebieg eksperymentu.

Idea pomiaru jest niezwykle prosta. Należy zmierzyć odległość między punktem, w którym neutrino powstało, a detektorem, w którym je zarejestrowano, a następnie podzielić ją przez czas, który upłynął między chwilami powstania i rejestracji neutrina. Niestety, jak zwykle, „diabeł tkwi w szczegółach”.

Zacznijmy od tego że, ściśle mówiąc, nie potrafimy w żaden sposób wyznaczyć punktu, w którym powstało neutrino. W CERNie wiązka protonów krąży po orbicie i jest z niej co pewien czas „wyrzucana” impulsem pola magnetycznego. Wtedy pada na tarczę, a protony zderzają się z jądrami atomów, produku-

jąc liczne silnie oddziałujące cząstki (hadrony). Odpowiednio ukształtowane pola magnetyczne i przesłony powodują, że najliczniej produkowane, bo najlżejsze z produkowanych cząstek, tzw. mezony π i K , czyli piony i kaony, wpadają do kilometrowej komory próżniowej, w której rozpadają się. Jednym z możliwych stanów końcowych rozpadów jest para mion–neutrino mionowe. Wszystkie inne cząstki lecące w badanym kierunku zostają pochłonięte w grubej warstwie żelaza. Miony, które uniknęły absorpcji, są rejestrowane w specjalnych detektorach.

Przypomnijmy, że miony mają niezerowy ładunek, więc łatwo je rejestrować, ale w materii są pochłaniane o wiele słabiej, niż wszystkie inne znane cząstki naładowane. Natomiast neutrino oddziałują z materią tak słabo, że nawet w wielokilometrowej warstwie żelaza czy ołowiu oddziałuje mniej niż jedno neutrino na bilion. Wiązka neutrin z rozpadów mezonów przelatuje więc przez wszystkie przesłony praktycznie bez strat, a jej kierunek jest zbliżony do ustalonego wcześniej kierunku lotu mezonów, wybranego tak, aby neutrino trafiły do odległego o setki kilometrów podziemnego laboratorium w Gran Sasso, gdzie mieści się detektor. Schemat układu produkcji wiązki neutrin przedstawiono na rys.1.



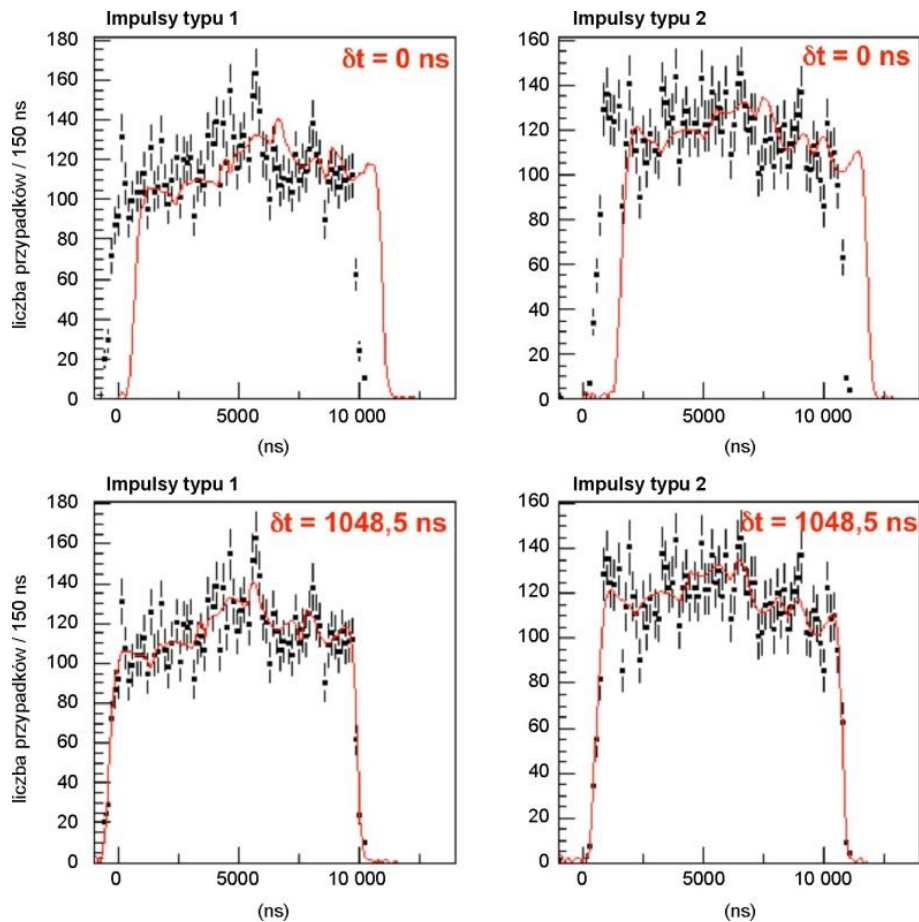
Rys.1. Schemat „linii produkcyjnej” neutrin w CERNie

Proces rozpadu mezonu ma charakter statystyczny. Oznacza to, że nie potrafimy wskazać konkretnego punktu, w którym powstało neutrino zarejestrowane później w detektorze; może się to zdarzyć w dowolnym punkcie kilometrowej komory. Znamy tylko **średni** czas życia mezonu w spoczynku, a znając jego energię możemy obliczyć **średnią** drogę mezonu od tarczy, w której powstał, do punktu rozpadu (czyli punktu, w którym powstało neutrino). Jak więc można obliczyć precyzyjnie drogę i czas przelotu neutrina?

Paradoksalnie, umożliwia to ta sama Szczególna Teoria Względności, z którą niezgodne wydają się ostateczne wyniki. Mezony będące źródłem wiązki neutrin mają energie o dwa rzędy wielkości większe od ich energii spoczynkowych, więc poruszają się z szybkością zaledwie o setne części promila mniejszą od c . Zatem popełnimy bardzo niewielki błąd, zastępując drogę s przebytą przez neutrino drogą s' od tarczy do detektora (którą autorzy eksperymentu wyznaczają z dokładnością do dwudziestu centymetrów!) i równocześnie zastępując czas

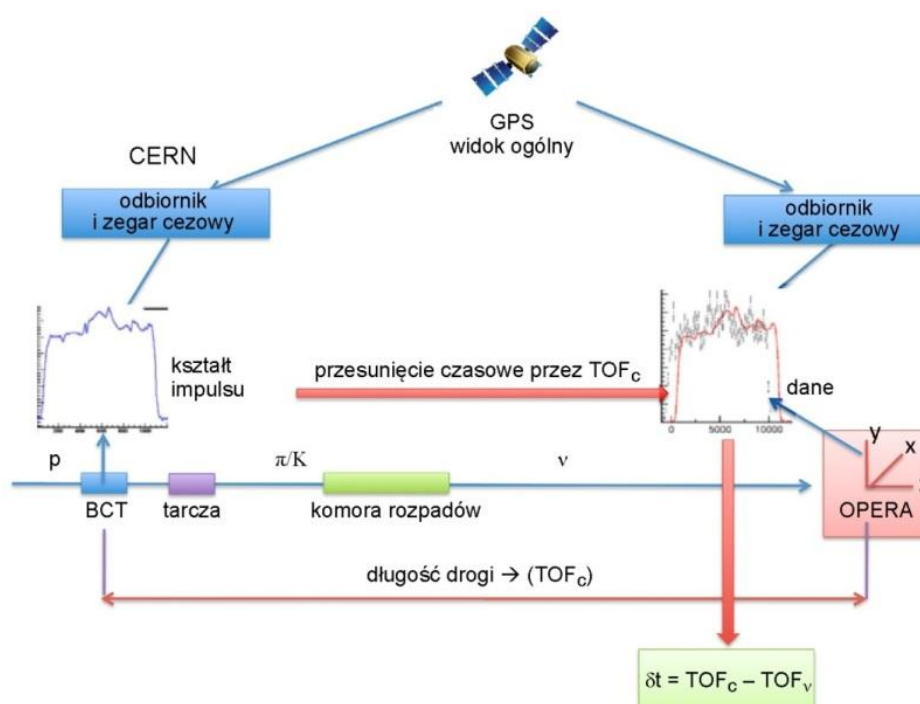
przełotu neutrina t czasem t' , jaki upłynął od uderzenia protonu w tarczę (i powstania mezonu) do rejestracji neutrina. Jeśli neutrina poruszają się z szybkością c , z którą zgodnie z teorią względności powinny się zawsze poruszać cząstki o pomijalnie małej energii spoczynkowej, to między czasem i drogą musi zachodzić z dokładnością lepszą niż jedna milionowa związek $t' = s'/c$.

Oczywiście nie wiemy, który proton wyprodukował mezon, z którego pochodziło dane neutrina zarejestrowane w detektorze. Możemy jednak skorzystać z faktu, że wiązka protonów uderzających w tarczę nie jest „ciągła”, lecz składa się z impulsów, trwających około $10 \mu\text{s}$, których profil czasowy przedstawiono jako ciągłą linię na rys. 2. Rejestrując przełot takiego impulsu można bardzo dokładnie określić początkową i końcową chwilę kolejnych serii zderzeń. Pozwala to na podanie rozkładu wartości czasów, jakie upłynęły od początku każdego impulsu do chwili rejestracji kolejnych neutrin.



Rys. 2. Rozkład czasowy rejestracji neutrin na tle profilu impulsu protonów

Efekty aparaturowe powodują, że nie oczekujemy zgodności tego rozkładu z rozkładem czasowym zderzeń protonów przesuniętym o $t' = s'/c$. Istotnie, dobrą zgodność otrzymujemy przyjmując dodatkowe przesunięcie o 1048,5 ns, jak widzimy na rys. 2. Może ono wynikać z wielu przyczyn, np. poprawek do synchronizacji zegarów przez system GPS i czasów przesłania różnych sygnałów w układzie przedstawionym na rys. 3. Wszystkie te efekty zostały jednak starannie oszacowane i wynikające z nich oczekiwane sumaryczne przesunięcie wynosi 987,8 ns.



Rys. 3. Schemat systemu pomiaru czasu

GPS – *Global Positioning System*, czyli System nawigacji satelitarnej,
 LNGS – *Laboratori Nazionali di Gran Sasso*, czyli Laboratorium Narodowe Gran Sasso,
 UTC – *Universal Time Clock*, czyli Uniwersalny czas koordynowany,
 TOF – *Time of Flight*, czyli Czas przelotu; TOF_c – czas przelotu z prędkością c ,
 BCT – *Beam Change Trigger*, czyli Sygnał zmiany wiązki.

Dane nie są więc zgodne z oczekiwaniami. Jak duża jest rozbieżność? Różnica między zmierzonym i oczekiwanym przesunięciem rozkładów sugeruje, że czas przelotu neutrina jest krótszy od przewidywanego o $(1049,6 - 987,8)$ ns, czyli około 60 ns. Przypomnijmy, że pełny czas przelotu to około $730 \text{ km} / 300\,000 \text{ km/s} \approx 2,4 \text{ ms}$. Zatem różnica to w przybliżeniu 25 milionowych części

przewidywanej wartości. Taką samą względną różnicę otrzymalibyśmy podając czas biegu na czterysta metrów o jedną tysięczną sekundy mniejszy od prawdziwej wartości! Czy ta rozbieżność wyniku z teorią jest znacząca?

Autorzy eksperymentu podają, że ocena łącznej niepewności pomiaru czasu t' i poprawek do niego, wynikających z różnych źródeł, daje zaledwie około 10 ns. Jeśli ta ocena jest poprawna, to prawdopodobieństwo otrzymania sześciokrotnie większej różnicy między wynikiem i przewidywaniami jest niezwykle małe. Ani fluktuacje statystyczne, ani niepewności pomiarów czasów, ani tym bardziej niepewność pomiaru odległości nie mogą wytłumaczyć obserwowanej rozbieżności. Dlatego po kilku miesiącach bezowocnych prób znalezienia możliwego błędu w analizie wyników autorzy zdecydowali się podać je do wiadomości publicznej. Teraz z pewnością fizycy na całym świecie zaczną uważnie analizować warunki eksperymentu i założenia dokonanych obliczeń, a zapewne w niedługim czasie inna grupa spróbuje powtórzyć doświadczenie.

Jednak już obecnie ogłoszone wyniki są kwestionowane w oparciu o wcześniejsze doświadczenia. Jak wspomniano, sto lat badania ruchu obiektów mikro- i makroskopowych nigdy dotąd nie wykazało żadnej niezgodności ze szczególną teorią względności. Badany był jednak zawsze ruch cząstek naładowanych, bo dla nich znacznie łatwiej wyznaczyć drogę i czas przelotu. Nie można więc z góry wykluczyć możliwości, że neutrino to taki szczególny rodzaj cząstek, do których z jakichś przyczyn nie stosuje się bezpośrednio Szczególna Teoria Względności. Pomiaru ruchu neutrin na wielosetkiometrowej drodze, umożliwiające odkrycie tak małej różnicy przewidywanego i mierzonego czasu, odbywają się dopiero od niedawna. Czy musimy więc czekać na wykonanie kolejnego podobnego doświadczenia, aby ocenić prawdopodobieństwo tego, że wyniki eksperymentu OPERA są prawdziwe?

Poważne wątpliwości zgłosiło wielu fizyków. Przykładowo, laureat Nagrody Nobla Sheldon Glashow zauważył, że dla neutrin przekraczających prędkość światła należy oczekiwać promieniowania par elektron-pozyton analogicznego do promieniowania elektromagnetycznego wysyłanego przez cząstki naładowane poruszające się w ośrodku szybciej niż światło (promieniowanie Czerenkowa). Taki efekt powinien zmienić rozkład energii neutrin. Dane z eksperymentu ICARUS, zanalizowane specjalnie w poszukiwaniu takiej zmiany, zgadzają się doskonale z widmem energii oczekiwanym bez dodatkowego efektu. Nie zarejestrowano też obecności dodatkowych par elektron-pozyton. Jednak inne modele „nadświetlnych neutrin” pozwalają na uniknięcie przewidywanej emisji par.

Okazuje się też, że możemy skorzystać z uprzejmości natury. Jak przypomniał natychmiast po ogłoszeniu nowych wyników znany teoretyk z CERNu John Ellis, w roku 1987 zarejestrowano wybuch Supernowej w Obłoku Magellana, około 180 000 lat świetlnych od Ziemi. Pracowały już wtedy trzy wielkie podziemne detektory neutrin i zarejestrowały pojedyncze oddziaływania neutrin

pochodzących z (przewidzianego przez teorię) potężnego ich strumienia. Zgodnie z przewidywaniami teorii, neutrina dotarły do nas niemal równocześnie z błyskiem świetlnym. Gdyby ich szybkość była o 25 milionowych większa od c , jak w wynikach eksperymentu OPERA, neutrina dotarłyby do Ziemi o cztery lata wcześniej! Dwa detektory, które działały już wtedy, nie zanotowały w tym czasie żadnej nadwyżki rejestrowanych neutrin.

Oczywiście nie jest to argument rozstrzygający o nieprawdziwości nowego wyniku. Neutrina z Supernowej miały energie ponad tysiąc razy mniejsze od neutrin z CERNu. Jeśli „nadświetlna” szybkość neutrin zależy od ich energii, można wyobrazić sobie, że różnica między nią i c szybko rośnie z energią. Warto jednak zauważyć, że w eksperymencie OPERA nie znaleziono żadnej różnicy między neutrinami o energii mniejszej i większej od średniej. Dokładniejsze pomiary mogą więc wykluczyć taką możliwość.

Najczęstsze zastrzeżenia wobec opublikowanych wyników dotyczyły analizy statystycznej rozkładu czasowego rejestracji neutrin przypisanych do kolejnych impulsów protonowych. Przypomnijmy, że efekt polega na tym, że rozkład szeroki na ponad 10 000 ns jest przesunięty w stosunku do oczekiwanego czasu przelotu o około 1050 ns, a nie o 990 ns, jak oczekiwano na podstawie analizy działania wszystkich elementów układu doświadczalnego. Autorzy twierdzili, że potrafią wyznaczyć przesunięcie z dokładnością do 10 ns, ale było to kwestionowane. Niektóre analizy danych sugerowały, że równie dobry jest ich opis tłumaczący niezgodności z rozkładem przesuniętym o 990 ns wyłącznie przez fluktuacje statystyczne, bez dodatkowego przesunięcia.

Aby usunąć te wątpliwości, autorzy eksperymentu przeprowadzili specjalny test. Przez dwa tygodnie zbierali dane dla wiązki protonów podzielonej na niezwykle krótkie impulsy, trwające po 3 ns i powtarzane co 524 ns. 18 października ogłoszono wyniki tego testu. Zarejestrowano tylko 20 neutrin, ale każde z nich można było przyporządkować jednoznacznie jednemu z impulsów protonowych. Dla każdego z nich wyznaczono więc osobno czas przelotu. Otrzymane wartości są systematycznie krótsze od oczekiwanych. Średnie obserwowane przesunięcie czasu to $(62,1 \pm 3,7)$ ns, co jest zgodne z poprzednim wynikiem. Zatem zmierzony uprzednio efekt nie był spowodowany błędną analizą statystyczną rozkładu czasów rejestracji neutrin.

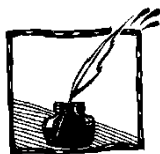
Wypada podać jeszcze kilka liczb. Opublikowane dane pochodzą z zebranych przez trzy lata około stu trylionów (10^{20}) zderzeń protonów z jądrami atomów tarczy, a liczba zarejestrowanych w tym czasie neutrin to około 16 tysięcy. 20 neutrin zarejestrowanych w ciągu dwóch tygodni dodatkowego testu pochodziło z 40 tysięcy bilionów (4×10^{16}) zderzeń protonów z jądrami tarczy. Ilustruje to niezwykłość eksperymentu: w ogromny detektor OPERA trafia oczywiście tylko niewielki ułamek powstających w CERNie neutrin, bo po przebyciu 700 km wiązka neutrin ma prawie kilometr średnicy. Nadal jednak to tysiące bilionów neutrin, więc w przybliżeniu zaledwie jedno neutrino na bilion

oddziałuje w detektorze! Nie jest zatem łatwo zebrać w krótkim czasie takiej liczby oddziaływań, aby sprawdzić wyniki OPERA.

Jeśli wyniki eksperymentu OPERA zostaną potwierdzone, fizykę czeka okres burzliwych dyskusji nad interpretacją danych. Niekoniecznie muszą one oznaczać modyfikację szczególnej teorii względności. Wśród wielu pomysłów teoretyków wypada wymienić możliwy efekt „dodatkowych wymiarów”, przez które „na skróty” mogą poruszać się neutrina. Inne możliwe tłumaczenie wprowadza nowe pola, z którymi oddziaływanie „spowalnia” wszystkie cząstki oprócz neutrin. Sugeruje się też, że za efekt odpowiedzialne są oscylacje zmieniające „zwykłe” neutrina w ich nową, „sterylną”, czyli nieoddziałującą odmianę, która ma niezwykle własności. Z pewnością możliwe są jeszcze inne tłumaczenia. Opublikowano już ponad sto prac cytujących i interpretujących dane OPERA. Na razie jednak znaczna większość fizyków pozostaje sceptyczna.



Detektor OPERA



Niektórzy twierdzą, że świat skończy się w lodzie – Nagroda Nobla z fizyki 2011

Sebastian J. Szybka

Obserwatorium Astronomiczne UJ

Wybitny relatywista, John Wheeler, powiedział kiedyś: „znajdź najdziwniejszą rzecz w jakiegokolwiek dziedzinie, a potem poddaj ją badaniu”. W latach 1998–1999 dwa niezależne zespoły naukowe opublikowały swoje wyniki, z których wynikało, że Wszechświat zawiera cztery razy więcej materii¹ niż przypuszczaliśmy. Ta dodatkowa materia o nieznanym nam naturze, odmiennej od natury zwykłej materii, miała powodować przyspieszenie ekspansji Wszechświata, objawiające się pociemnieniem odległych supernowych szczególnego typu. Chociaż od tego czasu minęło już 13 lat, jest to wynik, który ciągle zadziwia. Od dawna wiedzieliśmy, że Wszechświat ekspanduje. Teraz okazało się, iż tempo ekspansji wzrasta.

