

Foton 102

Jesień
2008

Pismo dla nauczycieli i studentów fizyki oraz uczniów

INSTYTUT FIZYKI × UNIwersYTET JAGIELLOŃSKI
SEKCYJA NAUCZYCIELSKA POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO

Zdjęcia: images.google.com



Wielki Zderzacz Hadronowy LHC
Fizyka w wesołym miasteczku
Polski model supernowej
50 lat cyklotronu w Krakowie

Nagroda Nobla z fizyki w 2008

Królewska Szwedzka Akademia Nauk postanowiła przyznać połowę Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki w roku 2008 fizykowi amerykańskiemu pochodzenia japońskiego **Yoichiro Nambu** (Enrico Fermi Institute, University of Chicago); drugą połowę nagrody otrzymali wspólnie japońscy fizycy: **Makoto Kobayashi** (High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba) i **Toshihide Maskawa** (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University).



Yoichiro Nambu



Makoto Kobayashi



Toshihide Maskawa

W roku 1960 Yoichiro Nambu sformułował matematyczny opis spontanicznego złamania symetrii w fizyce cząstek elementarnych. Teorie Nambu okazały się niezwykle użyteczne w tworzeniu Modelu Standardowego, który opisuje zachowanie najmniejszych cząstek materii.

Makoto Kobayashi i Toshihide Maskawa wykazali w latach 70., że Model Standardowy trzeba rozszerzyć, wprowadzając trzecią rodzinę kwarków. Istnienie tych kwarków potwierdzono w ostatnich latach dzięki niezależnym eksperymentom przeprowadzonym w detektorach BaBar (Stanford, USA) oraz Belle (Tsukuba, Japonia).



Nieśmiały powrót narracji

Od lat istnieje rozdźwięk pomiędzy hasłami na temat nauczania a światem rzeczywistym, czyli tym, co dzieje się na lekcjach w szkole. Pomiędzy – w większości słusznymi – zaleceniami „jak być powinno, co należy” a możliwością realizacji tych zaleceń jest przepaść nie do przebycia z powodów, w gruncie rzeczy, oczywistych. Cały świat ogarnęła przemożna chęć (najlepsze niemieckie słowo) *zglajszachtowania* – wszyscy koniecznie uczą się tego samego – i obiektywizacji oceniania wyników nauczania. Przy różnorodności talentów uczniów, różnorodności nauczycieli, ich wiedzy i temperamentu to nie może dawać dobrych rezultatów. Testy wyboru wyparły proste i czasami zmyślne zadania, które dawały uczniom i nauczycielom szansę na ciekawe dyskusje, wyzwajające inicjatywę i nierutynowe myślenie.

W praktyce, w warunkach presji czasowej i mierzonych testami wyników, wbrew szczytnym hasłom, nauczanie przeradza się w wygolone ze szczegółów i kontekstu przerabianie *vademecum*, co najwyżej z elementami, skądinąd cennych, widowiskowych demonstracji.

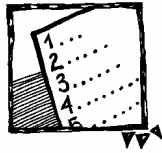
Obecnie (patrz s. 69 o konferencji w Monachium) zaczęto dostrzegać potrzebę mądrego używania historii fizyki w nauczaniu (nie chodzi tylko o encyklopedyczne życiorysy kilku uczonych) oraz rolę starej formy nauczania, czyli narracji. To, siłą rzeczy, oznacza zindywidualizowanie nauczania.

Cóż innego robił Arkadiusz Piekara w *Felusiu maszyniście*, gdy wykladał, a raczej odkrywał, krok po kroku, arcytrudne przecież prawa Newtona. On opowiadał, rozmawiał z czytelnikiem. A co robił Galileusz, który chciał być zrozumiany przez szersze grono, nie tylko uczonych? Konwersował z czytelnikiem, opisywał mu rozmaite rzeczywiste i wymyślone przypadki. Narracyjny podręcznik napisał niezapomniany Eric Rogers. I cóż się dzieje z tym podręcznikiem? Wygrzebałam go kiedyś ze sterty makulatury. Dlaczego wylądował na śmietniku? Za gruby! Za dużo czasu trzeba zużyć na czytanie. Ludzie sądzą, że wystarczy im *vademecum*, bryk, skrót, a przecież uczniowie w szkole to nie zawodowi fizycy, którzy mogą rozkoszować się zwięzłą formą *Mechaniki* Landaua.

Koleżanki i Koledzy, nie bójmy się narracji na lekcjach. Z narracją, w miejsce suchego, szybkiego wywodu, mamy szansę dotrzeć do większej liczby uczniów. Nie jest to łatwa droga, bo wymaga większego namysłu i przygotowania. Wiemy, że każde słowo się liczy. Nie chodzi przecież o barokowe ornamenty i zbędne dygresje.

Foton, jak zwykle, będzie starał się dostarczać Państwu ciekawych materiałów, również narracyjnych.

Z.G-M



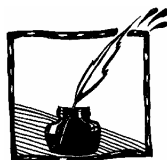
Contents

Come back of narrative style of teaching <i>Zofia Gołąb-Meyer</i>	1
Polish supernova model <i>Andrzej Odrzywółek</i>	4
Large Hadron Collider in CERN <i>Jerzy Bartke</i>	14
Half a century of Cracow cyclotron U120 <i>Adam Strzałkowski</i>	17
Physical dimensions (part 1) <i>Jerzy Karczmarczuk</i>	21
Candela – a physical unit <i>Andrzej Zięba</i>	34
Non conventional cars – looking for cost economization and minimalization environment polutions <i>Zbigniew Sosin</i>	39
Physics in the Amusement Park Mirabilandia <i>Giovanni Pezzi, Alessandro Foschi, Fabio Ortolani, Stefano Alberghi</i>	48
The ghosts of desert <i>Dagmara Sokółowska</i>	57
Problems. Noises from the cave (10) – A Stone, a bird and a tree <i>Adam Smólski</i>	59
Problems. Travelling across the wind.....	65
What to read.....	67
Stories in Science Teaching <i>Zofia Gołąb-Meyer</i>	69
Polish Physical Society Awards for 2008.....	71
Comments on the proposed Polish school reform.....	72
Polish Festival „Science on Stage 3”.....	73
The results of 7 th Polish Physical Society Competition on Demonstrations in Physics.....	76
Physics Academy for school students – Summer 2008 <i>Dagmara Sokółowska</i>	77



Spis treści

Nieśmiały powrót narracji <i>Zofia Gołąb-Meyer</i>	1
Polski model supernowej <i>Andrzej Odrzywołek</i>	4
Wielki Zderzacz Hadronowy w CERN-ie <i>Jerzy Bartke</i>	14
Pół wieku krakowskiego cyklotronu U120 <i>Adam Strzałkowski</i>	17
O wymiarze wielkości fizycznych (część 1) <i>Jerzy Karczmarszuk</i>	21
O świecy zwanej kandelą <i>Andrzej Zięba</i>	34
Niekonwencjonalne napędzanie samochodów – sposób na obniżenie kosztów transportu i zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska <i>Zbigniew Sosin</i>	39
Fizyka w wesołym miasteczku <i>Giovanni Pezzi, Alessandro Foschi, Fabio Ortolani, Stefano Alberghi</i>	48
Duchy pustyni <i>Dagmara Sokółowska</i>	57
Odgłosy z jaskini (10). Kamień, ptak i drzewo <i>Adam Smólski</i>	59
Kącik zadań. Jazda i lot pod wiatr	65
Co czytać	67
Nauczanie fizyki poprzez opowiadania z historii fizyki <i>Zofia Gołąb-Meyer</i>	69
Nagrody Polskiego Towarzystwa Fizycznego za rok 2008	71
Stanowisko PTF w sprawie reformy programowej	72
Ogólnopolski Festiwal „Nauki Przyrodnicze na Scenie 3”	73
Wyniki VII Ogólnopolskiego Konkursu na Doświadczenie Pokazowe z Fizyki	76
Akademia Fizyki Lato 2008 <i>Dagmara Sokółowska</i>	77



Polski model supernowej

Andrzej Odrzywołek

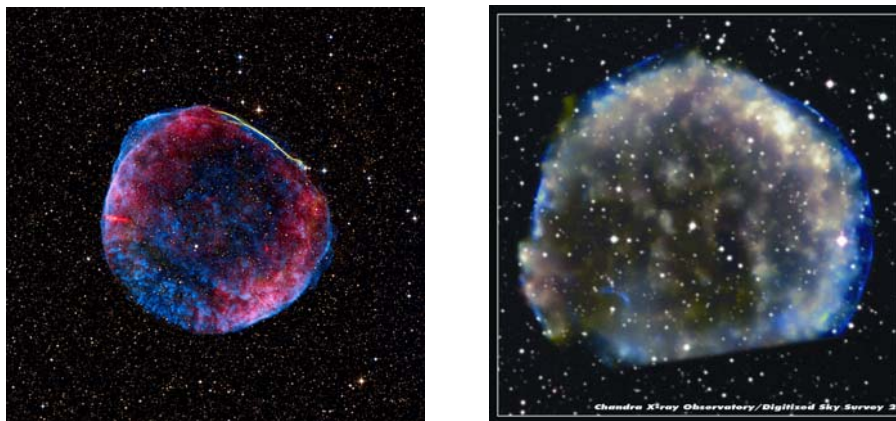
Instytut Fizyki UJ

1. Wstęp: Dwa typy supernowych

Supernowe to eksplodujące gwiazdy, spektakularne, najpotężniejsze znane wybuchy we Wszechświecie (rys. 1). Ze względu na ogromną skalę (wybuchają gwiazdy o masie przekraczającej masę Układu Słonecznego), zjawiska te są obserwowane przez wiele miesięcy z odległości sięgających krańca obserwowalnego Kosmosu. Wybuchy wewnątrz naszej Galaktyki (rys. 2), ostatnio w 1006, 1054, 1572 i 1604 roku, bywają widoczne nawet w ciągu dnia. Jednak nie tylko to przyciąga astronomów i astrofizyków do tego tematu. Zdziwiający są mechanizmy fizyczne eksplozji. Panują tam ekstremalne warunki fizyczne, w których prędkości są bliskie prędkości światła. Formują się czarne dziury i prawie wszystkie znane atomy, a neutrina, które zwykle przenikają na wskroś Ziemię, zostają uwięzione niczym gaz w butelce. Istnieje sieć powiązań problemu supernowych z nieomal wszystkimi gałęziami wiedzy ludzkiej, od kosmologii do wielkich wymiarów żywych organizmów; to tylko część zagadnień związanych z supernowymi.



Rys. 1. Supernowa typu Ia o numerze katalogowym SN 1994 D



Rys. 2. Pozostałości po termojądrowej eksplozji białych karłów w 1006 i 1572 roku

Najważniejszym elementem teorii supernowych jest mechanizm wybuchu, określany popularnym anglojęzycznym zwrotem „engine”. Ten „silnik” napędza eksplozję, której dalszy przebieg zależy od struktur zewnętrznych: samej wybuchającej gwiazdy, gwiazdy towarzyszącej, otaczającej mgławicy i materii międzygwiazdowej. Teoria rozwija się w dwóch kierunkach: (1) wyjaśnienia natury „silnika”, który musi wygenerować w krótkim czasie – rzędu sekund – gigantyczną energię oraz (2) obliczenia widzialnych, obserwowanych przez astronomów skutków wybuchu: przyszłej supernowej. Problem pierwszy jest ogromnym wyzwaniem teoretycznym, i mówiąc szczerze, jego rozwiązanie ciągle wydaje się odległe. Wiemy już sporo, ale potykamy się o liczne szczegóły, a supernowe modelowane w komputerach nie chcą wybuchnąć. Drugie zagadnienie jest kluczowe, gdyż pomijając fale grawitacyjne i neutrino (których nie potrafimy skutecznie obserwować) tylko druga faza eksplozji dostarcza informacji astrofizykom. Trudno oprzeć się wrażeniu, że niezależnie od wyrafinowania stosowanych metod, zawsze będą to informacje niejako „z drugiej ręki”.

Tematem artykułu będzie mechanizm wybuchu, konkretnie jeden z dwóch znanych sposobów na wyzwolenie energii wystarczającej do rozerwania gwiazdy. Pierwszym z nich jest kolaps grawitacyjny. Proces ten jest łatwy do zrozumienia i znany od nieomal 100 lat.

Niech w pewnym momencie kulista gwiazda o masie M i promieniu R utraci stabilność i zapadnie się do obiektu o promieniu r , który jest znacznie mniejszy niż R . Wyzwolona energia, zgodnie z teorią Newtona, wynosi – pomijając bliski 1 czynnik:

$$E = E_{\text{start}} - E_{\text{koniec}} = G M^2/R - G M^2/r,$$

gdzie G to stała grawitacyjna. Wstawiając wartości typowe dla jądra gwiazdy pre-supernowej np. $M = 3 \times 10^{30}$ kg (1,5 masy Słońca), $R = 1000$ km (promień wypalonego jądra gwiazdy) i zakładając, że wynikiem zapadania się będzie

gwiazda neutronowa o promieniu $r = 10$ km otrzymamy energię około 4×10^{46} J, czyli ponad 100 razy więcej niż dla typowej supernowej. Niestety, przekształcenie energii grawitacyjnej do postaci „użytecznej” jest niezwykle trudne i większość z niej zostaje albo wypromieniowana w postaci neutrin albo zamrożona w postaci masy i pola grawitacyjnego czarnej dziury. Astrofizycy z trudem wyszukują procesy pozwalające wydobyć 1% energii grawitacyjnej na użytek eksplozji gwiazdy. Z najbardziej popularnych można wymienić podgrzewanie neutrinami, efekty 3D, wibracje gwiazdy neutronowej czy oddziaływanie pól magnetycznych i rotującej czarnej dziury prowadzące do wyrzutu strug plazmy, tzw. *jetów*.

Drugi z mechanizmów jest tak oczywisty, że dziwne wydaje się, iż do lat 60. nikt go nie zaproponował: wybuch termojądrowy. Jest to tym bardziej zaskakujące, bo kilka lat wcześniej były przeprowadzone próby z bronią wodorową, a od dawna wiadano, że reakcje termojądrowe zachodzą w Słońcu. Upraszczając, „engine” jest w tym wypadku gigantyczną bombą, w wielu aspektach podobną do „zwykłych”, posiadanych przez armie. Zajmiemy się teraz bardziej szczegółowo tym zjawiskiem, określanym jako „supernowa termojądrowa” (ang. *thermonuclear supernova*) w odróżnieniu od „supernowej implozyjnej” (ang. *core-collapse supernova*) opisaney w poprzednim akapicie.

2. Wybuchy termojądrowe w Kosmosie

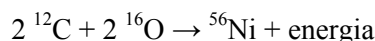
2.1. Standardowy model supernowej Ia

Wśród kilku typów wybuchów termojądrowych, takich jak gwiazdy nowe i rozbłyski rentgenowskie, supernowe zajmują specjalne miejsce. Po pierwsze, energia wybuchu jest największa, po drugie, następuje kompletne zniszczenie gwiazdy, która dosłownie zostaje roznieciona w pył. Jak do tego dochodzi?

Musimy dysponować odpowiednią ilością „materiału wybuchowego”, znaleźć obiekt lub układ, w którym może samorzutnie dojść do zapłonu oraz upewnić się, że eksplozja nie skończy się niewypałem. Dodatkowe warunki nakładają obserwacje. Ponieważ wybuchy supernowych typu Ia, które identyfikujemy z termojądrowymi, obserwowane są (w odróżnieniu od pozostałych typów) we wszystkich typach galaktyk, a nawet w przestrzeni międzygalaktycznej, nie mogą to być egzotyczne, rzadko spotykane ciała niebieskie. Co więcej, supernowe te obserwujemy w galaktykach, które od miliardów lat nie „produkują” nowych gwiazd. Dlatego mechanizm zapłonu musi działać niezwykle powoli.

Wiele lat pracy teoretyków i astronomów–obserwatorów pozwoliło zawęzić gigantyczny zbiór kombinacji paliwo / sposób zapłonu / rodzaj eksplozji / wybuchające ciało niebieskie. Obecnie rozważa się ich kilka. Dominuje pogląd, że klasyczna supernowa termojądrowa (około 85% przypadków) jest wybuchem białego karła (wygasłej gwiazdy), składającego się z mieszaniny 50% węgla (C) i 50% tlenu (O).

Oczywiście taki biały karzeł pozostawiony sam sobie nigdy nie wybuchnie. Dlatego musi znajdować się w układzie podwójnym, a materia z jego towarzysza musi być powoli wysysana i gromadzona na jego powierzchni. Proces ten nazywamy **akrecją** i spotykamy go w Kosmosie bardzo często. Nie zawsze prowadzi to do wybuchu supernowej, zwykle zgromadzony materiał spala się gwałtownie, a wybuch nie przenosi się dalej. Zjawisko takie, tysiące razy słabsze od supernowej, nazywamy gwiazdą nową. Jeżeli jednak w wyniku akrecji masa białego karła wzrasta, sytuacja jest inna. Prawa fizyki ograniczają jego maksymalną masę. Można obliczyć, że biały karzeł CO, którego masa rośnie zbliżając się do wartości 1,38 masy Słońca, ulega samozapłonowi w rejonie centralnym. Dla jasności należy podkreślić, że nie jest to bynajmniej chemiczny zapłon węgla w tlenie, ale *synteza termojądrowa* tlenu i węgla prowadząca do powstania jąder znajdujących się w tablicy Mendelejewa blisko żelaza. Szczegóły tej reakcji nie będą potrzebne do zrozumienia samego wybuchu, wystarczy wiedzieć, że dochodzi do połączenia jąder atomowych węgla i tlenu, w wyniku czego powstają (w przypadku zachodzenia kompletnej reakcji) jądra radioaktywnego niklu:



gdzie, zgodnie ze słynnym wzorem Einsteina:

$$\text{energia} = (2 M_{\text{C}} + 2 M_{\text{O}} - M_{\text{Ni}}) c^2.$$

Całkowita energia wyzwolona na skutek wspomnianej powyżej reakcji w białym karle o masie 1,38 masy Słońca wynosi około 2×10^{44} J, czyli właśnie tyle, ile wyzwala wybuch supernowej typu Ia. Aż do tego momentu większość teoretyków jest dosyć zgodna. „Schody” zaczynają się jednak już w następnym kroku.

2.2. Mechanizmy wybuchu: spalanie, wybuch, detonacja

Naiwnie rozumując, poprzez analogię ze zwykłymi bombami, wydaje się, że jeżeli mamy już zgromadzony materiał wybuchowy i podpaliliśmy lont, to reszta nie ma znaczenia. Otóż nie jest to takie proste. Prawie każda wydzielająca energię (egzotermiczna) reakcja, zarówno chemiczna jak i termojądrowa, może przebiegać zasadniczo w trzech reżimach: spalaniu, wybuchu (deflagracji) i detonacji. Granica oddzielająca spalanie i deflagrację jest nieco umowna. Na ogół o spalaniu mówimy, gdy reakcja zachodzi na tyle wolno, że wyzwolona energia jest natychmiast odprowadzana na zewnątrz. Przykład to płomień świecy czy reakcje termojądrowe w Słońcu. Jeżeli energia *nie jest* odprowadzana na zewnątrz to naturalnie gromadzi się, prowadząc do wzrostu temperatury. Wzrost temperatury powoduje zwiększenie tempa spalania itd. Proces ten może narastać bardzo szybko aż do wyczerpania się „paliwa”. Na ogół jednak znacznie wcześniej wyzwolona energia przekształca się w energię kinetyczną i „paliwo” zostaje rozrzucone zanim zdąży się spalić. Zazwyczaj tworzy się front

spalania: powierzchnia oddzielająca „paliwo” od „popiołu” nazywana jest zwykle płomieniem. Przemieszcza się ona stosunkowo wolno (w porównaniu do prędkości dźwięku) i na skutek niestabilności może przybierać bardzo złożone kształty. Tego rodzaju wybuch jest nie tylko powolny, ale również mało efektywny. Spaleniu ulega na ogół tylko ułamek całkowitej masy materiału wybuchowego. W warunkach ziemskich stosujemy liczne triki zwiększające efektywność wybuchu, jak zapłon wielopunktowy, grube obudowy bomb zapobiegające rozrzutowi materiału palnego itp.

Najsukuteczniejsze, z punktu widzenia gwałtowności wybuchu, jest zmuszenie (pobudzenie) paliwa do detonacji. Pojęcie to jest blisko spokrewnione z *falą uderzeniową*. Front fali uderzeniowej (ang. *shock*) jest to przemieszczająca się powierzchnia, na której skokowo zmienia się ciśnienie, temperatura i gęstość płynu. Powstaje samorzutnie jako skutek rozchodzenia się bardzo dużych (nie liniowych) zaburzeń, zazwyczaj związanych z wybuchami. Amplituda fali uderzeniowej (np. różnica ciśnienia przed i po jej przejściu) w otwartej przestrzeni zwykle szybko maleje z czasem i odległością od „epicentrum” wybuchu. W odróżnieniu od fal akustycznych, które są małymi zaburzeniami, czy też płomienia (fali deflagacyjnej), który stanowi także powierzchnię nieciągłości, fale uderzeniowe poruszają się z prędkościami ponaddźwiękowymi. Jeżeli taka fala uderzeniowa wejdzie w obszar zajęty przez paliwo lub też wytworzy się wewnątrz niego i będzie dostatecznie silna, temperatura i ciśnienie tuż za jej frontem mogą być wystarczająco duże, aby nastąpił zapłon. Wydzielona energia „napędza” falę uderzeniową, która od tego momentu nie słabnie, ale porusza się ze stałą prędkością praktycznie do miejsca, w którym paliwo się kończy. Fala detonacyjna przesuwa się tak szybko, że materia, do której jeszcze nie dotarła, „nie wie” o eksplozji, która już się rozpoczęła. Z tego powodu „paliwo” nie jest w stanie rozproszyć się i w 100% zostaje zużyte, wyzwalając co najmniej kilka razy więcej energii niż to samo paliwo w zwykłej deflagacji. Co więcej, energia ta zostaje wyzwolona w bardzo krótkim czasie. Takie szczegóły, jak miejsce zapłonu, kształt powierzchni i rozkład gęstości materiału wybuchowego, mają drugorzędne znaczenie.

2.3. Termojądrowy wybuch białego karła

Uzbrojeni w podstawową wiedzę na temat wybuchu, możemy łatwo prześledzić sposób rozumowania astrofizyków badających supernową typu Ia. Biały karzeł jest obiektem dosyć egzotycznym, posiada masę rzędu masy Słońca i promień porównywalny z ziemskim. Elektronowy gaz zdegenerowany, którego ciśnienie powstrzymuje przyciąganie grawitacyjne, zachowuje się w sposób możliwy do wyjaśnienia jedynie na gruncie mechaniki kwantowej i szczególnej teorii względności. Nie powinien więc zdziwić fakt, że biały karzeł, który wysysa masę ze swojego towarzysza, staje się na skutek tego coraz *mniejszy*, a zatem

gęstszy. Kompresja powoduje wzrost temperatury, największy w obszarze centralnym. Proces ten jest powolny, rzędu tysiąca lat, a jego szczegóły są tematem aktualnych prac naukowych. Na pewnym etapie tego okresu, określanego jako „tlenie się” (ang. *smouldering, simmering*), tempo reakcji jądrowych zaczyna wzrastać w sposób nieograniczony i zaczyna się wybuch. W latach 60. sądzono, że niemal natychmiast przechodzi on w detonację rozchodzącą się od środka ku powierzchni. W wyniku takiej eksplozji materia, z której zbudowany jest biały karzeł, zostałaby w niecałą sekundę przekształcona całkowicie w radioaktywny nikiel, ostatecznie rozpadający się (poprzez kobalt) do żelaza w czasie rzędu 2–3 miesięcy. Jest to z grubsza zgodne z obserwowaną krzywą blasku supernowej. Bardziej szczegółowe obserwacje ustaliły skład chemiczny wybuchającej supernowej i okazało się, że co prawda „żelazo” jest produkowane, ale w znacznie mniejszej ilości. Około połowa wyrzucanej materii to atomy znajdujące się w układzie okresowym pomiędzy tlenem a żelazem. Ich obecność jest tak bardzo charakterystyczna dla supernowych termojądrowych, że linie widmowe krzemu od lat 80-tych służą do identyfikowania typu Ia. Na pierwszy rzut oka, biorąc pod uwagę ogólne informacje przedstawione wyżej, wyklucza to detonację.

Jeżeli nie detonacja, to może deflagracja? Podobny, jak opisany wyżej model, przyjmujący, że płomień termojądrowy rozchodzi się sferycznie od środka do powierzchni, okazał się niezwykle skuteczny w odtwarzaniu obserwowanych własności supernowych i jest powszechnie używany przez astronomów. Problem polega na tym, że prędkość rozchodzenia się fali deflagracyjnej w tych modelach nie tylko jest sprzeczna ze znanymi prawami fizyki, ale na dodatek zależy od chwilowego położenia wewnątrz białego karła. Można wręcz powiedzieć, że 20 ostatnich lat prac nad supernowymi termojądrowymi to próby odtworzenia tego typu modeli w ramach dobrze przecież ugruntowanych praw fizyki. Zgodna z obserwacjami prędkość rozchodzenia się płomienia jest około 3 razy *mniejsza* niż prędkość detonacji (dźwięku) i kilka lub kilkanaście razy *większa* niż prędkość deflagracji. Zaproponowano wiele sposobów wyjaśnienia anomalnej prędkości spalania.

Jeden z kierunków to zwiększenie efektywnej prędkości deflagracji poprzez np: zapłon w wielu miejscach równocześnie lub sfałdowanie płomienia do postaci bliskiej fraktalnej (zob. prace autora i np.: <http://astro.sunysb.edu/mzingale/SNr1/> lub http://astro.sunysb.edu/mzingale/rt3d/rt_1.5e7_3d_new.avi), dzięki czemu „paliwo” zużywa się znacznie szybciej. Nadal niektórzy astrofizycy próbują „przyspieszyć” spalanie, mimo to jednak wydaje się, że osiągnięcie wymaganej prędkości nie jest możliwe. Z drugiej strony, prędkość detonacji jest dobrze określona i niemożliwe jest, aby przebiegała ona wolniej, niż wymagają tego prawa zachowania masy, energii i pędu. Jeżeli jednak detonacja rozpoczęłaby się w połowie spalania, średnia prędkość wybuchu może okazać się zgodna z obserwacjami.

Model taki, w którym na pewnym etapie deflagracja przechodzi w detonację, przez astrofizyków określany jest jako DDT (ang. *Deflagration to Detonation Transition*, przejście spalania w detonację). Przy odpowiednim wyborze miejsca, w którym przejście to nastąpi, zgodność z obserwacjami astronomicznymi jest bardzo dobra. Czy przejście takie jest możliwe? W warunkach ziemskich udaje się to osiągnąć – na tej zasadzie działa część zapalników pobudzających detonację. Detonator to urządzenie niezbyt skomplikowane, ale jego geometria i użyte materiały są starannie dobrane. Czy takie samo zjawisko może zajść dla rozchodzącej się prawie sferycznie fali deflagracyjnej w supernowej? Bez wchodzenia w zbędne szczegóły odpowiedź powinna brzmieć: nie.

2.4. Model DFD

Na początek mała dygresja. W ostatnich latach supernowe Ia, używane ze względu na ich powtarzalność jako indykatory odległości we Wszechświecie, nabrały ogromnego znaczenia. To w znacznej części na nich oparte zostały ogromnego ciężaru gatunkowego wnioski: Kosmos składa się z atomów w 4%, reszta to „ciemna materia” i „ciemna energia”. Co więcej, „ciemna energia” wykazuje jawnie antygravitacyjne własności, prowadząc do przyspieszania tempa ucieczki galaktyk. Nadal jednak nie mamy poprawnego i spójnego z prawami fizyki modelu supernowej typu Ia. Oczywiście, nic nie zabrania nam korzystać ze „świacy standardowej” (w postaci supernowej termojądrowej), której działania nie rozumiemy. Wątpliwości i niedosyt intelektualny jednak pozostają.

Taka mniej więcej sytuacja panowała, gdy polski astrofizyk Tomasz Plewa, pracujący wtedy na Uniwersytecie w Chicago, zaproponował niezwykle interesujący model **DFD** (ang. *Detonating Failed Deflagration*, detonacja nieudanej deflagracji). Od pewnego czasu wiadomo było, że wybuch termojądrowy w polu grawitacyjnym prowadzi do sferycznie rozchodzącego się płomienia tylko wtedy, gdy zapłon nastąpi prawie idealnie w centrum idealnie symetrycznego białego karła. W praktyce, zapłon w niewielkiej odległości, rzędu kilkunastu kilometrów od centrum (biały karzeł ma promień około 2000 km), powoduje powstanie płomienia kształtem przypominającego raczej grzyb atomowy. Zwykle „grzybów” tego „gatunku” jest podczas deflagracji przynajmniej kilka, a ich początkowa liczba czy położenie jest w zasadzie losowa. Astrofizycy starali się dosyć sztucznie zwiększać ich liczbę, bo to zwiększa tempo spalania. Co stanie się, gdy ograniczymy się do najbardziej naturalnego przypadku: jednego płonącego „bąbla”? Nie wyprodukuje on energii wystarczającej do rozerwania białego karła, ale spali sporo węgla i tlenu oraz zdeformuje go. Ponieważ „grzyb” unosi się cały czas do góry, wcześniej czy później musi „wyskoczyć” (dochodzi do tego po około sekundzie) na powierzchnię. W tym momencie na powierzchni gwiazdy tworzą się ogromne rozchodzące się koncentrycznie fale.

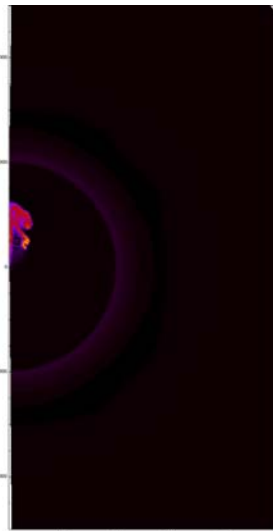
Przypominają one ziemskie fale tsunami. Na powierzchni białego karła nie ma jednak gór czy kontynentów. Rozchodzące się fale, nie napotykając na żadne przeszkody, obiegają (w czasie kilku sekund) powierzchnię gwiazdy i zderzają się w punkcie znajdującym się na antypodach. Zogniskowana energia jest wystarczająco duża, aby powstała fala uderzeniowa zadziałała jak zapalnik i pobudziła białego karła do detonacji. Fala detonacyjna w ułamku sekundy spala to, co pozostało po wcześniejszej, nieudanej deflagracji. Całe to zjawisko, od zapłonu deflagracji do wygaśnięcia detonacji, trwa około 5 sekund. Pomimo, że eksplozja jest bardzo asymetryczna, już kilka minut później trudno zauważyć niewielkie odstępstwo od sferycznej ekspansji (zobacz np. http://flash.uchicago.edu/~jbgallag/wd_det_8km_16rb_80off_movies/). Warto zwrócić uwagę, że w opisanej sekwencji nie ma żadnych „wyciągniętych z kapelusza” elementów. Model ten po raz pierwszy na świecie zademonstrował, w jaki sposób początkowe spalanie w nieuchronny sposób może prowadzić do opóźnionej detonacji, bez „ręcznego sterowania” prawami fizyki. A to jest jeden z głównych problemów teorii wybuchów supernowych typu Ia. Model ten (DFD) jest obecnie w trakcie porównywania z danymi astronomicznymi. Pierwsze wyniki tej analizy są obiecujące, ale ustalenie, czy wybuch supernowej Ia faktycznie przebiega według zaproponowanego przez T. Plewę scenariusza, wymaga dalszych badań, głównie symulacji komputerowych, jak również obserwacji.

Literatura

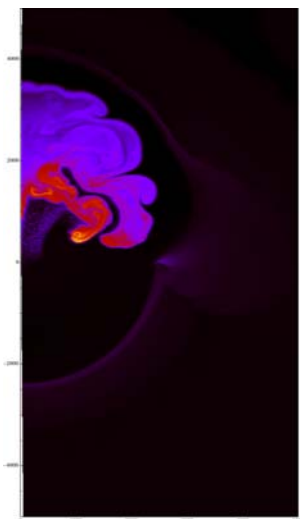
- W. Hillebrandt, H.-Th. Janka, E. Müller, *Rozsadzić gwiazdę*, „Świat Nauki” 11, 36–43 (2006).
- I. Asimov, *Supernowe*.
- A. Odrzywołek, *400 lat bez supernowej. Kiedy następna?*, Prace Komisji Astrofizyki PAU, Nr 10 (2006) 73–136, Eksplozje gwiazd, osobliwa materia w ich pozostałościach, astrofizyka otoczenia czarnych dziur i ogólna teoria względności.
- A. Odrzywołek, *Turbulencja w eksplozjach supernowych*, Prace Komisji Astrofizyki PAU, w druku.
- D. Kasen, T. Plewa, *Detonating Failed Deflagration Model of Thermonuclear Supernovae II. Comparison to Observations*, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0612198>
- T. Plewa, *Detonating Failed Deflagration Model of Thermonuclear Supernovae I. Explosion Dynamics*, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0611776>
- T. Plewa *et al.*, *Type Ia Supernova Explosion: Gravitationally Confined Detonation*, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0405163>
- Zbiór animacji i rysunków powiązanych z modelowaniem supernowych typu Ia: <http://flash.uchicago.edu/~jbgallag/>
- Symulacje płomienia termojądrowego: M. Zingale <http://astro.sunysb.edu/mzingale/>



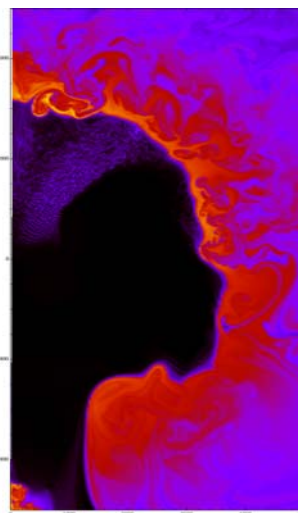
Rys. 3a. Biały karzeł w momencie zapłonu $t = 0$ (połowa przekroju południkowego). Pokazano rozkład temperatury w zakresie 0–10 GK (gigakelwinów) biały – 0 GK, czarny – 10 GK. Wyraźnie widać powierzchnię gwiazdy, oddzielającą zimne wnętrze gwiazdy od nieco gorętszego gazu na zewnątrz. Skala w kilometrach, model Y12 T. Plewy



Rysunek 3b. Dla $t = 1$ s wyraźnie widoczny jest płonący unoszący się do góry bąbel przypominający „grzyb atomowy”, który wkrótce „pęknie” na powierzchni



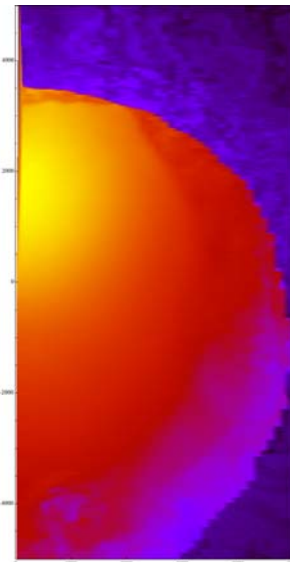
Rys. 3c. Dla $t = 1,5$ s „fala tsunami” osiąga rejon równika



Rys. 3d. Dla $t = 3$ s, następuje zderzenie fal na antypodach, prowadząc do wzrostu temperatury i powstania fal uderzeniowych



Rys. 3e. Dla $t = 3,65$ s rozpoczyna się detonacja, która kończy się po około 0,5 s



Rys. 3f. Fala detonacyjna dla $t = 4,1$ s „skonsumowała” już całego białego karła

Zachęcamy czytelników do obejrzenia wersji internetowej artykułu z kolorowymi ilustracjami.



Wielki Zderzacz Hadronowy w CERN-ie

Jerzy Bartke

Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie

Międzynarodowe Laboratorium Fizyki Cząstek CERN, położone w pobliżu Genewy na przygranicznych terenach Szwajcarii i Francji, było już przedmiotem artykułu w numerze 87 *Fotonu* z 2004 roku z okazji 50-lecia tego ośrodka badawczego. W CERN-ie dokonano szeregu ważnych odkryć. Wymieniamy je poniżej:

- odkrycie tzw. prądów neutralnych w oddziaływaniach słabych (1973);
- odkrycie bozonów $W^{+/-}$ i Z pośredniczących w oddziaływaniach elektroslabych, opisywanych tzw. modelem standardowym (1983);
- stwierdzenie istnienia trzech generacji kwarków i leptonów (1990).

W roku 2000 ogłoszono także zaobserwowanie plazmy kwarkowo-gluonowej w zderzeniach relatywistycznych jąder, co jednak nie zostało uznane przez wszystkich fizyków za jednoznacznie udokumentowane odkrycie.

Pracującym w CERN-ie uczonym przyznano dwie Nagrody Nobla. Otrzymali je: Carlo Rubbia i Simon van der Meer w roku 1984 i Georges Charpak w roku 1992.

W CERN-ie powstała też tzw. platforma internetowa www, która jest obecnie powszechnie używana na całym świecie.

W obecnym roku następuje w CERN-ie kolejne ważne wydarzenie: uruchomienie Wielkiego Zderzacza Hadronowego (Large Hadron Collider – LHC). Urządzenie to zbudowano w podziemnym tunelu, mieszczącym uprzednio zderzacz elektronów LEP. Tunel ten jest wydrążony w płycie skalnej na głębokości około 100 m. Wybrano takie rozwiązanie ze względów geologicznych (chodzi o stabilność), jak i ze względu na prawa własności, gdyż we Francji i Szwajcarii na tej głębokości grunt jest własnością państwa.

Na obwodzie ok. 27 km rozmieszczono 1232 14-metrowe magnesy dipolowe, ponad 300 magnesów kwadrupolowych i innych magnesów korekcyjnych. Magnesy LHC, zaprojektowane na osiągnięcie indukcji magnetycznej 8,4 Tesli, posiadają uzwojenia z materiałów nadprzewodzących i są chłodzone ciekłym helem. Cały układ stanowi największą instalację kriogeniczną kiedykolwiek zbudowaną. LHC wykorzystuje istniejące już w CERN-ie akceleratory do przyspieszania wstępnego. LHC dostarczy zderzających się wiązek protonów o energii $7 + 7$ TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$), czyli 14 TeV w układzie środka masy (w przypadku zderzających się wiązek takich samych cząstek o tych samych energiach układ laboratoryjny jest jednocześnie układem środka masy zderzenia), a także wiązek jąder ołowiu o energii $2,75 + 2,75$ TeV, czyli 5,5 TeV na

każdą parę nukleonów w układzie środka masy. Energie te przekraczają kilkadziesiąt razy wartości uzyskiwane w istniejących akceleratorach w Fermilab i Brookhaven National Laboratory w Stanach Zjednoczonych.

Celem LHC jest badanie oddziaływań protonów i jąder w tym nowym zakresie energii, a w szczególności poszukiwanie hipotetycznej cząstki Higgsa, która według teoretyków miałaby być odpowiedzialna za powstawanie masy cząstek, a w zderzeniach jądrowych – dalsze badania własności gęstej i gorącej materii powstającej w takich zderzeniach. Dla prowadzenia tych badań przygotowano cztery wielkie układy detekcyjne: ATLAS, CMS, LHCb i ALICE. Największy z nich, ATLAS, ma rozmiary $20 \times 20 \times 20 \text{ m}^3$. Ta ogromna objętość, odpowiadająca dużemu budynkowi, wypełniona jest różnego typu detektorami, pełniącymi różne funkcje w zakresie rejestracji i identyfikacji cząstek. Trzy pierwsze spośród wyżej wymienionych urządzeń nastawione są głównie na badanie zderzeń protonów, urządzenie ALICE będzie badać zderzenia jąder. O skali całego projektu LHC może świadczyć jego koszt: około miliarda franków szwajcarskich na budowę zderzacza i podobna kwota na eksperymenty. W przygotowaniu eksperymentu ATLAS uczestniczy ok. 2000 fizyków i inżynierów.

Polscy fizycy z Krakowa i Warszawy uczestniczą we wszystkich czterech eksperymentach na LHC począwszy od fazy ich przygotowania. Liczny zespół inżynierów i techników z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie brał także udział w budowie LHC.

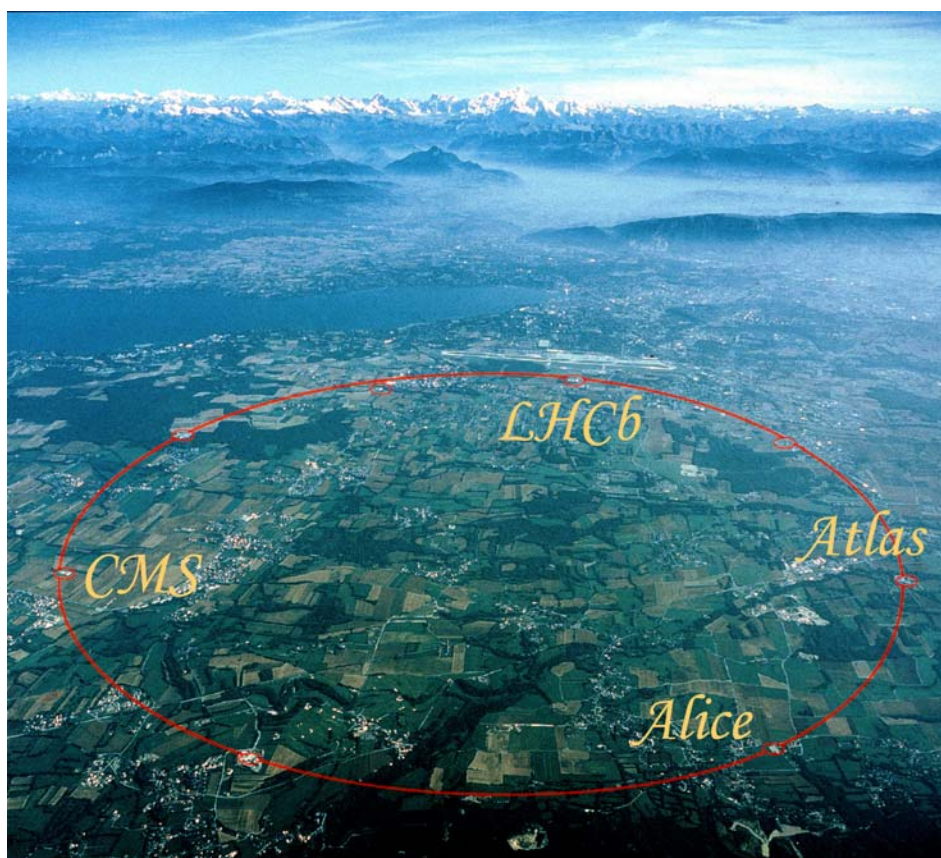


Tunel LHC, w którym montowane są nadprzewodzące magnesy

Uroczysta inauguracja LHC miała miejsce 10 września br. Na tą sesję zaproszono głowy państw i przedstawiciele rządów krajów członkowskich CERN-u.

Obecnie trwają dalsze próby techniczne LHC.

W roku 2009 przewiduje się osiągnięcie docelowej energii dla protonów oraz, jesienią, pierwszych zderzeń wiązek jądrowych.



Zdjęcie lotnicze przedstawia przygraniczne tereny Szwajcarii i Francji z zaznaczonym przebiegiem tunelu LHC i umiejscowieniem czterech eksperymentów wymienionych w artykule. Trzy spośród nich znajdują się na terytorium francuskim

Od Redakcji z ostatniej chwili

Skutki awarii, która nastąpiła po starcie LHC, spowodowanej błędem technicznym w nadprzewodzących złączach, są usuwane.



Pół wieku krakowskiego cyklotronu U120

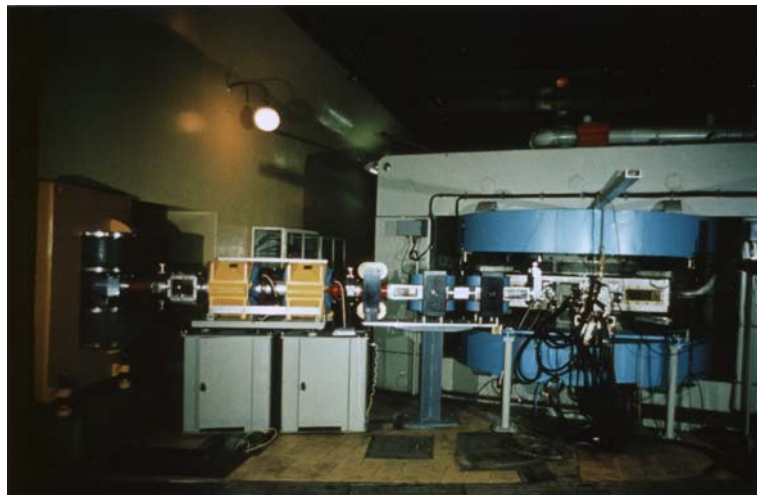
Adam Strzałkowski

Institut Fizyki UJ

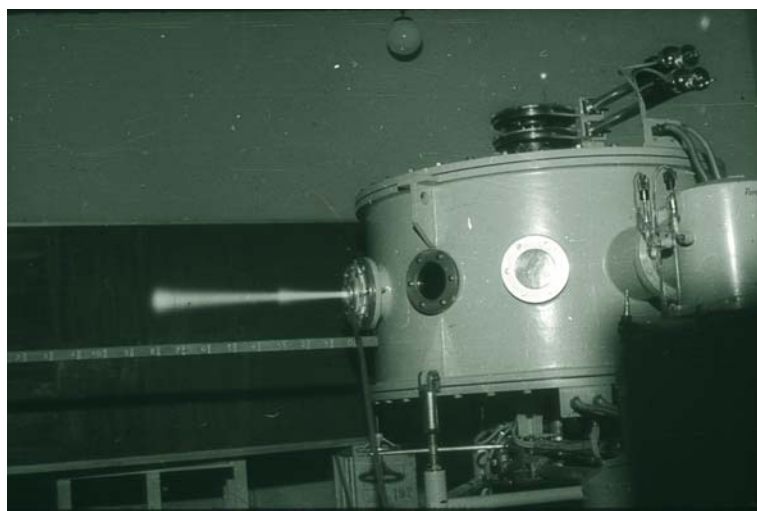
Po pierwszej międzynarodowej konferencji „Atom for Peace” w roku 1955 w Genewie, Związek Radziecki zaproponował swym krajom satelickim zakup dwóch urządzeń do badań jądrowych: reaktora i cyklotronu. Cyklotron udało się uzyskać dla Krakowa i wokół niego Profesor Henryk Niewodniczański rozpoczął tworzenie Instytutu Fizyki Jądrowej, który dzisiaj nosi Jego imię.

Instytut zlokalizowano w Krakowie, nieco za miastem, w Bronowicach i szybko ruszyła jego budowa jako inwestycji priorytetowej. Zaczęły napływać z Rosji elementy instalacji cyklotronowej i rozpoczął się ich montaż. Cyklotron U120 radzieckiej konstrukcji miał średnicę nabiegunników magnesu 120 cm – stąd jego nazwa – i miał służyć do przyspieszania deuteronów do energii około 12.5 MeV i cząstek alfa do energii około 25 MeV.

50 lat temu, w roku 1958, instalacja cyklotronu dobiegała końca. Ale nim jeszcze montaż ten został ukończony, krakowscy fizycy rozpoczęli przygotowywanie pierwszych eksperymentów. Kazimierz Grotowski i Andrzej Budzanowski wraz z Profesorem Niewodniczański postanowili rozpocząć od jednego z najbardziej wówczas aktualnych zagadnień: pomiaru polaryzacji spinowej neutronów emitowanych w reakcji *strippingu*. Jest to reakcja jądrowa, w której jeden z nukleonów wchodzących w skład bombardujących jądro tarczy deuteronów jest przyłączany do tego jądra, a drugi – albo neutron, albo proton – leci dalej. Niewiele wcześniej R. Huby przewidział, że ten wylatujący nukleon powinien mieć spin zorientowany preferencyjnie w pewnym kierunku, czyli jak mówimy, powinien być spinowo spolaryzowany. Polaryzacja emitowanych w takiej reakcji protonów została już zmierzona wcześniej, ale z neutralnymi elektrycznie neutronami sprawa nie była taka prosta. I to wyzwanie podjęto właśnie w Krakowie jako pierwszy eksperyment na uruchamianym dopiero cyklotronie.



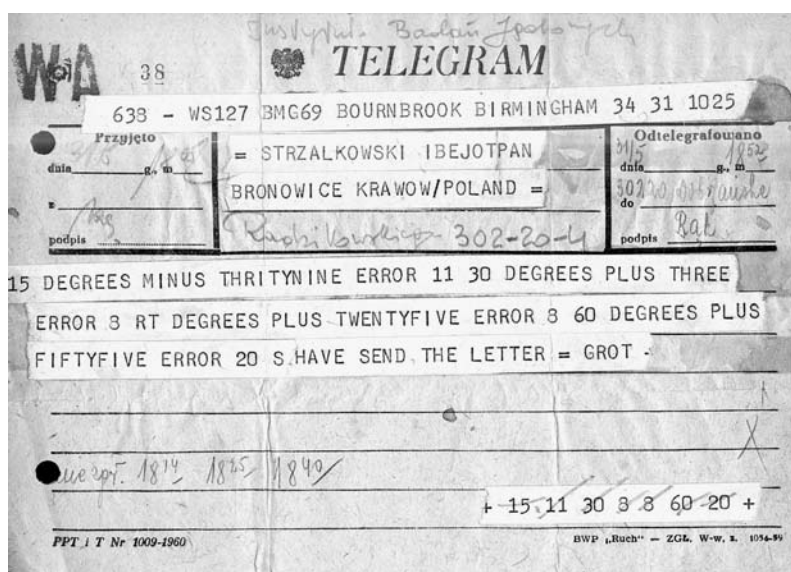
Fot. 1. Cyklotron U120 już zmontowany w Instytucie



Fot. 2. Wiązki jonów przyspieszone w cyklotronie i wypuszczone do powietrza. Widać wyraźnie dwa zasięgi w powietrzu, gdyż z deuteronami przyspieszane były również protony jako jony H_2^+

I eksperyment ten został rzeczywiście już w 1958 roku wykonany z sukcesem jako jeden z pierwszych takich pomiarów na świecie. Wtedy uchylona została nieco „żelazna kurtyna” oddzielająca nasze kraje od Zachodu, fizycy zaczęli wyjeżdżać na staże naukowe i Grotowski jadąc do Birmingham zabrał te wyniki ze sobą dla ich opracowania. Prof. Niewodniczański chciał je przedstawić na konferencji w Paryżu, zwróciłem się zatem do Kazika Grotowskiego o przysłanie nam ich telegraficznie. Okazało się to nie takie proste. Telegram

zawierał wyniki w postaci samych liczb i urzędnik na poczcie w Birmingham nie chciał takiej depeszy przyjąć. Po pewnym czasie sam jednak odnalazł Kazimierza Grotowskiego w jego mieszkaniu i oświadczył, że może ją nadać. Nie ulega wątpliwości, że treść tej depeszy dotarła przede wszystkim do biura szyfrów zarówno w Anglii, jak i u nas w Polsce. Co odcyfrowano, nie wiem, ale jej treść uważano widocznie za bardzo ważną, bo w Krakowie w środku nocy żołnierz przywiózł ten telegram do Instytutu do Bronowic i zmusił wartownika Instytutu, żeby ten na rowerze zawiózł mi ją tejże nocy do domu.