W tym roku Nagrodę Nobla z fizyki przyznano właśnie za to odkrycie. Jak napisano w uzasadnieniu, za „odkrycie przyspieszonej ekspansji Wszechświata poprzez obserwacje odległych supernowych”. Nagrodę podzielono pomiędzy trzy osoby: Saul Perlmutter otrzymał połowę, a pozostała połowa przypadła Brianowi P. Schmidtowi i Adamowi G. Riessowi. W osobach tych trzech naukowców zostały nagrodzone dwa zespoły badawcze liczące po kilkadziesiąt osób: *Supernova Cosmology Project* (Saul Perlmutter) oraz *High-z Supernova Search Team* (Brian Schmidt, Adam Riess).



SAUL PERLMUTTER



BRIAN P. SCHMIDT



ADAM G. RIESS

W latach dziewięćdziesiątych oba zespoły konkurowały ze sobą w „polowaniu” na odległe supernowe. Jest kilka typów supernowych. Badaczy interesowa-

¹ Kosmologowie wprowadzają rozróżnienie na promieniowanie, materię i tzw. stałą kosmologiczną („energię próżni”). Dla uproszczenia te dwie ostatnie formy energii określiłem wspólnym mianem materii.

ły supernowe typu Ia, gdyż są one ważne dla kosmologii. Ich analiza umożliwia oszacowanie parametrów pojawiających się w modelu kosmologicznym, a tym samym określenie dynamiki Wszechświata. Pod koniec XX stulecia obydwie grupy niezależnie doszły do tego samego zaskakującego wniosku: odległe supernowe typu Ia są ciemniejsze niż przewidywano. Obserwacja ta zinterpretowana w ramach standardowego modelu kosmologicznego implikuje, iż ekspansja Wszechświata ulega przyspieszeniu, i że Wszechświat w około 73% jest wypełniony nieobserwowaną wcześniej na Ziemi tajemniczą formą egzotycznej materii o ujemnym ciśnieniu (zwaną obecnie ciemną energią). Dzisiaj ciemna energia pozostaje równie ciemna i tajemnicza jak 13 lat temu. Jej istnienie jest pośrednio potwierdzone przez inne obserwacje kosmologiczne, ale najważniejszym argumentem pozostają obserwacje odległych supernowych typu Ia.

Tegoroczny werdykt Królewskiej Szwedzkiej Akademii Nauk nie był nieoczekiwany, bo i pytanie, które motywowało do pracy nagrodzonych naukowców było niebagatelne: „Jaki będzie ostateczny los Wszechświata?”. Nie chodziło więc tutaj o odkrycie umożliwiające zbudowanie szybszych komputerów, czy też bardziej pojemnych twardych dysków, ale o odpowiedź na pytanie fundamentalne. Czy Wszechświat będzie się wiecznie rozszerzał, a jego temperatura będzie zawsze maleć? Cytując fragment wiersza amerykańskiego poety Roberta Frosta: „niektórzy twierdzą, że świat skończy się w ogniu, a niektórzy, że w lodzie”. Jeśli prędkość ekspansji Wszechświata będzie zawsze wzrastać to czeka nas ta druga ewentualność.

W praktyce droga od nagrodzonych obserwacji do wniosku co do losów Wszechświata jest dosyć daleka. Nie chodzi mi tutaj o możliwe błędy systematyczne, bo za ich brak Akademia zaręczyła swoim autorytetem. Jak wiadomo, każdy wynik obserwacyjny ma sens tylko w ramach pewnej teorii. Jest oczywiste jak zmierzyć długość stołu, ale tylko wtedy, jeśli stół i precyzja pomiaru są typowe dla skal, z którymi nasz mózg miał do czynienia w trakcie ewolucji. Poza tymi skalami „zdroworozsądkowe” procedury zawodzą. Heisenberg napisał kiedyś o mikroświecie mechaniki kwantowej: chcemy opisać zjawiska, dla których „nasz język nie ma słów”. Na drugim końcu skali wielkości, również bardzo odległym od naszego codziennego doświadczenia, znajduje się kosmologia. Tradycyjny sposób pojmowania odległości traci w niej sens. Na przestrzeni stuleci nauka wypracowała sobie sposób radzenia z tego typu problemami. Przewodnikiem po obcych nam obszarach okazała się być matematyka. Nikt nie wie, dlaczego Wszechświat okazał się być matematyczny, choć to pytanie jest najważniejszym pytaniem nauki.

Zastanówmy się więc na czym polegały nagrodzone obserwacje i jak na ich podstawie można próbować wyciągać wnioski co do materii wypełniającej Wszechświat oraz jego ostatecznego losu. Rozglądnijmy się dookoła. Z dużą dozą pewności mogę stwierdzić, że gdzieś w zasięgu naszego wzroku znajduje się żarówka. Jak zmierzyć odległość do niej nie ruszając się z miejsca? Dla

prostoty założmy, że żarówka świeci izotropowo (tak samo we wszystkie strony) oraz, że znajdujemy się w zaciemnionym pokoju bez dodatkowych źródeł światła. Jeśli znamy moc żarówki (moc oznaczmy przez P) to wiemy, ile energii wysłała ona w czasie Δt ($\Delta E_0 = P\Delta t$). Z lekcji anatomii wiadomo, z jakiej powierzchni oko „zbiera” światło docierające do naszej siatkówki (to pole powierzchni oznaczmy przez A). Jeśli znaleźlibyśmy sposób na zmierzenie ilości energii (ΔE_1) docierającej do naszej siatkówki w czasie Δt , to łatwo moglibyśmy obliczyć odległość d oka od żarówki. Zauważmy, że w odległości d od żarówki energia ΔE_0 jest rozłożona na powierzchni sfery $4\pi d^2$. Oznacza to, że w czasie Δt do naszej siatkówki powinna dotrzeć energia $\Delta E_1 = \frac{A \Delta E_0}{4\pi d^2}$. Obliczając z tego równania wielkość d otrzymujemy

$$d = \left(\frac{\Delta E_0}{\Delta E_1} \frac{A}{4\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{P\Delta t}{\Delta E_1} \frac{A}{4\pi} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Wzór ten można zapisać w bardziej elegancki sposób $d = \left(\frac{A}{\Delta\delta} \right)^{\frac{1}{2}}$, gdzie $\Delta\delta$ oznacza kąt bryłowy, w który zostały wypromieniowane fotony zarejestrowane przez nasze oko i $\Delta\delta = \frac{4\pi \Delta E_1}{\Delta E_0}$. Jeszcze inny sposób zapisu to $d = \left(\frac{P}{4\pi S} \right)^{\frac{1}{2}}$,

gdzie $S = \frac{\Delta E_1}{A\Delta t}$ oznacza gęstość strumienia energii padającego na naszą siatkówkę. Jakkolwiek nasz sposób pomiaru odległości może wydawać się bardziej skomplikowany niż pomiar za pomocą sznurka, to proszę zauważyć, że w opisany przeze mnie sposób można próbować zmierzyć odległość do obiektów, do których nie możemy bezpośrednio dotrzeć, np. do gwiazd.

Przy przejściu od obserwacji żarówek do obserwacji obiektów astronomicznych pojawiają się nowe problemy. Nasze naturalne rozumienie odległości do danego obiektu nie może być ekstrapolowane na skale astronomiczne. Jeśli znamy moc P danego obiektu, to ciągle możemy obliczać odległość ze wzoru

$$d = \left(\frac{P}{4\pi S} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Okazuje się, że tak obliczona wielkość ma niewiele wspólnego

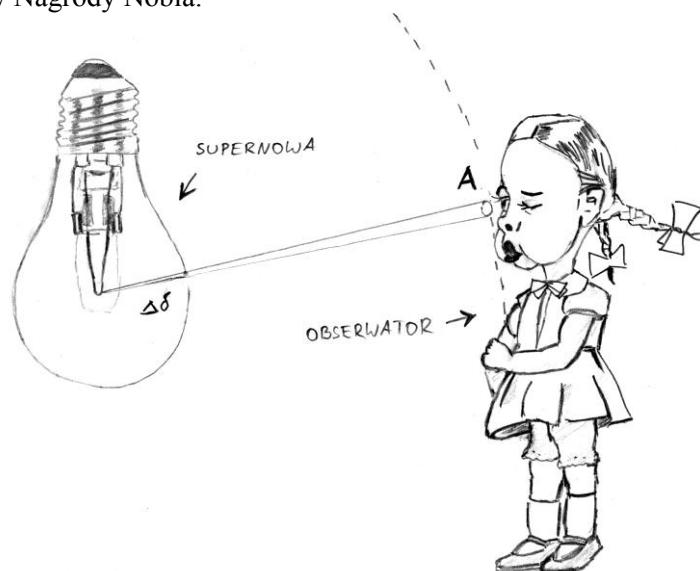
z tym, co powszechnie uznaje się za odległość. Ze względu na rozszerzanie się Wszechświata, rozumowanie, które przeprowadziliśmy dla żarówek należałoby uściślić i uzupełnić o nowe elementy. W przypadku dużych odległości wielkość

$$d = \left(\frac{P}{4\pi S} \right)^{\frac{1}{2}}$$

nie musi nawet być monotoniczną funkcją czasu potrzebnego na

dotarcie do danego obiektu, więc aby uniknąć zamieszania, tak obliczoną odle-

głość d oznacza się symbolem d_L i określa się mianem *odległości jasnościowej*. Pomimo tych niedogodności odległość jasnościowa stała się ważnym narzędziem współczesnej kosmologii, skutecznie wykorzystanym przez tegorocznych laureatów Nagrody Nobla.



Warunkiem koniecznym do dokonania pomiaru odległości jasnościowej d_L danego obiektu jest znajomość wartości mocy P . Gęstość strumienia energii S mierzy się lokalnie i jego pomiar nie nastręcza trudności. Oba zespoły badawcze, których przedstawiciele zostali nagrodzeni, prześcigały się w wyszukiwaniu supernowych typu Ia. Ilość energii uwalniana w tych wybuchach jest zawsze podobna, dlatego można je traktować jak żarówki o ustalonej i tej samej mocy. Z tego powodu nazywa się je *świecami standardowymi*.

W dużej skali dominują oddziaływania grawitacyjne. Wśród większości ludzi intuicyjne rozumienie grawitacji pokrywa się z jej newtonowską interpretacją. Niestety, próbując opisać cały Wszechświat za pomocą tej teorii, napotyka się na problemy, których nie sposób rozwiązać. Żeby pokonać trudności trzeba sięgnąć po teorię dającą lepsze zrozumienie tego czym jest grawitacja. Opisuując obiekty oddziałujące grawitacyjnie w teorii Newtona wykorzystuje się dwa pojęciowo niezależne parametry: masę bezwładną ciała (będącą miarą tego, jak trudno zatrzymać dane ciało, jeśli porusza się ono z ustaloną prędkością względem obserwatora) oraz masę ciężką, która jest ładunkiem grawitacyjnym analogicznym do elektrycznego, czyli określa siłę oddziaływania grawitacyjnego pomiędzy dwoma ciałami. Koncepcyjnie są to dwa różne pojęcia. Okazuje się jednak, że pomiar eksperymentalny tych dwóch różnych mas daje te same wyniki z bardzo dużą dokładnością. Należy więc sądzić, że masa bezwładna i cięż-

ka to jedno i to samo, a odmienność definicyjna tych wielkości jest niepożądaną cechą teorii Newtona. Obierając ten prosty fakt za przewodnią latarnię można dojść do teorii, w ramach której staje się możliwy opis Wszechświata „jako całości”. Opis ten jest pierwszym modelem kosmologicznym w historii ludzkości, który spełnia warunki nowożytnej nauki, tzn. w jego ramach można formułować przewidywania, które z dużą dokładnością są potwierdzane obserwacyjnie. Teoria, o której mowa, to ogólna teoria względności Einsteina.

Przy założeniu, że materia we Wszechświecie jest rozłożona jednorodnie, oraz, że Wszechświat jest izotropowy, a my nie zajmujemy w nim wyróżnione go miejsca, teoria Einsteina implikuje, że Wszechświat w chwili obecnej rozszerza się lub kurczy. Obserwacje astronomiczne odległych galaktyk, które zostały przeprowadzone w pierwszej połowie XX wieku, pokazały, że odległe galaktyki oddalają się od nas. Wysyłane przez nie światło jest przesunięte ku czerwieni tym bardziej, im dalej znajdują się one od nas. Przesunięcie ku czerwieni oznacza się literą z i definiuje się jako $1 + z = \lambda_o/\lambda_e$, gdzie λ_o , λ_e oznaczają długość fali obserwowanego i emitowanego światła. Efekt ten jest w pewnym stopniu podobny do zmiany częstotliwości dźwięku oddalającego się pociągu.

Dla galaktyk, które nie są zbyt daleko ani zbyt blisko, odległość można oszacować ze wzoru $d = zc/H_0$, gdzie H_0 jest tzw. stałą Hubble’a, a c to prędkość światła. Oprócz H_0 w modelu kosmologicznym pojawiają się jeszcze inne parametry. W szczególności można obliczyć teoretyczną krzywą zależną od tych parametrów: odległość jasnościową $d_L(z)$ w funkcji przesunięcia ku czerwieni z . Laureaci tegorocznej Nagrody Nobla dopasowali krzywą teoretyczną do danych obserwacyjnych opartych na obserwacjach supernowych typu Ia. Na tej podstawie oszacowano parametry kosmologiczne. Jeden z tych parametrów to tzw. *stała kosmologiczna*. Jest ona fizycznie interpretowana jako niezmienna w czasie i przestrzeni gęstość pewnej specyficznej formy materii mającej ujemne ciśnienie. Dodatnia wartość tej stałej (wyznaczona przez obie grupy badawcze), implikuje przyspieszanie ekspansji Wszechświata. Po prostu supernowe typu Ia dla danej wartości przesunięcia ku czerwieni są ciemniejsze, niż gdyby stała kosmologiczna była równa zero.

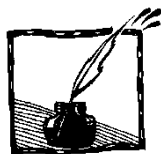
Stała kosmologiczna jest wolnym parametrem w równaniach Einsteina i jej wartość zastanawiała kosmologów od wielu lat. Obserwacje odległych supernowych typu Ia mogą być wytłumaczone za jej pomocą bez wprowadzania innych egzotycznych form materii. Dlaczego więc stałą kosmologiczną wrzuca się do jednego worka z innymi, o wiele bardziej hipotetycznymi formami tzw. ciemnej energii, albo rozważa się alternatywne modele kosmologiczne, w których pociemnienie odległych supernowych nie implikuje przyspieszonej ekspansji? Otóż, wartość stałej kosmologicznej wyznaczona z obserwacji kosmologicznych jest 10^{120} razy mniejsza niż się spodziewano na podstawie innych teorii. Co więcej obecna gęstość zwykłej materii jest zbliżona do gęstości egzotycznej materii związanej ze stałą kosmologiczną. Skoro pierwsza z tych gęsto-

ści zmienia się w czasie, a druga pozostaje stała, ich równość implikuje, że żyjemy w bardzo szczególnym momencie istnienia Wszechświata. Fizycy nie lubią takich tajemniczych koincydencji, więc poszukują mechanizmu, który mógłby wytłumaczyć ten zbieg okoliczności.

Tegoroczna Nagroda Nobla jest w pewien sposób nietypowa. Została przyznana za obserwacje, których implikacje nie są jeszcze w pełni zrozumiane. Nazwa „ciemna energia” najlepiej oddaje naszą niewiedzę. Tym razem nie nagrodzono odpowiedzi, lecz sformułowanie pytania. Co powoduje pociemnienie odległych supernowych typu Ia? Czy Wszechświat naprawdę „skończy się w lodzie”? Warto szukać rozwiązania tej zagadki. Niewątpliwie zostanie ono nagrodzone kolejną Nagrodą Nobla.



Supernowa 1994D położona na obrzeżach galaktyki soczewkowej NGC 4526



Muzyka kwantów (I)

Piotr Zieliński

*Instytut Fizyki Politechniki Krakowskiej
i Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie*

Profesorowi Bronisławowi Średniawie

Od przyzwyczajania do analogii

Mechanika kwantowa należy do tych działów fizyki, które – mimo niezaprzeczalnych sukcesów w wyjaśnianiu zjawisk znanych i przewidywaniu nowych – wciąż budzą dyskusje i wywołują poczucie niedosytu zrozumienia. Dzieje się tak dlatego, że aparat pojęciowy mechaniki kwantowej charakteryzuje się wysokim stopniem abstrakcji. Dochodzenie do wyników sprawdzalnych doświadczalnie, a więc jakoś „namacalnych”, wymaga obliczeń przy użyciu obiektów matematycznych niełatwo przemawiających do intuicji, a i sam sposób wykorzystania tych wyników do opisu obserwacji i pomiarów wydaje się – z powodu występujących tam tworów tak dziwnych, jak amplitudy prawdopodobieństwa – mało bezpośredni, wykraczający poza ramy samej teorii, a nawet angażujący odczucia subiektywne, lub wymagający obecności świadomego obserwatora [1]. W swoim podręczniku mechaniki kwantowej prof. Kacper Zalewski pisze „W tych warunkach powstaje pytanie, co to znaczy wy tłumaczyć komuś mechanikę kwantową?” i proponuje odpowiedź, że „[...] polega to na próbie pokazania, jak się w praktyce stosuje mechanikę kwantową do konkretnych problemów.” [2]. Mój wykładowca tego przedmiotu na Uniwersytecie Jagiellońskim, prof. Bronisław Średniawa mawiał, że do zrozumienia mechaniki kwantowej nie wystarczają jedynie słowa i wzory matematyczne – potrzebne są czasem także i gesty. Znana jest też świetna książka S. Brandta i H.D. Dahmena *Mechanika kwantowa w obrazach* [3].

Z upływem czasu osoba posługująca się w swej pracy mechaniką kwantową przyzwyczajają się do wypracowanych tam reguł – a jak wiadomo, przyzwyczajenie staje się drugą naturą – lub też – gdy jednak nie może się całkiem przyzwyczaić – poszukuje analogii w innych zjawiskach opisywanych za pomocą podobnych pojęć matematycznych [4]. W przypadku mechaniki kwantowej naturalnym źródłem takich analogii są drgania i ruchy falowe. Mechanika kwantowa zwana jest wszak także mechaniką falową, gdyż rozwiązania obowiązujących tam równań prawie zawsze mają postać fal biegnących w przestrzeni, lub „stojących” w pewnych obszarach ograniczonych. W tym drugim przypadku funkcje falowe są bliskim analogiem drgań własnych różnych przedmiotów, tj. drgań, które te przedmioty wykonują, gdy wprowadzone w ruch są pozostawione same sobie: gong uderzony młotkiem, czasza dzwonu zderzona z jego sercem, szarpnięta struna gitary... Powietrze przenosi te drgania do naszych uszu

za pośrednictwem fal zagęszczeń i rozrzedzeń, skutkiem czego drgania te wywołują w nas wrażenia dźwiękowe. Można więc spróbować zapytać, jak brzmiałyby obiekty kwantowe, gdyby występujące tam fale i stany własne nie były kontrowersyjnymi „amplitudami prawdopodobieństwa” [5], lecz amplitudami drgań jakichś przedmiotów. Innymi słowy, po mechanice kwantowej we wzorach, obrazach i gestach można spróbować przedstawić mechanikę kwantową w dźwiękach. Kilka przykładów chciałem przedstawić w tym artykule.