Fot. 3. Historyczny telegram z wynikami pierwszego eksperymentu na cyklotronie krakowskim, przesłany mi przez Kazimierza Grotowskiego z Birmingham

Nastąpiły dalsze lata intensywnych i owocnych prac naukowych na krakowskim cyklotronie. Zbudowano nowe urządzenia badawcze, takie jak: magnetyczny spektrometr jonów, układy do pomiarów polaryzacji cząstek, rozbudowano halę eksperymentalną.

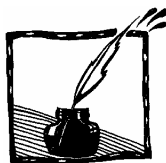


Fot. 4. Adam Strzałkowski przy spektrometrze magnetycznym, jednym z pierwszych urządzeń pomiarowych zbudowanych dla eksperymentów na krakowskim cyklotronie



Fot. 5. Rozbudowana hala eksperymentalna cyklotronu U120 z wieloma liniami jonowymi

Powoli jednak możliwości cyklotronu U120 zaczęły się wyczerpywać. Energia przyspieszanych na nim cząstek była zbyt niska do przeprowadzania interesujących eksperymentów fizycznych. Jeszcze przez pewien czas cyklotron był wykorzystywany do naświetleń w ramach terapii nowotworów i badań bioradiacyjnych. W roku 1995 cyklotron U120 zakończył definitywnie swą pracę i został zastąpiony przez zbudowany w Instytucie cyklotron izochroniczny AIC144.



O wymiarze wielkości fizycznych (część 1)

Jerzy Karczmarczuk

Århus, Dania

Wstęp

Pojęcie wymiaru lub *miana* wielkości fizycznych, jak np. długości, momentu pędu, itp., zaistniało w sposób w miarę sformalizowany od roku 1822, od czasów Fouriera [1, 2], ale już wcześniej wiadomo było, że prawie wszystkie wielkości pomiarowe wymagają różnych od siebie jednostek miary, że niektóre są *ekstensywne*: dodają się jak masy składników układu złożonego, inne są *intensywne*, jak temperatura. Galileusz i Mersenne operowali wymiarami i jednostkami, a Descartes w roku 1644 suponował, że całkowita „ilość ruchu” we Wszechświecie jest stała. Potrafił mnożyć masę przez prędkość i zdawał sobie sprawę z umowności jednostek miary i z koniecznej dyscypliny w ich użyciu, aby operowanie liczbami wyrażającymi wielkości fizyczne miało sens i żeby można było mówić o prawach zachowania.

Teraz od dziecka operujemy wagami i odległościami, a już na początkowym etapie nauki fizyki poznajemy wymiar prędkości i przyspieszenia, później siły, ładunku elektrycznego, temperatury, itp. Dowiadujemy się jakie jednostki obowiązują w układzie SI [3, 4] i szybko przyzwyczajamy się do wymiarów i ich jednostek. Przyzwyczajenie wiąże się ze znieczuleniem. Pewnych pytań nie zadajemy. Co to *jest* długość? Nikt na to nie odpowie, nie definiujemy pojęcia przestrzeni ani czasu. Pomimo to, bez obawy dzielimy metr przez sekundę, aby otrzymać jednostkę prędkości. Ale czy my wiemy, co oznacza w tym kontekście, operacja dzielenia? Pytanie *co to jest metr* miało różne odpowiedzi: wielkość astronomiczna, wzorzec w Sèvres, wielkość atomowa (długość fali światła laserowego)... Od roku 1983 metr jest odległością, którą światło w próżni przemierza w 1/299 792 458 sekundy. Zwróćmy jednak uwagę, że odpowiedź, jakkolwiek, zawiera w sobie informację, że jest to jednostka długości, więc problem „o czym my mówimy?” pozostaje. Jednak w niniejszym tekście chcemy uniknąć wszelkich sporów doktrynalnych i filozoficznych.

Pewne aspekty jednostek wydają się oczywiste, np. każdy wie, że nie należy mieszać wartości podanych np. w stopach z długościami w centymetrach, co nie przeszkodziło zmarnować milionów dolarów na skutek katastrofy sondy Mars Climate Orbiter [5] wywołanej właśnie takim niespójnym oprogramowaniem...

Niniejszy, dwuczęściowy artykuł omawia szereg nieoczywistych problemów dotyczących sensu wielkości mianowanych i operacji na nich. Mimo sędziwego wieku tej dziedziny, fizycy (i metodologowie fizyki) nadal się spierają [6],

a rozwój fizyki współczesnej sprawę tylko zaostrzył [7]. Zajmiemy się takimi kwestiami jak:

- *Analiza wymiarowa*, w jaki sposób zdyscyplinowane operowanie wielkościami mianowanymi pozwala nam unikać błędów we wzorach. Omówimy w przystępny sposób *algebraiczny* sens wielkości mianowanych i przedyskutujemy pokrótce ich użycie w programach komputerowych. Trochę miejsca poświęcimy problemowi miary kątowej, który mimo swojej banalności, potrafił wywołać sporo bałaganu.
- *Jednostki układu SI* [3, 4], podstawowe i pochodne. Zastanowimy się, jaki jest stosunek między protokołami pomiarowymi, a ustaleniami konwencjonalnymi. Nie mamy zamiaru omawiać dokładnie układu SI, ale zastanowienie się, dlaczego przyjęto takie jednostki, a nie inne, może być użyteczne.
- *Wymiarowe stałe uniwersalne*, ich związek z konwersją jednostek. Poruszymy dość mętną kwestię „co właściwie zostało zmierzone”. Nie mamy ambicji udzielić wyczerpującej odpowiedzi na to pytanie.
- *Znaczenie bezwymiarowych stałych w analizie układów fizycznych*. To jest szeroki temat, który dotyczy i tzw. niezmienniczości skalowania, i opisu układu zredukowanego, gdzie pojawiają się wielkości typu stałej Reynoldsa.

Wielkości wymiarowe i bezwymiarowe oraz ich sens pomiarowy

Intuicyjnie wszyscy wiemy, jaka jest różnica między „czystymi liczbami”, jak 1, $3/8$, czy π , a wielkościami posiadającymi miano. Te pierwsze są absolutne, $\pi = 3,14159265\dots$ niezależnie od własności fizycznych świata, który nas otacza i jedyne co się może zmienić, to notacja. Na pewno nie są to obiekty zależne od naszych jednostek miary. Ale nawet i tu można się pomylić i przesadzić z geometryczną interpretacją pewnych liczb, np. uczyć, że π to *jest* stosunek długości obwodu koła do jego średnicy, i tyle. Oczywiście geometria jest tu zbędna, wiemy, że 2π jest okresem funkcji trygonometrycznych, czy wykładniczej zespolonej: $\exp(ix)$. Funkcje te mają znane rozwinięcia w szereg i spełniają określone równania różniczkowe, nie ma tutaj żadnej dowolności. Przy takim, racjonalnym podejściu, w stwierdzeniu, że pełny kąt płaski zawiera 2π radianów, radian jako jednostka jest niepotrzebny i nie oznacza *niczego* (jest to jedyńka). Tym niemniej, została ona „uprawomocniona” w układzie SI jako jednostka pomocnicza i tym samym nabrały prawa do istnienia i inne, jak stopnie czy rumby, i napotkamy zdania w rodzaju: „ 2π (radianów) to 360 stopni, albo 32 rumby”. Pojęcie jednostki nie jest więc banalne... W czystej matematyce nikt, nigdy by nie wprowadził pojęcia „jednostki radian”. Ale matematyka powstała przez destylację procedur pomiarowych, fizycznych i pojęcie kąta stało się dla nas dawno temu nieco zbliżone intuicyjnie do pojęcia długości. Możemy nawet skonstruować wzorzec radiana, albo stopnia (tyleż warty co „wzorzec tuzina”). Aby uniknąć nieporozumień, należy dobrze sprecyzować formalizm, którym

operujemy, przyjmując całą arytmetykę, algebrę, analizę... Wtedy „jednostka stopnia” stanie się po prostu skrótem językowym liczby $\pi/180$, będziemy mogli nią operować tak, jak się operuje np. tuzinami, czy kopami, co nie neguje faktu, że kąty też są *mierzone*, mówi się o nich, więc nie ma powodu, aby SI ignorował ich istnienie. SI jest systemem pragmatycznym.

Przejdźmy do dyskusji prawdziwych wielkości mianowanych. Człowiek współczesny zdaje sobie sprawę, że jednostki pomiarowe, jak metr, paskal, itp. są konwencjonalne, dowolne. Żadna teoria fizyczna, która operuje wielkościami wymiarowymi, nie może zależeć od tych jednostek. Sekundy czy lata, teoria winna być taka sama, a wzory mogą się różnić jedynie notacją. Czy oznacza to, że można operować wzorami, w których nie ma żadnych jednostek pomiarowych? Odpowiedź na to pytanie jest zawikłana, z jednej strony mamy wspomnianą niezależność „prawdziwej fizyki” od umownych jednostek, z drugiej zaś wiemy, że wartości liczbowe siły, czy momentu pędu *zależą* od jednostek pomiaru, a bez danych doświadczalnych teorie są puste! Możemy więc się umówić, że pośrednikiem między conceptualną, uniwersalną teorią świata, a danymi doświadczalnymi, jest użyta przez nas notacja, która winna odpowiadać użytej matematyce, dawać się konfrontować z doświadczeniem i być społecznie akceptowalna (przede wszystkim w nauczaniu!).

Wzory będą w razie potrzeby zawierać *explicite* takie mnożniki, jak m/s dla prędkości, $m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$ dla energii, itp. Mnożenia i dzielenia przez jednostki są intuicyjnie zrozumiałe i logicznie spójne. Przyzwyczailiśmy się, i to ma dobre strony, potrafimy szybko konwertować jednostki, potrafimy prawidłowo pisać programy komputerowe operujące liczbami interpretowanymi jako wielkości wymiarowe i opanowaliśmy skróty. Kontrola wymiarów pozwala nam unikać błędów we wzorach, zauważymy, że dodawanie odległości do czasu jest niespójne, nie wiemy jaki nadać sens takiemu wyrażeniu.

Co daje nam analiza wymiarowa

Techniki formalnego operowania wielkościami mianowanymi zwykle nazywa się analizą wymiarową [2, 8–10]. Narzuca ona szereg ograniczeń. Wiemy, iż nie należy np. dodawać masy do siły. Wzory winny być *jednorodne* względem potęg jednostek, co pozwoli np. uprościć $m \cdot kg \cdot s^{-2}$ z obu stron równania Newtona $F = ma$. Jeśli jakiś wyprowadzony wzór okazuje się niejednorodny, jest to niewątpliwie skutek błędu. Dalej, wiemy, że argumentem x takich funkcji jak $\exp(x)$, czy $\sin(x)$ *musi* być wielkość bezwymiarowa, gdyż w rozwinięciu

w szereg: $\sin(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots$ dodajemy do siebie różne potęgi. Analiza

wymiarowa pozwala nam *konstruować* pewne wzory, np. wiemy, że ruch wahadła matematycznego: punktu o masie m [kg] na nitce o długości l [m] w polu ciężenia wyrażonym przyspieszeniem g [$m \cdot s^{-2}$], winno się dać opisać za pomo-

ca łą tylko tych wielkości. Więc okres wahań musi się wyrażać zależnością $T \propto \sqrt{l/g}$, gdyż jest to jedyna multiplikatywna kombinacja tych wielkości, dająca wymiar czasu. Masa nie może się znaleźć w tym wzorze. Liczbowy współczynnik proporcjonalności jest dowolny. To uproszczenie masy jest oczywiście wynikiem faktu, że przyspieszenie ziemskie ma charakter *lokalnie* uniwersalny, że wszystkie masy spadają z tym samym przyspieszeniem. Weźmy teraz kulkę na sprężynie, dla której obowiązuje prawo Hooke'a dla siły: $F = kx$, gdzie x jest wychyleniem, a k [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$] – stałą sprężystości. Pozwalamy jej drgać w polu przyciągania ziemskiego i próbujemy oszacować okres drgań. Problem zupełnie trywialny nie jest, np. czy długość sprężyny odgrywa jakąś rolę, czy nie? Jeśli jednak zauważymy – doświadczalnie – że przyspieszenie ziemskie jest nieistotne, wpływ długości sprężyny na okres musi być jakoś ukryty w stałej k , gdyż jedyną wielkością o wymiarze czasu będzie $\sqrt{m/k}$, długość nie może wystąpić w tym wzorze. Ponieważ okres drgań zależy jednak od długości sprężyny (z tego samego materiału), zasadne staje się pytanie jak k zależy od tej długości, jaka inna stała intensywna kryje się w środku. Rozważmy trzeci przykład, drgającej struny o długości l i o gęstości liniowej ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$]. Struna może być różnie napięta, a lokalne napięcie σ [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$] określimy jako siłę na jednostkę długości. Struna drga z amplitudą A [m]. Stwierdzenie, że okres drgań będzie proporcjonalny do $\sqrt{\rho l / \sigma}$, nie wystarczy. Amplituda oraz długość pozwalają na skonstruowanie wielkości bezwymiarowej A/l , i wtedy okres, częstość, energia, itp. drgań, może zawierać dowolny czynnik $f(A/l)$, gdzie f jest nieznaną funkcją. Analiza wymiarowa nie powie nam nic o niej, ale stwierdzi, że jest to *jedyna* dowolna funkcja w opisie problemu. Oczywiście, jeśli mierzymy napięcie konkretnej struny jako siłę niezredukowaną do jednostki długości, stwierdzimy, że okres jest proporcjonalny do długości. Zauważymy ponadto zależność od gęstości masy i zrozumiemy, dlaczego basowe struny fortepianowe i gitarowe zawierają cienki rdzeń, wyznaczający sprężystość i otoczkę z miękkiego materiału (np. miedzi), która na napięcie nie wpływa, natomiast obciąża strunę.

Algebra wielkości wymiarowych i komputery

Mnożenie czy dzielenie metrów przez kilogramy ma charakter *formalny*. Jednostki we wzorach zachowują się jak „zmiennie symboliczne”, nieredukowalne; wyrażenie kg/m nie sprowadza się do żadnej innej postaci. Jednak matematyka jest spójna, m/m to jest jedynka, $\text{s}\cdot\text{s}$ zapiszemy jako s^2 , itp. Czasami spotyka się twierdzenie, że matematycznie przestrzeń wielkości wymiarowych jest obiektem zwanym *torsorem* [11], który składa się z pewnych abstrakcyjnych nieredukowalnych pojęć, oraz grupy działań matematycznych nad nimi, spełniających znane własności. Są znane i inne torsory, np. punkty w przestrzeni: \bar{x} , nie

powinny być nazywane wektorami! Można odjąć dwa punkty, dostaniemy wektor odległości między nimi, można dodać wektor do punktu, ale nie można dodać dwóch punktów... Punkt, element przestrzeni *afinicznej*, jest abstrakcją, tak jak długość, czy masa. W podobny sposób zachowuje się data kalendarzowa. W tych drugich torsorach nie ma sensu mówić o zerze (dla dodawania, nie o wektorze zerowym, tylko o „punkcie zerowym”). W torsorze mian nie ma jedności (względem mnożenia).

Możemy jednak skonstruować programy, które w sposób spójny i jednoznaczny operują wielkościami wymiarowymi, o ile nasz język programowania umożliwia definiowanie „prywatnej” arytmetyki, na dowolnych strukturach danych, które budujemy sami [12, 13]. Wyobraźmy sobie, że nasz program przedstawia wartości mianowanych wyrażeń arytmetycznych jako czwórki: $Q(x, n, p, q)$, gdzie x jest „właściwą” wartością liczbową, a n, p, q są wykładnikami w mianie: $m^n \cdot kg^p \cdot s^q$. (Ograniczamy się do tych trzech, ale uogólnienie jest oczywiste).

Tak więc, prędkość światła to $Q(299792458, 1, 0, -1)$.

Dodawanie definiujemy jako:

$$Q(x, n, p, q) + Q(y, n, p, q) = Q(x+y, n, p, q).$$

Program winien wykryć próbę niezgodności wykładników i zgłosić błąd. Mnożenie, to:

$$Q(x, n, p, q) * Q(y, n1, p1, q1) = Q(x*y, n+n1, p+p1, q+q1),$$

pierwiastek, to:

$$\text{sqrt}(Q(x, n, p, q)) = Q(\text{sqrt}(x), n/2, p/2, q/2), \text{ itp.}$$

Wielkości niemianowane, to $Q(x, 0, 0, 0)$. Tylko takie mogą się znaleźć jako argument sinusa, itp., w przeciwnym wypadku program zgłosi błąd.

Opieramy się na znanej aksjomatyce operacji algebraicznych i na niczym więcej. Odpowiedź na pytanie „czy istnieje pierwiastek z metra, i co to oznacza”, odsyła pytającego do doświadczenia, aby sprawdził, czy takie wielkości się mierzy. Tym niemniej, istnieje różnica między potęgami wymiernymi, np. $\frac{1}{2}$ i dowolnymi rzeczywistymi (przestępnymi), np. π , które we wzorach fizycznych się nie pojawiają, lecz temat jest zbyt skomplikowany, aby go tu omówić. Szereg pakietów programowania naukowego i inżynierskiego ma wbudowane możliwości operowania na liczbach mianowanych, upraszczania i konwersji jednostek. Wspomnimy tutaj system programowania algebraicznego Maple, oraz pakiet programowania wizualnego MathCad. Nie zawsze ich zachowanie odpowiada naszym potrzebom, np. Maple pozwoli nam dodać kilogramy do metrów, traktując wyrażenie czysto formalnie. Dopiero gdy zażądamy uproszczenia wzoru, sprowadzenia do wspólnych jednostek, wbudowane mechanizmy kontroli zgłoszą błąd. Wydaje się, że nic tu więcej nie ma do dodania... A jednak, nie tak dawno temu Huntley [9] zaproponował, aby w wielkościach wektorowych, np. odległościach, prędkościach, itp. przypisać poszczególnym skła-

dowym różne miana długości. Wydaje się to bezsens, metry są metrami, wszystko jedno, czy chodzi o szerokość, czy głębokość. Fizyka jest niezmiennicza względem obrotów układu odniesienia, szerokość przejdzie w wysokość, co się stanie z jednostkami? A jednak pewien sens w tej procedurze jest, jeśli pomyśleć o niezmienniczości geometrycznej formuł. Nie chodzi tu o żadną rewolucję fizyczną, tylko o zwykły mechanizm kontroli wzorów. Normalnie nie spotkamy wyrażenia typu $v_x + v_y$. Ale mamy wyrażenia niezmiennicze, np. iloczyn skalarny $\vec{u} \cdot \vec{v} = u_x v_x + u_y v_y + u_z v_z$, co jest podobne, na pozór dostaniemy sumę o wymiarze $m_x^2 + m_y^2 + m_z^2$. Tym niemniej, we współczesnej geometrii odróżniamy wektory *kowariantne* i *kontrawariantne*, aby móc wykonać operację iloczynu skalarnego, oba wektory muszą należeć do różnych gatunków i ten drugi ma wymiary odwrotne. W przestrzeni euklidesowej tego nie widzimy, obliczamy bez problemów $\vec{v}^2 = \vec{v} \cdot \vec{v}$. To, co zostało ukryte, to istnienie impli-cyte tensora metrycznego, którego składowe poprawiają wymiar, a który figuruje w euklidesowym iloczynie skalarnym jako mnożnik: $\vec{u} \cdot \vec{v} = g_{xx} u_x v_x + g_{yy} u_y v_y + g_{zz} u_z v_z$, niewidoczny, gdyż euklidesowe składowe są numerycznie równe jedności. Rozszerzenie proponuje oczywiście szereg ustaleń wymiarów dla wielkości macierzowych, czy tensorowych w fizyce. Huntley zauważył, że pewnym mechanizmem kontroli spójności może być także przypisanie innych wymiarów masie inercyjnej (z wzoru Newtona) i masie określającej ilość materii.

Omówione zagadnienie jest raczej anegdotyczne, propozycja nie została zaakceptowana, gdyż notacja staje się kłopotliwa. Tym niemniej, nie można wykluczyć, że pewne nowe pakiety automatycznego programowania uwzględnią ją, może zmodyfikowaną [14] jako mechanizm kontroli błędów w czasie kompilacji programów.

Układ SI

Nie zamierzamy go omawiać dokładnie, materiały dostępne w Internecie i w literaturze są bardzo bogate. W systemie SI mamy oczywiście metr, kilogram i sekundę jako jednostki bazowe. W naszym rozumieniu fizyki, pomiary długości, czasu i masy są od siebie niezależne. Jednak ich definicje są od siebie koncepcyjnie niezwykle różne, nie ma żadnej symetrii między nimi.

Jedna sekunda, to 9 192 631 770 okresów drgań fali elektromagnetycznej odpowiadającej przejściu między poziomami nadsubtelnego rozszczepienia stanu podstawowego cezu 133 w temperaturze zera bezwzględnego. Jest to definicja uniwersalna, którą możemy przekazać na odległość np. naszemu kuzynowi z mgławicy Andromedy, który nie ma dostępu do naszych obiektów materialnych. Jest ona oparta o konkretny protokół pomiarowy, wiadomo jak zmierzyć częstotliwość fali radiowej.

Metr moglibyśmy zdefiniować podobnie, jako wielokrotność pewnej atomowej długości fali i tak też było (pewne promieniowanie kryptonu 86). Zdecydowano jednak inaczej i, jak wspomnieliśmy, metr będąc jednostką podstawową, posiada definicję opartą na sekundzie. Jest to odległość, którą światło w próżni przemierza w $1/299\,792\,458$ sekundy. Stała liczbowa w tym wzorze jest *dokładna*. Definicja metra wiąże ze sobą jednostkę długości z *dokładną* wartością liczbową prędkości światła i należy zrozumieć wagę i paradoksalność tego sformułowania!

Wtedy, gdy dysponowaliśmy inną definicją metra, np. opartą na wzorcu z Sèvres, dokonaliśmy pomiaru prędkości światła i odpowiednie liczby znalazły się w tablicach. Następnie odcięliśmy się od procedur pomiarowych. Żaden nowy pomiar prędkości światła już jej nie może zmienić, wszelkie zmiany spowodują tylko przeskalowanie metra! Paradoks wiąże się z następującym pytaniem: czyżby więc prędkość światła była wielkością czysto konwencjonalną, a nie pomiarową? Czyżby nam nic nie mówiła o świecie, gdyż została ustalona przez komitet? Oczywiście jest to nonsens. My *musieliśmy* wiedzieć, co to jest metr całkowicie niezależnie od prędkości światła i pomiar tej prędkości był rzetelną procedurą doświadczalną. Ponieważ jednak c jest uznane za uniwersalną stałą Wszechświata, fundamentalną dla wszystkich wyobrażalnych (na razie) teorii fizycznych, metodologicznie „zdrowiej” wydało się oprzeć jednostkę długości o tę stałą, niż wyrażać prędkość w sposób przybliżony poprzez jednostki czysto umowne, oparte o wzorzec, czy o rozmiar Ziemi.

Nie powiemy kuzynowi z Andromedy, że nie musi zmierzyć c . Zrobi to przy użyciu swoich jednostek długości, i wtedy się dowie, ile w tych jednostkach wynosi metr, bez żadnych pomiarów. A prędkość światła pozostając ważną stałą Przyrody, operacyjnie stanie się zwykłym współczynnikiem konwersji jednostek, pozwalającym przeliczać dokładnie sekundy na metry.

Jedyną wielkością, która w systemie SI pozostała zdefiniowana poprzez wzorzec (IPK, *International Prototype Kilogram*, irydowo-platynowy, przechowywany w Sèvres) pozostał kilogram. Z definicji kilograma poprzez litr wody zrezygnowano, za dużo problemów z warunkami pomiaru, a i tak IPK jest niestabilny i kilkadziesiąt kopii wzorca na całym świecie wykazuje zmienne w czasie odchylenie wagi (rzędu mikrogramów na rok). Procedura pomiarowa, która określa sposoby czyszczenia wzorca i warunki środowiskowe, jest niezwykle drobiazgową. Aktualnie rozwija się tzw. Projekt Avogadro [15], zbiorowa inicjatywa kilku krajów, mająca zastąpić wzorzec z Sèvres bardzo dokładną kulą z monokryształu krzemu 28 o prawie dokładnie określonej liczbie atomów. Oczywiście, wiedząc ile atomów przypada na kilogram, kuzyn z Andromedy będzie mógł odtworzyć kilogram bez potrzeby dysponowania naszym wzorcem. Możliwym rozwiązaniem uniwersalnym byłoby ustalenie dokładnej wartości stałej Plancka $h = 6,62\,606\,896 \times 10^{-34}$ J·s i zdefiniowanie kilograma jako masy odpowiadającej energii fotonów o sumarycznej częstotliwości

$1,356\,392\,733 \times 10^{50}$ Hz. Wtedy, podobnie jak z metrem, wszelkie zmiany doświadczalne wielkości h pójdą w przedefiniowanie kilograma. Ta propozycja, aczkolwiek koncepcyjnie ciekawa, doświadczalnie wydaje się na razie dość niepraktyczna. Zarówno do liczby Avogadra, jak i do stałej Plancka jeszcze wrócimy. Przejdźmy do jednostek elektrycznych.

W układzie CGS (lub MKS), popularnym w czasie, gdy autor uczęszczał do szkoły, wielkości związane z elektrycznością miały miana wyrażające się przez wymienione trzy (kilogram, metr i sekunda), Prawo Coulomba zapisywaliśmy

jako $F = \kappa \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$, gdzie wartość $\kappa = 1/(4\pi\epsilon)$, a ϵ jest przenikalnością dielek-

tryczną. Wartość tę dla próżni przyjęto za 1. Wtedy ładunek ma wymiar

$$\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1/2} \cdot \text{s}^{-1},$$

(stała bezwymiarowa $1/4\pi$, która mnoży prawą stronę, nic nie zmienia; ta stała zresztą w innych układach była przyjmowana jako równa jedności).