Ton prosty i kwantowy stan ustalony, wysokość dźwięku i poziom energetyczny

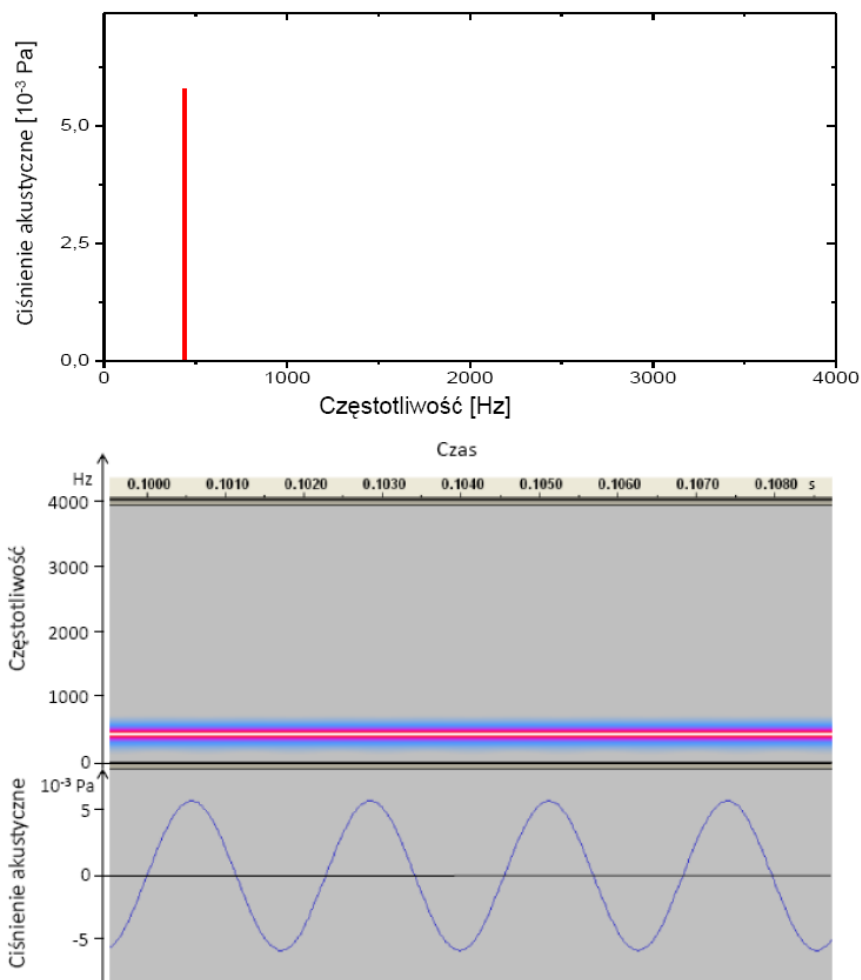
Układ mechaniczny, który wytracony z położenia równowagi wykonuje ruch opisany pojedynczą sinusoidą jest prototypem – ale też wszechobecnym składnikiem – wszystkich instrumentów muzycznych mogących wytwarzać dźwięki o określonej wysokości. Sinusoidalna fala zagęszczeń i rozrzedzeń powietrza docierająca do narządów słuchu wywołuje bowiem wrażenie dźwięku o dobrej określonej wysokości logarytmicznie zależnej od liczby tych zagęszczeń w jednostce czasu. Liczbę zagęszczeń – grzbietów fal w jednostce czasu nazywa się częstością, lub – dla odróżnienia od średniej liczby wystąpienia jakiegoś zjawiska przypadkowego – częstością drgań. Można więc wahania nadwyżki ciśnienia ponad ciśnienie atmosferyczne, tj. tzw. ciśnienie akustyczne p , w takim sygnale – zwanym tonem prostym – opisać wzorem $p = p_0 \cos(2\pi ft + \varphi)$, gdzie p_0 jest amplitudą ciśnienia akustycznego, f częstością tonu, a φ początkową fazą sygnału. Dla uproszczenia niektórych obliczeń taki oscylujący sygnał podaje się w postaci zespolonej

$$p = \bar{p}_0 e^{-i2\pi ft}, \text{ gdzie } \bar{p}_0 = p_0 e^{-i\varphi}.$$

Oczywiście ciśnienie nie może być liczbą zespoloną, dlatego w tym zapisie prawdziwym ciśnieniem akustycznym jest część rzeczywista podanego wyrażenia:

$$p = \operatorname{Re}(\bar{p}_0 e^{-i2\pi ft}) = \operatorname{Re}(\bar{p}_0) \cos(2\pi ft) + \operatorname{Im}(\bar{p}_0) \sin(2\pi ft) = p_0 \cos(2\pi ft + \varphi).$$

Widelki stroikowe – kamerton – są tak skonstruowane, aby wytwarzany przez nie sygnał możliwie wiernie przypominał ton prosty. Częstość widłek strojowych wynosi zazwyczaj 440 cykli na sekundę (herców), ponieważ zgodnie z międzynarodowymi umowami tej właśnie częstości odpowiada wzorcowa wysokość dźwięku „a-razkreślne”, nr 69 w systemie MIDI. Rysunek 1 przedstawia widmo – czyli wykres amplitud sinusoid, z których można złożyć dany sygnał dźwiękowy w funkcji częstości – dla tonu prostego. Ponieważ w tonie prostym jest tylko jedna sinusoida, widmo składa się z jednego tylko słupka, czyli linii widmowej. Spektrogram, to wykres częstości w zależności od czasu. Na rys. 1 widać więc jedną linię poziomą, poniżej której przedstawiono przebieg czasowy dobiegającego do ucha ciśnienia akustycznego.



Rys. 1. Widmo, spektrogram (tj. zależność częstotliwości od czasu) oraz przebieg czasowy ciśnienia akustycznego w tonie prostym

Nie jest mi znane pochodzenie i biologiczna funkcja logarytmicznej zależności wysokości dźwięku od częstotliwości. Przypomina ona znane prawo Webera-Fechnera, orzekające, że wrażenie jest proporcjonalne do logarytmu intensywności bodźca. W ten sposób postrzegamy jasność świecącego obiektu, np. dalekiej gwiazdy, w funkcji jego odległości od obserwatora albo zależność głośności dźwięku od jego natężenia. W tych przypadkach mamy do czynienia z realizacją instynktu samozachowawczego: krzywa logarytmiczna staje się coraz bardziej pozioma i płaska, gdy jej argument przyjmuje duże wartości, co zabezpiecza organizm przed zbyt intensywną reakcją na bodźce bardzo silne.

Z drugiej strony, dla bodźców bardzo słabych, stosunkowo duża szybkość narastania krzywej logarytmicznej pozwala rozpoznać i zróżnicować bodźce o natężeniu bliskim progowi wrażliwości. Funkcja logarytmiczna jest tu zwykle pewnym przybliżeniem. Tymczasem różnice wysokości dźwięków, zwane interwałami, które tworzą melodię, odpowiadają bardzo dokładnie stałym stosunkom częstotliwości, co oznacza, że proporcjonalność wysokości dźwięku do logarytmu częstotliwości jest spełniona z wielką dokładnością. Już niewielka zmiana tych stosunków jest zauważalna. Znają to dobrze słuchacze utworów z epok poprzedzających temperację stroju. Te same utwory grane na instrumentach dawnych, strojonych w różnych odmianach stroju naturalnego, brzmią znacząco inaczej, niż gdy je słyszymy na instrumentach współczesnych w stroju zbliżonym do równomiernie temperowanego. Codziennym przykładem tego zjawiska jest też „falszowanie” znanych piosenek. Transpozycja polegająca na pomnożeniu wszystkich częstotliwości przez wspólny czynnik nie jest odbierana jako falszowanie (może z wyjątkiem osób obdarzonych słuchem absolutnym, które rozpoznają nie tylko interwały, ale i bezwzględną częstotliwość). Czyżby zatem nasze narządy słuchu znały klasyczną relację proporcjonalności między energią a częstotliwością $E \sim f^2$, albo przeczuwały obowiązującą w mechanice kwantowej odpowiedniość między energią, a częstotliwością

$$E = hf \text{ ?}$$

Oznaczałoby to, że nasz organizm, broni się przed nadmierną energią, zmniejszając swoją wrażliwość, gdy energia ta staje się zbyt duża.

Wydaje się, że w percepcji promieniowania elektromagnetycznego nie ma zjawiska analogicznego do wysokości dźwięku. Nie ma żadnych „interwałów świetlnych”, a związek między energią a kolorem światła jest jednoznaczny tylko w przypadku fal monochromatycznych [6].

Sygnal sinusoidalny ma pewną charakterystyczną właściwość, którą najłatwiej zauważyć używając liczb zespolonych. Mianowicie gdybyśmy zmienili początkową chwilę liczenia czasu, czyli zamienili t na $t + t_0$, to ani amplituda, ani częstotliwość, ani też kształt sygnału nie ulegną zmianie. Matematycznie takie przesunięcie czasu spowoduje tylko pomnożenie całej liczby o module równym 1, albo – równoważnie – przesunięcie fazy sinusoidy

$$p(t + t_0) = p(t)e^{-i2\pi ft_0}.$$

Funkcje, które przy przesunięciu czasu zostają tylko pomnożone przez stały czynnik, niezmienny ich amplitudy, opisują drgania własne w świecie, w którym czas płynie równomiernie i to zarówno w przód jak i w tył. Ostatnie wymaganie jest trochę dziwne, właściwie niedorzeczne. Rzeczywiście odwracalność biegu czasu oznacza m.in., że nie ma strat energii. Straty energii jednak w naszym świecie zawsze istnieją, co powoduje, że sinusoidalne drgania nawet

najlepszych widełek strojowych zawsze są trochę tłumione, aż wreszcie całkiem zanikają. Natomiast stała częstotliwość i tym samym stała wysokość dźwięku przedmiotów drgających jest zjawiskiem łatwym do zauważenia. Stąd wszechobecność ruchów sinusoidalnych – zawsze nieco jednak tłumionych przez opór powietrza, tarcie wewnętrzne i wreszcie promieniowanie fali dźwiękowej – w otaczającej nas rzeczywistości. Czas przecież płynie równomiernie...

Plik 1. [Tony Proste.mp3](#)* przedstawia tony proste o różnych częstotliwościach, tak dobranych, aby tworzyły temat bachowskiej *Sztuki Fugi* [7]. Ilustracja tym bardziej zbliża się do prawdziwych tonów prostych im ciszej jest odtwarzana, ponieważ wszystkie urządzenia odtwarzające, a nawet nasz narząd słuchu wprowadzają zawsze pewne zniekształcenia rosnące z amplitudą sygnału. Dźwięki związane z okresowymi zmianami ciśnienia akustycznego charakteryzują się swoją wysokością dźwięku i przez to wyróżniają się spośród innych wrażeń dźwiękowych. Do tego stopnia, że ich wydobywanie stało się najistotniejszym elementem sztuki, jaką jest muzyka.

Równania mechaniki kwantowej są inne od tych, które rządzą ruchem widełek strojowych. Inna jest też poszukiwana funkcja. Nie jest nią żadna wielkość fizyczna, taka jak ciśnienie akustyczne, lecz tzw. funkcja falowa: dziwny twór oznaczany literą Ψ , niosący jednak całą dostępną – niestety, nie tak kompletną jak w przypadku obiektów klasycznych – informację o układzie. Ale i tam obowiązuje równomierność upływu czasu i dlatego funkcja falowa kwantowego stanu ustalonego ma taką samą postać matematyczną, jak ciśnienie akustyczne w tonie prostym.

$$\Psi(t) = A_0 e^{-i2\pi ft},$$

tj. oscyluje ze stałą częstotliwością f , której odpowiada energia $E = hf$, częściej niż częstotliwość używana w rozważaniach kwantowomechanicznych. Przelicznik częstotliwości na energię – stała Plancka – jest bardzo dobrze znany, choć nikt chyba nie wie, dlaczego jego wartość wynosi akurat

$$h = 6,626\ 069\ 57(29) \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}.$$

Ta wartość jest tak mała, że kwanty drgań akustycznych, zwane fononami, mające energie $E = hf$ dostępne są dla pomiarów, np. przy zderzeniach z neutronami (jakże użytecznymi w badaniach ruchów atomów w ciałach stałych!), dopiero przy częstotliwościach rzędu teraherców. W zakresie słyszalnym, tj. $16 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$ pojedynczych fononów nie da się ani zarejestrować żadnym urządzeniem ani, tym bardziej, usłyszeć. Ich energie są za słabe, a ich liczba potrzebna do wywołania wrażenia słuchowego tak duża, że odbieramy tylko efekt zbiorowy, podobnie jak w zakresie widzialnym nie dostrzegamy pojedynczych fotonów (cz. II, rozdz. „Granica klasyczna”). W istocie jednak, w oby-

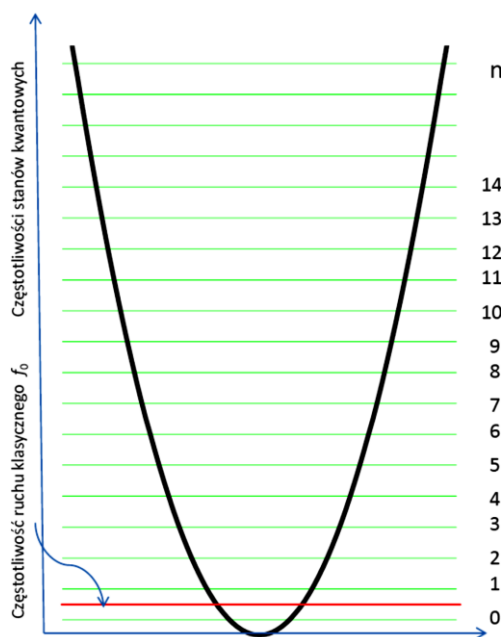
* Na szaro zaznaczono przykłady plików muzycznych, dostępnych w wersji internetowej *Fotonu*.

dwu przypadkach: ciśnienia akustycznego i pola elektromagnetycznego mamy do czynienia z amplitudą prawdopodobieństwa pewnych kwazicząstek [5].

Wielotony i superpozycja stanów

Ton prosty jest ilustracją stanu kwantowego o zadanej energii, czyli stanu stacjonarnego, ustalonego, w którym układ znajduje się ciągle na jednym poziomie energetycznym. Można by zapytać czy istnieją układy kwantowe, które tak jak widelki stroikowe, miałyby tylko jedną częstotliwość własną. Nie znam takiego przykładu. Zresztą i w świecie instrumentów muzycznych jest to sytuacja też wyjątkowa i przybliżona. Widelki strojowe mają także inne częstotliwości własne, tylko są one tak oddalone od tej jednej wzorcowej, że nie zaburzają istotnie sinusoidalnego charakteru ruchu. Dokładnie jedną częstotliwość własną miałyby punktowa – więc wyidealizowana – masa na nieważkiej – a więc jeszcze bardziej wyidealizowanej – sprężynie. Spróbujmy zatem zobaczyć jak zachowywałyby się widelki strojowe, lub ich wyidealizowany model zwany oscylatorem harmonicznym, gdyby były układem kwantowym. W tym celu narysujemy energię potencjalną w zależności od rozchylenia widełek. Ma ona postać otwartej ku górze paraboli. Rozwiązanie kwantowego problemu pojedynczej cząstki w takim potencjale przewiduje cały szereg częstotliwości własnych. Widać je na rys. 2 w postaci (zielonych) linii poziomych. Tworzą one „drabinkę” o szczeblach równoodległych z wyjątkiem najniższego, którego odległość od dna paraboli jest o połowę mniejsza. Mechanika kwantowa stwierdza, że taki oscylator harmoniczny może przyjmować energie zadane przez szczeble tej drabinki. Odizolowany od wszelkich oddziaływań, a także od fluktuacji próżni (wszędzie jednak w istocie obecnych, trochę podobnie do wszechobecnego tłumienia dźwięku) kwantowy oscylator harmoniczny pozostaje stale na jednym ze swych poziomów energetycznych – na jednym szczeblu drabinki poziomów. Szczeble tych jest nieskończenie wiele. Zatem repertuar tonów prostych oscylatora kwantowego jest nieporównanie bogatszy od jego klasycznego pierwowzoru. Przykład 2. [Tony_Oscylatora_Kwantowego.mp3](#) przedstawia je po kolei. Jest to taka sama sekwencja tonów, $f_n = f_0(n - 1/2)$ $n = 1, 2, 3, \dots$ jaką można wydobyć z piszczałki, np. organowej, zamkniętej na jednym i otwartej na drugim końcu. Wielkość f_0 jest tutaj częstotliwością najniższego tonu, jaki wydałaby ta sama piszczałka, gdyby była dwa razy dłuższa i zamknięta z obu końców. Jest to też częstotliwość drgań klasycznego oscylatora harmonicznego o tej samej masie i tym samym potencjale, co na rys. 2. Dlaczego pojedynczy obiekt kwantowy: punktowa masa na nieważkiej sprężynie ma tak skomplikowany układ poziomów energetycznych, jak blaszany, czy też drewniany cylinder, do tego wypełniony gazem? Dzieje się tak dlatego, że opis kwantowy nawet pojedynczej cząstki punktowej zakłada jej obecność, albo przynajmniej prawdopodobieństwo obecności, w całej przestrzeni. Poszukiwana funkcja fa-

lowa – amplituda prawdopodobieństwa, tj. wielkość, której kwadrat modułu określa prawdopodobieństwo przebywania cząstki w jednostce objętości – jest zatem obiektem rozciągłym w nie mniejszym stopniu niż gęstość gazu w obszarze piszczałki. Drgania własne obiektów rozciągniętych bywają liczne, ale gdy obiekty te są ograniczone w przestrzeni (piszczałka jest ograniczona swą długością i promieniem), to częstotliwości drgań własnych tworzą zbiór dyskretny: drabinkę częstotliwości odpowiadającą możliwym falom stojącym. Podobnie jest z układami kwantowymi, punktowa cząstka w parabolicznym potencjale nie może uciec do nieskończoności i dlatego jej poziomy energetyczne tworzą dyskretną drabinkę. Problem znalezienia układu mechanicznego o zadanym zbiorze częstotliwości własnych jest znany i trudny. Nazywa się zagadnieniem odwrotnym. Nie będziemy go tu rozpatrywać. Zadowolmy się tym, że kwantowy oscylator i piszczałka zamknięta z jednego końca mają identyczne, z dokładnością do czynnika, częstotliwości własne.



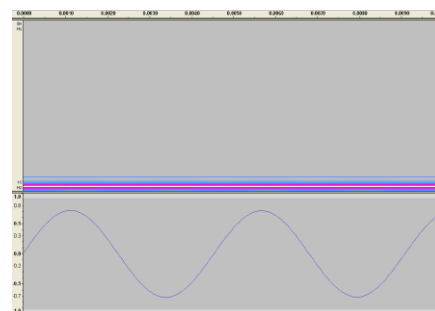
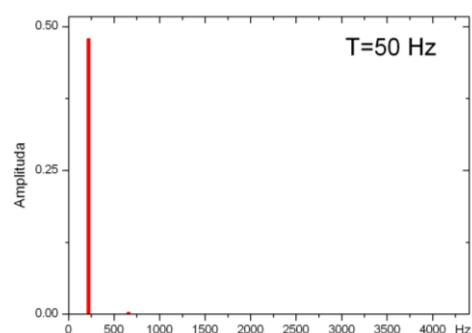
Rys. 2. Energia potencjalna (linia czarna), częstotliwości kwantowych stanów własnych energii (linie zielone) oraz częstotliwość klasyczna (linia czerwona) oscylatora harmonicznego

Znawców instrumentów muzycznych nie dziwi fakt, że drgający obiekt wytwarzający dźwięk wykonuje na raz kilka swych drgań własnych. Wytwarza się w ten sposób wieloton. W przypadku piszczałki amplituda poszczególnych tonów prostych, zależy to od sposobu zadęcia oraz od liczby i kształtu dodatkowych otworów. W przypadku struny – od miejsca, w którym się ją potrąci i od

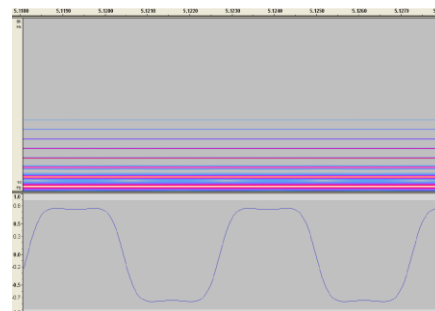
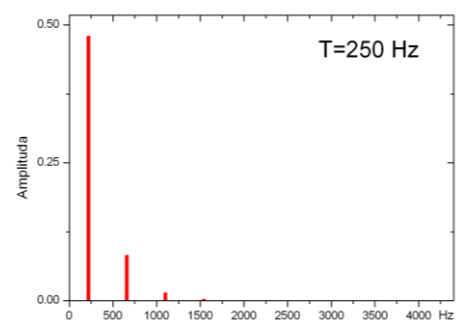
kształtu elementu wywołującego ruch: może to być palec gitarzysty, albo jego plastikowe piórko, kucze pióro w klawesynie, albo filcowy młoteczek w fortepianie. Za każdym razem drgania własne występują z różnymi amplitudami zależnie od sposobu wydobycia dźwięku. Zbiór tych amplitud – widmo dźwięku – określa jego barwę. Gdy wzbudzonych jest wiele drgań własnych, układ znajduje się w superpozycji swych stanów wibracyjnych. Oczywiście również układy kwantowe mogą się znajdować w superpozycji swych stanów. Które z tych stanów i z jakim prawdopodobieństwem znajdują się w danej superpozycji zależy od tzw. przygotowania stanu, tj. od tego, jakie były chwilowe prawdopodobieństwa obsadzenia stanów własnych w momencie, gdy układ został pozostawiony samemu sobie: zupełnie analogicznie do tego, w jaki sposób szarpnięcia struny przygotowuje superpozycję jej drgań własnych. O ile dla muzyka zjawisko superpozycji drgań jest zupełnie normalne, a składowe tony proste mają specjalną nazwę – „aliquoty”, o tyle możliwość występowania obiektów kwantowych w superpozycji stanów niepokoiła twórców mechaniki kwantowej i wywołuje dyskusje do dziś. Któż nie słyszał o słynnym „kocie Schrödingera”, zamkniętym w pudle wraz z układem kwantowym w superpozycji dwóch stanów, z których jeden uśmierca zwierzę? Kot miałby być na raz żywy i martwy...

Posłuchajmy kilku superpozycji stanów kwantowego oscylatora harmonicznego czyli tonów prostych z poprzedniego przykładu, teraz jednak brzmiących naraz. Amplitudy poszczególnych tonów prostych zostały tu zadane poprzez funkcję $p_{0n} = e^{-f_n/T}$. Jeżeli parametr T oznaczałby temperaturę pomnożoną przez stałą Boltzmanna k i podzieloną przez stałą Diraca $\hbar = h / 2\pi$, to taki rozkład amplitud odpowiadałby zespołowi – chórowi nieoddziałujących oscylatorów w tej właśnie temperaturze. Przykłady 3a,3b. [OscylatorKwantowyRosnacaTemperatura.mp3](#), [OscylatorKwantowyRosnacaTemperaturaCiagly.mp3](#) ilustruje brzmienie tego chóru przy rosnącej temperaturze. Rysunek 3 przedstawia widma, spektrogramy i przebiegi ciśnienia akustycznego z przykładu [OscylatorKwantowyRosnacaTemperaturaCiagly.mp3](#). Słuchacz zauważy, że gdyby zaśpiewać kolejne dźwięki tego przykładu, to wysokość ich będzie zawsze taka sama. Dźwięk jest jednak coraz bardziej jasny, jaskrawy. Obrazuje to następującą prawidłowość: wysokość dźwięku jest określona przez okresowość sygnału (rys. 3 przekonuje, że dodawanie poszczególnych tonów prostych nie zmienia w tym wypadku okresu drgań), zaś barwę dźwięku określa jego widmo, tj. zbiór amplitud poszczególnych tonów składowych. Dodawanie tonów składowych nie zmienia okresowości sygnału, o ile wszystkie częstotliwości tonów składowych są całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości najniższej, tj. częstotliwości tonu podstawowego. Tak powstały wieloton nazywamy wielotonem harmonicznym. Rzeczywiście w naszym przykładzie mamy: $f_n = f_1(2n-1)$, $n = 1, 2, 3...$ Wielotony harmoniczne charakteryzują się swoją wysokością dźwięku, podobnie jak tony proste i dlatego można z nich tworzyć melodie. Przykład 4.

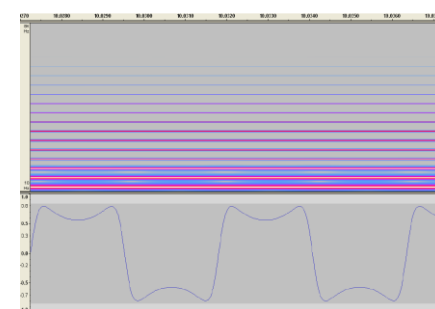
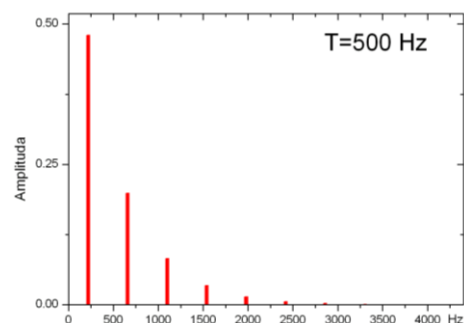
[Oscyl Kwant Rozne Dzw Stala Temp.mp3](#) przedstawia kilka wielotonów harmonicznych o różnych częstotliwościach podstawowych f_1 . Amplitudy poszczególnych alikwotów zostały zadane wzorem $p_{0n} = e^{-f_n/T}$ podobnie jak na rys. 3, przy czym parametr T jest jednakowy dla wszystkich wielotonów. Czytelnik zwróci zapewne uwagę, że barwa dźwięku jest tu w pewien sposób „butelkowa”. Nic w tym dziwnego; butelka to przecież piszczałka otwarta z jednego końca.



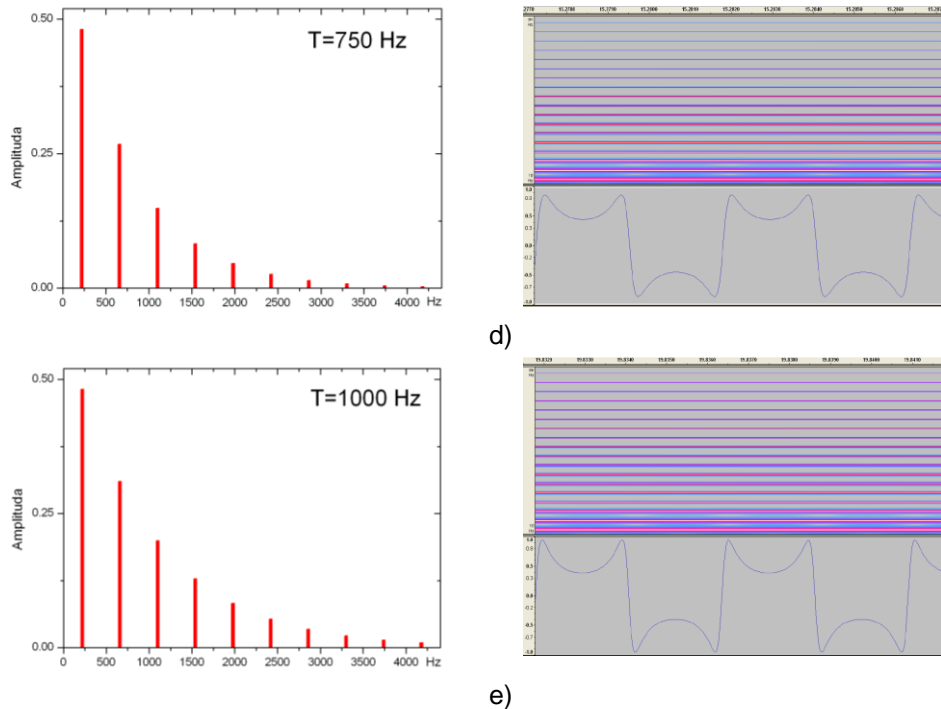
a)



b)



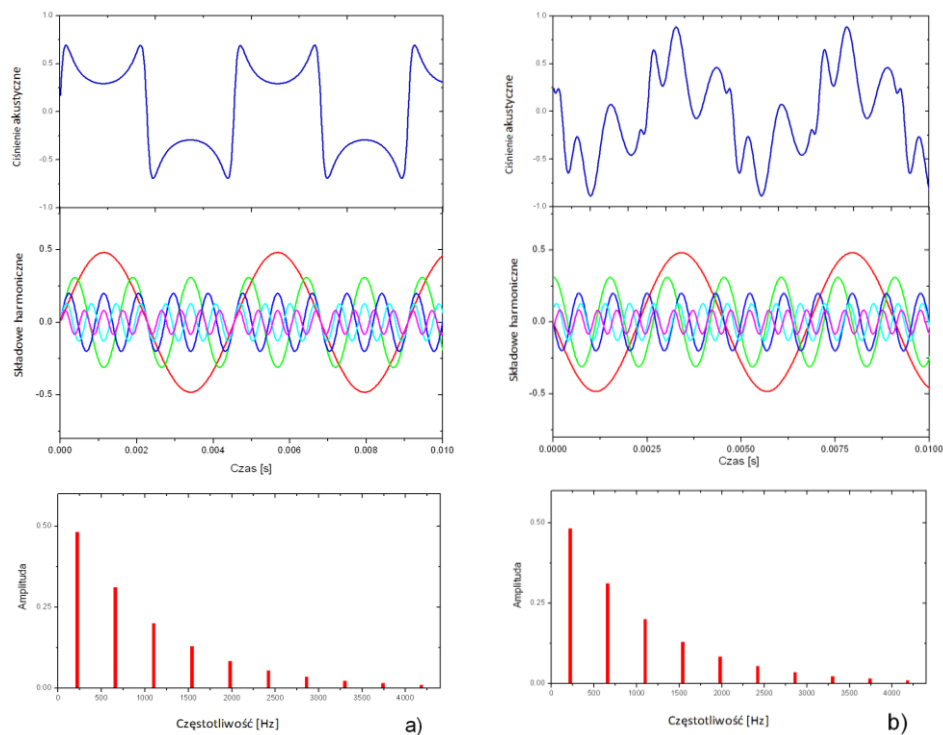
c)



Rys. 3a–e. Widma dźwięku, spektrogramy i przebiegi czasowe $p(t) = \sum_{n=1}^{25} \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot (n - \frac{1}{2}) \cdot t) \cdot A_n$, gdzie $A_n = \exp(-f_0 \cdot (n - \frac{1}{2}) / T)$ i $f_0 = 440$ Hz, sygnału w superpozycjach tonów prostych odpowiadających stanom własnym energii kwantowego oscylatora harmonicznego dla różnych wartości parametru T

Niezależność barwy od fazy i spektroskopia

Rysunek 4a przedstawia przebieg ciśnienia akustycznego w jednym z przykładów ilustracji kwantowego oscylatora harmonicznego z rys. 3. Pod przebiegiem sumarycznego ciśnienia akustycznego widzimy sinusoidy, odpowiadające kilku pierwszym składowym tonom prostym tego wielotonu harmonicznego. Łatwo się przekonać, skąd pochodzi kształt sumarycznego przebiegu: sinusoidy są ułożone tak, że fazy ich najszybszego wzrostu i najszybszego spadku przypadają w tych samych chwilach, stąd i superpozycja wykazuje tam obszary bardzo szybkiego wzrostu i bardzo szybkiego spadku. Spróbujmy zbadać, co się stanie, gdy składowe sinusoidy porozsuwamy, np. tak jak na rys. 4b. Superpozycja takich sinusoid daje przebieg zupełnie nieprzypominający poprzedniego. Przykład 5. [OscylatorKwantowy BARWA FAZA.mp3](#) zawiera oba dźwięki podawane na przemian. Czy można je rozróżnić? Jeżeli nawet, to różnica jest niewielka, przy tak drastycznie różnym przebiegu ciśnienia akustycznego docierającego do naszych uszu.



Rys. 4. a): Przebieg czasowy ciśnienia akustycznego w wielotonie harmonicznym

$p(t) = \sum_{n=1}^{25} \sin(2 \cdot \pi \cdot 440 \cdot (n - \frac{1}{2}) \cdot t) \cdot A_n$, gdzie $A_n = \exp(-440 \cdot (n - \frac{1}{2}) / 1000)$, wraz z kilkoma

jego najniższymi tonami składowymi oraz widmo tego wielotonu, b): Przebieg czasowy ciśnienia

akustycznego w wielotonie harmonicznym $p(t) = \sum_{n=1}^{25} \sin(2 \cdot \pi \cdot 440 \cdot (n - \frac{1}{2}) \cdot t + 9 \cdot \pi / n) \cdot A_n$,

wraz z kilkoma jego najniższymi tonami składowymi oraz widmo tego wielotonu. Sinusoidy na rysunku b) są poprzysuwane w fazie względem sinusoid z rysunku a), co jest przyczyną różnic w sumarycznym przebiegu ciśnienia akustycznego. Barwy dźwięku obydwu wielotonów można porównać w przykładzie 5: [OscylatorKwantowy BARWA FAZA.mp3](#)

Jest to bardzo dziwne zjawisko, wzięwszy pod uwagę, że tony proste nie są fizycznie obecne w sygnale, lecz są one wynikiem abstrakcyjnego rozłożenia sygnału na sinusoidy. Sinusoidy składają się na wieloton zupełnie tak samo, jak amplitudy prawdopodobieństwa [5] w wypadkowej funkcji falowej układu kwantowego, wzmacniając się lub wygaszając. Po zmianie faz momenty wzmocnienia i wygaszenia są inne, dlatego sygnał wygląda zupełnie inaczej. Tymczasem brzmienie pozostaje praktycznie takie samo. Oznacza to, że nasz narząd słuchu działa jak spektrometr: rejestruje amplitudy tonów składowych, ale jest nieczuły na fazy tych składowych. Na przykład w spektroskopii pro-

mieniowania elektromagnetycznego atomów badamy amplitudy – natężenia poszczególnych linii widmowych, mimo, że fale wysyłane są przez badane atomy lub cząsteczki w sposób zupełnie niekontrolowany. Spójność faz występuje tylko w laserach, ale tam dotyczy to zwykle jednej częstotliwości. Również nasze postrzeganie kolorów światła za pośrednictwem narządu wzroku nie zależy od faz poszczególnych składowych widma. Różnica jest tylko taka, że postrzegana barwa światła niemonochromatycznego nie odpowiada jego widmu, lecz jest wynikiem systemu barw dopełniających, np. gdy do oka trafia jednocześnie monochromatyczne promieniowanie o barwie żółtej i niebieskiej, uzyskujemy wrażenie koloru zielonego. No cóż, oko jest po to by łudzić... Można też powiedzieć, że wzrok jest narządem syntezy, a słuch analizy.

Twierdzenie o tym, że narząd słuchu rozkłada sygnał dźwiękowy na składowe tony proste nazywa się akustycznym prawem Ohma, gdyż sformułował je Simon Ohm, bardziej znany z badań oporu elektrycznego. Natomiast twierdzenie o niezależności barwy dźwięku od fazy poszczególnych składowych przypisuje się Hermannowi Helmholtzowi, autorowi epokowego dzieła o wrażeniach dźwiękowych, jako podstawie teorii muzyki [8]. Zmarły w 1894 Helmholtz nie miał do dyspozycji elektronicznych urządzeń do nagrywania, syntezy i obróbki dźwięku. Dziś możemy sprawdzić jego twierdzenie na przykładach prawdziwych instrumentów. Jednym ze sposobów zmiany faz alikwotów jest skierowanie strzałki czasu w tył, czyli odtworzenie fragmentów utworów wstecz. Tam, gdzie ciśnienie akustyczne szybko wzrastało, teraz będzie szybko maleć itd. Przykłady 6. [Instr1_wstecz.mp3](#) i [Instr1_w_przod.mp3](#) oraz analogiczne [Instr2_wstecz.mp3](#) itd. aż do [Instr4_wstecz.mp3](#) i [Instr4_w_przod.mp3](#) zostały w ten sposób wykonane. Proponuję, by Czytelnik najpierw wysłuchał instrumentu grającego wstecz i spróbował zgadnąć, jaki to instrument, zanim wysłucha nagrania, tak jak zostało oryginalnie zarejestrowane. Ocenę podobieństwa lub niepodobieństwa pozostawiam Czytelnikowi.

Podane przykłady ilustrują twierdzenie Helmholtza o niezależności barwy dźwięku od faz jego składowych harmonicznych. Nasz narząd słuchu funkcjonuje więc jako rejestrator widma mocy, tj. jedynie kwadratów wartości bezwzględnych amplitud poszczególnych alikwotów podobnie jak większość przyrządów używanych w spektroskopii atomowej i molekularnej. W drugiej części artykułu, który ukaże się w następnym numerze *Fotonu*, przekonamy się jednak, że twierdzenie to ma swoje granice stosowności, i że wynikają one ze zjawiska, które jest podstawą jednej z najbardziej charakterystycznych zasad mechaniki kwantowej.

Przykłady dźwiękowe

1. [TonyProste.mp3](#); kilka tonów prostych o częstotliwościach i czasach trwania odpowiadających tematowi *Sztuki Fugi* J.S. Bacha w stroju naturalnym.
2. [Tony_Oscylatora_Kwantowego.mp3](#); 20 pierwszych tonów prostych odpowiadających kwantowemu oscylatorowi harmonicznemu o częstotliwości podstawowej 110 Hz (klasycznie 220 Hz).
3. 3a: [OscylatorKwantowyRosnacaTemperatura.mp3](#); 3b: [OscylatorKwantowyRosnacaTemperaturaCiagly.mp3](#) wielotony o widmach z rys. 3.
4. [Oscyl_Kwant_Rozne_Dzw_Stala_Temp.mp3](#); kilka dźwięków o barwie odpowiadającej kwantowym oscylatorom harmonicznym o różnej częstotliwości w jednej temperaturze.
5. [OscylatorKwantowy_BARWA_FAZA.mp3](#); odcinki dźwięków z rys 4a i 4b. Czytelnik jest proszony o rozróżnienie tych odcinków. Sekwencja odcinków jest dana w rozwiązaniach zagadek.
6. [Instr1_wstecz.mp3](#), [Instr1_w_przod.mp3](#), [Instr2_wstecz.mp3](#)... [Instr4_w_przod.mp3](#)...; nagrania fragmentów muzyki wykonywanej na różnych instrumentach. Czytelnik jest proszony o wysłuchanie najpierw wersji wstecz i o odgadnięcie instrumentu.

Rozwiązania zagadek

5. b) a) a) b) a) b) b) a).
6. trąbka, skrzypce, klarnet, organy.

Literatura i przypisy

- [1] J.A. Janik, *Ontologiczne aspekty fizyki*, Polska Akademia Umiejętności, Kraków, 2011.
- [2] K. Zalewski, *Wykłady z nierelatywistycznej mechaniki kwantowej*, PWN, Warszawa 1997.
- [3] S. Brandt, H.D. Dahmen, *Mechanika kwantowa w obrazach*, PWN, Warszawa, 1989.
- [4] P. Błasiak, *Combinatorial Model of the Heisenberg-Weyl Algebra*, rozprawa habilitacyjna, raport IFJ PAN 2010, i w pracach tam cytowanych podaje ciekawe przykłady obiektów makroskopowych: grafów, procesów losowania i dokładania kul do urn, ścieżek na szachownicy, podlegających regułom komutacji używanym w mechanice kwantowej.
- [5] R.P. Feynman, *QED Osobliwa teoria światła i materii*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1998, s. 31–41; *Sześć łatwych kawalków*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1998, s. 178 (uwaga na błędy w tłumaczeniu z angielskiego).

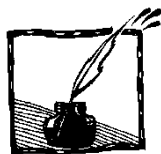
- [6] R.P. Feynman, *QED Osobliwa teoria światła i materii*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1998, s. 21. R. Feynman, mówi tu kolorze czystym, tj. takim, którego nie da się rozszcześcić na kolory składowe. Taki kolor czysty odpowiadałby wysokości dźwięku, w odróżnieniu od koloru rzeczywistego zależnego od udziału poszczególnych częstotliwości w sygnale optycznym i przez to pojęciowo bliższego pojęciu barwy dźwięku.
- [7] J.S. Bach, *Kunst der Fuge*, BWV 1080.
- [8] H. von Helmholtz, *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, Vieweg, Braunschweig 1863, Nachdruck: Minerva-Verlag, Frankfurt/Main 1981, ISBN 3-8102-0715-2.



Początek dzieła *Sztuka fugi* (*Die Kunst der Fuge*) Jana Sebastiana Bacha. Pierwsze dźwięki tego utworu zostały użyte w kilku ilustracjach dźwiękowych w tym artykule



Temat wszystkich fug Bacha (z wyjątkiem ostatniej niedokończonej) z dzieła *Die Kunst der Fuge*



Pseudowektory

Bernard Jancewicz

Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Wrocławskiego

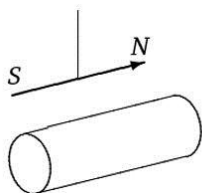
1. Wstęp

Przed trzema laty napisałem artykuł [1], w którym pokazywałem, iż nie tylko wektory są wielkościami skierowanymi, jakie można wprowadzić do fizyki. Przedstawałem tam dwuwektory i trójwektory. Krytyczny czytelnik zauważyłby wtedy, że wielkości fizyczne, które tam nazywałem dwuwektorami, tradycyjnie uważa się za pseudowektory. Tym razem pokażę, że można pozostać przy nich jako pseudowektorach, jeśli tylko nieco inaczej będzie się rozumieć ich kierunek.