Ale w SI jednostka natężenia prądu, amper, jest podstawowa, nieredukowalna, jednostka ładunku kulomb to jest amper razy sekunda. Nie da się go sprowadzić do masy, długości i czasu. To stwierdzenie może mocno uderzyć: jak to, to dane liczbowe dotyczące elektryczności sprzed kilkudziesięciu lat nie mają sensu? Jaki jest „naprawdę” wymiar ładunku? Oczywiście nic się nie zmieniło, za wyjątkiem *konwencji* dotyczących jednostek. Dla przenikalności próżni tablice podają wymiarową wartość liczbową: $\epsilon_0 = 8,854\,187\,817 \times 10^{-12}$ F/m. Mamy tu nową jednostkę pojemności: farad, który jest równy $F = C^2/J$, gdzie C jest kulombem. (Albo: $F = \text{A}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4$). Nie ma żadnej redukcji miana do $\text{m}\text{-kg}\text{-s}$, natomiast jednostka ładunku i ϵ_0 zwane niegdyś „stałą dielektryczną próżni” a współcześnie po prostu „stałą elektryczną”, stają się ze sobą liczbowo związane. Ale po co my w ogóle wprowadzamy trudną do zapamiętania wartość liczbową dotyczącą próżni? Przecież nie będziemy sugerować, że tam jest jakiś „eter” o istotnych własnościach fizycznych?

Odpowiedź jest związana z rozsądną zasadą metodologiczną dającą się rozpoznać w pracach BIPM [4]. Definiowane jednostki winne być oparte o spójne protokoły pomiarowe wyrażane prostym językiem i używające jednostek już znanych. Jeśli jednostka jest wtórna i nie wymaga pomiarów, jej definicja winna być prosta i używać *dokładnych* liczb wiążących ją z innymi. Jeśli teoria opisująca mierzone zjawiska kojarzy ze sobą różne wielkości, o różnych wymiarach, komplikacja numeryczna zostaje raczej ukryta w stałych współczynnikach proporcjonalności, niż w specyfikacjach jednostek. I tak, amper jest natężeniem prądu, który płynąc w dwóch nieskończonych, równoległych przewodnikach o znikomej średnicy, umieszczonych w próżni i odległych od siebie o metr, generuje między nimi siłę 2×10^{-7} N na metr długości. Proste i łatwe do zapamiętania.

Ten pomiar dotyczy istotnie innej fizyki, niż czysta mechanika, ale jest z nią związany. Więc skoro jednostkę ładunku definiujemy poprzez $C = A \cdot s$, stała elektryczna próżni staje się liczbowo konieczna, ale nie jest to żadna poważna „stała uniwersalna Przyrody”, tylko czynnik normalizacyjny związany z konwencjonalnie przyjętą „prostą” liczbą 2×10^{-7} i użyciem „po prostu” metrów w powyższej definicji.

Tylko, że teraz powiedzieliśmy półprawdę... Jeśli z maxwellowskiej elektrodynamiki zrekonstruujemy prawo Ampera, czy Biota-Savarta, zauważymy, że z konieczności pojawi się we wzorach prędkość światła, jako jedyna stała uniwersalna. Zostanie ona związana we wzorach z innymi współczynnikami i między innymi z przenikalnością magnetyczną próżni, μ_0 . Ponieważ teoria wymaga spełnienia zależności $\mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot c^2 = 1$, przyjęta konwencja odnośnie ładunku, wymaga, aby μ_0 było równe $4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$, co banalizuje trochę tę wartość liczbową, trudno się spodziewać, aby taka liczba miała jakieś poważne znaczenie... Dobrze jest więc sobie przyswoić już na poziomie szkoły średniej, że tak „ściśła” nauka jak fizyka, jest oparta o sporą ilość konwencji, które ingerują nawet w wartości liczbowe¹ i wymiary wielkości fizycznych. Dobrze jest także zauważyć, że system CGS powstał jeszcze w XIX wieku i że Giorgi zaproponował wprowadzenie jednostki elektrycznej jako niezależnej już w 1901 roku, aczkolwiek międzynarodowe instancje usankcjonowały system MKSA dopiero w roku 1946.

Powoli zaczynamy rozumieć, dlaczego SI zawiera tyle jednostek, po prostu mamy różne protokoły doświadczalne i różne teorie, niekoniecznie fundamentalne! Oprócz m–kg–s–A mamy jeszcze jednostkę temperatury – kelwina, jednostkę światłości – kandelę, a także mol – jednostkę ilości materii.

Pojawiają się nowe stałe

Wiadomo, że „fizycy mikroskopowi” często wyrażają temperaturę w jednostkach energetycznych, np. w elektronowoltach. Pojęcie stopnia jest teoretycznie zbędne. Ale temperaturę mierzymy od setek lat i ustaliliśmy jednostki niezależnie od termodynamiki teoretycznej. Najpierw mieliśmy skalę Celsjusza opartą na doświadczalnych pomiarach własności wody. Jej wadą jest między innymi jej względność, określamy właściwie tylko różnicę temperatur, a skala absolutna, z zerem w punkcie krzepnięcia wody, jest okropnie nieuniwersalna.

Od czasów Celsjusza (1701–1744) dowiedzieliśmy się między innymi, że istnieje zero absolutne. Tak więc dzisiaj jednostką temperatury jest kelwin, zdefiniowany jako ułamek $1/273,16$ temperatury punktu potrójnego wody. Dokładniejsze pomiary własności wody nie ruszą już tej liczby. Nie będziemy dysku-

¹ To zdanie należy dobrze zrozumieć, stwierdzenie, że *mierzone* wielkości zależą od „widzimiśię” byłoby oczywiście nonsensowne. Przykładem jego zasadności jest ustalona *dokładnie* prędkość światła i konwencja, że pomiar ustala jednostki.

tować więcej tej jednostki, natomiast interesuje nas jak się ma miano temperatury do innych jednostek, a konkretnie do mechaniki. Potrzebne nam będą wzory z termodynamiki, np. równanie Clapeyrona: $PV = nRT$. Po lewej mamy wielkość o wymiarze energii, po prawej – temperaturę, więc musimy wprowadzić nietrywialną stałą gazową: $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$. Bardziej podstawową niż R jest stała Boltzmanna k_B , która pozwala konwertować jednostki temperaturowe i energetyczne, bez angażowania ilości materii: $k_B = 1,3806505 \times 10^{-23} \text{ J/K}$. Czy dobrze rozumiemy sens tej stałej? Czy dotyczy ona fizyki, czy jest czystą konwencją?

Odpowiedź narzuca się sama. Jest to po prostu zwykły przelicznik jednostek, nie ma żadnej wielkości fizycznej o takim wymiarze. Teoretycznie więc można zdefiniować jednostkę K jako dżul podzielony przez (ustaloną raz na zawsze) stałą Boltzmanna, tylko na razie nikogo to nie uszczęśliwi. Przejdźmy z termodynamiki fenomenologicznej do fizyki statystycznej, która jest rekonstrukcją makrofizyki z własności mikroskopowych, z takimi stałymi, parametrami i jednostkami, jakie mamy w danym modelu mikroskopowym: masy, prędkości, ładunki, itp. *Musimy* zainwestować konkretny model dynamiczny, klasyczny lub kwantowy, do rozważań statystycznych i jedynym nowym pojęciem, jakim operujemy, jest prawdopodobieństwo, co pozwala zastosować do fizyki neutralną, matematyczną teorię miary. Więc żadne nowe stałe ani nowe jednostki nie powinny się już pojawić. Uniwersalne wzory fizyki statystycznej zawierają jedynie stałą Boltzmanna, gdyż energia jest tam niezbędna, a temperatura pojawia się jako czynnik Lagrange’a, albo jako stała wymiarowa pozwalająca operować wzorem Gibbsa na prawdopodobieństwo stanu s w funkcji jego energii

$$E(s): p(s) = \exp\left(-\frac{E(s)}{k_B T}\right).$$

Jak już jesteśmy przy termodynamice, wypada zauważyć jedną „krzyżącą niesprawiedliwość”. Jest pewna wielkość fizyczna, która ma swoją specyficzną metodykę pomiarową i którą wszyscy znamy. Jest ona równoważna energii, ale nie jest intuicyjnie z nią tożsama. Każdy dorosły wymienia nazwę odpowiedniej jednostki dość często, czasami kilka razy dziennie, a jednostka ta nigdy nie znalazła się w SI. Chodzi o ciepło i o jednostkę: kalorię. Jedna kaloria dla fizyka, to po prostu 4,184 J, nic więcej. Dlaczego ta jednostka została zlekceważona? Definiuje się ją jako ciepło potrzebne, aby podgrzać 1 gram wody o jeden stopień i to zależy od temperatury początkowej. Jest to więc definicja daleka od uniwersalności, mająca kilka wariantów czysto konwencjonalnych. Nie warto jej „nobilizować” przez umieszczenie w systemie SI, nawet jeśli się przydaje w kuracjach odchudzających...

Z kandelą nie ma dużo problemów. Jednostka ta jest zbędna, możemy ją sprowadzić do mocy emitowanej w jednostkę kąta bryłowego, ale światło to jest światło, odbieramy je inaczej niż energię mechaniczną. Mamy inne protokoły

pomiarowe, więc definiujemy kandelę *ab ovo*, jest to nowa jednostka, *światłości*, określająca znormalizowane źródło, emitujące promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości 540×10^{12} Hz, o natężeniu kierunkowym (mocy) $1/683$ watów na steradian².

Ten sektor fizyki nie doczekał się żadnych stałych „uniwersalnych”, nie są one potrzebne, gdyż niewielu ludzi potrzebuje na co dzień mierzyć światłość obiektów. Zresztą nie ma tutaj nowej teorii podstawowej, więc żadnej stałej naprawdę uniwersalnej być nie może. Nie można jednak wykluczyć, że sytuacja ulegnie pewnej zmianie (wprowadzi się inne *konwencje*), gdyż coraz większą rolę w symulowaniu świata wizualnego, np. w efektach specjalnych w filmach, odgrywają techniki komputerowe. Precyzyjne określenie własności podstawowych: spektralnych, energetycznych, statystycznych itp. światła i jego źródeł, z *perspektywy odbioru ludzkiego oka*, stało się niezbędne, organizacja CIE (*Commission Internationale d’Eclairage*) zajmuje się tym od osiemdziesięciu lat. Co to jest *barwa*? Czy można przypisać jej jakieś miano? Ten temat prosi się o osobny artykuł.

Reasumując: wielość jednostek wymiarowych wiąże się ze specyfiką pewnych pomiarów, a także z naszymi ludzkimi przyzwyczajeniami. Dla „czystej fizyki” nie ma to znaczenia.

Czy każda jednostka ma wymiar?

Poprzedni rozdział pomija pewną „wątpliwą” jednostkę podstawową: mol. Możemy się zgodzić, że taka wielkość jak długość, natężenie prądu, czy światłość, to jest „coś” nieredukowalnego do innych, gdyż pomiar tych wielkości jest specyficzny, a jeśli je redukujemy do innych parametrów, to wyskakuje nam jak chochlik jakaś stała uniwersalna. Ale ilość materii? To wygląda jak zwykła liczba bezwymiarowa, podobnie jak 10, czy π . Jeden mol to $6,0\ 221\ 415 \times 10^{23}$ cząstek. To jest po prostu N_a , bezwymiarowa liczba Avogadra (1776–1856).

I teraz mamy konflikt z poprzednimi rozważaniami: *bezwymiarowa stała uniwersalna*? Jeśli te stałe, niezależnie od podstawowej roli w formułowaniu teorii, operacyjnie dotyczą konwersji jednostek, to tutaj mamy bezsens. Zastanówmy się więc jak przekazać informację o tym sektorze systemu SI naszemu kuzynowi z Andromedy. Od razu zauważymy, że definicja N_a się zapętla, zawiera w sobie odnośnik do mola. Więc stwierdzamy, że ta stała nie ma w sobie nic uniwersalnego, mogłaby być dowolna (z odpowiednim przedefiniowaniem innych wielkości). Kuzyn zapisze: „Ziemianie lubią pewną dziwną liczbę, $6,0\ 221\ 415 \times 10^{23}$. Dlaczego akurat tyle?”

Prawo Avogadra zawiera w sobie dwa elementy. Po pierwsze, samo prawo, uniwersalne: w tych samych warunkach fizycznych, w równych objętościach

² Dawniejsza definicja, jako źródła równoważnego $1/600\ 000$ m² ciała doskonale czarnego, w temperaturze krzepnięcia platyny, jest po prostu dość niewygodna.

różnych gazów (zbliżonych do doskonałych) znajduje się taka sama liczba molekuł. Litry wodoru i litry tlenu zawierają z grubsza tyle samo cząsteczek, więc operowanie ilością gazu wyrażoną przez liczbę cząsteczek ma pewien głębszy sens, nawet w innej galaktyce. Po drugie, i tu jest istota zagadnienia, Avogadro interesował się wyznaczaniem mas atomowych i cząsteczkowych, wiedział, że wodór (molekularny) jest 6 razy lżejszy od węgla i dysponował całym bagażem fizyki swoich czasów, w szczególności wielkościami wymiarowymi, jak np. gram. Cóż więc dziwnego, że mol został zdefiniowany jako liczba gramów odpowiadająca względnej masie atomowej, w stosunku do najlżejszej substancji, tj. 2 g dla wodoru (H_2), 12 g dla węgla (C), itp.? Było to o tyle uniwersalne, że niezależne od właściwej masy cząsteczek, od jednostki nazwanej później daltonem i równej $1,66\ 054 \times 10^{-27}$ kg, 1/12 masy atomu węgla. 1 mol gazu to ok. 22,4 litra, niezależnie od gazu. Tak więc odpowiedź kuzynowi brzmi, że my lubimy pojęcie grama.

Podsumowanie

Temat będzie kontynuowany w drugiej części artykułu. Omówimy niezmiernie interesujące dla fizyka zagadnienie niezmienniczości skalowania, które odgrywa fundamentalną rolę w teorii przejść fazowych i w fizyce fundamentalnej, a które zawiera istotne własności zmiennych wymiarowych. Pominęliśmy dyskusję wielu bezwymiarowych liczb w fizyce np. stałej Reynoldsa, które wydają się mieć olbrzymie znaczenie, mimo, iż nie są fundamentalne.

Rozpoczęliśmy temat, który kwalifikuje się na głębszą dyskusję. Relacja między wielkościami wymiarowymi i niemianowanymi, dotyczącymi naszego życia codziennego jest zdradliwa. Każdy się zgodzi, że *cena* wymaga jednostek, jest inna w złotych, euro, koronach... Ale co to jest „wymiar pieniądza”? Ma to coś wspólnego z wymiarami fizycznymi? A liczbową wartość „mocy magicznej” w grach komputerowych typu Fantasy? Można ją przeliczać na odporność na strzały wroga, odległość lub prędkość teleportacji, itp.

Czytelnik, który teraz się zachnie i powie: „no, to jest dopiero czysta konwencja, do fizyki tu daleko!”, nie musi mieć racji. Jeśli jakaś waluta ma parytet w złocie, to można – umownie, ale obiektywnie – przypisać określonej liczbie dukatów pewną masę. Z kolei w zamkniętym świecie, gdzie nie ma żadnych innych walut poza jedyną oficjalną, cena staje się czystą liczbą, gdyż nie ma jednostki z czym porównać (a bywało tak, że nie dało się jej wymienić na żaden towar...). A w magii mamy zarówno pewne „protokoły pomiarowe”, jak i „teorie”. Zauważmy, ile książek musiał przeczytać biedny Harry P.

Daleko do fizyki? A może nie, może w ekstremalnych warunkach Big-Bangu, gdy nie było żadnych znanych cząstek, świat był opisywany przez teorię, w której wszystkie wielkości należało traktować jak bezwymiarowe, albo zawierające miano jakiejś kompletnie nieznannej wielkości fizycznej, którą odkryjemy dopiero w przyszłości? Spekulacji na ten temat jest mnóstwo, jak zaw-

sze, gdy nie ma nowych, istotnych danych doświadczalnych i różnica między teorią, a zwykłą gimnastyką umysłową się zaciera. Polecamy fascynującą dyskusję [7] dostępną w Internecie.

Literatura

- [1] J. Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, Firmin-Didot, Paryż, 1822.
- [2] E. Buckingham, *On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations*, Phys. Rev. 4, 1914, 345–376.
- [3] National Institute of Standards and Technology, URL: <http://physics.nist.gov/cuu/Units/index.html>
- [4] Bureau International des Poids et Mesures, URL: <http://www.bipm.org/>
- [5] CNN, rok 1999. URL: <http://www.cnn.com/TECH/space/9909/30/mars.metric/index.html>
- [6] G.D. Yarnold, *Note on electric and magnetic dimensions*, Proc. Phys. Soc. 54, 1942, 46–50, URL: <http://www.iop.org/EJ/article/0959-5309/54/1/305/prv54i1p46.pdf?request-id=mGznJkLW3BG581T92wi7Kg>
- [7] M.J. Duff, L.B. Okun i G. Veneziano, *Triologue on the number of fundamental constants*, JHEP 0203, 023 (2002), URL: http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0110/0110060v3.pdf.
- [8] J.W.S. Rayleigh. *The principle of similitude*. Nature, 95(66), s. 591 i 644, 1915.
- [9] G.I. Barenblatt, *Dimensional Analysis*, Gordon and Breach, 1987.
- [10] H.E. Huntley. *Dimensional Analysis*, Dover, (1967).
- [11] J. Baez, URL: <http://math.ucr.edu/home/baez/torsors.html>
- [12] G. Baldwin, *Implementation of Physical Units*, SIGPLAN Notices 22, 1987, 45–50.
- [13] M. Wand, P.M. O’Keefe, *Automatic Dimensional Inference*, w: *Computational Logic*, MIT Press, 1991, 479–486.
- [14] D. Siano, *Oriental Analysis – A Supplement to Dimensional Analysis*, J. Franklin Institute (320), 1985.
- [15] Australian Centre for Precision Optics, URL: <http://www.acpo.csiro.au/avogadro.htm>



O świecy zwanej kandelą

Andrzej Zięba

Instytut Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH

Prawie każdy podręcznik fizyki zawiera informację o układzie jednostek SI, a w nim tabelkę pięciu jednostek podstawowych. Dociekliwego czytelnika niepokoi ostatnia z nich – kandela. Dowiaduje się, że jest to jednostka „światłości”. Tej, dość dziwnie brzmiącej, wielkości nie omawiają współczesne podręczniki fizyki.

Definicja kandel, tekst wg rozporządzenia 30.11.2002 [1]

Kandela – światłość źródła emitującego w określonym kierunku promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości 540×10^{12} herców i o natężeniu promieniowania w tym kierunku równym 1/683 wata na steradian.

Celem artykułu jest próba rzetelnego przedstawienia natury jednostek oświetlenia. Przekonamy się, że zrozumienie, skąd się wzięła i co robi kandela w układzie SI, jest interdyscyplinarnym zagadnieniem na styku fizyki, fizjologii człowieka, metrologii, prawa, a nawet polityki.

1. Wielkości fizyczne i pozafizyczne

Mierzone przez człowieka wielkości przyporządkować można do dwu, na ogół wyraźnie rozgraniczonych, kategorii. Pierwszą stanowią wielkości, które możemy precyzyjnie zdefiniować i w efekcie zmierzyć z dokładnością zależną tylko od jakości używanych przyrządów pomiarowych. Wielkości te są powiązane ze sobą ścisłymi prawami fizyki, dlatego najczęściej określa się je jako wielkości fizyczne. Wielkościami rozpoznanymi od niepamiętnych czasów jako dające się jednoznacznie zmierzyć są np. czas, długość, masa i objętość naczyń. Współcześnie wszystkie wielkości fizyczne zawarte są w zbiorze wielkości układu SI.

Wielkości pozostałe nazwijmy wielkościami pozafizycznymi. Termin ten jest wprowadzony przez autora artykułu jako dychotomiczne dopełnienie pojęcia „wielkości fizyczne”. W literaturze metrologicznej jego odpowiednikiem jest przydługie określenie „wielkości mierzone za pomocą skal empirycznych” [2].

Wielkości pozafizycznych nie można jednoznacznie zdefiniować i zmierzyć, dlatego, że dotyczą zjawisk i bytów złożonych, takich jak twardość, żyzność gleby, czułość filmu fotograficznego czy liczbowe oceny w studenckim indek-

sie. W szczególności do tej kategorii należą wszystkie wielkości związane z tym najbardziej złożonym organizmem, jakim jest człowiek.

Światłość jest wielkością pozafizyczną, gdyż związana jest z widzeniem światła przez ludzkie oko.

2. Skąd pochodzi kandela?

Definicje wielkości i jednostek pozafizycznych wynikają z potrzeb nauki i praktyki. Jedną z nich była próba odpowiedzi na pytanie, ile światła daje ta czy inna świeca, lampa naftowa, żarówka względnie dioda świecąca.

W czasach gdy nie znano detektorów światła, wymyślono pomiar porównawczy. Na ławie optycznej umieszczano świecę badaną i świecę wzorcową, a pośrodku ekranik z lusterkami umożliwiającymi jednoczesny ogląd jego obydwu stron. Przesuwając ekranik szukano takiego położenia, przy którym obydwie strony ekraniku wydawały się jednakowo jasne [3]. Związek światłości obydwu świec S_x i S_w oraz odpowiednich odległości do ekranika r_x i r_w określa proporcja

$$\frac{S_x}{r_x^2} = \frac{S_w}{r_w^2}. \quad (1)$$

Pomiar taki wymaga zdefiniowania świecy wzorcowej, czyli właśnie kandelii. Przykładowo, w podręczniku fizyki A. Witkowskiego z roku 1908 [3] znajdziemy definicję wzorcowej świecy amyłowej Hefnera-Altenecka. Ma to być „lampka spalająca, bez kominka, czysty octan amyłowy, za pośrednictwem knota bawełnianego, wypełniającego rurkę metalową, wystającą ze zbiornika na 25 mm, średnicy wewnętrznej 8 mm, zewnętrznej 8,3 mm. Wysokość płomienia powinna wynosić dokładnie 40 mm, kierunek promieni poziomy”.

Od łacińskiej nazwy świecy *candela*, pochodzi nazwa naszej jednostki. (Po angielsku świeca to *candle*, w języku polskim znajdziemy ten łaciński rdzeń w słowie *kandelabr*).

3. Jak mierzy się światło dziś?

Pełną informację o świetle w określonym punkcie w pobliżu źródła światła da umieszczenie spektrometru w tym właśnie punkcie i zmierzenie widma światła $I(\lambda)$. Funkcja $I(\lambda)$ zdefiniowana jest jako stosunek natężenia promieniowania (jednostka: W/m^2) w elementarnym przedziale długości fali $d\lambda$ do długości tego przedziału. Całkowite natężenie promieniowania $[\text{W}/\text{m}^2]$ dane jest całką

$$\text{natężenie promieniowania} = \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

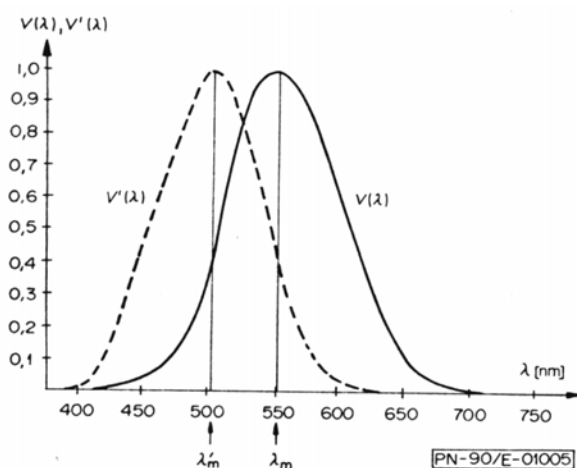
Przypomnijmy przy okazji, że postać funkcji $I(\lambda)$ dla ciała doskonale czarnego o temperaturze T wyprowadził teoretycznie Planck, wykorzystując przełomowe założenie o istnieniu kwantu promieniowania. Scałkowanie wzoru

Plancka (przy wykorzystaniu wzoru (2)) daje prawo Stefana-Boltzmana, stwierdzające, że całkowite natężenie promieniowania I jest proporcjonalne do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej.

Wielkości $I(\lambda)$ oraz I są bez wątpienia wielkościami fizycznymi. Natężenie promieniowania I nie może być, niestety, miarą światła widzianego przez oko, gdyż np. dla żarówki przeważająca część emitowanego światła przypada na zakres podczerwieni. *Natężenie oświetlenia* jest wielkością pozafizyczną, biorącą pod uwagę subiektywną wrażliwość oka ludzkiego na światło o różnej długości fali. Współcześnie jest zdefiniowane jako

$$\text{natężenie oświetlenia} = K_m \int_0^{\infty} I(\lambda)V(\lambda)d\lambda, \quad (3)$$

gdzie $V(\lambda)$ oznacza bezwymiarową funkcję czułości oka ludzkiego (rys. 1). Funkcję $V(\lambda)$ normalizuje się do jedności dla żółtozielonego światła o długości fali $\lambda_m = 555$ nm (częstotliwość 540 THz), dla którego czułość oka przy widzeniu dziennym jest najwyższa.