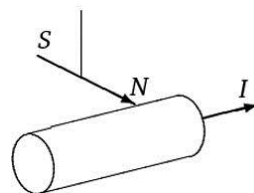
Pozwolę sobie przytoczyć cytat z książki Hermanna Weyla *Symetria* (PWN, Warszawa 1960, s. 30–31):

E. Mach opowiada, że jako chłopiec doznał wstrząsu intelektualnego, gdy się dowiedział, iż igła magnetyczna zawieszona równoległe do drutu, przez który przepływa prąd elektryczny w określonym kierunku, odchyła się w pewną stronę na prawo lub na lewo. Ponieważ cała konfiguracja geometryczna i fizyczna, obejmująca prąd elektryczny i oba bieguny igły magnetycznej, jest na pozór symetryczna względem płaszczyzny przeprowadzonej przez drut i igłę, igła powinna zachowywać się jak osiołek Buridana między jednakowymi wiązkami siana i odmówić rozstrzygnięcia na rzecz prawej lub lewej strony.

Ktoś mógłby zapytać, dlaczego ważne jest zapewnienie symetrii względem odbicia w opisanej płaszczyźnie? Wobec tego trzeba przywołać tzw. zasadę Piotra Curie: „symetria przyczyn musi się objawiać w symetrii skutków”. W tym wypadku przyczyną jest prąd elektryczny płynący w przewodzie, a skutkiem ustawienie igły magnetycznej nad tym przewodem. Jeśli przewód ma kształt walca, to odbicie w dowolnej płaszczyźnie przechodzącej przez jego oś nie zmienia przewodu ani płynącego w nim prądu. To są możliwe symetrie przyczyny. W jednej ze wspomnianych płaszczyzn leży środek igły magnetycznej. Skutek, czyli igła magnetyczna po wychyleniu też powinna podlegać tej symetrii.



Prąd nie płynie



Prąd płynie

W opisanym przykładzie istotne jest nie to, że po włączeniu prądu igła się odchyła, lecz to, że przy włączonym prądzie brakuje symetrii względem odbicia w płaszczyźnie przechodzącej przez oś przewodu i środek igły magnetycznej. Przewód i prąd przenień płynący nie zmieniają się, ale bieguny igły zamieniają się miejscami.

Kłopot Macha bierze się stąd, że igłę magnetyczną uważał on za dobry model wektora, dla którego odbicie względem środka igły zamienia bieguny, podobnie jak odbicie wektora względem jego środka zmienia zwrot na przeciwny. Tymczasem igła magnetyczna jest modelem pseudowektora, który przy takim odbiciu nie zmienia wcale swego zwrotu. Pseudowektory w ogóle zachowują się „dziwnie” względem odbić, a to zachowanie wydaje się dziwne dlatego, że przedstawiamy je graficznie tak samo, jak zwykłe wektory. Przy tym do takiego ich przedstawiania potrzebna jest śruba prawoskrętna. Wybór takiej śruby jest kwestią umowy fizyków i nie jest zadany przez opisywane zjawiska fizyczne.

W niniejszym artykule zaprezentuję inny obraz graficzny pseudowektorów, przy którym ich zachowanie względem odbić przestaje być „dziwne” i nie jest potrzebna żadna śruba: ani prawoskrętna, ani lewoskrętna. Taki sam pogląd na pseudowektory przedstawia Andrzej Staruszkiewicz [2].

2. Pseudowektor

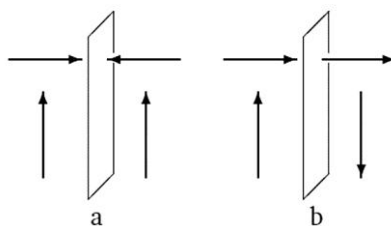
Zanim opiszę, jak przedstawiać pseudowektor, przedstawię mój pogląd na określanie cech zwykłego wektora, który przedstawiłem już w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku [3]. Przy definiowaniu wektora swobodnego w podręcznikach szkolnych wymienia się trzy jego cechy: *kierunek*, *zwrot* i *wartość*. Kierunek rozumie się jako prostą, na której leży wektor. Po ustaleniu kierunku można wybierać jeden z dwóch możliwych zwrotów. Według tej definicji nie może więc być kierunków przeciwnych, mogą być tylko przeciwne zwroty wektorów o tym samym kierunku. Takie rozumienie słowa „kierunek” jest jednak sprzeczne ze znaczeniem w języku potocznym i z intuicją kojarzoną z tym słowem. Zresztą i fizycy używają słowa „kierunek” na pojęcie obejmujące również zwrot, co przejawia się w mówieniu o kierunkach przeciwnych. Przykłady na to można znaleźć w podręcznikach uniwersyteckich autorów polskich [4, 5]. Dlatego w dalszym tekście kierunek wektora będzie rozumiany razem ze zwrotem, a samą prostą bez zwrotu będę nazywać *nastawieniem*.

Cechy zwykłego wektora zwanego też *wektorem biegunowym*:

1. *wartość* – długość
2. *kierunek*, na który składa się:
 - a) *nastawienie* – prosta
 - b) *zwrot* – strzałka na prostej.

W tradycyjnym ujęciu *pseudowektor* zwany też *wektorem osiowym* ma takie same cechy, a różni się tylko zachowaniem względem przekształceń z grupy zawierającej wszystkie obroty, inwersje i odbicia. Oprócz przekształcenia we-

dług macierzy A trzeba go pomnożyć przez wyznacznik $\det A$, który dla odbić jest równy -1 . Na rysunku pokazujemy zachowanie obu typów wektorów względem odbić. W lewej części widzimy zachowanie wektorów biegunowych – jeśli wektor jest prostopadły do płaszczyzny odbicia, to zmienia zwrot na przeciwny, a jeśli jest równoległy to nie zmienia zwrotu. Natomiast w prawej części pokazujemy zachowanie pseudowektora, które wydaje się wysoce nienaturalne.

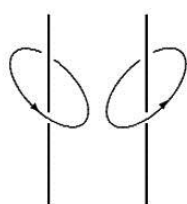


Zachowanie względem odbić: a) zwykłych wektorów, b) pseudowektorów przedstawianych tradycyjnie

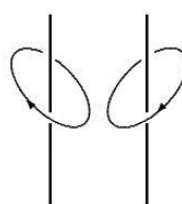
Moim zdaniem należy rozumieć cechy *pseudowektora* następująco:

1. *wartość* – długość;
2. *kierunek*, na który składa się:
 - a) *nastawienie* – prosta,
 - b) *zwrot* – strzałka na owalu okrążającym prostą.

Przy tym owal niekoniecznie musi być w płaszczyźnie prostopadłej do nastawienia. Jest swoboda manipulowania tym owalem ze strzałką, byleby nie wysuwać go poza odcinek obrazujący długość pseudowektora. Można zauważyć, że możliwe są tylko dwa różne zwroty – nazywamy je *przeciwnymi*. W lewej części rysunku są dwa ustawienia owalu ze strzałką odpowiadające jednemu zwrotowi, a w prawej dwa odpowiadające innemu zwrotowi.

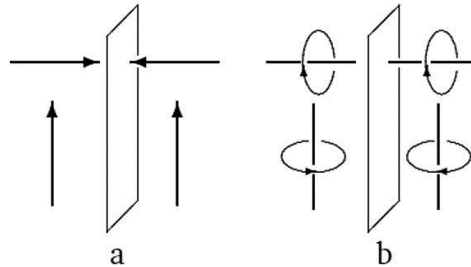


Pseudowektor
z wybranym zwrotem



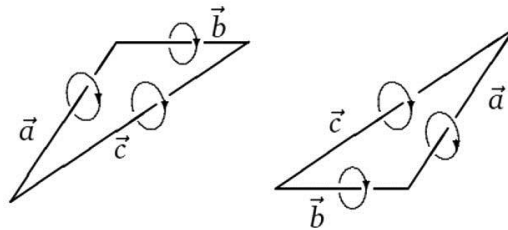
Pseudowektor
z przeciwnym zwrotem

Przy takich cechach zachowanie pseudowektorów względem odbić wygląda naturalnie. Jeśli jest on prostopadły do płaszczyzny odbicia, to zachowuje on swój zwrot, bo strzałka na owalu go otaczającym po odbiciu jest taka sama. A pseudowektor równoległy do płaszczyzny odbicia zmienia swój zwrot na przeciwny, bo tak się dzieje ze strzałką na owalu.



Zachowanie względem odbić: a) zwykłych wektorów, b) pseudowektorów przedstawianych w nowy sposób

Z wektorami można wykonywać dwa działania: mnożenie przez skalar i dodawanie. To jest potrzebne do tego, aby utworzyć z nich strukturę algebraiczną zwaną przestrzenią liniową. Mnożenie pseudowektorów przez skalar określa się tak samo, jak dla wektorów biegunowych (skalar dodatni zmienia wartość, a zachowuje kierunek wektora, natomiast skalar ujemny zmienia wartość i zmienia kierunek na przeciwny). Dodawanie pseudowektorów określamy w analogii do reguły trójkąta dla dodawania wektorów. Przykładamy ich odcinki tak, żeby owal z jednego odcinka \vec{a} po przejściu przez złącze miał zwrot zgodny ze zwrotem owalu na drugim odcinku \vec{b} . Wtedy łącząc swobodne końce odcinkiem prostej, dostajemy sumę pseudowektorów, a zwrot sumy dostajemy ze zwrotu składników przez ich rozciąganie.



Dodawanie pseudowektorów

Z przedstawionego rysunku widać, że dodawanie nie zależy od sposobu przykładania, byleby zachowana była zgodność zwrotów. Mówimy, że dodawanie pseudowektorów jest przemienne:

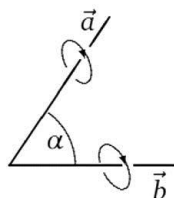
$$\vec{c} = \vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}$$

Można sprawdzić konstrukcyjnie, że spełniona jest rozdzielność mnożenia względem dodawania i wszystkie inne aksjomaty przestrzeni liniowej. W ten sposób mamy do dyspozycji przestrzeń liniową pseudowektorów nie gorszą od takiejże przestrzeni dla wektorów biegunowych.

W algebrze wektorowej potrzebne są jeszcze iloczyny wektorów. Dla iloczynu skalarnego pseudowektorów wzór jest taki sam, jak dla zwykłych wektorów:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| |\vec{b}| \cos \alpha$$

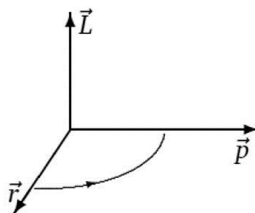
Trzeba tylko podać przepis na znalezienie kąta α , który ma być wstawiony do tego wzoru. Otóż teraz należy odcinki odpowiadające obu pseudowektorom przyłożyć inaczej, niż przy dodawaniu. Owal z jednego odcinka po przejściu przez złącze staje się przeciwny do owalu na drugim odcinku. Kąt między tak przyłożonymi odcinkami jest tym kątem α , który występuje w iloczynie skalarnym.



Kąt potrzebny do iloczynu skalarnego pseudowektorów

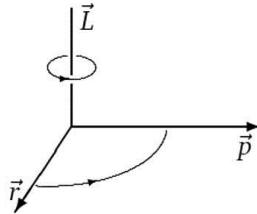
Przy iloczynie wektorowym występują różne możliwości zależnie od tego, jaki charakter mają jego czynniki. Właśnie w tym działaniu na wielkościach skierowanych pojawia się potrzeba wprowadzania pseudowektorów.

Pseudowektorami są wielkości fizyczne otrzymane przez *iloczyn wektorowy* ze zwykłych wektorów, jak moment pędu (kręt) $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ czy moment siły $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$. Do określania ich zwrotu tradycyjnym sposobem (tzn. ze strzałką na nastawieniu) potrzebna jest śruba – według umowy – prawoskrętna.

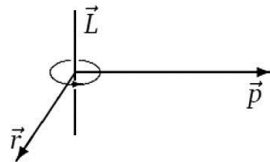


Iloczyn wektorowy $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ w starym stylu

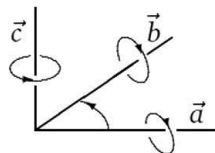
W nowym ujęciu uznajemy je za pseudowektory nadal prostopadłe do dwóch czynników wektorowych, ale ze zwrotem oznaczającym obracanie od pierwszego wektora do drugiego. Śruba prawoskrętna nie jest potrzebna. Po prostu obracanie od wektora \vec{r} do wektora \vec{p} przenosimy na zwrot strzałki na owalu otaczającym odcinek \vec{L} .

Iloczyn wektorowy $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ w nowym stylu

Odcinek oznaczający wynik tego iloczynu nie musi być rysowany po jednej stronie płaszczyzny wyznaczonej przez czynniki, bo taki rysunek wyróżniałby jeden koniec tego odcinka. Najlepiej byłoby rysować go tak:

Iloczyn wektorowy $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ bez wyróżniania końców wyniku

Podajemy przepis iloczynu wektorowego dwóch pseudowektorów. Należy je przyłożyć do siebie tak samo, jak do iloczynu skalarowego, a wynik jest pseudowektorem prostopadłym do obu czynników ze zwrotem od pierwszego czynnika do drugiego:

Iloczyn wektorowy pseudowektorów $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$

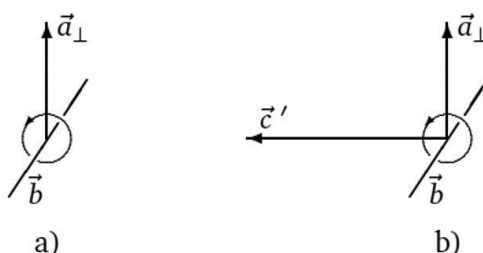
Potrzebna jest też definicja *iloczynu wektorowego wektora biegunowego \vec{a} z wektorem osiowym \vec{b}* . Możliwe są dwa iloczyny wektorowe: Jeden $\vec{a} \times \vec{b}$ z pseudowektorem na drugim miejscu oraz drugi $\vec{b} \times \vec{a}$ z pseudowektorem jako pierwszym czynnikiem. Za każdym razem wynik jest zwykłym wektorem prostopadłym do obu czynników, więc nastawienie wyniku mamy określone.

Zacniemy od określenia drugiego iloczynu wektorowego. Do tego potrzebne są dwa kroki. W pierwszym kroku trzeba z wektora \vec{a} wziąć składową \vec{a}_\perp prostopadłą do \vec{b} . Drugi krok mamy zilustrowany na rysunku – ze zwrotem

pseudowektora \vec{b} jako okręgiem ze strzałką i środkiem tego okręgu na początku wektora \vec{a}_\perp . Dzięki temu można sformułować następującą regułę: obrócić wektor \vec{a}_\perp o kąt $\pi/2$ w stronę pokazaną przez zwrot \vec{b} , co daje zwrot wyniku $\vec{c} = \vec{b} \times \vec{a}$. A wartość wyniku jest dana znany wzorem

$$|\vec{a} \times \vec{b}| = |\vec{a}| |\vec{b}| \sin \alpha,$$

gdzie α jest kątem między czynnikami.



Iloczyn $\vec{c}' = \vec{b} \times \vec{a}$: a) sytuacja przed wykonaniem iloczynu, b) sytuacja po wykonaniu iloczynu

Można to podsumować następującym przepisem. Pseudowektor mnożony wektorowo z wektorem biegunowym zachowuje się jak operator liniowy wykonujący trzy czynności: a) wybiera z wektora składową prostopadłą do siebie, b) obraca ją wokół swojego nastawienia o kąt $\pi/2$ w stronę swojego zwrotu, c) mnoży przez wartość samego siebie.

Dla ruchu po okręgu istnieje związek między promieniem okręgu r , szybkością liniową v i wartością prędkości kątowej ω

$$v = \omega r.$$

Jeśli zechcemy zapisać ten związek przez wielkości wektorowe: zaczepiony w środku okręgu wektor wodzący \vec{r} , prędkość liniową \vec{v} i prędkość kątową $\vec{\omega}$, to dwa pierwsze są wektorami biegunowymi, a ostatni – osiowym. Związek między nimi to iloczyn wektorowy

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}.$$

Związek między wektorami \vec{v} , $\vec{\omega}$ i \vec{r} pokazujemy na rysunku. W jego lewej części wektor wodzący \vec{r} jest zaczepiony na osi obrotu, a wektor prędkości \vec{v} na końcu wektora wodzącego, bo tam jest obracający się punkt. W prawej części rysunku wektor \vec{v} jest zaczepiony na początku wektora \vec{r} , aby pasował do definicji rozważanego iloczynu wektorowego $\vec{\omega} \times \vec{r}$.



Związek między wektorami \vec{v} , $\vec{\omega}$ i \vec{r}

Ten sam rysunek nadaje się do ilustracji innego iloczynu wektorowego

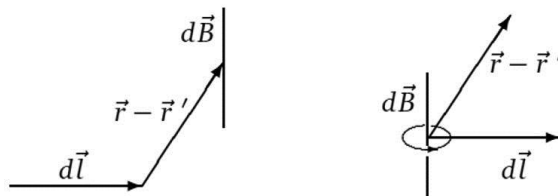
$$\vec{\omega} = \frac{\vec{r} \times \vec{v}}{r^2}.$$

3. Wielkości magnetyczne

Prawo Biota-Savarta ma postać

$$d\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3},$$

w której I jest natężeniem prądu płynącego we fragmencie obwodu opisanym przez wektor $d\vec{l}$ w punkcie \vec{r}' , a \vec{r} jest punktem, w którym wytwarzane jest pole magnetyczne o indukcji $d\vec{B}$. W tym wzorze po prawej stronie mamy iloczyn wektorowy wektorów biegunowych, wobec tego indukcja magnetyczna jest wektorem osiowym, czyli pseudowektorem. Sytuację geometryczną występujących tu wielkości ukazujemy w lewej części rysunku. Jeśli wektory $d\vec{l}$ i $\vec{r} - \vec{r}'$ zaczepić w jednym punkcie, to obracanie pierwszego do drugiego daje zwrot owalu otaczającego nastawienie \vec{B} – co pokazano w prawej części rysunku.



Indukcja magnetyczna pseudowektorem

Siła Lorentza jest dana wzorem

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = -q\vec{B} \times \vec{v}.$$

Dla ładunku ujemnego warto tę siłę zapisać tak:

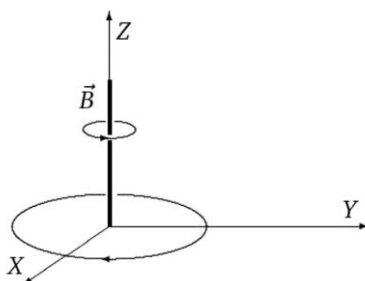
$$\vec{F} = |q| \vec{B} \times \vec{v}.$$

aby mieć pseudowektor jako pierwszy czynnik. Związek między wektorami \vec{B} , \vec{v} , \vec{F} przedstawiono na rysunku. W lewej jego części w konfiguracji przestrzennej wektor \vec{F} jest doczepiony na końcu wektora \vec{v} , bo siła „ciągnie” koniec wektora prędkości, aby go obrócić, a w prawej części wektory \vec{v} i \vec{F} zostały zaczepione w jednym punkcie, aby pasowały do definicji iloczynu wektorowego.



Siła Lorentza działająca na ładunek ujemny

To dowodzi, że ładunek ujemny jest obracany zgodnie ze zwrotem indukcji magnetycznej. Wobec tego ładunek dodatni jest obracany w przeciwną stronę, co pokazujemy na następnym rysunku.



Ruch cząstki z ładunkiem dodatnim w płaszczyźnie prostopadłej do \vec{B}

W prawie Faradaya

$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

występuje powierzchnia S objęta przez jakiś obwód elektryczny oraz brzeg ∂S tej powierzchni, którym jest sam obwód. Prąd płynący w obwodzie wyznacza kierunek obieganego wspomnianego brzegu, co zadaje zwrot wektora $d\vec{l}$. Po

lewej stronie tego wzoru jest iloczyn skalarny dwóch wektorów biegunowych, więc po prawej stronie strumień magnetyczny też musi być skalar

$$\Phi_m = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

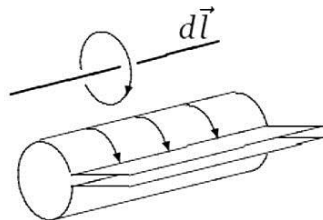
O tym, że \vec{B} jest pseudowektorem, napisałem wcześniej, a teraz musimy stwierdzić, że element $d\vec{s}$ pola powierzchni obwodu też jest pseudowektorem po to, aby iloczyn skalarny dał normalny skalar. Jak już się zgodzimy, że $d\vec{s}$ ma być pseudowektorem, to trzeba określić jego zwrot. Otóż zwrot tego pseudowektora należy wziąć jako owal ze strzałką o zwrocie zgodnym z prądem płynącym w obwodzie, czyli po brzegu ∂S .

Jest jeszcze jedna wielkość opisująca pole magnetyczne. Warto przytoczyć operacyjną definicję *natężenia pola magnetycznego* [6]:

Posługujemy się „nadprzewodzącym solenoidem próbnym”. Umieszczamy go najprzód w miejscu, w którym pole magnetyczne znika, tam zamykamy jego obwód i następnie wprowadzamy go do tego miejsca w polu, w którym chcemy zmierzyć \mathbf{H} . Strumień magnetyczny przepływający przez solenoid, który równał się zeru w chwili zamykania obwodu, pozostaje stale równy zeru, a przeto również odpowiednia składowa pola wewnętrznego jest równa zero.

Prąd nastawia się automatycznie w ten sposób, aby ta składowa pola zerowała się. Natężenie prądu przepływającego przez solenoid jest proporcjonalne do jego długości, jeśli ta długość jest dostatecznie mała. Współczynnikiem proporcjonalności jest natężenie pola magnetycznego.

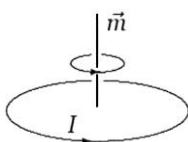
Długość solenoidu powinna być przedstawiona jako wektor $d\vec{l}$, pytanie tylko jaki: biegunowy czy osiowy? Długością tego wektora jest długość osi solenoidu jako odcinka. Nie ma żadnego powodu, aby wyróżniać jeden z końców tego odcinka, natomiast ważne jest, jak dołączymy amperomierz do solenoidu, tzn. gdzie odbieramy ładunki dodatnie wzbudzonego w nim prądu. To połączenie, czyli oczekiwany kierunek prądu ilustruje okrągła strzałka otaczająca odcinek opisujący długość solenoidu.



Operacyjna definicja natężenia pola magnetycznego

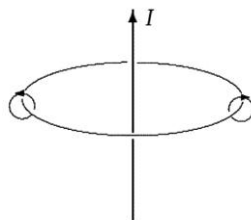
We wzorze na natężenie prądu wzbudzonego w solenoidzie występuje iloczyn dwóch pseudowektorów \vec{H} i $d\vec{l}$. Skoro ważna jest składowa \vec{H} wzdłuż $d\vec{l}$, musi to być iloczyn skalarny $dI = \vec{H} \cdot d\vec{l}$.

Jest jeszcze inna wielkość w opisie zjawisk magnetycznych. Moment magnetyczny układu prądów $\vec{m} = \frac{1}{2} \int_V dv [\vec{r} \times \vec{j}(\vec{r})]$ z całkowaniem po objętości V , w której występują prądy. Stąd otrzymuje się wzór dla momentu magnetycznego obwodu z prądem $\vec{m} = \frac{1}{2} \oint_K \vec{r} \times d\vec{r}$ przy zaniedbaniu przekroju poprzecznego przewodu, więc z całką krzywoliniową po krzywej K oznaczającej przewód. Skoro w tych wzorach jest iloczyn wektorowy wektorów biegunowych, to moment magnetyczny jest pseudowektorem.

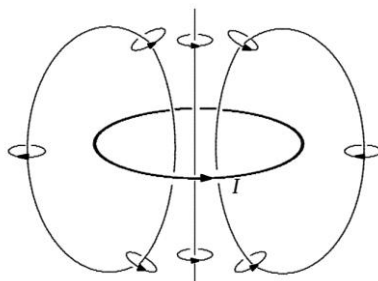


Moment magnetyczny obwodu z prądem

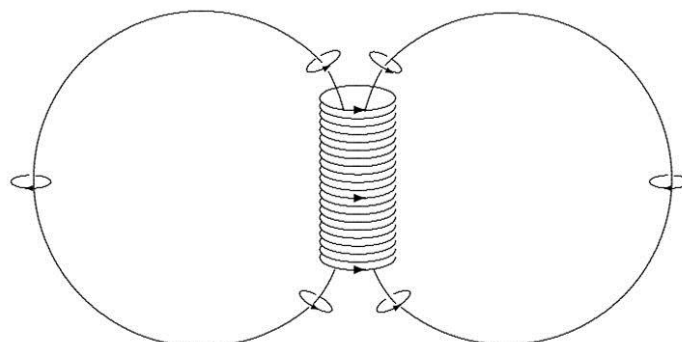
Warto jeszcze pokazać, jak powinno się ilustrować linie pola magnetycznego. Służą do tego trzy kolejne rysunki.



Linia pola magnetycznego wokół przewodu prostoliniowego

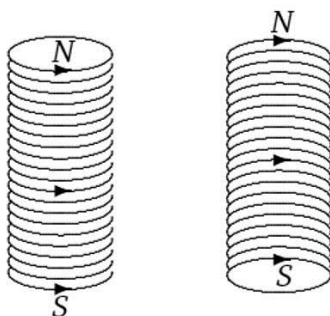


Linie pola magnetycznego wokół przewodu kołowego



Linie pola magnetycznego wokół solenoidu

A czym jest magnes? Wiadomo, że jego namagnesowanie bierze się z mikroskopijnych prądów krążących w jego atomach i cząsteczkach. My symbolicznie przedstawimy go jak solenoid, jakoby stos prądów płynących po jego powierzchni.



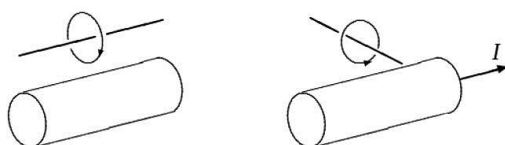
Magnes jako stos obwodów elektrycznych

Co to jest biegun północny? Według starej definicji jest to ten koniec magnesu, z którego „wychodzą” linie pola magnetycznego. A nowa proponowana definicja powinna brzmieć: to ten koniec magnesu, na którym z zewnątrz „widac” prądy krążące przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. Analogicznie jest z biegunem południowym – do tej pory przyjmowano go za ten koniec magnesu, do którego „wchodzą” linie pola, a teraz – to ten koniec magnesu, który przy oglądaniu z zewnątrz ma prądy krążące zgodnie z ruchem wskazówek zegara.

Jak się ma przed oczami taki obraz biegunów magnetycznych, to można wytłumaczyć, dlaczego bieguny różnoimienne przyciągają się. Otóż gdy biegun południowy jednego magnesu znajdzie się naprzeciwko bieguna północnego innego magnesu, to prądy w nich płyną zgodnie, a wiadomo ze wzoru na siłę Lorentza, że prądy równoległe płynące w zgodnych kierunkach przyciągają się.

4. Zakończenie

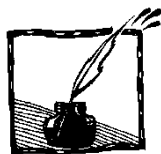
Igła magnetyczna to mały magnes, a wspomnieliśmy przed chwilą, że magnes to stos prądów. Igłę magnetyczną charakteryzuje moment magnetyczny jako pseudowektor. Owalna strzałka otaczająca ustawienie tego pseudowektora odpowiada prądom płynącym w igle. Teraz możemy objaśnić to, co Mach uważał za paradoks.



Jeśli prąd nie płynie, a igła jest ustawiona równoległe do przewodu (lewa część rysunku), to nie ma symetrii względem odbicia w płaszczyźnie przechodzącej przez igłę i przewód, gdyż przy takim odbiciu odwraca się zwrot strzałki „otaczającej” igłę, a w gruncie rzeczy zwrot prądów krążących w igle. Natomiast w sytuacji płynącego prądu igła sama ustawia się prostopadle do przewodu (prawa część rysunku) zapewniając symetrię względem odbicia w płaszczyźnie przechodzącej przez oś przewodu i środek igły magnetycznej, albowiem to odbicie nie zmienia zwrotu strzałki wokół igły, czyli prądów krążących w igle.

Literatura

- [1] B. Jancewicz, „Skalary, wektory i co dalej?”, *Foton* **103**(2008), s. 35–51.
- [2] A. Staruszkiewicz, Wykłady dla fizyków, tom I, *Algebra i geometria*, NKF, Kraków 1993.
- [3] B. Jancewicz, „O niektórych możliwościach użycia wielowektorów w fizyce”, *Postępy Fizyki* **35**,1(1984), s. 63–79.
- [4] A.K. Wróblewski, J.A. Zakrzewski, *Wstęp do fizyki*, t.1, PWN, Warszawa 1976, s. 64–66.
- [5] R.S. Ingarden, A. Jamiołkowski, *Elektrodynamika klasyczna*, PWN, Warszawa 1980, s. 176, 266.
- [6] J. Wyssenhoff, *Zasady elektromagnetyki i optyki klasycznej*, PWN, Warszawa 1957, s. 348.



Oblicza Jana Czochralskiego

Paweł E. Tomaszewski

INTiBS PAN Wrocław

Zapewne każdy Czytelnik *Fotonu* spotkał się już z nazwiskiem Czochralski zwłaszcza w ostatnich miesiącach, gdy nagłośniono sprawę przywrócenia czci profesorowi Janowi Czochralskiemu (1885–1953) przez Senat Politechniki Warszawskiej. Jego macierzysta uczelnia, która przed wojną obdarzyła go jako jednego z pierwszych zaszczytnym tytułem doktora *honoris causa*, po 66 latach oficjalnie zdarła zasłonę milczenia. Ciekawe, że już od kilku lat na tej samej uczelni, i to z udziałem rektora, wręczano nagrodę i medal imienia Jana Czochralskiego, równocześnie nie uznając go za człowieka godnego czci i pamięci!

Kim był i co uczynił człowiek, który budził przez tyle dziesięcioleci tak wiele emocji? Odpowiedzi nie udzieli nam nawet Wikipedia, w której hasło „Czochralski” było tak wiele razy zmieniane, poprawiane i fałszowane, że dziś nie wiadomo, ile warte są informacje tam zamieszczone. I trudno się dziwić, skoro życie Czochralskiego naznaczone było tyloma różnymi wyborami, dramatycznymi decyzjami, przegranymi i sukcesami, że starczyłoby na kilka życiorysów i kilka filmów... sensacyjnych. Do dziś wiele zagadek z jego życia nie znalazło rozwiązania czy wyjaśnienia. Profesor bez matury i studiów – to najlepiej świadczy o wielkości umysłu tego syna stolarza z wielkopolskiego miasteczka. Był nie tylko naukowcem-praktykiem i teoretykiem, ale zajmował się sztuką, pomagał studentom i artystom w Niemczech i w Polsce.



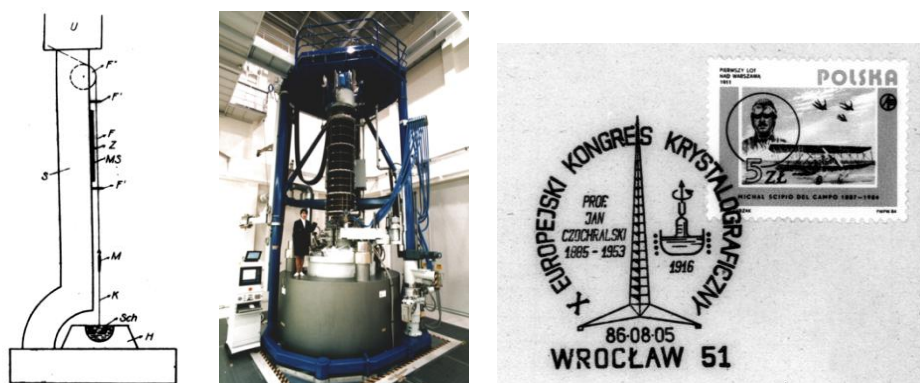
Czy wszystkie oblicza Jana Czochralskiego są dziś dobrze znane i opisane? Nie – wymaga to nadal wielu dogłębnych badań i poszukiwań.

1. Badacz-naukowiec

Zdawałoby się, że najlepiej znamy oblicze badacza, bo wiele razy je opisywano. To przecież dzięki tej stronie swego życia zasłynął w świecie. Przed stu laty rozpoczęła się jego kariera od pracy na temat badań krystalograficznych – a było to równoległe z odkryciem dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego na kryształach! Naszkicowany wówczas plan pracy konsekwentnie realizował w laboratoriach niemieckich i polskich.

Niestety, trzeba zaznaczyć, że sławne było przede wszystkim jego nazwisko, uwiecznione w nazwie metody otrzymywania monokryształów, a nie sama osoba badacza. Dopiero po wielu latach udało się „przypisać” konkretną osobę do

nazwiska, najczęściej pojawiającego się w literaturze z zakresu nauk ścisłych. Tak zwana **metoda Czochralskiego** opracowana została pierwotnie przez Czochralskiego jako metoda pomiaru szybkości krystalizacji metali. Wykorzystane zostało tu zjawisko niewystępujące w przyrodzie, a przypadkowo odkryte przez Czochralskiego w 1916 r. Szybko jednak zorientowano się, że w ten sam sposób można także otrzymywać monokryształy. Zarodek zanurzony w roztopionym metalu (później i w innych stopionych materiałach) należy powoli wyciągać i wówczas narastanie kolejnych warstw materiału odbywa się w sposób uporządkowany i zależny od struktury krystalicznej badanego materiału. Od kilkunastocentymetrowych drucików otrzymywanych przez Czochralskiego doszliśmy dziś do monokryształu krzemu o wadze 800 kg, średnicy 40 cm i długości 2 m. To najlepiej świadczy o skali rozwoju techniki, bo idea Czochralskiego pozostała taka sama jak przed 95 latami¹. To dzięki tej metodzie możliwy był rozwój elektroniki półprzewodnikowej i – szumnie mówiąc – rozwój naszej cywilizacji. To na krzemowych płytkach wycinanych ze wspomnianych ogromnych monokryształów, wykonuje się prawie wszystkie układy scalone – „serce” współczesnych urządzeń elektronicznych.



Rys. 1. – Metoda Czochralskiego wczoraj i dziś. Obok okolicznościowy datownik pocztowy poświęcony Janowi Czochralskiemu i jego metodzie

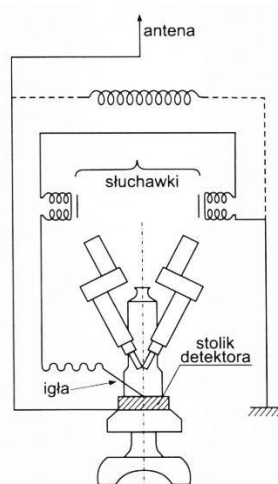
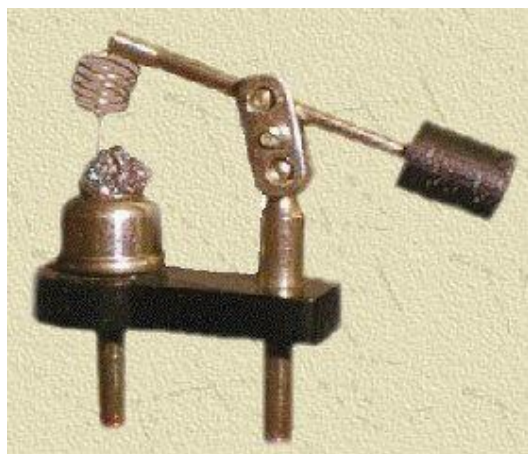
Metoda Czochralskiego nie została opatentowana. Inne odkrycie przyniosło wymierne korzyści naszemu bohaterowi – to słynny przed laty **metal B**, stop kolejowy na panewki łożysk ślizgowych poddawanych dużym naciskom i wysokim temperaturom. Po kilkunastu latach badań udało się Czochralskiemu opracować i opatentować w 1924 r. beczynowy stop, który spełniał wszystkie wymagania stopów zastępczych, przede wszystkim dla kolejnictwa. Patent kupiony przez wiele państw stanowił nie tylko źródło poważnych dochodów, ale

¹ Redakcja poleca artykuł J.M. Honiga o monokryształach w *Fotonie* 72 i 73, 2001.

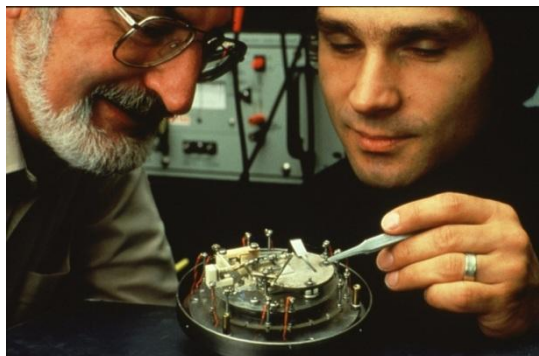
przyniósł sławę biegłego badacza stopów. Dzięki temu duże koncerny metalowe, zbrojeniowe, samochodowe i lotnicze zabiegały o współpracę z Czochralskim i sporo płaciły za jego ekspertyzy.

Niestety, duża część prac Czochralskiego związana była z przemysłem zbrojeniowym zarówno w Niemczech, jak i – po 1928 r. – w Polsce. Objęte były tajemnicą i praktycznie nic nie zachowało się do dziś.

Trzecim ważnym, z dzisiejszej perspektywy, osiągnięciem Czochralskiego był tzw. **radiomikroskop**, czyli metoda skanowania powierzchni próbek metalicznych w poszukiwaniu i badaniu domieszek niemetalicznych w stopach. Czochralski zastosował tu procedurę znaną z ówczesnych tzw. kryształkowych odbiorników radiowych. Tylko cel był inny. W radiu poszukiwano na kryształku (pełniącym rolę diody) miejsca, gdzie po prostu możliwy był odbiór audycji radiowej. U zwykłego słuchacza na odbiorze audycji kończyło się zadanie, u Czochralskiego – zaczynało. Głos w słuchawce (w Polsce pochodził z radiostacji w Raszynie) świadczył bowiem o znalezieniu niemetalicznego ziarna zatopionego (dokładniej – wykrystalizowanego) w badanym stopie. Regularne przemieszczanie igły po powierzchni próbki obserwowane pod mikroskopem i „odsluchiwane” pozwalało na sporządzenie mapy rozmieszczenia niemetalicznych wytrąceń w próbce. Dziś można na to urządzenie, nazwane przez Czochralskiego „radiomikroskopem” (metodę nazwał radiowym badaniem metali), spojrzeć jak na pierwowzór mikroskopu skaningowego z ruchomą sondą (SPM), za który Gerd Binnig i Heinrich Rohrer otrzymali Nagrodę Nobla z fizyki w 1986 r.



Rys. 2. Tzw. żuraw radiowy kryształkowy i schemat radiomikroskopu



Rys. 3. Heinrich Rohrer i Gerd Binnig przy swoim mikroskopie

Nie tylko te trzy osiągnięcia były dorobkiem Czochralskiego. Olbrzymi rozwój nauk ścisłych i techniki w pierwszej połowie XX wieku sprawił, że konieczne było opracowywanie nowych metod badawczych. Czochralski na bieżąco śledził nowości naukowe starając się je wykorzystać w swoich pracach laboratoryjnych. Rozwiązywanie kolejnych problemów naukowych wymagało od niego opracowania odpowiedniej aparatury, specjalnej metody pomiarowej lub przystosowania metod znanych w innych działach nauki. W ten sposób:

- przy badaniu szybkości krystalizacji metali narodziła się metoda Czochralskiego stosowana dziś do hodowli monokryształów;
- podjęcie prac nad rekrystalizacją metali dało diagramy rekrystalizacji jako sposób opisu własności materiału;
- do pomiarów samoulepszenia materiałów opracowano m.in. metodę analizy krzywych ogrzewania;
- badania metalograficzne wymagały opracowania nowych metod trawienia (m.in. tzw. odczynniki Czochralskiego do trawienia złota);
- z badań nad jakością materiałów narodził się sposób ilościowego oznaczania wtrąceń niemetalicznych w żelazie i stali (obserwacje mikroskopowe i analiza oporności elektrycznej wtrąceń i matrycy);
- próba wykrywania i identyfikacji wtrąceń niemetalicznych za pomocą skonstruowanego specjalnie radiomikroskopu (badanie statycznej i dynamicznej charakterystyki styku igła–badany materiał);
- badania nad stopniem skorodowania różnych materiałów wymagały opracowania jednolitych i kontrolowanych warunków pomiaru;
- brak dostępu do aparatury rentgenowskiej na Politechnice Warszawskiej spowodował opracowanie nierentgenowskich metod oznaczania orientacji monokryształów metali (figury trawienia, refleksy dyslokowane i ślady po odkształceniach mechanicznych – metody zaczerpnięte z mineralogii);
- wprowadzenie metod rentgenowskich do metaloznawstwa i szerokie ich propagowanie (m.in. do badania wpływu deformacji na obraz dyfrakcyjny).