Rys. 1. Krzywa względnej czułości oka ludzkiego wg normy PN-90/E-01005. Linia ciągła dotyczy natężenia oświetlenia rzędu kilku luksów, gdy za wrażenia wzrokowe odpowiedzialne są czopki siatkówki oka (widzenia dzienne). Krzywa przerywana dotyczy słabego oświetlenia poniżej kilku setnych luksa, gdy za widzenie odpowiedzialne są tzw. pręciki (widzenie nocne)

Jeżeli przyjąć wartość stałej $K_m = 683$ lx/W, wzór (3) daje natężenie oświetlenia w luksach. Przedstawiona na rys. 1 standardowa funkcja czułości oka $V(\lambda)$ i wartość stałej K_m określa w Polsce norma PN-90/E-01005 *Technika świetlna. Terminologia* (1991) [4]. (Litera E w symbolu normy informuje, że norma ta jest zgodna z normami europejskimi.) Funkcja $V(\lambda)$ została ustalona

przez empiryczne badania na grupie ochotników i jest do pewnego stopnia umowna – każdy z nas widzi światło nieco inaczej, szczególnie daltoniści.

Zatem we współczesnym, skodyfikowanym prawnie ujęciu, konstrukcja jednostek oświetlenia wychodzi od natężenia oświetlenia i jej jednostki – luksa. (We wzmiankowanej normie [4] przejawia się to w fakcie, że wzór całkowity (3) i występujące w nim wielkości znajdziemy w jej tekście przed definicjami lumina i kandeli.) Przedstawiona kombinacja fizycznego widma światła $I(\lambda)$ i krzywej czułości oka $V(\lambda)$ jest podstawą cechowania przyrządów do pomiaru natężenia oświetlenia – luksomierzy. Przez dobór materiału półprzewodnikowego detektora i użycie filtru o odpowiedniej charakterystyce staramy się doprowadzić do tego, by wskazania luksomierza były w miarę możliwości równe wartości natężenia oświetlenia zdefiniowanego przez wzór całkowity (3).

Wielkością pochodną od natężenia oświetlenia jest strumień świetlny (jednostka: lumen), zdefiniowany jako iloraz natężenia oświetlenia i kwadratu odległości od źródła. Oczywiście przy założeniu, że źródło jest małe i świeci izotropowo. Strumień świetlny jest wielkością określającą wydajność źródeł światła. Przykładowo, wydajność diody białej (używanej np. we współczesnych lampach turystycznych) jest większa od wydajności żarówki o tej samej mocy. W ujęciu tym światłość jest wielkością nie tylko pozafizyczną, ale również w istocie niepotrzebną – definicja kandel (vide ramka) określa jednocześnie tylko wartość współczynnika K_m we wzorze (3).

4. Natura wielkości mierzonych a przepisy prawa

Podział jednostek miary na fizyczne i pozafizyczne odzwierciedla się w prawodawstwie większości krajów tym, że jednostki fizyczne legalizuje się przez ustawowe przyjęcie układu SI zaś niejednoznaczne definicje jednostek pozafizycznych są określone przez normy techniczne. Przykładowo, naszą ustawę *Prawo o miarach* [5] rozpoczyna jednozdaniowy artykuł 1 o charakterze preambuły: „Celem ustawy jest zapewnienie jednolitości miar i wymaganej dokładności pomiarów wielkości fizycznych w Rzeczypospolitej Polskiej”. Innym przejawem wyróżnienia jednostek fizycznych w prawodawstwie polskim jest podstawowe rozporządzenie wykonawcze [1] do prawa o miarach, wyszczególniające m.in. legalne jednostki miar nienależące do układu SI. Wszystkie z nich są jednostkami wielkości fizycznych.

Określenie i legalizację miar wielkości pozafizycznych określają przyjęte przez Polskę normy techniczne. Obok wzmiankowanej normy dotyczącej jednostek oświetlenia mamy liczne normy określające jednostki i sposoby mierzenia wielkości pozafizycznych. W przypadku twardości mamy nie jedną, lecz szereg norm, gdyż wielkość ta mierzona jest za pomocą wielu skal empirycznych (Mohsa, Brinella, Vickersa...). Ich źródłem jest jednocześnie Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (International Standardization Organisation, w skrócie ISO).

Zatem ISO zajmuje się metrologią wielkości pozafizycznych, natomiast źródłem pojęć i przepisów prawnych dotyczących metrologii wielkości fizycznych jest, powołana w roku 1975, Międzynarodowa Konfederacja Miar, której organem wykonawczym jest Biuro Miar i Wag w Sèvres pod Paryżem (BIPM – *Bureau International des Poids et Mesures*). BIPM stoi na stanowisku, że wszystkie mierzone wielkości tworzą jednolity zbiór, bez podziału na wielkości fizyczne i pozafizyczne. Jego konsekwencją jest niechęć do odpowiedzi na pytanie, dlaczego właśnie kandela – jedna z wielu jednostek pozafizycznych – dostępuje zaszczytu uznania za jednostkę podstawową układu SI. Pozamerytoryczną przyczyną wyróżnionej pozycji kandelii w układzie SI jest też, jak uważa autor, kult, jakim w ojczyźnie metra i kilograma otaczana jest epoka *Oświecenia*.

5. Przyszłość kandelii w świetle ewolucji wzorców układu SI

Ewolucja wzorców jednostek miar polega na zastępowaniu wzorców nieodtwarzalnych (np. metr jako odległość między rysami na sztabie ze stopu Pt-Ir) przez wzorce odtwarzalne (metr jako droga przebyta w próżni przez światło w czasie $1/299\,792\,458$ sekundy). Obecnie trwa debata nad zastąpieniem obecnego wzorca kilograma (cylinder Pt-Ir przechowywany w BIPM) na odpowiedni wzorec odtwarzalny. Przedmiotem sporu jest nie tyle konieczność zmiany wzorca kilograma, ile pytanie, który z proponowanych nowych wzorców zostanie przyjęty [6]. Zmiana definicji kilograma pociągnie za sobą redefinicję jednostki liczności materii – mola. Decyzje w tych sprawach mają zapaść na spotkaniu Międzynarodowej Konfederacji Miar planowanym na rok 2011.

Byłaby to dobra okazja do usunięcia kandelii ze zbioru jednostek podstawowych układu SI. Nie przeszkodzi to w najmniejszym stopniu w dalszym używaniu luksa i lumena jako ważnych jednostek pozafizycznych ani spójności reszty układu SI. Potrzebna jest jednak w tym celu akcja informacyjno-lobbingowa np. ze strony środowisk fizycznych. Trawestując znane powiedzenie o wojnie i generałach: jednostki miar są sprawą zbyt ważną, by decyzje o nich pozostawić wyłącznie metrologom.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 listopada 2006 r. w sprawie legalnych jednostek miar (Dz. U. z dnia 8 grudnia 2006 r.). Dostępne w Internecie.
- [2] Piotrowski J., *Teoria pomiarów. Pomiar w fizyce i technice*. PWN, Warszawa 1986 (oraz inne podręczniki i skrypty tego autora).
- [3] Witkowski A., *Zasady Fizyki*, t. 2, Księgarnia Wende i S-ka, Warszawa 1908.
- [4] Norma PN-90/E-01005 Technika świetlna. Terminologia (1991).
- [5] Ustawa z dnia 11 maja 2001 Prawo o miarach (tekst jednolity). Dziennik Ustaw Nr 243, poz. 2441 z 2004 r. Dostępna w Internecie.
- [6] Gluza J., Grzanka A., Pleban A. (2007). *Ku nowej definicji kilograma*. „Postępy Fizyki” 53, 98–102.



Niekonwencjonalne napędzanie samochodów

– sposób na obniżenie kosztów transportu i zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska

Zbigniew Sosin
Instytut Fizyki UJ

Wstęp

W pewnym momencie historii ludzkości pojawiła się potrzeba sprawnego przemieszczania się ludzi, jak i transportu wytwarzanych przez nich towarów. Z czasem gwałtownie zwiększała się ilość energii zużywanej na ten cel w porównaniu z energią wydatkowaną na inne zadania, jak np. zdobywanie i wytwarzanie pożywienia, przemysł, rolnictwo, czy obsługa gospodarstw domowych. Już dziś udział energii przeznaczanej na transport stanowi ok. 25% ogółu wykorzystywanej energii i jak twierdzą eksperci, będzie się on dalej zwiększał. Sytuację dodatkowo komplikują kurczące się zapasy wykorzystywanych do tej pory paliw kopalnych, ich wzrastające ceny oraz coraz poważniejsze problemy ekologiczne. Dlatego też prowadzone są intensywne prace nad optymalizacją istniejących rozwiązań technologicznych, m.in. zwiększeniem sprawności stosowanych silników lub opracowanie zupełnie nowych rozwiązań, które mogłyby zastąpić te wykorzystywane obecnie.

W prezentowanym artykule postaramy się przedyskutować główne źródła strat stosowanych obecnie silników i zastanowić się, w jaki sposób można je zminimalizować. Stanowić to będzie punkt wyjścia do dalszych rozważań nad nowymi koncepcjami technologicznymi, które mogą znaleźć zastosowanie w samochodach przyszłości.

Jak oszczędnie jeździć samochodem?

Podczas ruchu samochodu silnik musi wykonać pracę, aby rozpędzić pojazd oraz po to, by utrzymać go w ruchu pokonując opory jazdy. Jak wiadomo, wielkość energii kinetycznej E_k potrzebna do rozpędzenia samochodu związana jest z jego masą m , jak i uzyskiwaną prędkością v , zgodnie ze wzorem $E_k = mv^2/2$. Jeśli jazda odbywa się w mieście, to ruch odbywa się pomiędzy skrzyżowaniami, na których samochód często się zatrzymuje. W standardowych pojazdach, zatrzymanie samochodu równoznaczne jest z całkowitą utratą energii E_k , tak więc jednym ze sposobów na ograniczenie energii jest zminimalizowanie strat. Minimalizacja ta może być związana ze zmniejszeniem masy samochodu (zależność liniowa) lub zmniejszeniem maksymalnej uzyskiwanej prędkości (zależność kwadratowa). Zwłaszcza ograniczenie prędkości, szczególnie na krótkich międzypostojowych odcinkach, może znacznie zmniejszyć zużycie paliwa,

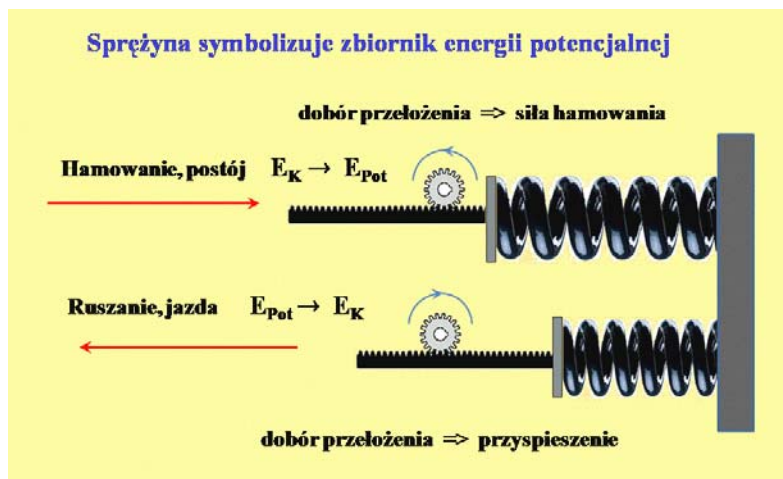
jak również podnieść bezpieczeństwo ruchu. Powoduje to jednak wydłużenie czasu przejazdu, co może stanowić poważny problem. Dlatego też stosując to rozwiązanie należy kierować się zdrowym rozsądkiem – nasza jazda powinna być płynna i oszczędna, a jednocześnie nie może ona zbytnio utrudniać ruchu innym pojazdom. Obserwując ruch miejski możemy zauważyć, że praktycznie nigdy samochody zatrzymujące na światłach nie wyłączają silników. Spowodowane jest to nieprzystosowaniem ich silników do takiego właśnie stylu jazdy. A przecież podczas postoju na światłach, czy „jazdy” w korku, energia wytwarzana przez silnik zamieniana jest na ciepło i w ten sposób bezpowrotnie tracona. Nowe rozwiązania technologiczne powinny zatem uwzględnić oba te fakty w celu optymalizacji energii wydatkowanej na ruch samochodu.

Prowadząc rozważania dotyczące oszczędnej jazdy nie sposób pominąć problemu sprawności silnika. Sprawność silnika spalinowego, który jest silnikiem cieplnym o spalaniu wewnętrznym, determinowana jest przez tzw. *stopień kompresji*, czyli temperaturę spalania mieszanki paliwowej. Dlatego też stopień kompresji jest jednym z czynników decydujących o wielkości zużycia paliwa. Dzięki wysiłkom konstruktorów, obserwowany jest systematyczny postęp w tej dziedzinie. Niezależnie jednak od niego, silniki paliwowe posiadają olbrzymią wadę związaną z brakiem możliwości ich pracy w cyklu odrotnym, tzn. przetwarzania energii kinetycznej w potencjalną. Nie ma zatem możliwości wyeliminowania strat, o których mowa była w poprzednim paragrafie. Z tego powodu, w prezentowanym artykule koncentrować się będziemy jedynie na alternatywnych sposobach napędzania samochodów, tzn. takich, które nie opierają się wyłącznie na silnikach spalinowych,

Jak wiadomo, opory ruchu, zwłaszcza przy stosowaniu większych prędkości, również stanowią poważne źródło strat energii i znacząco wpływają na wielkość zużycia paliwa. Ich ograniczenie jest możliwe poprzez optymalizację kształtu karoserii samochodu. Dzięki postępowi w fizycznych metodach opisu i badania oporów ruchu, również w tej dziedzinie zanotowano znaczący postęp, który pozwolił na optymalizację kształtów karoserii samochodów. Z tego też powodu większość współczesnych aut jest do siebie bardzo podobna.

Hamowanie pozwalające na odzyskanie energii

Jak pokazaliśmy w poprzedniej części, hamowanie samochodu jest bardzo znaczącym źródłem strat energii. By móc je wyeliminować, niezbędne jest zastosowanie dodatkowych urządzeń, które pozwolą na przekazanie i zmagazynowanie odzyskanej energii tj. przetwornika zmieniającego energię ruchu na inną formę energii, która może być gromadzona w zbiorniku.



Na rysunku przedstawiony został najprostszy przykład takiego właśnie urządzenia, które wielu z nas pamiętać może z okresu dzieciństwa – samochód zabawkę. W samochodzie tym zbiornik energii potencjalnej stanowi sprężyna, którą przed rozpoczęciem ruchu należy naciągnąć. Możemy jednak łatwo wyobrazić sobie, że ściskanie sprężyny odbywa się podczas hamowania rozpędzonego samochodu. Zwróćmy uwagę, że przy takim hamowaniu **nie wydziela się ciepło**, a energia sprężystości może być ponownie wykorzystana. W tym rozwiązaniu jednak pewną trudność może stanowić regulacja siły hamowania. Z tego powodu jego praktyczne wykorzystanie pociągałoby za sobą konieczność zastosowania układu zmiennych przełożeń dla zębatego koła i zębatego koła. Istnieją również pewne ograniczenia związane z bezpieczeństwem takiego rozwiązania, ponieważ zbyt silne napięcie sprężyny, w razie jej zerwania, mogłoby stanowić spore zagrożenie dla osób jadących pojazdem.

Okazuje się jednak, że istnieje szereg innych możliwości pozwalających na przetwarzanie i gromadzenie energii ruchu samochodu. Sposoby te można podzielić na dwie grupy:

1. Zamiana energii kinetycznej na energię elektryczną, a następnie gromadzenie jej w odpowiednio dużych kondensatorach albo w akumulatorach. Obecnie to rozwiązanie wydaje się najbardziej obiecujące, choć posiada ono swoje istotne ograniczenia. Omówimy je w dalszej części artykułu. Pisaliśmy również o nim w poprzednim numerze *Fotonu* (Nr 101).
2. Zamiana energii kinetycznej samochodu na inną formę energii mechanicznej. W takim przypadku wybór konkretnego rozwiązania związany jest z rozmiarami i masą pojemnika danej formy energii. Oprócz wspomnianej już energii sprężystości, można tu także rozważyć energię rotacji lub energię kompresji powietrza albo innego gazu.



Zajmijmy się na początek tym drugim rozwiązaniem. Ruch wirowy od dawna wykorzystywany był do magazynowania energii i w oparciu o niego budowane są różnego rodzaju pojemniki energii. W tego typu urządzeniach magazynowanie energii odbywa się poprzez wprowadzenie pewnego wirującego obiektu, np. masywnego koła, w ruch. Jeżeli obiekt ten obraca się szybko, gromadzona jest w nim energia. Energię tę można odzyskać spowalniając koło i zamieniając ją np. na energię elektryczną.

Możliwość gromadzenia energii mechanicznej z wykorzystaniem wirującej masy wykorzystywana jest w technologii *Flywheel*, m.in. w stacjach kosmicznych. Podczas gdy statek kosmiczny znajduje się po oświetlonej stronie Ziemi, za zasilanie odbiorników pokładowych odpowiadają baterie słoneczne. Nadmiar energii elektrycznej zasila silnik, który „rozkreca” wirującą masę. Gdy statek kosmiczny znajduje się w cieniu Ziemi (baterie słoneczne nie dostarczają energii), wtedy energia zgromadzona w postaci energii rotacji napędza generator, który wytwarza potrzebną energię elektryczną. Warto zwrócić uwagę, że taki akumulator energii jest znacznie trwalszy i mniej wrażliwy na zmiany temperatury od standardowego, chemicznego akumulatora.

Inne rozwiązanie związane jest z wykorzystaniem energii kompresji, dzięki której można poruszać silniki pneumatyczne. Rozwiązanie to polega na wykorzystaniu gazu, najczęściej powietrza, sprężonego w specjalnych zbiornikach do ciśnienia kilkudziesięciu MPa. Ze zbiornika powietrze dostarczane jest do cylindrów przez system podobny do klasycznego wtrysku. Powietrze działając na tłok porusza go, co w konsekwencji umożliwia ruch samochodu. Ważną zaletą tego typu silników jest ich „ekologiczność”. Jedyne produktem „spalania” takiego silnika jest zimne powietrze. Silniki pneumatyczne od dawna stosowane są w różnego typu pojazdach.

W rozważaniach zastosowania różnych form energii potencjalnej dla gromadzenia energii mechanicznej nie sposób pominąć potencjalnej energii grawitacyjnej. Jakkolwiek jej gromadzenie w samochodzie jest raczej trudne do praktycznej realizacji, to możliwość jej magazynowania w czasie jazdy „pod górkę”, a następnie jej wykorzystanie podczas jazdy w dół, jest nam dobrze znana, a zarazem doskonale obrazuje rozważane tu zagadnienie.

Praktycznie stosowane rozwiązania

Przyjrzymy się teraz niektórym rozwiązaniom, które umożliwiają stosowanie „hamowania odzyskowego”. Rozważymy trzy typy samochodów dające takie możliwości, tj. samochody o napędzie pneumatycznym, elektrycznym i hybrydowym

Samochód z napędem pneumatycznym

Niektóre szacunki możliwego stopnia kompresji powietrza, uwzględniające wytrzymałość mechaniczną materiałów użytych do budowy butli, w których magazynowana jest energia pneumatyczna, sugerowały, że zasięg samochodów wykorzystujących to rozwiązanie nie mógłby być większy niż 100 km. Gdyby tak rzeczywiście było, znacznie ograniczałoby to możliwości użytkowe tego typu samochodów. Na szczęście skonstruowany we Francji prototyp samochodu o napędzie pneumatycznym pozwolił na osiągnięcie całkiem obiecujących parametrów: maksymalnej prędkości 110 km/h, zasięgu 200–300 km oraz ładowności 0,5 tony. Przewidywany czas tankowania *Family*, bo tak go nazwano, za pomocą kompresora elektrycznego wynosi 4 godziny, podczas gdy na stacji ze sprężonym powietrzem można będzie tego dokonać w 3 minuty. Jakkolwiek parametry te mogą być może nieco zawyżone, pozwalają wiązać pewne nadzieje z tego typu rozwiązaniem.

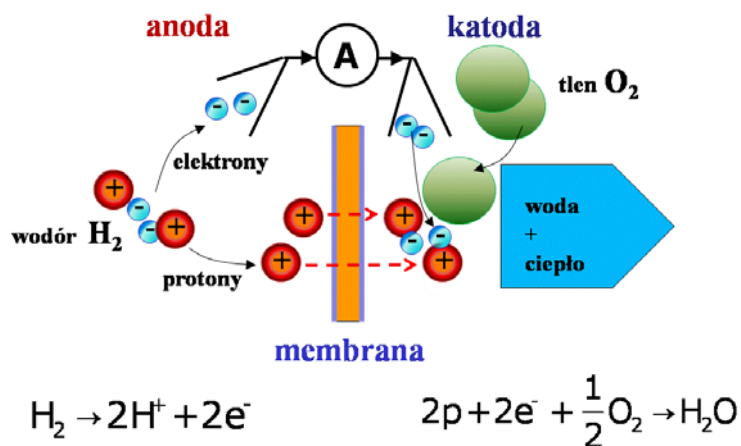


Stosunkowo duży zasięg tych samochodów związany jest ze specjalną konstrukcją silnika, zapewniającą mu wysoką sprawność oraz technologią wytwa-

rzania butli na sprężone powietrze. Podczas napędzania samochodu powietrze ulega rozprężeniu, co powoduje jego ochłodzenie. Może to w upalne dni zostać wykorzystane dla ochłodzenia wnętrza pojazdu. Sam silnik nie wymaga również układu chłodzenia, co upraszcza konstrukcję układu napędowego. Jest oczywiste, że w czasie hamowania silnik może pracować jak kompresor, co pozwala na odzyskiwanie energii. Licencja na produkcję tego samochodu zakupiona została już przez hiszpańskie i hinduskie fabryki.

Samochód o napędzie elektrycznym

Ze względu na wysoką sprawność silników elektrycznych, dużą efektywność odzyskiwania energii hamowania oraz łatwość sterowania przepływem energii, optymalnym rozwiązaniem rozważanego problemu wydają się być samochody z napędem elektrycznym. Dodatkowymi atutami tego typu pojazdów jest brak konieczności stosowania skrzyni biegów i układu chłodzenia silnika. Największą jednak słabością tego rozwiązania jest duży stosunek masy źródła dostępnej energii do ilości energii otrzymanej z tego źródła. Innymi słowy, masa i objętość akumulatorów potrzebnych do przejechania większych dystansów jest stosunkowo duża. Zmiana sytuacji w tej dziedzinie stanowi przedmiot badań i poszukiwań wielu ośrodków naukowo-badawczych, a osiągnięty sukces może spowodować gwałtowną rewolucję na rynku motoryzacyjnym. Aby poprawić sytuację w tym zakresie stosuje się dodatkowe, nieakumulatorowe źródła energii elektrycznej, jak np. ogniwa paliwowe i baterie słoneczne. W takim przypadku klasyczny akumulator służy głównie do magazynowania energii hamowania.



Zastosowanie dodatkowych źródeł energii elektrycznej ma również swoje ograniczenia. Przykładowo, wydajność niektórych źródeł prądu, np. wodorowych ogniw paliwowych, zmniejsza się wraz z wielkością pobieranego prądu.

Dlatego przy zastosowaniu takiego źródła akumulator ładowany jest z niego równomiernie w czasie stosunkowo małym prądem. W przypadku wyższego zapotrzebowania na prąd, np. podczas ruszania czy przyspieszania, akumulator staje się głównym źródłem zasilania silnika. Taka organizacja pracy źródeł energii powoduje znaczne zwiększenie sprawności układu zasilania.

Różne firmy od lat testują rozwiązania tego typu. Jako przykład przedstawimy rozwiązanie zastosowane w samochodzie Honda FCX Clarity, którego sprzedaż planuje się na rok 2008 w salonach w Japonii i USA. Ten elektryczny samochód, oprócz akumulatorów litowo-jonowych, wyposażony jest w wodoro-we ogniwo paliwowe. Ogniwo to jest zasilane z kriostatycznego zbiornika z ciekłym wodorem o objętości 171 litrów. Taki system zasilania pozwala na uzyskanie maksymalnej prędkości 160 km/h i zasięgu 440 km.

Główną wadą tego samochodu jest sposób magazynowania wodoru. Gaz ten powoli, ale systematycznie paruje ze zbiornika. Po tygodniu jego ilość zmniejsza się mniej więcej o połowę. Dlatego po zatankowaniu wodoru należy go stosunkowo szybko zużyć.

Głównym problemem związanym z zastosowaniem baterii słonecznych jako nieakumulatorowych źródeł prądu, jest ich stosunkowo niewielka moc i niska wydajność. Dlatego też nie mogą one zostać wykorzystane jako efektywne źródło uzupełniania energii akumulatora. Z tego też powodu, mimo trwających od wielu lat prac, nie udało się do tej pory skonstruować samochodu wykorzystującego energię słoneczną.

Innym, nieco bardziej futurystycznym rozwiązaniem, jest propozycja zastosowania nowoczesnego pantografu, który mógłby być montowany np. na autostradach. W takim przypadku samochód mógłby być „tankowany” w trakcie jazdy, a sam pantograf mógłby pełnić rolę automatycznego pilota.

Wiele ciekawych rozwiązań można również zaczerpnąć z badań prowadzonych nad sposobami dostarczania energii do stacji kosmicznych. Ciekawym przykładem jest technologia AMTEC, która wykorzystuje unikalne własności ceramicznego elektrolitu AlO_2 . Elektrolit ten dzieli dwa obszary: jeden z nich zawiera sód w postaci gazowej pod wysokim ciśnieniem i w wysokiej temperaturze (od 900 do 1300 K), w drugim sód jest skraplany i ochładzany do temperatury ok. 500 K. Unikalna własność elektrolitu AlO_2 polega na „obdzieraniu” z elektronów atomów przechodzących przez niego ze zbiornika o wyższym ciśnieniu do zbiornika o niższej temperaturze. W ten sposób generowane są dodatnio naładowane jony i ujemnie naładowane elektrony. Ponieważ cały układ znajduje się w polu elektrycznym, jony dodatnie sodu zbierają się na katodzie, zaś elektrony wędrują do anody. Stąd są one odprowadzane do odbiorników energii elektrycznej, a następnie do katody, gdzie ponownie łączą się z jonami tworząc obojętne atomy sodu. Sód skraplany w chłodnicy wędruje przez zespół kapilar ponownie do parownika. W ten sposób uzyskujemy możliwość przetwarzania energii cieplnej na elektryczną (która jest równoważna

mechanicznej), bez stosowania silnika cieplnego. Symulacje teoretyczne pokazują, że sprawność silników wykorzystujących to rozwiązanie może dochodzić do 40%. Ponieważ podobną sprawność osiągają silniki spalinowe, technologia AMTEC może być dla nich konkurencyjna. Warunkiem jednak jest osiągnięcie małych rozmiarów i masy przetwornika ciepła na energię elektryczną. Jeśli jednak tak się nie stanie, wciąż większe możliwości daje zastosowanie silnika spalinowego. W ten sposób dotarliśmy do najpopularniejszego dziś rozwiązania, jakie stanowi napęd hybrydowy.

Samochody hybrydowe

Idea napędu hybrydowego polega na zastosowaniu dwu różnych silników (napędów) dla poruszania pojazdu. Prosty przykładem pojazdu z napędem hybrydowym jest motorower. Od razu jednak zauważmy, że idea ta jest kompletnie nieopłacalna w przypadku nierównomiernego korzystania z elektrycznych i spalinowych typów napędów. Przykładowo, gdy udajemy się w długą podróż autostradą, gdzie nie będziemy zbyt często używali hamulców, to energia zgromadzona w akumulatorach stosunkowo szybko się skończy. W takiej sytuacji silniki elektryczne, generatory i akumulatory stanowią zbędny balast zwiększający zużycie paliwa! Jest to sytuacja analogiczna do przypadku motoroweru, w którym wyczerpało się paliwo. Jest on wtedy znacznie gorszym rozwiązaniem od klasycznego roweru. Jedyne uzasadnienie dla napędu hybrydowego stanowi ruch miejski, gdzie częste hamowania, postoje na skrzyżowaniach i jazda w korkach pozwalają na odzyskanie energii kinetycznej ruchu i optymalne wykorzystanie mocy silnika spalinowego. W ruchu miejskim takie rozwiązanie daje możliwość bardzo dużej, sięgającej nawet do ok. 50%, oszczędności energii. Zważywszy na intensywność ruchu samochodowego w naszych miastach, oszczędności te mogą być olbrzymie w skali globalnej. Wśród samochodów hybrydowych można wyróżnić trzy różne rozwiązania, które schematycznie przedstawiono na rysunku. Są nimi: hybryda szeregową, hybryda równoległą i hybryda mieszana.

Hybryda o napędzie szeregowym

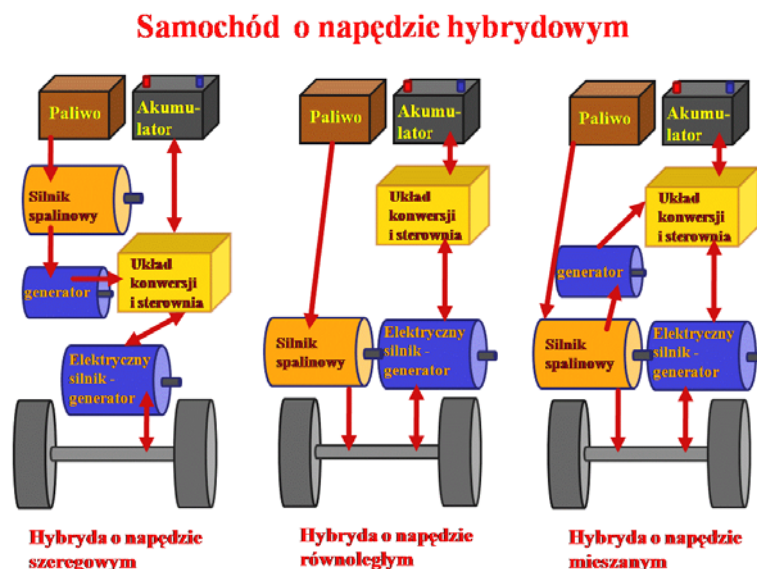
W tym rozwiązaniu koła samochodu są napędzane przez silnik elektryczny, zaś silnik spalinowy poprzez generator służy jedynie do ładowania akumulatorów. Akumulator i silnik elektryczny umożliwiają sterowanie mocą napędu samochodu. Idea, która przyświeca temu rozwiązaniu, polega na zoptymalizowaniu pracy silnika spalinowego, tak, by pracował on cały czas przy optymalnych obrotach, wykorzystując największą sprawność.

Hybryda o napędzie równoległym

W rozwiązaniu szeregowym koncentrujemy się na optymalizacji pracy silnika spalinowego, a poprzez to na minimalizacji zużycia paliwa. Niemniej czasami, dla zwiększenia osiągnięć samochodu, kuszące może być użycie obu silników równocześnie (uzyskanie większych przyspieszeń przy ruszaniu i wyprzedzaniu). Wówczas napęd na koła samochodu powinien pochodzić z obu silników. Takie rozwiązanie zwiększa nieco zużycie paliwa, ale też poprawia znacznie możliwości samochodu.

Hybryda o napędzie mieszanym

W tym rozwiązaniu kierowca (bądź komputer) decyduje o sposobie napędu. Samochód może być napędzany zarówno w układzie szeregowym, jak i równoległym.



Podsumowanie

Zmiana sposobu napędzania samochodów może doprowadzić do znacznych oszczędności zużycia energii. W ruchu miejskim oszczędności te mogą sięgać nawet do 50%. Można będzie tego dokonać przez optymalizację wykorzystania energii i jej odzyskiwanie w trakcie hamowania samochodu. Ten ostatni aspekt jest szczególnie istotny. Dlatego też jest on szeroko analizowany w laboratoriach fizycznych i chemicznych na całym świecie. Wypada mieć nadzieję, że spore środki finansowe przeznaczone na ten cel doprowadzą do ciekawych i ekonomicznych rozwiązań, które w konsekwencji spowodują rewolucję na rynku samochodowym.



Fizyka w wesołym miasteczku

Stefano Alberghi, SIM (Meteorological Service), Bologna

Alessandro Foschi, Liceo scientifico Fulceri Paulucci di Calboli, Forlì

Giovanni Pezzi, Liceo Torricelli, Faenza

Fabio Ortolani, Physics Department, University of Bologna

The Physics Teacher, vol. 45, December 2007, s. 536

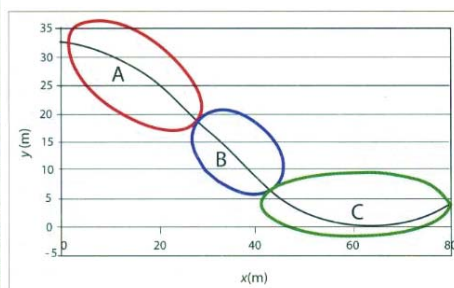
Uczyć się bawiąc, bawiąc się uczyć – wydaje się być najlepszą metodą na przyswajanie nowych, czasami bardzo nieintuicyjnych wiadomości. Szczególnie, jeżeli dotyczą one pojęć związanych z fizyką – tym przedmiotem w szkole, który spędza sen z oczu niejednemu uczniowi.

„Uczyć się bawiąc” wprowadza w życie projekt realizowany od 2003 roku w wesołym miasteczku Mirabilandia (Włochy)¹ pod nazwą „Klasa Bez Ścian”. Uczniowie, z pomocą nauczycieli (trenerów), próbują odpowiedzieć na pytanie: **czy i dlaczego bardziej ekscytująca jest jazda z przodu, czy na końcu roller coastera?**

Uczniowie rozwiązują zagadkę dzięki własnym obserwacjom, odbywając przejażdżkę na pokładzie *Sierra Tonante* (rys. 1). Jest to drewniana kolejka o maksymalnej wysokości 32,5 m. Tor o długości 1165 m pokonuje się w ciągu ok. 90 s. Maksymalna szybkość ok. 25 m/s jest osiągana na końcu zjazdu z pierwszego stoku, na którym można zauważyć: początkowy paraboliczny łuk dający imitację swobodnego spadku (A), oraz prostą linię (B), gładko łączącą się z łukiem (C) na dole toru (rys. 2).

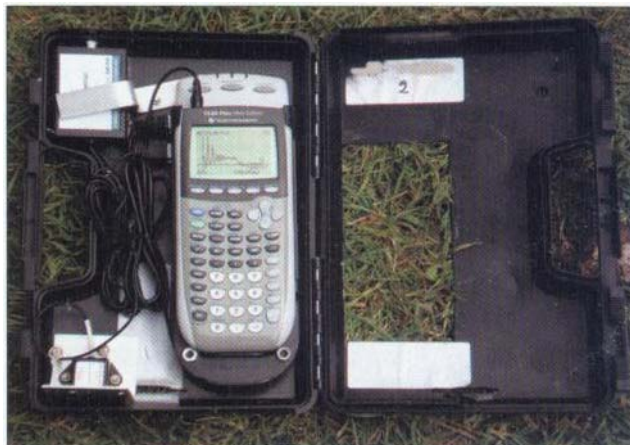


Rys. 1. Widok na pierwszy ze stoków roller coastera Sierra Tonante w wesołym miasteczku Mirabilandia (Włochy)



Rys. 2. Profil pierwszego ze stoków roller coastera Sierra Tonante

¹ http://www.mirabilandia.it/scuole_it.htm



Rys. 3. Walizka z urządzeniami pomiarowymi: TI-84, CBL2, barometr, akcelerometr

Uczniowie w czasie podróży mają do dyspozycji „specjalistyczną” walizkę (rys. 3), w której zainstalowane są urządzenia mierzące przyspieszenie – akcelerometr i zmiany ciśnienia (wysokości) – barometr². W walizce umieszczono także graficzny kalkulator TI-84 oraz interfejs CBL2, podłączone do barometru i akcelerometru³. Akcelerometry zostały skierowane do góry od strony podłogi kolejki, w kierunku prostopadłym do toru ruchu. Przy takiej orientacji, kiedy kolejka poruszała się horyzontalnie, a akcelerometr jest stabilny, odczytano wartość $+9,8 \text{ m/s}^2$. Mierzone przyspieszenie jest równe sile normalnej, działającej na jednostkę masy, dlatego też to urządzenie podaje wartość siły reakcji podłoża, takiej jaka pochodzi od sprężyny dynamometru. Odczyty z barometru są używane do wyznaczenia wysokości n.p.m. podczas przejażdżki.

Uczniowie korzystają jednocześnie z trzech takich walizek, umieszczonych z przodu, z tyłu i w środku (blisko środka masy) kolejki. Zagadnienie jest rozpatrywane w dwóch przypadkach – podczas zjazdu kolejki i podczas wspinaczki na kolejny fragment toru.

Podczas jazdy, w zależności od trajektorii, uczniowie czasami mają wrażenie, że nic nie ważą, a czasami, że są znacznie ciężsi, niż normalnie. Dlatego jazda ta jest tak bardzo ekscytująca.

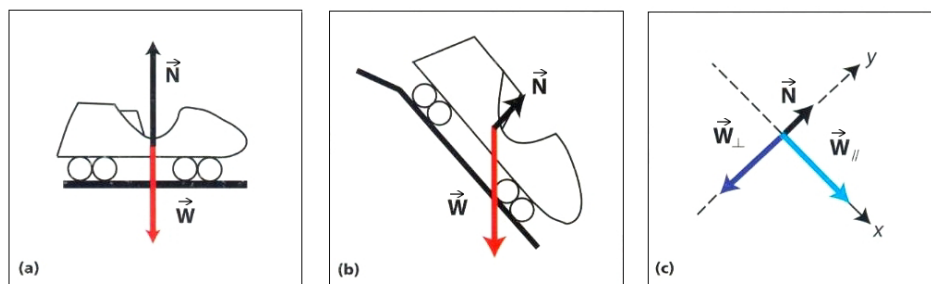
Siły działające na pasażerów

Zastanówmy się, jakie siły działają na pasażerów. Załóżmy chwilowo, że kolejka składa się tylko z jednego wagonu. Pasażer jest poddawany działaniu dwóch

² *Data Collection at the Amusement Park*, Appendix 11: „Accelerometers and Forces” at <http://www.vernier.com/cmat/datapark.html>

³ C. Escobar, *Amusement Park Physics* (AAPT, 1994).

sił (w tej dyskusji zaniebujemy siły tarcia): sile ciężkości $\vec{W} = m\vec{g}$ i sile reakcji podłoża \vec{N} , prostopadłej do toru ruchu (rys. 4 a–c).



Rys. 4. Schemat pokazujący siły reakcji podłoża \vec{N} i ciężaru \vec{W} działające na pasażera, siedzącego w wagonie poruszającym się: a) poziomo i b) w dół stoku; c) diagram sił dla przypadku (b)

Jeśli α jest kątem nachylenia stoku do powierzchni Ziemi, to wartość składowej siły ciężkości stycznej do toru wynosi $W_{\parallel} = mg \sin \alpha$. Siła ta jest odpowiedzialna za składową styczną przyspieszenia, czyli za wrażenia jazdy do przodu czy do tyłu. Przy poruszaniu się wzdłuż segmentu A (rys. 2), kąt α rośnie z czasem (tak też się dzieje z W_{\parallel}), osiągając wartość maksymalną na początku segmentu B.

Wypadkowa sił \vec{N} i \vec{W}_{\perp} jest siłą dośrodkową \vec{F}_d .

$$\vec{F}_d = \vec{N} + \vec{W}_{\perp}$$

W trakcie ruchu po fragmencie toru A siły \vec{F}_d i \vec{W}_{\perp} mają zgodne zwroty (tor ruchu jest zewnętrznym względem krzywizny), dlatego dla kierunku prostopadłego do toru (kierunek y) otrzymujemy

$$N - mg \cos \alpha = -m \frac{v^2}{r}. \quad (1)$$

Nasze urządzenie pomiarowe – akcelerometr, dostarcza informacji o wartości współrzędnej siły N , która może być albo dodatnia, albo ujemna, zgodnie z równaniem:

$$N = mg \cos \alpha - m \frac{v^2}{r} \quad (2)$$

Sytuacja jest bardziej złożona, kiedy rozpatrujemy kolejkę rzeczywistą, jako zespół wagonów połączonych ze sobą sztywno za pomocą cięgieł (łączników). Pojawia się wtedy dodatkowa siła \vec{T} pomiędzy wagonami (siła naciągu, równoległa do toru ruchu), która w każdej chwili utrzymuje wspólną szybkość i skła-

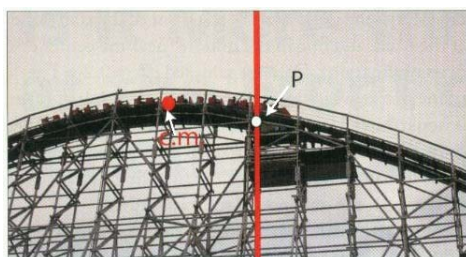
dową styczną przyspieszenia wszystkich wagonów kolejki. Wartości są takie same, jak te obliczone dla środka masy. W tym wypadku rozpatrzmy stały punkt toru. Ponieważ kolejne wagony przebywają ten punkt w różnych odstępach czasu, każdy z nich ma inną szybkość i inną składową styczną przyspieszenia, w zależności od swego położenia w stosunku do środka masy. Co więcej, w pewnej chwili wartość kąta α może być różna dla pasażerów w różnych położeniach, powodując odmienne wrażenia. Emocje, jakich doświadczają uczestnicy przejażdżki, zależą zatem i od miejsca, które zajmują w kolejce, i od położenia wagonika kolejki na torze.

Na dół...

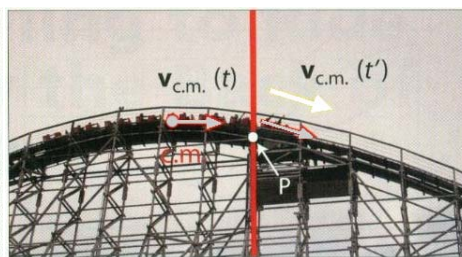
Okazuje się, że zjazd po pierwszym zboczach jest najbardziej ekscytującym fragmentem przejażdżki. Trajektorię fragmentu toru A można porównać do ruchu swobodnego spadku pocisku, wystrzelonego zadaną składową poziomą wektora prędkości, dlatego też pasażerowie doświadczają uczucia nieważkości przez pewien określony czas.

Wybermy stały punkt (punkt P na rys. 5) gdzieś w obszarze segmentu A i przeanalizujmy przejście kolejki przez ten punkt.

Pasażer siedzący dokładnie w środku masy ma tę samą prędkość, jaką ma środek masy (c.m. – *centre of mass*) układu i odczuwa stan nieważkości [$mg \cos \alpha = mv^2 / r$ w równaniu (2)]. Jednakże, dla pasażerów jadących albo z przodu, albo z tyłu kolejki, sytuacja ulega niewielkiej zmianie. W chwili uchwyconej na rys. 5 c.m. jest zlokalizowany w miejscu, gdzie tor jest prawie poziomy, składowa styczna przyspieszenia wynosi prawie zero dla wszystkich wagonów.

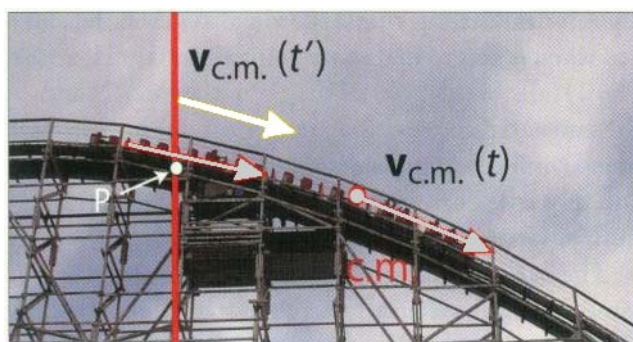


Rys. 5. Kolejka na pierwszym ze stoków rollercoastera; punkt c.m. oznacza położenie środka masy kolejki



Rys. 6. Przedni wagon w punkcie P. Szare strzałki (o równych długościach) oznaczają, że szybkość pierwszego wagonu, gdy ten osiąga zaznaczony punkt P (w czasie t) jest taka sama, jak szybkość środka masy, w chwili, gdy znajduje się on w najwyżej położonym punkcie toru. Biała strzałka pokazuje większą szybkość środka masy, którą osiąga on w punkcie P w czasie $t' > t$

Pierwszy wagon osiąga punkt P w segmencie A w chwili t z szybkością *mniejszą* niż ta, którą posiada środek masy w chwilę później (t'), gdy osiąga ten sam punkt (rys. 6). Z drugiej strony, ostatni wagon przebywa punkt P z szybkością *większą*, niż ta, którą posiada środek masy na chwilę wcześniej, zanim minie ten sam punkt (rys. 7).



Rys. 7. Tylni wagon w punkcie P. Szare strzałki (o równych długościach) oznaczają, że szybkość tylniego wagonu, gdy ten osiąga zaznaczony punkt P (w czasie t) jest taka sama, jak szybkość środka masy w chwili, gdy ten znajduje się niżej na torze zjazdowym. Biała strzałka pokazuje, że środek masy miał mniejszą szybkość przejeżdżając przez punkt P na chwilę wcześniej t'

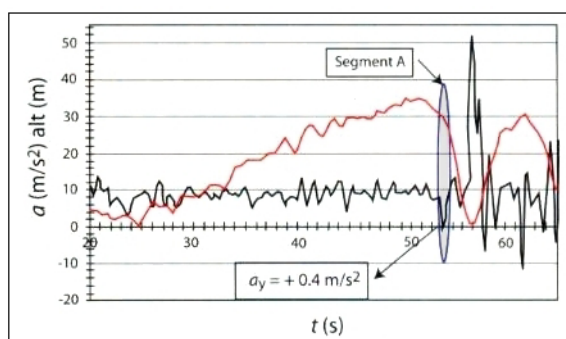
Ponieważ pierwszy wagon przebywa zaznaczone miejsca z szybkością mniejszą niż szybkość środka masy w tych samych miejscach, siła normalna działająca na pasażera znajdującego się w tym wagonie (z przodu) jest większa, niż w sytuacji, gdyby znajdował się bliżej środka masy. Każdy kolejny wagon przebywa punkt P z szybkością większą niż ten poprzedni. Z równania (2) jasno wynika, że jeżeli v wzrasta, to siła reakcji podłoża \vec{N} maleje. Ponieważ ruch środka masy po krzywiźnie A może być rozpatrywany jako spadek swobodny, wartość współrzędnej siły N w wagonie zlokalizowanym w środku masy wynosi zero, a pasażer siedzący tam odczuwa stan nieważkości. W miejscu pierwszego wagonu wartość współrzędnej siły $N > 0$ i dlatego też pasażer siedzący tam odczuwa mniej „porywających” doznań związanych z nieważkością. Ale w wagonie na końcu kolejki (tym, który ma największą szybkość w punkcie P) $N < 0$ i pasażer tam siedzący faktycznie odczuwa, jakby krzesło, na którym siedzi, próbowało odłączyć się od jego ciała. Pasażer jest przytrzymywany w krześle za pomocą pasów i specjalnej belki bezpieczeństwa.

Dane przedstawione na rys. 8 zgadzają się z naszymi przewidywaniami – wykres przedstawia zależność współrzędnej składowej pionowej (prostopadłej do toru ruchu) przyspieszenia (siła normalna na jednostkę masy) i wysokości od czasu, dla wagonów położonych najbliżej środka masy.

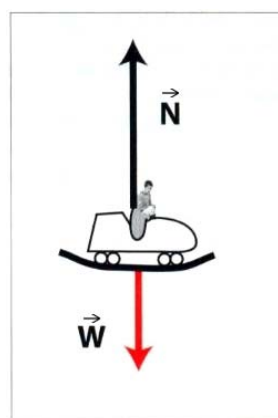
Tak jak przypuszczano, wartość współrzędnej przyspieszenia spada prawie do zera w segmencie A, (powodując wrażenie niemal stanu nieważkości).

Z odpowiednich wykresów dla składowej poziomej przyspieszenia wagonów znajdujących się z przodu i z tyłu kolejki, które mają różne szybkości w chwili przejazdu przez punkt P, wynika, że wartości ich wartości wynoszą odpowiednio $+1,9 \text{ m/s}^2$ i $-3,7 \text{ m/s}^2$.

Po krótkim prostoliniowym segmencie B, kolejka wchodzi w obszar toru po wewnętrznej stronie krzywizny (segment C), osiągając m.in. najniższy położony punkt podczas całej przejażdżki. Środek masy w tym punkcie nabiera maksymalnej szybkości, wynoszącej ok. 25 m/s . Siły działające na pasażera znajdującego się w tym położeniu wagonika przedstawione są na rys. 9.



Rys.8. W pobliżu środka masy kolejki: wartość współrzędnej poziomej składowej przyspieszenia (czarna linia) i wysokość (czerwona linia) względem czasu. Elipsa wskazuje położenie segmentu A (część paraboliczna) toru ruchu



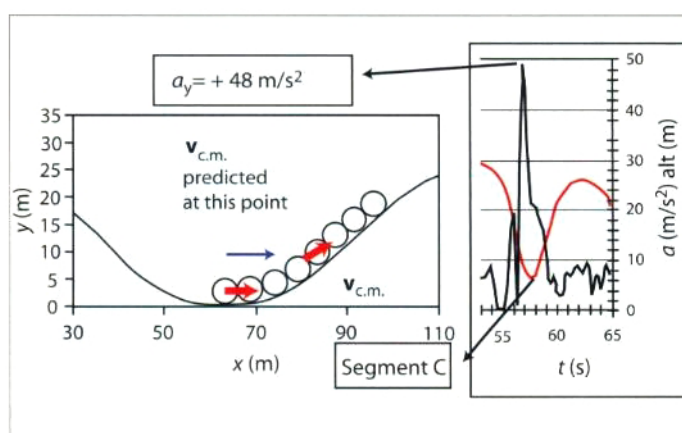
Rys.9. Schemat sił działających na pasażera znajdującego się w najniższym punkcie stoku: ciężar \vec{W} i siła reakcji podłoża \vec{N}

Dla każdego z wagonów wzdłuż łuku, wypadkową siły reakcji podłoża \vec{N} i siły ciężkości \vec{W} jest nadal siła dośrodkowa \vec{F}_d , która zakrzywia tor ruchu. Siły \vec{W} i \vec{F}_d mają jednak teraz przeciwne zwroty. (Tak jest w inercjalnym układzie odniesienia. Jeżeli popatrzymy na ten przypadek z perspektywy nieinercjalnego układu odniesienia pasażera, to działa na niego siła odśrodkowa, której zwrot jest zgodny ze zwrotem siły \vec{W} – co powoduje wrażenie zwiększenia własnego ciężaru.)

To odczucie ponownie zależy od lokalizacji pasażera w stosunku do położenia środka masy. Pierwszy wagon osiąga najniższy położony punkt toru z szybkością mniejszą niż ta, którą ma środek masy, zaś wagon ostatni także porusza się wolniej w tym miejscu, w porównaniu do środka masy, ponieważ wcześniejsze wagony poruszają się teraz do góry, zmniejszając swoją szybkość. Dlatego

też siła normalna działająca na jednostkę masy, powinna w pobliżu środka masy być większa, niż z przodu i z tyłu kolejki.

Zebrane dane potwierdzają nasze przypuszczenia. Wartości składowej pionowej przyspieszenia zmierzone z tyłu kolejki, gdy osiąga najniższy punkt stołu przedstawione są na rys. 10. Maksyma na wykresach przedstawiających zachowanie się współrzędnej składowej pionowej przyspieszenia w pobliżu środka masy i z przodu kolejki, osiągają odpowiednio wartości odpowiednio: $+52 \text{ m/s}^2$ i $+45 \text{ m/s}^2$.