Warto zauważyć, że badania odkształceń za pomocą dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego Czochralski opublikował w 1923 r., a wersja polska tej pracy była pierwszą polską publikacją z rentgenografii!

Badania odkształceń za pomocą promieni Roentgena.

Większe zastosowania promieni Roentgena do rozwiązywania zagadnień technicznych. Badania struktury, dokonane przez J. Czochralskiego. Rentgenogramy kryształów soli kamiennej przed i po zgięciu. Rentgenogramy ciał bezpostaciowych. Zmiany różel rentgenograficznych pod wpływem zależności ilości kryształów w polu powstania oraz zwiększenia grubości warstwy. Wpływ obu tych czynników jednocześnie.

Promienie Roentgena stały się, jak wiadomo, potężnym środkiem badawczym w medycynie oraz w dziedzinie badania budowy atomów. Odkrycie tych promieni wywołało nadzieję, iż za ich pomocą uda się przeprowadzić również szereg doniosłych badań z zakresu inżynierii praktycznej, jak np. badań pęknięć, miejsc spawanych, różnych uszkodzeń metali, jam usadowych i t. p.

Przez długi czas jednak nie udało się wykorzystać promieni Roentgena do rozwiązywania tych i im podobnych zagadnień technicznych, a nawet bliższe poznanie tych promieni, w miarę zastosowania ich w medycynie, rozwiało niektóre pierwotne nadzieje.

Stopniowo jednak prace doświadczalne, przez wielu uczonych prowadzone, wyjaśniały możliwości wyzyskania promieni Roentgena i doprowadzały do pewnych wniosków, oświetlających zagadnienia budowy materii i wpływu rozmaitych objawów działania sił zewnętrznych (zginania, zgniotu, ścinania i in.) na budowę atomu.

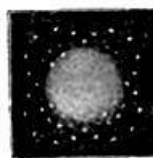
Obfitość prac tych nie pozwalała ująć ich wszystkich w ramach artykułu, dlatego też ograniczamy się do streszczenia pracy, podanej w czasopiśmie Engineering (14 grudnia, 1923 r.), która zaznajamia z niektórymi wynikami doświadczeń jednego z najbardziej znanych badaczy z tej dziedziny, J. Czochralskiego ¹⁾ (z Frankfurtu).

Prace Czochralskiego oparte były na metodzie rentgenogramów Laue'go, zapoczątkowanej w roku 1912. Sądzono wówczas, że promienie Roentgena podlegają tym samym prawom, które były znane dla promieni świetlnych, różniąc się od tych ostatnich tylko długością fali. Barkla stwierdził, że promienie Roentgena ulegają rozszczepieniu, podobnie jak

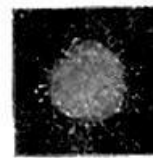
zują maxima interferencji, odpowiadające przeciętlom słokowych powierzchni promieniowania kilku atomów.

Pierwsze sprawozdanie, odczytane przez Laue'go w Ba-warskiej Akademii w r. 1912, wspominało o kilku punktach, odnajdywanych kilkakrotnie przez różnych badaczy. Próbowano różnych kryształów, całych i sproszkowanych. Brano też pod uwagę zjawiska cieplne, zachodzące w miejscach działania promieni. Próbowano również rozważać otrzymane wyniki z punktu widzenia teorii kwantów o nieciągłej emisji światła.

Wkrótce też zaczęto badać układ atomów ciała odkształconego plastycznie, jednak nie otrzymano dodatnich wyników. Dopiero Czochralskiemu i Polanyi'emu udało się to przed dwoma laty.



Rys. 1.



Rys. 2.

Rysunek 1 pokazuje rentgenogram Laue'go otrzymany z kryształu soli. Na rys. 2 i 3 widzimy zdjęcia dokonane z tego samego kryształu przy małym oraz przy dużym wy-

Rys. 4. Pierwsza polska praca z rentgenografii

Jan Czochralski trzy razy organizował swoje miejsce pracy. Pierwszy raz w nowym laboratorium metalurgicznym koncernu Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (AEG), potem w organizowanym i kierowanym przez niego dużym laboratorium metaloznawczym firmy Metallbank und Metallurgische Gesellschaft we Frankfurcie nad Menem. Po powrocie do kraju w 1928 r. pracował w mrocznych piwnicach Budynku Chemii Politechniki Warszawskiej, gdzie badaniu szybkości krystalizacji złota przeszkadzały biegające... szczury. Dopiero wybudowanie w 1934 r. nowoczesnego gmachu Technologii Chemicznej pozwoliło na szerszy front badań prowadzonych głównie dla wojska. Wydaje się, że powołany do życia Instytut Metalurgii i Metaloznawstwa tylko formalnie należał do Politechniki Warszawskiej; wszelkie decyzje personalne, finansowe i badawcze zapadały w Ministerstwie Spraw Wojskowych. Wizytujący laboratorium niemieccy uczeni (także podczas wojny) byli zaskoczeni wyposażeniem placówki, lepszym niż niejedno laboratorium niemieckie. Być może to uchroniło instytut Czochralskiego przed wywiezieniem do Niemiec?

2. Od apteki do apteki

Zanim Czochralski przed stu laty rozpoczął swą karierę badawczą, pracował w małych laboratoriach chemicznych. Swoją przygodę z chemią rozpoczął jeszcze w rodzinnej Kcyni, urządzając domowe laboratorium, zapewne pod wpływem lektury znalezionych na strychu podręczników do chemii jak i wizyt w miejscowej aptece. Warto pamiętać, że ówczesna apteka nie była sklepem z lekami, ale małą fabryczką chemiczną. Przyrządzano w niej nie tylko mikstury lecznicze, lecz także różne wyroby chemii gospodarczej, drogerijnej.

Po wyjeździe z Kcyni (gdzie ukończył Seminarium Nauczycielskie, lecz nie odebrał świadectwa końcowego) pracował w kilku aptekach. Później zatrudnił się w fabryce preparatów chemiczno-farmaceutycznych doktora Augusta Herbranda w Altglienicke (dziś jest to dzielnica Berlina). Należy przy tym pamiętać, że dla osób urodzonych w zaborze pruskim Niemcy były naturalnym kierunkiem umożliwiającym rozwój, a Berlin najbliższym ośrodkiem akademickim. W 1906 r. podjął pracę jako analityk w laboratorium firmy Kunheim w podberlińskim Niederschöneweide. Po roku przeniósł się do fabryki kabli Oberspree w Oberschöneweide należącej do koncernu AEG. Zadaniem Czochralskiego w laboratorium metalurgicznym było wprowadzenie aluminium do elektroniki, a więc pionierskie prace nad technologią produkcji blach, drutów i wyprasek aluminiowych, badanie stopów aluminium i standaryzacja badań metalograficznych. Metale i metalografia stały się odtąd pasją Czochralskiego. Publikował kolejne prace, nie stroniąc od tematów trudnych i nowych. Jego osiągnięcia były doniosłe i wyznaczały nowe drogi w nauce i technologii. Sława Czochralskiego powoli rosła. Umożliwiło to przeniesienie się do nowego i nowoczesnego laboratorium metaloznawczego firmy Metallbank und Metallurgische Gesellschaft we Frankfurcie nad Menem.

W czasie wojny powrócił do wyrobów drogerijnych pozwalających pracownikom na uzupełnienie nędznego zaopatrzenia wojennego. Zastąpił m.in. ze specjalnej wody kolońskiej, a odczynniki sprowadzane do produkcji pasty do zębów wykorzystano w podziemiu do produkcji materiałów wybuchowych. Po wojnie, gdy władze Politechniki nie pozwoliły mu wrócić na uczelnię, założył w rodzinnej Kcyni Zakłady Chemiczne BION. Wydaje się, że była to jakaś kopia firmy Herbranda. Produkował m.in. świece, pastę do butów, płyn do trwałej ondulacji (stosowany do dziś w jednym z zakładów fryzjerskich w Gdańsku!) i znany „Proszek od kataru z Gołąbkim”. Pamięta się również jego eksperymenty z opracowywaniem receptur na potrawy z czerwonych muchomorów i trujących roślin. Nikt nie zatruł się tymi specjałami. Szkoda więc, że nie zachowały się te przepisy.

Tak więc od małej chemii w Kcyni zaczął i na takiej chemii w tejże Kcyni skończył, pomimo tak wielkiego dorobku naukowego. Kcynia stała się więc jakby kłamrą spinającą życie profesora. Życie zatoczyło wielki krąg – poprzez Berlin, Frankfurt i Warszawę powrócił do źródeł. Stąd też przed laty ruszyła fala

działań przywracających Jana Czochrałskiego świadomości społeczeństwa polskiego i międzynarodowego klanu uczonych. Swego rodzaju zwieńczeniem tych działań jest czerwcową uchwałą Senatu Politechniki Warszawskiej, otwierająca nowy etap prac nad upamiętnieniem prof. Jana Czochrałskiego.



Rys. 5. Ulotka reklamowa proszku od kataru

3. Mecenat

Jan Czochrałski był nie tylko badaczem zapatrzonym w pracę naukową. Nie bardzo wiadomo skąd wzięło się u niego zainteresowanie i zamiłowanie do sztuki i literatury. Może wieczorne opowieści jego matki będące jakąś odtrutką na germanizację w szkole? A może to były geny? Jego kuzynka śpiewała w berlińskiej operze, a jej brat był stroicielem fortepianów. Czochrałski miał też ciekawy wzór do naśladowania – doktora Ericha Kunheima i jego ojca Hugona słynących z willi z galerią obrazów i z czwartków literackich skupiających znakomitości ze świata sztuki i kultury. Faktem jest, że wraz z żoną Małgorzatą, pianistką, interesował się aukcjami sztuki. Kupował cenne dzieła wielkich mistrzów. Warszawski dom przy ul. Nabelaka był małym muzeum, a organizowane przez gospodarzy spotkania literackie znane były w ówczesnej Warszawie. W czasie wojny mecenat polegał na finansowaniu dzieł, co pozwalało na przeżycie artystom i literatom, na ratowaniu „Zachęty” i jej zbiorów. Niestety, wszystkie zgromadzone przez niego dzieła zaginęły po Powstaniu Warszawskim. Udało się tylko uratować kilka obrazów z „Zachęty” – dziś znajdują się w Muzeum Narodowym.

Nie można też zapomnieć, że sam pisał wiersze; największy ich zbiór pt. *Maja. Powieść miłosna* niebawem ukaże się w formie reprintu.

4. Wywiad

Najbardziej tajemnicze oblicze Jana Czochrałskiego wiąże się z jego współpracą z wojskiem polskim. Jest dopiero odkrywane, ale już dziś pozwala na inne spojrzenie na wiele wydarzeń z życia profesora i na inną ocenę jego postawy np. w czasie wojny. Wspomniałem o pracach prowadzonych dla wojska, ale jest to tylko jedna strona medalu. Okazuje się, że przyjazd Czochrałskiego do Polski w 1928 r. był „zorganizowany” przez polski wywiad wojskowy. Uchroniło to Czochrałskiego przed niemieckim kontrwywiadem. Czyżby wcześniejsze wizy-

ty w Warszawie były związane z kontaktami z Oddziałem II Sztabu Generalnego, czyli z wywiadem? Przecież nie przyjeżdżał wówczas na Politechnikę. Nie wydaje się, by pozycja Czochrańskiego była tylko przypadkowo zgodna z wytycznymi Ministerstwa Spraw Wojskowych w kwestii gwarancji dla wywiadowców powracających z Niemiec do kraju.

Tajemnicą pozostanie jednak wiele spraw z początku wojny, które tak zaważyły na dość powszechnym na Politechnice przekonaniu o jego szkodliwej współpracy z Niemcami. Nie wiemy jak traktowali go Niemcy – czy uważali nadal za obywatela niemieckiego. Czy był przymuszony do ustępstw jakiegoś rodzaju szantażem? Czy może wykonywał polecenia polskiego wywiadu? Tego się już chyba nie dowiemy. Pozostaje jednak faktem jego współpraca z wywiadem, swoista opieka ze strony wywiadu AK. Przecież nie doszłoby do wizyty w gabinecie Czochrańskiego jednego z najwyższych rangą cichociemnych, pułkownika Romualda Bielskiego, desygnowanego na szefa tymczasowej administracji polskiej po zwycięstwie Powstania Warszawskiego? Czochrański formalnie nie należał do AK, ale wspierał podziemie wykorzystując m.in. swoją pozycję wśród Niemców. Tajemnicza decyzja Senatu w 1945 r. była być może swoistą formą ochrony profesora w zmienionej rzeczywistości politycznej. Nie zapomnijmy, że nie znalazł się wśród osób wymienionych z nazwiska przez rektora jako tych, którzy „niechlubnie z grona naszego odeszli”. To, czego się tylko domyślaliśmy, znalazło w czerwcu 2011 r. nieoczekiwane i wręcz sensacyjne potwierdzenie – w dokumentach AK znaleziono meldunek wywiadowczy pochodzący od Czochrańskiego!

Profesor Jan Czochrański, wybitny polski chemik i metaloznawca, autor patentów i metod badawczych, rzecznik współpracy nauki z przemysłem, pozostaje nadal postacią tajemniczą i ciekawą, wzorem pracowitości i otwartości na nowinki naukowe i techniczne oraz – co niektórzy kwestionują – służby Ojczyźnie w najtrudniejszych okolicznościach. Pięknie o nim pisała córka: „Ojczyzna ponad wszystko – była to myśl przewodnia Ojca. O Niej myślał, dla Niej pracował, dla Niej zdobył sławę i dla Niej tyle cierpiał”. Profesor Czochrański jest też, jak sądzę, przykładem jak zawiść i nieznajomość rzeczywistych przyczyn postępowania, a także nieznajomość Wielkopolan i ich historii przez Warszawiaków, mogą być źródłem nieporozumień i tragedii.

Powyższy tekst tylko wspomina o niektórych wydarzeniach w życiu prof. Jana Czochrańskiego. Zainteresowanych Czytelników proszę o nieco cierpliwości – właśnie na ukończeniu są prace nad nową, obszerną biografią profesora – powinna ukazać się drukiem już w 2012 roku.



„Maria Skłodowska-Curie 2011” – wędrująca wystawa planszowa o życiu niezwykłej Uczzonej

Maria Pawłowska

Biblioteka Instytutu Fizyki UJ

Z okazji Międzynarodowego Roku Chemii i setnej rocznicy przyznania Nagrody Nobla Marii Skłodowskiej-Curie, z inicjatywy Muzeum Curie i Instytutu Curie w Paryżu, przy wsparciu francuskiego Ministerstwa Spraw Zagranicznych oraz Francuskiego Centrum Badań Naukowych, powstała wystawa planszowa poświęcona życiu tej niezwykłej Uczzonej. Za pośrednictwem Instytutu Francuskiego w Krakowie wystawa była prezentowana w szkołach, ośrodkach naukowych i instytucjach kultury, które w roku 2011 chciały włączyć się do obchodów Roku Marii Skłodowskiej-Curie.



fol. J. Wichman

W marcu 2011 roku ta ekspozycja trafiła do Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego. Towarzyszyła innej wystawie – przygotowanej przez Bibliotekę Instytutu Fizyki – prezentacji zbiorów dotyczących Marii Skłodowskiej-Curie.

Ekspozycję otwiera plansza zatytułowana: **Warszawa-Paryż 1867–1895**, na której znalazło się zdjęcie Marii Skłodowskiej w wieku 16 lat. Właśnie ukończyła szkołę średnią, uznano ją za najlepszą uczennicę w klasie i przyznano złoty medal.

Umieszczony na planszy cytat zdecydowanie wybiega w przyszłość. Pochodzi z listu, jaki Piotr napisał do Marii w sierpniu 1894 roku: *Byłaby to jednak rzecz piękna, w którą nie ośmielam się wierzyć: spędzić życie jedno przy drugim, zahipnotyzowani naszymi marzeniami; twoim marzeniem patriotycznym, naszymi marzeniami humanitarnymi i naszymi marzeniami naukowymi.*



Zanim jednak spełni się marzenie Piotra...

Pierwsza plansza tego cyklu pokazuje najwcześniejszy okres życia Manii, bo tak nazywali ją w dzieciństwie najbliżsi. Pięcioro rodzeństwa: Zosia, Józio, Hela i Bronia, Mania jest najmłodsza. Na innej fotografii – Mania i Bronia („dwie pozytywne idealistki”) – właśnie umówiły się: Bronia wyjeżdża na studia do Paryża, Mania będzie ją wspierać finansowo pracując jako guwernantka. Na kolejnym zdjęciu – ukochany ojciec, który starał się zastąpić dzieciom zmarłą na gruźlicę matkę, obok trzy piękne, mądre córki.

W marcu 1890 roku Bronia pisze do siostry: „Przyjeżdżaj w przyszłym roku do Paryża”; jednak decyzję o wyjeździe Maria podejmuje dopiero pod koniec 1891 roku. Zapisuje się na Wydział Nauk Ścisłych na Sorbonie. Jest jedną z 23 dziewczyn studiujących na tej uczelni i pierwszą kobietą studiującą fizykę. Po dwóch latach ciężkiej pracy uzyskuje z pierwszą lokatą licencjat z fizyki. Dzięki stypendium Aleksandrowiczów, które ku zaskoczeniu fundatorów zwróci w całości, by mogli z niego skorzystać inni potrzebujący, w 1894 roku otrzymuje licencjat z matematyki, tym razem z drugą lokatą. W tym samym roku rozpoczyna pracę w laboratorium Lippmana, gdzie bada właściwości magnetyczne niektórych stali.

Piotr Curie w środowisku naukowym jest już uznanym fizykiem. Słynie z prac dotyczących piezoelektryczności, magnetyzmu i symetrii. Jest cenionym eksperymentatorem i profesorem w ówczesnej Miejskiej Szkole Fizyki i Chemii Przemysłowej, gdzie wykłada fizykę ogólną. Jest zauroczony inteligencją młodej Polki – Marii Skłodowskiej. Piotra i Marię połączyła miłość do nauki, zainteresowanie fizyką i wspólna praca w laboratorium. Pierwszym podarunkiem Piotra dla Marii była książka naukowa, którą sam napisał. W lipcu 1895 roku są już małżeństwem.

Na swój miesiąc miodowy udają się w podróż po cudownych wybrzeżach Bretanii. Na otrzymanych w prezencie ślubnym rowerach – szczyście mody i elegancji we Francji ówczesnych czasów, objeżdżają całe górzyste wybrzeże północno-zachodniej Francji. Pani Curie pracuje w laboratorium męża i prowadzi dom. Po urodzeniu córki Ireny godzi pracę naukową z obowiązkami macierzyńskimi.



Drugą serię plansz, zatytułowaną: *Wspólne dzieło 1895–1906*, otwiera najważniejszy dla nas Polaków cytat z artykułu Marii i Piotra Curie, w którym piszą: *Wierzymy, zatem, że substancja, którą wydobyliśmy z blendy smolistej, zawiera metal jeszcze nieopisany [...]. Jeśli potwierdzi się istnienie tego metalu, proponujemy, żeby nazwano go polonem, na cześć kraju, z którego pochodzi jedno z nas.*



Na planszach tego cyklu znajdują się kopie dyplomów noblowskich Marii i Piotra Curie, ich zdjęcie w laboratorium, faksymile notatek.