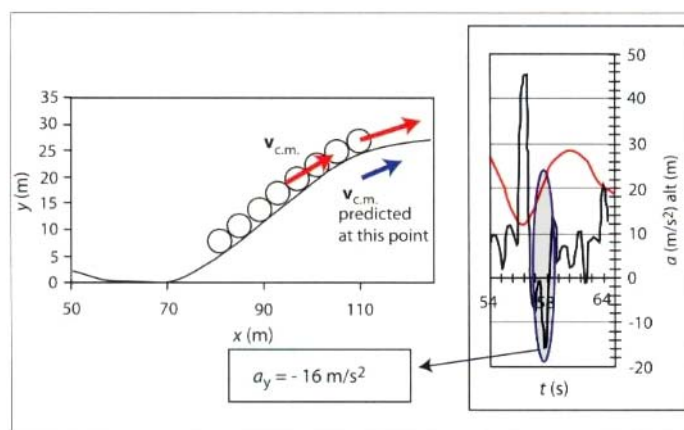
Rys. 10. Wykres po prawej stronie przedstawia zmiany przyspieszenia (czarna linia) i wysokości (czerwona linia) w czasie, dla wagonu znajdującego się z tyłu kolejki. Wartość składowej poziomej przyspieszenia na dole stołu wynosi $+48 \text{ m/s}^2$. Na schemacie po lewej stronie, równe długości grubych strzałek wskazują, że w tej samej chwili czasu, prędkość środka masy (c.m.) jest taka sama jak prędkość ostatniego wagonu. Cienka strzałka pokazuje, że środek masy miał większą prędkość, gdy znajdował się u podnóża stołu

Do góry...

Trajektoria drugiego wzniesienia zbudowana jest z wypukłego łuku na szczycie, po którym następuje odcinek prostoliniowy. Podczas wspinania się, przód kolejki osiąga punkt blisko szczytu toru z szybkością większą niż ta, którą ma środek masy, osiągający ten sam punkt toru w chwilę później (rys. 11). Z przodu kolejki siła \vec{N} i składowa styczna przyspieszenia są tak duże, że pasażer ma wrażenie bycia wyrzucanym do góry i do przodu. Dlatego też oczekiwana jest duża bezwzględna wartość ujemnej współrzędnej siły normalnej, działającej na jednostkę masy.

Z drugiej strony, tył kolejki przebywa ten sam punkt z szybkością mniejszą, niż środek masy znajdując się w tym miejscu (środek masy zwalnia, gdy kolejka zaczyna poruszać się ku górze). Siła reakcji podłoża \vec{N} i składowa styczna przyspieszenia, doświadczane przez pasażerów są dużo mniejsze i dlatego

oczekuje się, że wartość współrzędnej siły normalnej działającej na jednostkę masy będzie mieć znak dodatni.



Rys. 11. Wykres po prawej stronie przedstawia zależność przyspieszenia (czarna linia) i wysokości (czerwona linia) od czasu dla wagonu znajdującego się z przodu kolejki. Obszar tuż przed szczytem toru jest zaznaczony elipsą. Na schemacie po lewej stronie, równe długości czerwonych strzałek wskazują, że w tej samej chwili czasu, szybkość środka masy (c.m.) jest taka sama jak szybkość pierwszego wagonu. Niebieska strzałka poniżej krzywej ilustruje, że środek masy będzie miał mniejszą szybkość, gdy znajdzie się w tym samym miejscu

Wykres prezentowany na rys. 11 podaje dane doświadczalne, zmierzone z przodu i z tyłu kolejki. Widzimy na nim duże ujemne wartości, gdy wagon zbliża się do szczytu toru ruchu.

Wykresy przedstawiają zachowanie się składowej normalnej przyspieszenia wagonów umieszczonych blisko środka masy i z tyłu kolejki, a wartości są równe odpowiednio: -7 m/s^2 i $+9 \text{ m/s}^2$.

Wniosek

W tabeli zostały podsumowane wartości pionowej składowej przyspieszenia, zmierzone przez uczniów dla wagonów umieszczonych z przodu, w pobliżu środka masy i z tyłu kolejki, dla różnych lokalizacji roller coastera na torze.

Pionowa składowa przyspieszenia [m/s^2]			
	Przód kolejki	Środek masy (c.m.)	Tył kolejki
Zjazd z pierwszego stoku	1,9	0,4	-3,7
Pozycja najniższa	45	52	48
Wyjazd na drugi stok	-16	-7	9

Z analiz tych wynika, że istnieje więcej niż jedna odpowiedź na zadane początkowo pytanie. Prawdą jest, że pasażer siedzący w wagonie z tyłu kolejki, przeżywa bardziej intensywne wrażenia przez sporą część przejażdżki, ale na pewnych odcinkach, w szczególności podczas podjazdów w górę, pasażer siedzący w pierwszym wagonie odczuwa silniejsze emocje (tam, gdzie odczyt przyspieszenia dośrodkowego wskazuje wartości ujemne).

Zadanie, które omówiliśmy, jest bardzo dobrym przykładem, jak zjawiska w świecie fizyki mogą być wyjaśnione przez połączenie wymagań zajęć w szkole z zabawnymi sytuacjami, jakich można doświadczać w parku rozrywki⁴. Jest to świetny przykład na potwierdzenie tezy, że można doskonale uczyć się bawiąc i bawić się ucząc.

O autorach

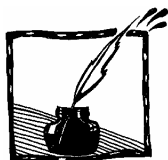
Giovanni Pezzi i **Alessandro Foschi** są nauczycielami fizyki we włoskich szkołach średnich i pierwszymi autorami projektu „Fizyka, Klasa bez ścian”.

Fabio Ortolani, profesor na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Bolońskiego, od początku brał udział w projekcie.

Stefano Alberghi jest absolwentem fizyki, członkiem zespołu zajmującego się projektem oraz badaczem w regionalnym ośrodku meteorologicznym.

Tłum. Katarzyna Dziedzic-Kocurek (Instytut Fizyki UJ) za zgodą Redakcji *The Physics Teacher* i autorów.

⁴ N.A. Unterman, *Amusement Park Physics, A Teacher's Guide*, 2nd ed. (J. Weston Walch, Portland, ME, 2001).



Duchy pustyni

Dagmara Sokołowska

Beduini nazywają go „duchem pustyni”, Marco Polo słysząc go podczas podróży do Chin, przypisał jego obecność siłom nieczystym, Charles Darwin doświadczył go podczas swego pobytu w Chile. Na świecie jest około stu miejsc, w których od czasu do czasu można usłyszeć śpiew pustyni – przerażający pomruk tak głośny, jak dźwięk Jumbo Jeta przelatującego tuż nad naszymi głowami.

Koncert wydm¹ trwa zazwyczaj kilkanaście minut. Dźwięk, jaki wydają, jest niezemski, o natężeniu 110 decybeli (dB) (próg bólu dla człowieka wynosi zaledwie 120 dB). Wydaje się, że pochodzi on z niewiadomego kierunku, ze względu na swą niską częstotliwość i długość fali dźwiękowej ok. 3 m (człowiek jest w stanie rozpoznawać kierunek jedynie dla fal o długościach mniejszych niż odległość pomiędzy parą uszu, czyli ok. 30 cm).

Badacze od wielu lat zastanawiali się nad naturą i źródłem tej swoistej muzyki. Wiadomo było, że zjawisko to jest sezonowe oraz że występuje jedynie w wybranych obszarach pustynnych. Najbardziej wyraźne pomruki następowały zawsze po wietrznym dniu, a z kolei wilgoć zupełnie uniemożliwiała wysłuchanie koncertu. W ciągu ostatnich trzech lat dwie grupy badawcze z Francji (B. Andreottiego i S. Douady’ego) oraz grupa ze Stanów Zjednoczonych przeprowadziły serie testów na pustyniach oraz w laboratoriach, dochodząc do wspólnych wniosków, że za dźwięk ten odpowiedzialne są samosynchronizujące się lawiny piasku, które zamieniają wydnię w instrument muzyczny. To nie wiatr, lecz grawitacja jest inicjatorem koncertu! Naukowcy ustalili ponadto, że w śpiewających wydmach występują warstwy piasku o posortowanych, ściśle określonych wielkościach ziaren: grubsze na wierzchu, drobniejsze na spodzie. To właśnie przesuwanie się warstw ziaren



Wydma na pustyni w Maroku
(<http://pl.wikipedia.org>)

¹ http://www.lps.ens.fr/~douady/SongofDunes/ArticleJduC/CD_SongOfDunes.html

generuje falę mechaniczną, pod wpływem której powierzchnia wydmy zaczyna drgać jak membrana głośnika, generując pomruk. Każda wydma ma swoją charakterystyczną częstotliwość zależną od średniego rozmiaru ziaren: im większe ziarna, tym niższy dźwięk generowany przez wydme.

Nie każda wydma może wytwarzać dźwięk. Ważne jest, aby ziarenka piasku były małe i okrągłe, a szybkość przesuwania się warstw niezbyt duża (ale też nie za mała). Francuz Douady zauważył także, że najpiękniejsze dźwięki udało mu się usłyszeć na pustyniach w miejscach zlokalizowanych w pobliżu morza, a piasek z nich sprowadzony do laboratorium przestawał śpiewać po około miesiącu eksperymentów. Okazało się jednak, że po wykapaniu go w słonej wodzie odzyskiwał swoje wirtuozerskie właściwości. Dlaczego? Do tej pory nie wiadomo.

Wydaje się, że śpiewające wydmy kryją w sobie jeszcze wiele tajemnic.



Wydmy w Libii (fot. Luca Galuzzi – www.galuzzi.it)

Pierwotnie artykuł ten ukazał się na blogu *Tygodnika Powszechnego*
<http://swiat-jaktodziala.blog.onet.pl/2,ID341901661,index.html>



Odgłosy z jaskini (10) Kamień, ptak i drzewo

Adam Smólski

Już małe dziecko zauważa, że jak stoi w wannie, to „ma krótsze nogi”, a spacerując nad Morskim Okiem słyszy od rodziców, że jezioro jest przy brzegu znacznie głębsze, niż się wydaje. Ten efekt omawia się także w szkole, wśród konsekwencji załamania światła. W Lwiątku 2003 był to temat zadania 6 dla I klasy liceum:

Obserwator patrzy pionowo w dół na gładką powierzchnię wody o głębokości 1 m. Ile jest równa pozorna głębokość wody?

- A. 1 m.
- B. Więcej niż 1 m.
- C. Mniej niż 1 m.
- D. To zależy, z jakiej odległości patrzy obserwator.
- E. Przy głębokości 1 m nie widać dna.

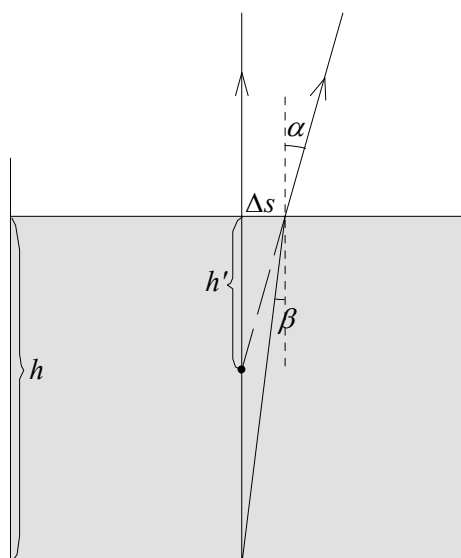
a w tym roku podsunęliśmy podobny problem gimnazjalistom:

W tafli jeziora odbija się przelatujący ptak, widać także leżący na dnie kamień. Pozorna głębokość, na jakiej widać 1) odbicie ptaka, 2) kamień, jest w stosunku do rzeczywistej odległości tych obiektów od lustra wody

- A. 1) i 2) większa,
- B. 1) i 2) mniejsza,
- C. 1) mniejsza, 2) taka sama,
- D. 1) taka sama, 2) mniejsza,
- E. 1) i 2) taka sama.

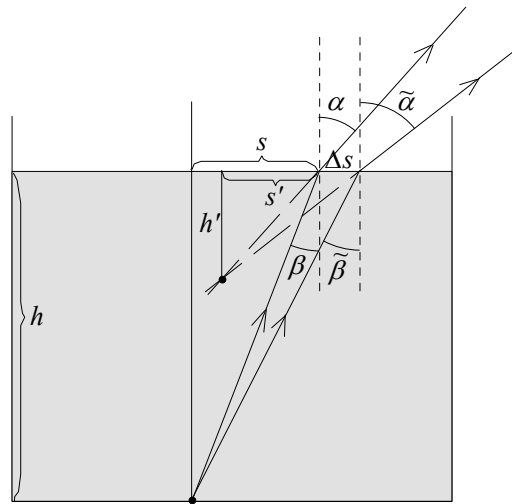
Poprawne odpowiedzi w powyższych zadaniach to C w pierwszym i D w drugim.

Obliczenie pozornej głębokości jest łatwe, gdy patrzymy pionowo w dół:



Przy oznaczeniach z rysunku $\frac{h'}{h} = \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{\sin\beta}{\sin\alpha} \cdot \frac{\cos\alpha}{\cos\beta} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\cos\alpha}{\cos\beta}$ i przy $\Delta s \rightarrow 0$ wartość ta dąży do $\frac{1}{n}$, gdzie n jest współczynnikiem załamania wody (powyższy rysunek nie zachowuje proporcji poprawnych dla wody, gdy $n = 4/3$).

A gdy patrzymy pod kątem? Czy pozorna głębokość nie zależy od kąta, pod którym patrzymy? Czy nie ma przesunięcia obrazu także w kierunku poziomym? Warto zbadać to dokładniej.

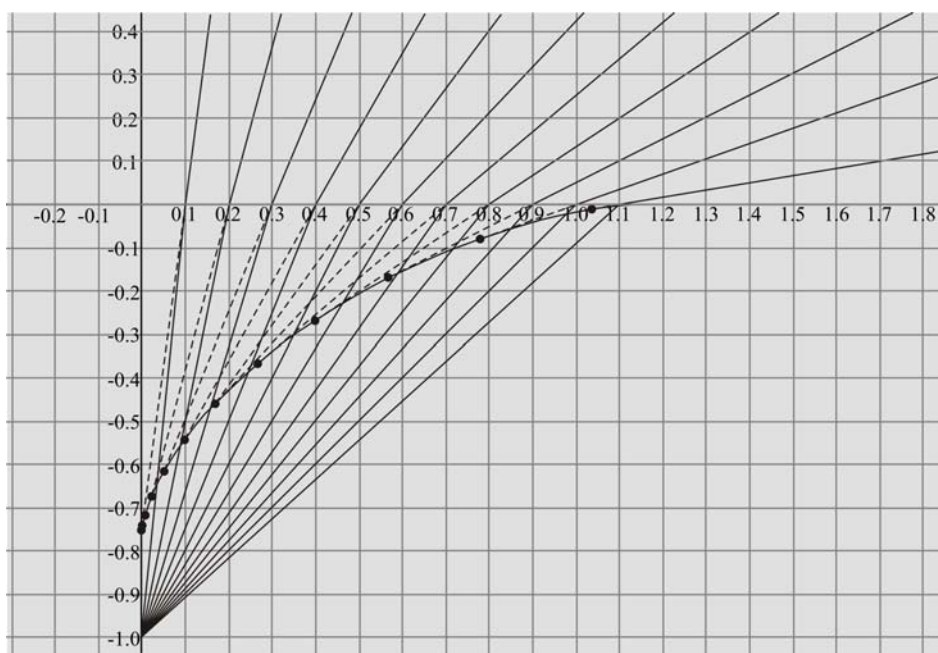


Przyjmijmy oznaczenia jak na rysunku. Kąty α, β są funkcjami parametru s . Jak poprzednio, obraz powstaje na przecięciu przedłużeń promieni wpadających do oka. Ponieważ $\frac{s'}{h'} = \operatorname{tg}\alpha$, $\frac{s'+\Delta s}{h'} = \operatorname{tg}\tilde{\alpha}$, więc $\Delta s = h'(\operatorname{tg}\tilde{\alpha} - \operatorname{tg}\alpha)$. W granicy gdy $\Delta s \rightarrow 0$ otrzymujemy $\frac{1}{h'} = \frac{d}{ds} \operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{\cos^2\alpha} \frac{d\alpha}{ds}$. Analogiczny rachunek prowadzi do $\frac{1}{h} = \frac{1}{\cos^2\beta} \frac{d\beta}{ds}$. Po podzieleniu stronami $\frac{h'}{h} = \frac{\cos^2\alpha}{\cos^2\beta} \cdot \frac{d\beta}{d\alpha}$. Ponieważ $\sin\alpha = n \sin\beta$, więc (różniczkujemy obie strony po α)

$$\cos\alpha = n \cos\beta \cdot \frac{d\beta}{d\alpha}. \text{ Stąd } \frac{d\beta}{d\alpha} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\cos\alpha}{\cos\beta}.$$

$$\text{Ostatecznie } \frac{h'}{h} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\cos^3\alpha}{\cos^3\beta}, \text{ zaś } \frac{s'}{s} = \frac{h' \operatorname{tg}\alpha}{h \operatorname{tg}\beta} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\cos^2\alpha \sin\alpha}{\cos^2\beta \sin\beta} = \frac{\cos^2\alpha}{\cos^2\beta}.$$

Rysunek w programie Winplot pokazuje linię (tzw. kaustykę), wzdłuż której układają się obrazy pozorne kamienia, gdy patrzymy pod coraz większym kątem. Przedłużenia promieni są styczne do tej linii. Dlaczego? Ponieważ położenie obrazu pozornego otrzymaliśmy jako granicę punktu przecięcia „bliskich” przedłużeń, gdy ich „odległość” Δs dążyła do zera. Zatem dla bliskich przedłużeń obraz „ślizga się” po każdym z nich.



Gdy patrzymy pod coraz większym kątem, kamień wydaje się coraz bliżej – nas i powierzchni wody. Proponujemy podpatrzyć ten efekt podczas wizyt nad wodą.

Jeśli komuś z Państwa przedstawiony problem wydał się matematycznie trudny, to biada mu – nie zdałby matury z fizyki. Niemal identyczny problem pojawił się w arkuszu przygotowanym przez OKE w Poznaniu na próbną maturę w marcu 2008. Oto zadanie 2 z tego arkusza:

Zadanie 2. Cień drzewa. (7 punktów)

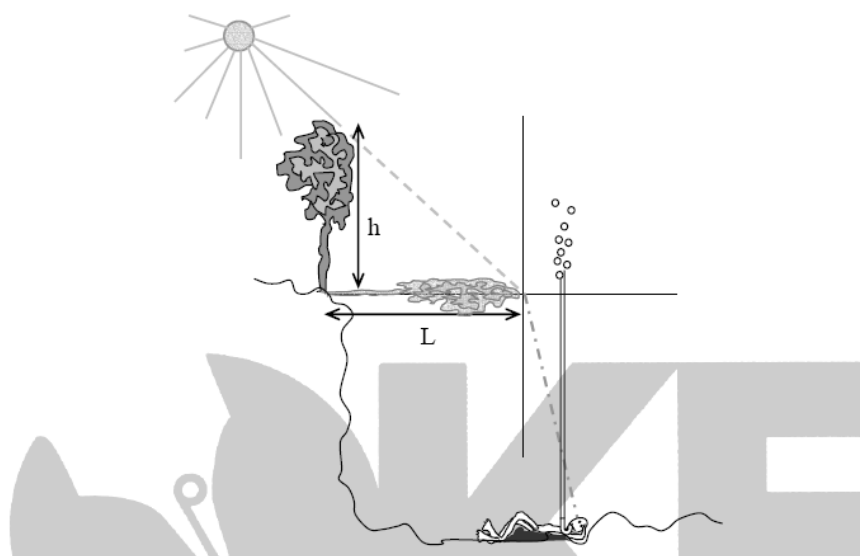
Nad brzegiem jeziora rośnie drzewo o wysokości $h = 10$ m, które rzuca na taflę jeziora cień o długości $L = 12$ m. Na dnie jeziora leży nurek i spogląda na to drzewo poprzez wodę jeziora. Nurek obserwuje promienie słoneczne padające tuż nad koroną drzewa (patrz rysunek 2.1).

2.1 (3 punkty)

Wyznacz stosując odpowiednie prawo, kąt, jaki tworzą z pionem promienie słoneczne padające do oczu nurka (podaj wartość dowolnie wybranej funkcji trygonometrycznej tego kąta). Przyjmij, że współczynnik załamania światła dla wody wynosi $n_w = 1,33$ a dla powietrza $n_p = 1$.

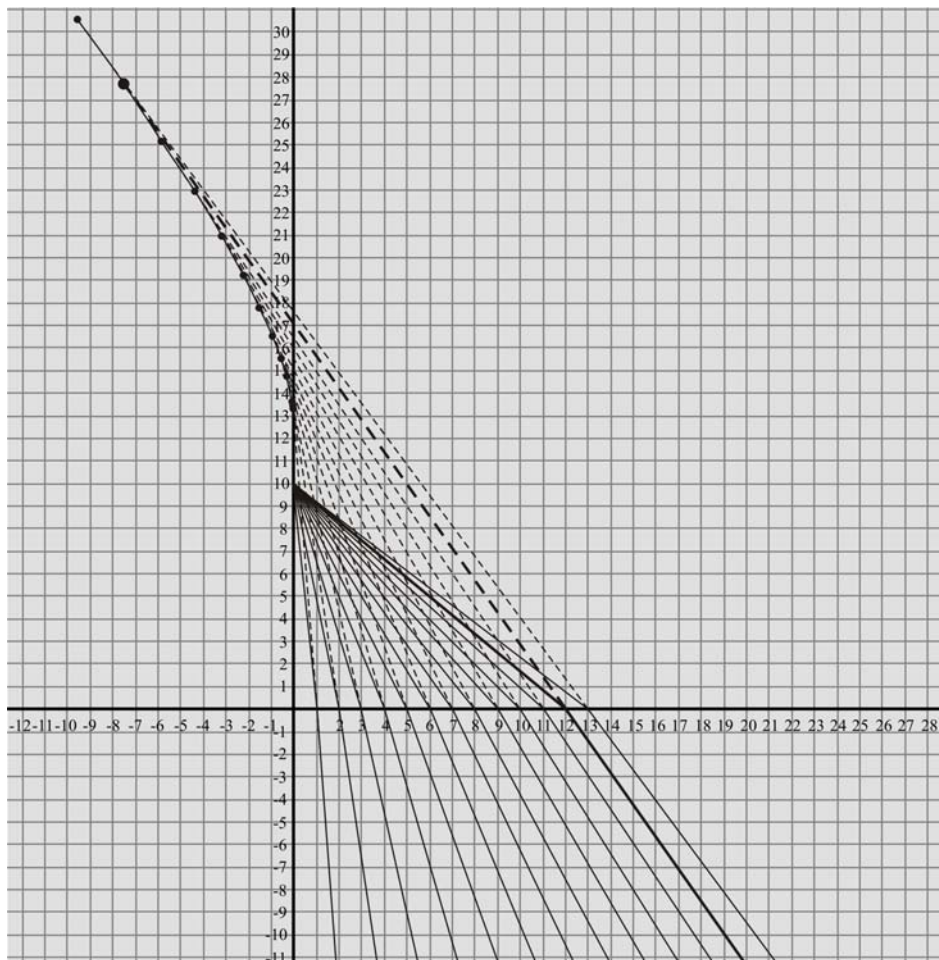
2.2 (2 punkty)

Przedstaw na rysunku 2. konstrukcję ilustrującą powstawanie obrazu drzewa widzianego przez nurka. Określ cechy tego obrazu.

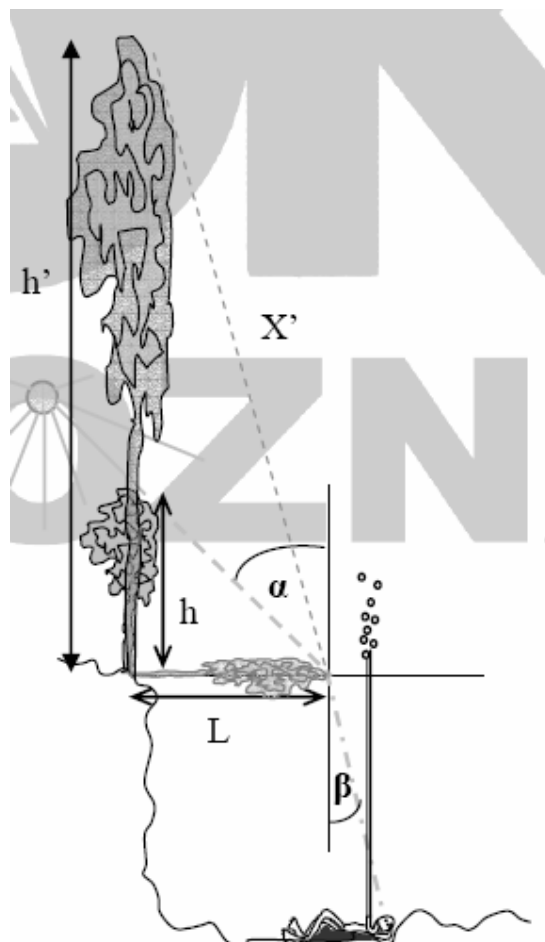
**2.3 (3 punkty)**

Oblicz, jak wysokie może wydawać się nurkowi rosnące drzewo. Współczynnik załamania światła dla wody wynosi $n_w = 1,33$ (dla powietrza przyjmij $n_p = 1$).