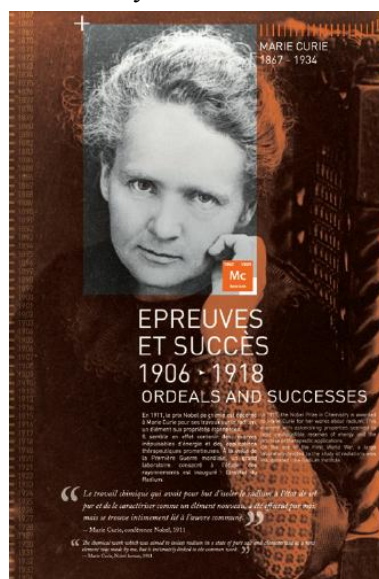
Za radą Piotra Maria postanawia badać właściwości promieniowania odkrytego przez H. Becquerela. Zamierza przebadać rudy uranu, by sprawdzić, czy tylko uran emituje te nieznanne promienie, a także to, czy istnieją inne substancje o podobnych właściwościach. Do badań dołącza Piotr. W lipcu 1898 roku małżonkowie ogłaszają odkrycie polonu, w grudniu donoszą o odkryciu radu. Maria wyznacza ciężar atomowy radu: 225,93. W czerwcu 1903 roku ma miejsce obrona pracy doktorskiej Marii Skłodowskiej-Curie: „Badanie ciał radioaktywnych”. Wynik egzaminu jest dla niej triumfem: **Uniwersytet Paryski nadaje Pani tytuł doktora nauk fizycznych – z adnotacją: „tres honorable”** (z najwyższą pochwałą).

Ukoronowaniem ciężkiej, wykonywanej w bardzo trudnych warunkach, pracy naukowej było przyznanie pod koniec 1903 roku Piotrowi Curie i jego małżonce Marii Skłodowskiej-Curie, Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki za badania promieniotwórczości oraz za odkrycie radu i polonu. Na podkreślenie zasługuje fakt, że małżonkowie Curie udostępnili światu proces wytwarzania radu, rezygnując z praw do patentu. Nowa metoda terapeutyczna, zwana radiolecznictwem, lub jak mówiono we Francji curieterapią, szybko upowszechniła się w wielu krajach.

W 1904 roku na Sorbonie powstaje katedra fizyki, którą obejmuje nowo mianowany profesor, Piotr Curie. Maria otrzymuje nominację na kierowniczkę laboratorium organizowanego przy katedrze. Nareszcie małżonkowie mogą opuścić starą szopę, która do tej pory służyła im za laboratorium. Gdy życie państwa Curie zaczyna się powoli stabilizować, 19 kwietnia 1906 roku pod kołami rozjeżdżonego wozu konnego ginie Piotr Curie. Jego śmierć wywarła olbrzymi wpływ na dalsze prace nad promieniotwórczością, ale ich nie przerwała. Maria, pomimo przeżytej tragedii i obowiązków matki dwóch córek: dziewięcioletniej Ireny i dwuletniej Ewy, musi te badania kontynuować.

Motywnym przewodnim trzech kolejnych plansz, zebranych pod wspólnym tytułem: **Trudności i sukcesy 1906–1918**, jest cytat pochodzący z wykładu, jaki Maria Skłodowska-Curie wygłosiła odbierając w 1911 roku drugą Nagrodę Nobla, tym razem z chemii: *Prace chemiczne, które miały na celu wyodrębnienie radu w postaci czystej soli i scharakteryzowanie go jako nowego pierwiastka, zostały wykonane przeze mnie, ale są ściśle powiązane ze wspólnym dziełem.*

Maria Skłodowska-Curie przejęła po swym zmarłym mężu wykłady z fizyki na Sorbonie. Tym samym została pierwszą kobietą – profesorem tej francuskiej uczelni. Jednak jej dorobek naukowy był bardziej ceniony na świecie niż w samej Francji, gdzie niejednokrotnie spotykała się z niechęcią, zawiścią i plotkami. We francuskiej prasie pojawiały się oszczercze zarzuty dotyczące jej życia prywatnego, a Francuska Akademia Nauk nie przyjęła jej kandydatury na członka Akademii.



29 października 1911 roku rozpoczął się w Brukseli Kongres Solvayowski. Ernest Solvay, belgijski przemysłowiec, założyciel Międzynarodowego Instytutu Fizyki, zebrał po raz pierwszy wszystkich wielkich naukowców tego czasu. Na sławnym zdjęciu, wykonanym podczas Kongresu, widzimy Marię Skłodowską-Curie, obok: Henri Poincaré i Jean

Perrin, a nieopodal: Albert Einstein, Ernest Rutherford, Max Planck, H.A. Lorentz, Arnold Sommerfeld i inni.

W 1914 roku otwarto Instytut Radowy – laboratorium prowadzące badania nad promieniotwórczością i jej biologicznymi skutkami. Maria Curie nadzorowała jego budowę, wykonywała plany, pilnowała robotników, a nawet zaprojektowała ogród, w którym osobiście zasadziła najpiękniejsze gatunki róż.

Wybuch I wojny światowej przerwał prace naukowe prowadzone w Instytucie, a Maria Skłodowska zajęła się inną działalnością: organizowała oddziały radiologiczne i wyposażała karetki (zwane przez żołnierzy karetkami „małej Curie”), w aparaturę rentgenowską. Prowadziła również szkolenia dla zespołów, które tę aparaturę miały obsługiwać. Do pracy zaangażowała swoją siedemnastoletnią córkę Irenę.



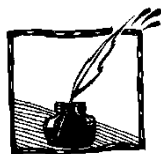
Prezentację: *Międzynarodowe uznanie 1918–1934* otwiera plansza zawierająca znamieny cytat: *Niżej wymienieni członkowie uznają, że Akademia byłaby zaszczycona wyborem pani Skłodowskiej-Curie na członka korespondenta w uznaniu roli, jaką odniosła w odkryciu nowego sposobu leczenia: „curioterapii”* (Francuska Akademia Medycyny, 7 lutego 1933).

Do badań potrzeba coraz więcej radu. W zniszczonej wojną Francji brakuje funduszy na ten cel. W 1920 roku Skłodowska poznaje amerykańską dziennikarkę „Missy” Meloney, która organizuje Marii tournée po Stanach Zjednoczonych połączone ze zbieraniem funduszy na zakup radu. Chodzi „tylko” o jeden gram radu... W USA Maria Curie witana jest entuzjastycznie. W Białym Domu spotyka się z prezydentem Hardingiem, który wkłada jej na szyję wstążkę ze złotym kluczykiem przeznaczonym do otwarcia mahoniowej skrzyneczki. Wraz z wewnętrzną warstwą ołowiu skrzyneczka waży 50 kilogramów plus jeden gram – gram radu. Wyprawa do Ameryki zapoczątkowała liczne podróże zagraniczne Marii Curie. Zapraszano ją na konferencje, wykłady, przyznawano doktoraty honorowe.



Maria Skłodowska zaznała w swoim życiu wielu trudności, ale nigdy nie straciła wiary w to, co najważniejsze: w Naukę! Gdy w 1935 roku Irena i Fryderyk Joliot odbiorą wieńczącą ich badania Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii, Marii nie będzie już na świecie. Dziedzina wiedzy, którą stworzyła, rozwinie się w przyszłości na wielką skalę. Odkrycia wielkiej uczonej staną się własnością całej ludzkości i otworzą niezmierzone perspektywy przed nauką i techniką światową.

Wystawa „Maria Skłodowska-Curie 2011” po zakończeniu Międzynarodowego Roku Chemii, przekazana zostanie w 2012 roku do Biblioteki Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego, skąd będzie można ją wypożyczyć, by informować o życiu i osiągnięciach naukowych tej niezwyklej Polki, nie tylko przy okazji kolejnych świąt i rocznic.



Przygoda z CERNem

Barbara Górska

Moja przygoda z CERNem rozpoczęła się dzięki drugiej edycji konkursu dla nauczycieli pod nazwą **Pojedź do CERNu i doświadcz niezwyklej przygody z fizyką**, organizowanego przez firmę Nowa Era Sp. z o.o.; zostałam laureatką razem z trzema innymi nauczycielami. Ten wyjazd to nasza wspiana nagroda.

Organizatorem wyjazdu nauczycieli do Europejskiego Centrum Badań Jądrowych (CERN) w Genewie był Instytut Fizyki im. Augusta Chełkowskiego Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach we współpracy ze Śląskim Kuratorem Oświaty.

Wyjechaliśmy 8 października autokarem pod opieką pań dr Anety Szczygielskiej i mgr Janiny Pawlik. Do CERNu w Genewie dotarliśmy w południe następnego dnia. Tu z ramienia CERN od razu zaopiekowali się nami panowie dr Andrzej Siemko i Mick Storr. Zaraz po zakwaterowaniu obeszlśmy CERN zapoznając się z jego topologią. Jeszcze tego samego dnia wraz z kilkoma osobami zwiedziliśmy francuskie miasteczko Saint-Genis-Pouilly leżące przy granicy ze Szwajcarią.

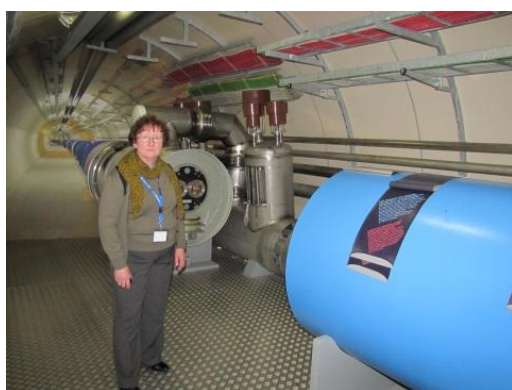
Od następnego dnia zaczęły się wykłady i ćwiczenia. Wszystkie zajęcia odbywały się w języku polskim. Program dnia był następujący: przed południem trzy wykłady, obiad, ćwiczenia lub zwiedzanie wybranych miejsc w CERNie, kolacja. Dzień kończył się około godziny 22.00, ponieważ spotykały nas różne niespodzianki, np. nocne zwiedzanie Genewy lub zakupy w centrum handlowym we Francji. Oprócz tych drobnych niespodzianek były też i większe, np. gra terenowa, polegająca na dotarciu małymi grupkami do restauracji w Genewie na uroczystą kolację. Była to wspiana okazja zobaczenia ciekawych miejsc w tym mieście. W przeddzień wyjazdu byliśmy w Chamonix i wyjechaliśmy kolejką na Aiguille du Midi na wysokość 3842 m n.p.m.

Podczas pobytu wysłuchaliśmy prezentacji: „Jak budowano LHC”, „Jak działa LHC”, „Klasyczne eksperymenty fizyczne w pigułce”, „Akceleratory i detektory cząstek wokół nas”. Zgłębialiśmy „Istotę materii”, „Jak «zobaczyć» cząstki elementarne?” i „Wstęp do fizyki akceleratorów”. Zbudowaliśmy „Komorę mgłową – zrób to sam”. Zwiedziliśmy LINAC, LEIR i byliśmy w Centrum Komputerowym, w Hali Testów Technologii Akceleratorowych, w Centrum Wizyt Eksperymentu ATLAS i w Centrum Kontroli Akceleratorów. Nie obyło się bez warsztatów: „W poszukiwaniu utraconej symetrii” i roztrząsania „Jak znaleźć igłę w stogu siana”. Poruszano również takie tematy jak: „Fizyka jądrowa: od własności jądra atomowego po medycynę”, czy „Czego oczekują fizycy w eksperymentach LHC”. Wielką niespodziankę zrobił nam

Mick Storr zabierając nas na głębokość 100 m do CMS, gdzie zobaczyliśmy, że Polska ma również swój ogromny wkład w stworzenie tego międzynarodowego laboratorium.

Może jeszcze kilka uwag o kosztach. Całość wyjazdu zamyka się w kwocie 3000 zł i około 30 franków szwajcarskich. Ale warto wliczyć wyjazd kolejką na Aiguille du Midi około 45 euro, no i kieszonkowe, gdyby ktoś chciał zrobić jakieś zakupy, zwiedzić zamek Chillon nad jeziorem Genewskim lub zjeść ciastko w mieście Mozarta i Dopplera – Salzburgu i obiad w Czechach w drodze powrotnej.

Więcej informacji związanych z wyjazdem na szkolenia w CERNie można znaleźć na stronie: <http://www.dydaktykafizyki.us.edu.pl/>.





CO CZYTAĆ

Żona astronoma

Żona astronoma. Historia życia Elżbiety Heweliusz, Kornelia Stepan, Bukowy Las 2010

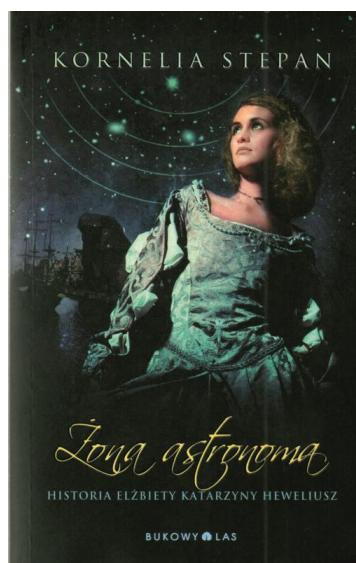
Przyznana w tym roku Nagroda Nobla dotyczy osiągnięć z astrofizyki. Współczesne odkrycie naukowe dotyczące obserwacji supernowych uświadamia nam, jaki kolosalny postęp w metodach doświadczalnych dokonał się od czasów Galileusza, Keplera i gdańskiego astronoma Heweliusza.

Na ogół nieznana jest postać Elżbiety, żony Heweliusza, zdolnej uczoney, pierwszej profesjonalnej astronomki. Nie tylko prowadziła z Heweliuszem obserwacje, ale też po jego śmierci dokonała publikacji jego prac. Ze współczesną efektywnością starała się o „granty” na badania (np. od króla Jana III Sobieskiego).

Autorka Kornelia Stepan napisała powieść o uczoney, o jej życiu prywatnym i osiągnięciach naukowych. Znaczna część książki to opis dzieciństwa i okresu dojrzewania. Autorka pisze książkę w pierwszej osobie używając archaizowanego współczesnego języka. Poznajemy nieco egzaltowaną dziewczynkę. Pomimo, iż pochodziła z bogatej rodziny kupieckiej, jej życie z dzisiejszego punktu widzenia nie było godne pozazdroszczenia. Autorka, miejmy nadzieję, że w miarę wiernie, odtwarza życie codzienne w tamtych czasach, urządzenie mieszkań, wygląd ulicy, a nawet ubiory. Zanurzamy się w XVII-wieczny Gdańsk, miasto bogate, wielokulturowe.

Elżbieta, wydana w wieku 15 lat za sławnego już wtedy i znanego astronoma Jana Heweliusza, wykorzystwała daną jej w życiu szansę i włączyła się w prace badawcze męża, który urządził na dachach trzech gdańskich kamienic najnowocześniejsze wtedy, w skali światowej, obserwatorium astronomiczne.

Jak to w powieściach bywa, autorka skupiła się na życiu emocjonalnym bohaterki, niemniej nie pominęła też opisu jej prac naukowych.



Z.G-M



„Nauki Przyrodnicze na Scenie 5”

Wojciech Nawrocik

Przewodniczący KKO

Wydział Fizyki UAM w Poznaniu

Zaproszenie do udziału w Ogólnopolskim Festiwalu „Nauki Przyrodnicze na Scenie 5” i Europejskim Festiwalu „Science on Stage 2013”

Krajowy Komitet Organizacyjny (KKO) uprzejmie informuje, że zgodnie z wieloletnią tradycją kolejny Ogólnopolski Festiwal „Nauki Przyrodnicze na Scenie 5” odbędzie się na Wydziale Fizyki UAM w Poznaniu w dniach **21 i 22 września 2012 roku**.

Do udziału w festiwalu zapraszamy nauczycieli przedszkoli, szkół podstawowych, ponadpodstawowych, dydaktyków nauk przyrodniczych (fizyki, chemii i biologii) i matematyki z wyższych uczelni oraz popularyzatorów tych nauk z całej Polski. Nauczycielom uczestniczącym w festiwalu mogą towarzyszyć grupy liczące do 10 uczniów.

Celem poznańskiego festiwalu „Nauki Przyrodnicze na Scenie 5” będzie pokazanie wkładu wymienionych nauk w budowanie wiedzy społeczeństwa o otaczającym nas świecie i o wpływie tych nauk na codzienne życie człowieka. Jak na wszystkich poprzednich festiwalach występy zespołów oceniane będą w trzech kategoriach:

- **demonstracje zjawisk,**
- **działania artystyczne** związane z wymienionymi naukami (przedstawienia teatralne, fotografie, rysunki, wiersze itp.),
- **pokazy multimedialne** dotyczące różnych problemów związanych z ostatnimi osiągnięciami naukowymi w dziedzinie nauk przyrodniczych i matematyki.

Zgłoszenia gotowości udziału w festiwalu prosimy przysyłać **tylko** drogą elektroniczną **do 6 maja 2012 roku** na adres mobiala@amu.edu.pl.

KKO do dnia **31 maja 2012 roku** zamieści informację, które zgłoszenia zostały zakwalifikowane do udziału w festiwalu. Szkoły mogą zgłaszać chęć udziału w wymienionych wyżej trzech kategoriach, jednak liczba uczestników z jednej szkoły nie może przekraczać 10 osób.

KKO stara się uzyskać fundusze na pokrycie kosztów udziału w festiwalu, m.in. na opłacenie posiłków i noclegów uczestnikom festiwalu. W chwili obecnej nie możemy zapewnić Państwa, że będziemy mogli zaoferować uczestnikom darmowe posiłki i noclegi. Mamy jednak nadzieję, że uda nam się zdobyć fundusze na choćby częściowe pokrycie kosztów.

Równocześnie informujemy, że w **dniach 25–28 kwietnia 2013 roku** wspólnie z kolegami niemieckimi z *Science on Stage Deutschland* organizujemy kolejny Europejski Festiwal „**Science on Stage 2013**” w przygranicznych miastach – Słubicach i Frankfurcie nad Odrą.

Festiwal ten zgromadzi około 400 nauczycieli przedmiotów przyrodniczych i matematyki z około 30 krajów europejskich i poza europejskich. Wybrano już motto festiwalu: „Crossing borders in Science Teaching” (Przekraczanie barier w nauczaniu nauk przyrodniczych i matematyki).

Staramy się o to, aby patronat na tym europejskim festiwalu objęli Panowie Prezydenci Polski i Niemiec.

Grupa polskich uczestników festiwalu liczyć będzie około 70 nauczycieli wyłonionych głównie spośród uczestników festiwalu w Poznaniu. Ponadto przewiduje się jednodniową wizytę na festiwalu w Słubicach – 100 nauczycieli polskich i 100 niemieckich.

Czekają nas więc dwa lata wyteżonych przygotowań do ogólnopolskiego festiwalu „Nauki Przyrodnicze na Scenie 5” w roku 2012 i europejskiego festiwalu „Science on Stage” Europe w roku 2013.

Zapraszamy do udziału w festiwalach, liczymy na Państwa aktywność!

W razie wątpliwości związanych z organizacją festiwalu proszę o e-mailowy lub telefoniczny kontakt:

Małgorzata Obiała mobiala@amu.edu.pl lub tel. 61-8295210

Wojciech Nawrocik nawrocik@amu.edu.pl lub tel. 61-8295169

Informacje o Ogólnopolskim Festiwalu „Nauki Przyrodnicze na Scenie 5” znaleźć można na stronie <http://www.staff.amu.edu.pl/~fizscena/>

Informacje o Europejskim Festiwalu „Science on Stage” Europe umieszczone są na stronie <http://www.science-on-stage.eu/>.

Stowarzyszenie Absolwentów i Przyjaciół V Liceum Ogólnokształcącego im. Augusta Witkowskiego w Krakowie zaprasza szkoły do wzięcia udziału w

Polsko-Ukraińskim Konkursie Fizycznym

LWIĄTKO

X EDYCJA ODBĘDZIE SIĘ 26 marca 2012 r.

**INFORMACJE, ZGŁOSZENIA ORAZ ZADANIA Z UBIEGŁYCH LAT
NA STRONIE INTERNETOWEJ**

www.lwiatko.org

ZGŁOSZENIA SZKÓŁ DO KONKURSU DO 31 stycznia 2012 r.

1. Mały walec (promień R) toczy się wokół dużego nieruchomego walca (promień $4R$), wracając do początkowego położenia. Ile obrotów wykonuje mały walec?

A. 1. B. 2. C. 3. D. 4. E. 5.



2. Żagiel słoneczny (służący do rozpędzania statków kosmicznych bez użycia silników) powinien mieć powierzchnię

A. białą,
B. czarną,
C. przezroczystą,
D. dobrze odbijającą,
E. dobrze pochłaniającą.

3. Który wyłącznik wystarczy zamknąć, by zaświeciła choć jedna żaróweczka



E. Zamknięcie jednego nie wystarczy.



Odpowiedzi do zadań: 1. E, 2. D, 3. B.