Z poleceniem 2.1 nie mieliśmy trudności. Za to 2.2 i 2.3 wydają się całkiem całkiem... Oto wynik analizy podobnej do tej przeprowadzonej wyżej dla kamienia:



Położeniu nurka odpowiadają promienie pogrubione, a pogrubiony punkt jest obrazem czubka drzewa, tak jak go widzi nurek. Niech ten rysunek będzie naszą odpowiedzią na pytanie 2.2. Odpowiedź na pytanie 2.3 brzmi ok. 27,8 m. Sporo. A jak odpowiada na te pytania OKE w Poznaniu? Całkiem zabawnie. To jest „konstrukcja”:



a to wysokość obrazu drzewa h' : 17 m.
Fizyka to trudny przedmiot.

Na zakończenie informacja dla Czytelników: jaskinia, z której odgłosy tu prezentujemy, wyprowadza się z podziemi szkoły na Bednarskiej i będzie miała od tej pory charakter wędrowny. Wiąże się to z zaprzestaniem pracy nauczycielskiej przez jej głównego lokatora. Cały trud organizacji Polsko-Ukraińskiego Konkursu Fizycznego „Lwiątko” przejmuje V Liceum Ogólnokształcące im. A. Witkowskiego w Krakowie. Natomiast wspomniany lokator nadal ma zamiar przykładać się do tworzenia konkursowych zestawów zadań i opowiadania o nich w *Fotonie*. Zatem do usłyszenia w następnym odcinku!



KĄCIK ZADAŃ

Jazda i lot pod wiatr

Zofia Gołąb-Meyer

Naukę fizyki często rozpoczyna się od kinematyki. Standardowym zadaniem jest problem motorówki płynącej pod prąd i z prądem rzeki. Podobne zadanie formuluje się dla samolotu lecącego z wiatrem i pod wiatr. Przykładowe zadanie brzmi:

Samolot w nieruchomym powietrzu przy maksymalnej mocy silnika rozwija szybkość u . Lecąc pod wiatr z silnikiem o tej samej mocy rozwija tylko szybkość v . Jaka jest szybkość wiatru w ? Jaką szybkość rozwinąłby samolot lecący z wiatrem?

Bez żadnych dywagacji znajduje się oczywistą odpowiedź, iż szybkość wiatru to

$$w = u - v,$$

zaś szybkość samolotu z wiatrem to

$$v = u + w.$$

Rozwiązanie nie jest jednak tak całkiem oczywiste. Problem wykracza poza kinematykę. Widać to jasno, gdy go sformułujemy dla samochodu jadącego pod wiatr i z wiatrem. Oczywiście należy zrobić wyraźne założenie o sile oporów, np. uwzględnić tylko opór powietrza. Niech zadanie brzmi (zadanie F309 z *Deltą* 6/1991; przedruk *Foton* 12/1992, rozwiązanie: L. Motyka, *Foton* 17/1993):

Maksymalna prędkość pojazdu przy bezwietrznej pogodzie wynosi $u = 100$ km/h. Jadąc pod wiatr kierowca nie mógł rozwinąć większej prędkości niż $v = 90$ km/h. Oszacować prędkość wiatru w . Opory toczenia należy pominąć.

Punktem wyjścia rozwiązania jest porównanie mocy silnika w przypadku ruchu w nieruchomym powietrzu i w ruchu pod wiatr. Praca silnika przy ruchu jednostajnym jest zużywana na pokonanie siły oporu powietrza F . Zakładamy, że $F = C_x(v + w)^2$, ponieważ $v + w$ to właśnie względna szybkość samochodu względem powietrza (C_x jest współczynnikiem proporcjonalności zależnym od kształtu samochodu).

$$\text{Moc silnika } P = F \cdot v, \text{ zatem } P = C_x v (v + w)^2.$$

$$\text{W przypadku ruchu w bezwietrznym powietrzu } P = C_x \cdot u^2 \cdot u = C_x u^3.$$

Przyrównanie mocy w obu przypadkach daje $C_x v (v + w)^2 = C_x u^3$, czyli równanie kwadratowe na prędkość wiatru w .

Rozwiązanie to: $w = u \sqrt{\frac{u}{v}} - v$. Przy danych $u = 100$ km/h i $v = 90$ km/h dostajemy $w = 15,4$ km/h. Wynik trochę zaskakujący.

W przypadku samolotu moc w bezwietrznym powietrzu to też $P = C_x' u^3$. W ruchu pod wiatr $F = C_x' (v + w)^2$, tak jak dla samochodu, lecz w tym przypadku przy liczeniu mocy trzeba wziąć pod uwagę prędkość samolotu względem powietrza, czyli też $v + w$. Zatem mamy $C_x' u^3 = C_x' (v + w)^3$, co jest spełnione gdy $w = u - v$.

Skąd zatem różnica w tych obu, wydawałoby się analogicznych, przypadkach? Pochodzi ona z obecności trzeciego ciała: Ziemi.



CO CZYTAĆ

Vademecum Maturzysty. Fizyka i astronomia

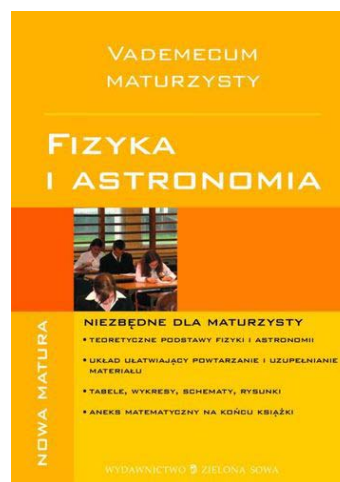
Katarzyna Cieślak, Witold Zawadzki
Wydawnictwo Zielona Sowa, Kraków 2008

Vademecum maturzysty. Fizyka i astronomia zostało przygotowane jako pomoc dla uczniów zdających maturę z fizyki, ale przydatne może okazać się każdemu uczniowi (a nawet studentowi), chcącemu uporządkować swoje wiadomości z fizyki na poziomie szkoły ponadgimnazjalnej.

W książce znajdują się pogrupowane tematycznie (wprowadzane przez kolejne lata nauki w liceum) zagadnienia wymagane na maturze z fizyki. Uczeń znajdzie więc zebrane najważniejsze pojęcia i zagadnienia z fizyki i astronomii – od podstawowych zagadnień z kinematyki i dynamiki, poprzez termodynamikę i elektrodynamikę, aż po budowę i ewolucję wszechświata. W *vademecum* omówiono także narzędzia współczesnej fizyki. Na końcu książki znajduje się aneks matematyczny stanowiący przypomnienie podstawowych wiadomości z matematyki (m.in. wektory, trygonometria) niezbędnych przy rozwiązywaniu zadań z fizyki. Aneks zawiera również tabele podstawowych stałych fizycznych, przedrostków, jednostek SI.

Książka została napisana w przystępny sposób, ułatwiający powtarzanie i uzupełnianie materiału. Poszczególne tematy zostały wyszczególnione w osobnych rozdziałach i podrozdziałach, opatrzone rysunkami, schematami i tabelami. *Vademecum* ma charakter praktycznego poradnika, tak więc prócz teorii znajdują się w nim także, sprawiające uczniom chyba najwięcej trudności, zadania rozwiązane krok po kroku.

Autorzy mają nadzieję, że *vademecum* to pomoże maturzystom uzyskać świetne wyniki na egzaminie dojrzałości.



Uczniów i nauczycieli zachęcamy do lektury *Delty*, gdzie znajdziecie Państwo między innymi zadania z Olimpiady Fizycznej I stopnia. Polecamy też zadania z „Klubu 44” redagowane przez Jerzego Brojana, jak i te z kotkiem redagowane przez Ewę Czuchry.

Sz szczególnie polecamy domowe eksperymenty fizyczne redagowane przez Stanisława Bednarka. W *Delcie* Nr 7 (2008) znajdziecie propozycję budowy silników elektrycznych, a w Nr 8 zamieszczono propozycję pomiaru współczynnika lepkości cieczy.





Nauczanie fizyki przez opowiadania z historii fizyki

Zofia Gołąb-Meyer

W dniach 14–18 lipca 2008 odbyła się w Monachium druga międzynarodowa konferencja poświęcona nauczaniu historii fizyki przez opowiadania (*Second International Conference on Stories In Science Teaching. Stories from History of Science: Knowledge Translation for the Science Classroom*).

Konferencja zorganizowana przez fizyków z Kanady (Stephen Klassen, John Murray) oraz Jurgena Teichmanna z Monachium zgromadziła 25 osób zajmujących się nauczaniem historii fizyki w szkołach. Temat konferencji może brzmieć niepoważnie, ale w istocie dotyka ważnej kwestii filozofii nauczania. Nauczanie fizyki z powodu ogromnych napięć spowodowanych sprzecznymi wymaganiami (szybko, dużo, użytecznie, przyjemnie, wszędzie łatwo, jednako wszędzie) zostało zdegenerowane. Fizyka zaczęła się jawić uczniom jako zbiór abstrakcyjnych reguł, zupełnie niezrozumiałych i być może tylko użytecznych inżynierom. Fizyka została zdehumanizowana. Od dawna wiadomo, że odpowiednio przekazywana historia fizyki wnosi element ludzki. Nie jest całkiem oczywiste, w jakich przypadkach przyczynia się do lepszego zrozumienia trudnych pojęć fizycznych. Piagetowska paralela między rozwojem myśli ludzkiej a rozwojem osobniczym może być jedynie wskazówką sugerującą, kiedy posługiwać się historią w nauczaniu. Dzisiejsze dzieci żyją bowiem w zupełnie innym świecie niż poprzednie pokolenia.

Uczestnicy konferencji monachijskiej zastanawiali się nad rolą narracji i opowiadań. To najstarsza i wypróbowana metoda w nauczaniu. Okazuje się, że stosowna w wielu przypadkach w nauczaniu historii fizyki, a nawet samej fizyki. Oczywiście trzeba brać pod uwagę fakt, że nowe pokolenie przyzwyczajone do telefonów komórkowych i Internetu, jest wychowywane na innym sposobie narracji niż starsze pokolenia.

O czym dokładnie mówiono na konferencji można się dowiedzieć ze strony internetowej www.sci-ed.org. Naszym czytelnikom niezmiennie przypominam, że *Historia fizyki* Andrzeja Kajetana Wróblewskiego jest napisana jakby na zamówienie tej ostatnio propagowanej metody nauczania poprzez opowiadanie.

Doskonałym materiałem do budowania opowiadań są tegoż autora *Anegdoty o uczonych* publikowane w *Wiedzy i Życie* oraz w książkach: *Prawda i mity w fizyce*, Ossolineum, 1982; *Uczni w anegdocie. Początek drogi*, Prószyński i S-ka, 2004; *Uczni w anegdocie*, Prószyński i S-ka.

Nie muszę komentować faktu, że takie nauczanie wymaga większej ilości czasu oraz dokonania cięć w programie nauczania. W krajach z centralnym programem nauczania nie byłaby możliwa sytuacja jednego z uczestników kon-

ferencji, nauczyciela fizyki w prywatnej (bardzo drogiej) szkole w Stanach Zjednoczonych. Przekonał on dyrekcję szkoły oraz rodziców uczniów, że warto skrócić trening przygotowujący do narodowych testów z fizyki na rzecz głębszej, porządnej nauki, aczkolwiek niegwarantującej przerobienia „całego” materiału. Dla mnie osobiście nieco szokujące było stwierdzenie prelegenta, iż pojęciu energii w fizyce nie poświęca osobnych lekcji, tylko je omawia *en passant*, w kontekstach rozmaitych sytuacji fizycznych. Aż trudno sobie wyobrazić, że to ważne pojęcie będzie odpowiednio zrozumiane. Z drugiej strony uderzyła mnie dojrzałość odpowiedzi uczniów na pytania ukazujące rozumienie istoty fizyki i stosowności jej jako narzędzia opisu rzeczywistości.

Może to jest jakaś propozycja wyjścia z impasu spowodowanego przeładowaniem materiału i niemożnością nauczenia wszystkich wszystkiego. Do tego potrzebna jest odwaga by zaufać nauczycielom, a od nauczycieli wymagać znacznie większych kompetencji niż do prostego treningu uczniów.

Konferencja zorganizowana została na terenie *Deutsches Museum*¹. Znajduje się tam komfortowy acz skromny ośrodek konferencyjno-hotelowy, w którym odbywają się regularne szkolenia nauczycieli, a uczniowie i studenci odbywają w muzeum praktyki i prowadzą badania naukowe.



Deutsches Museum w Monachium

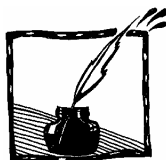
¹ <http://www.deutsches-museum.de/en/flugwerft/information/>



Nagrody Polskiego Towarzystwa Fizycznego za rok 2008

Informujemy, iż Polskie Towarzystwo Fizyczne przyznało za rok 2008 następujące nagrody:

- Medal i nagrodę PTF im. Krzysztofa Ernsta za popularyzację fizyki – **dr Stanisław Bajtlik** z CAMK, za wszechstronną i pełną pasję działalność popularyzatorską.
- Medal i nagrodę PTF im. Grzegorza Białkowskiego dla wyróżniających się nauczycieli – **mgr Marek Golka**, nauczyciel z Zespołu Szkół Ogólnokształcących w Radomiu, za wkład w rozwój polskiej fizyki poprzez pracę z uzdolnioną młodzieżą i wybitne osiągnięcia uczniów na arenie międzynarodowej i krajowej.
- Nagrodę PTF II stopnia dla wyróżniających się nauczycieli – **mgr Jerzy Mucha**, nauczyciel z V LO w Krakowie, za pracę z uzdolnioną młodzieżą i wybitne osiągnięcia uczniów na arenie międzynarodowej i krajowej.
- Nagrodę PTF III stopnia dla wyróżniających się nauczycieli *ex aequo*:
 - **mgr Jadwiga Fojt-Jasińska** – nauczycielka z Zespołu Szkół Katolickich w Zielonej Górze, za aktywną pracę na rzecz poprawy jakości nauczania fizyki w gimnazjum,
 - **mgr Emilia Misch** – nauczycielka z III LO w Poznaniu, za rozwijanie twórczych form pracy z uzdolnioną młodzieżą.
- Wyróżnienia otrzymali:
 - **mgr Robert Stasiak** – nauczyciel z XVI LO w Warszawie, za zaangażowanie w pracy z młodzieżą i świetne wyniki uczniów w Olimpiadach Fizycznych.
 - **mgr Agata Błahut** – nauczycielka z I LO w Rzeszowie, za pasję i twórcze przekazywanie wiedzy z fizyki.
 - **mgr Włodzimierz Nawrocki** – nauczyciel z XXXV LO w Łodzi, za niezwykle zaangażowanie w pracy z młodzieżą i świetne wyniki uczniów w konkursach fizycznych.
 - **mgr Ewa Królczyk** – nauczycielka z Gimnazjum nr 1 w Zielonej Górze, za rozbudzenie zainteresowań fizyką wśród uczniów gimnazjum.



Stanowisko PTF w sprawie reformy programowej

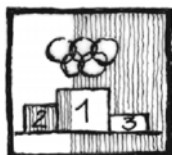
Polskie Towarzystwo Fizyczne zajęło stanowisko w sprawie reformy programowej. Na stronie internetowej <http://ptf.fuw.edu.pl/ref08.html> zamieszczone są następujące pozycje:

1. Opinia Komisji do Oceny Podręczników Szkolnych Polskiej Akademii Umiejętności
2. Uwagi dr Zofii Gołąb-Meyer
3. Kilka uwag krytycznych prof. Krzysztofa Fiałkowskiego
4. Uwagi dr Marii Baster-Grząślewicz
5. Opinia dr Jadwigi Salach
6. Stanowisko Sekcji Nauczycielskiej PTF + aneks
7. List ze stanowiskiem Komisji Nauczania Fizyki w Szkołach + uwagi
8. Kilka krytycznych uwag „spod tablicy” Cezarego Filipiuka
9. List dr Barbary Sagnowskiej
10. Uwagi Ewy Strugały

Zmiany podstawy programowej nie wpłyną na efekty nauczania fizyki w gimnazjum, jeśli nie będą im towarzyszyć inne istotne zmiany. Oto one:

1. Musi istnieć w gimnazjum możliwość tworzenia klas z poszerzoną liczbą godzin fizyki, jeśli są zainteresowani uczniowie.
2. W przypadku, gdy uczniowie mają 4 godziny w cyklu nauczania, nauka fizyki powinna się odbywać przez dwa lata po dwie godziny tygodniowo. Uczenie fizyki jedną godzinę tygodniowo uważamy za pozbawione sensu.
3. Obowiązkowe doświadczenia powinny być przeprowadzane przy podziale klas na grupy. W przeciwnym przypadku wymagane umiejętności polskich uczniów, które szczególnie słabo wypadają w badaniach PISA, nadal nie będą kształtowane.
4. Kształcenie nauczycieli fizyki nie może się odbywać na krótkich, pozbawionych praktyk, studiach podyplomowych. Fizyka jest przedmiotem trudnym i powinna być nauczana przez dobrze przygotowanych nauczycieli.

Zachęcamy do lektury i nadsyłania własnych uwag.



Ogólnopolski Festiwal „Nauki Przyrodnicze na Scenie 3”

Poznań, Wydział Fizyki UAM, 19–20 września 2008 roku

W dniach 19–20 września 2008 roku, na Wydziale Fizyki UAM w Poznaniu, pod patronatem Polskiego Towarzystwa Fizycznego i Polskiego Towarzystwa Astronomicznego, został zorganizowany Ogólnopolski Festiwal „Nauki Przyrodnicze na Scenie 3”, który stanowi kontynuację bardzo udanych trzech poprzednich ogólnopolskich festiwali „Fizyka na Scenie” i kolejnych dwóch festiwali „Nauki Przyrodnicze na Scenie” oraz trzech europejskich festiwali „Physics on Stage” i dwóch festiwali „Science on Stage”.

Następny Europejski Festiwal „Science on Stage 3” (SOS 3) – odbędzie się prawdopodobnie w 2009 roku, w którymś z wielkich laboratoriów europejskich.

Tegoroczni zwycięzcy:

Kategoria przedstawienia:

- I Miejsce** – zespół z Gimnazjum prof. S. Kielicha w Borowie, kierowany przez mgr Urszulę Grabowską, mgr Ewę Wegner, mgra Piotra Wegnera, w składzie: Aleksandra Marciniak, Paulina Płocieniak, Aleksandra Kasprzak, Bartosz Leraczyk, Ryszard Skrzypniak, Wiktor Kaźmierczak, Aleksandra Ferens, Tomasz Maciejewski, Wojciech Dominiczak, Patryk Antoniak, Piotr Szymkowiak, Zofia Wegner, Zofia Przybylska, Paulina Bisiolek, Joanna Wojciechowska, Martyna Kinecka, Patryk Kaptur, Martyna Grzelczyk, Olga Nawrocka, Anna Maciejewska, za przedstawienie pt. „Paryskie spotkanie”
- II Miejsce** – zespół z ZSO im. M. Kopernika w Cieszynie, kierowany mgr Danuta Bartnik, w składzie: Magdalena Dobosz, Maciej Habarta, Maria Michałek, Anna Michałek, Patryk Kukulski, Jakub Dobroszek, Bartosz Sikora, Anastazja Zeman, Zbigniew Witeczak, za przedstawienie pt. „Jeden Dzień”
- III Miejsce** – zespół z I Liceum Ogólnokształcącego im. Tadeusza Kościuszki w Myślenicach, kierowany przez mgr Janinę Śliwę, w składzie: Ryszard Spyt, Zbigniew Drabik, Piotr Druzgała, Joanna Talaga, Paweł Stoch, Jakub Cieśla, Dominika Ostafin, Agnieszka Śmielek, Izabela Górka, Marzena Hajdas, Katarzyna Kapłoniak, Anna Mirek, Anna Hałas, Anna Ślusarczyk, Aleksandra Skrzeczek, Monika Wiechniak, za przedstawienie pt. „Wiedza wychodzi z cienia”

Wyróżnienia:

- Dla zespołu w składzie: Mateusz Stocki, Agnieszka Stocka, Grzegorz Jurga z Wydziału Chemii UAM w Poznaniu, za przedstawienie pt. „ArtScience”

- Dla zespołu kierowanego przez dr Anetę Waszkowiak, w składzie: Piotr Derlatka, Izabela Stachowska, Marcin Samarzewski, Krzysztof Książkiewicz, Monika Tomaszewska, Magda Jakubowska, Dawid Piasny, Wojciech Zajac, Agnieszka Grinig, Dorota Nowak, Sandra Klonowska, Beata Szynder, Julia Dziamska, Anna Sitz z Zespołu Szkół Budowlano-Drzewnych w Poznaniu, za przedstawienie pt. „Magia codzienności”
- Dla Tomasza Łosia z VI Liceum Ogólnokształcącego im. Stefana Czarnieckiego w Szczecinie, za muzykę do sztuki „Życie gwiazdy”
- Dla Macieja Siedleckiego z III LO im. Unii Lubelskiej w Lublinie, za napisanie i reżyserię sztuki „You can shine, po prostu błyszcz”

Kategoria demonstracje:

Dwa równorzędne I Miejsca:

- Zespół w składzie: Mateusz Stocki, Agnieszka Stocka, z Wydziału Chemii UAM w Poznaniu, za demonstrację „Włazł kotek na płotek...”
- Zespół kierowany przez dr Anetę Waszkowiak i mgr Justyną Bartol-Baszczynską, w składzie: Bartosz Lang, Mikołaj Cybulski, Tomasz Lis, Marta Piotr, Henryk Skretny, Łukasz Łochyński, Natalia Gumna, Adrian Sobański, Monika Andrzejewska, Dawid Kaniewski z Zespołu Szkół im. H. Cegielskiego w Rogoźnie, za demonstrację „Pomaluj mój świat”

II Miejsce – zespół z Gimnazjum im. Marii Skłodowskiej-Curie w Pietrowicach Wielkich, kierowany przez mgr Jana Tokara, w składzie: Szymon Marcinek, Stefan Moczka, za demonstrację „Wykorzystanie stroboskopu do obserwacji efektów doświadczeń”

Dwa równorzędne III Miejsca:

- Zespół kierowany przez mgr Grażynę Generowicz, w składzie: Marta Modzelewska, Agnieszka Kwiatkowska, Agata Tomaszewska, Marta Kuczyńska, Maciej Kwiatkowski, Mateusz Wiatrowski, Rafał Aleksandrak, Michał Śmieszniak z III Liceum Ogólnokształcącego im. Mikołaja Kopernika w Kaliszu, za demonstrację „Kto sieje wiatr?”
- Zespół kierowany przez mgr Małgorzatę Sobczak, w składzie: Albert Ratajczak z I Liceum Ogólnokształcącego w Lesznie, za demonstrację „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”

Wyróżnienia:

- Dla zespołu kierowanego przez mgr Małgorzatę Masłowską w składzie: Marysia Wosiek, Martyna Jeziorska, Asia Wszędobyl, Monika Lesiecka, Piotr Oleszczyk, Monika Kaźmierczak, Szymon Janik, Michał Frątczak z Zespołu Szkół w Rajsku, za demonstrację „Pomóż sobie sam, Kopciuszkuczyli rzecz o mieszaniu, rozdzielaniu i czarowaniu”
- Dla Jakuba Kira z I Liceum Ogólnokształcącego im. Tadeusza Kościuszki w Busku-Zdroju, za demonstrację „Zgniatacz”

Kategoria prezentacje multimedialne:**Jury postawiło przyznać dwa równorzędne I Miejsca:**

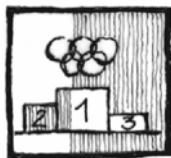
- zespołowi z I Liceum Ogólnokształcącego im. B. Chrobrego w Pszczynie, opiekun mgr Cezary Filipiuk, Aleksandra Pławecka, Wojciech Jańczak, za prezentację pt. „Fizyka a fotografia”
- zespołowi z I Liceum Ogólnokształcącego w Lesznie w składzie: mgr Zbigniew Trzmiel, Bartosz Niedźwiedź, za prezentację pt. „Człowiek – najślabsze ogniwo”

III Miejsce – zespół z Zespołu Szkół Elektronicznych, Elektrycznych i Mechanicznych Technikum nr 3 w Bielsko-Białej, opiekunowie mgr inż. Marek Myśliński, mgr Jolanta Kujawska-Tomasik, w składzie: Paweł Machnik, Mateusz Orawczak, za prezentację pt.: „Rozterki ludzkiego ucha”

Wyróżnienia:

- Dla zespołu kierowanego przez dr Joannę Gryboś w składzie: Dorota Wiśniewska z Zespołu Szkół Ogólnokształcących im. Jana Pawła II w Pawłowicach, za prezentację pt. „Świat biosensorów”
- Dla zespołu dr inż. Witold Misiak, Marcin Kasperski z ZSO w Gostyniu, za prezentację pt. „Wykorzystanie metody MindMappingu w uczeniu się fizyki i przedmiotów przyrodniczych”





Wyniki VII Ogólnopolskiego Konkursu na Doświadczenie Pokazowe z Fizyki

Jury VII Ogólnopolskiego Konkursu na Doświadczenie Pokazowe z Fizyki na posiedzeniu w Krakowie przyznało następujące nagrody:

I NAGRODA

- * *Grające cząsteczki* – Mateusz Stocki (Wydział Chemii UAM Poznań), Agnieszka Stocka (Wyższa Szkoła Humanistyczna w Lesznie)

II NAGRODA

- * *Przykłady działania silnika elektrycznego* – Agnieszka Ciurysek, Joanna Zalewska (LO Świnoujście)

III NAGRODA (przyznano dwie równorzędne)

- * *Tuba Rubensa* – Paweł Trzęsicki, Wiktor Luzarowski, Tomasz Jasek (V LO Bielsko-Biała)
- * *Zgniatacz* – Jakub Kir (I LO Busko-Zdrój)

WYRÓŻNIENIA

- * *Pseudożarówka* – Marlena Bereźniak, Jakub Pająk (II LO Słupsk)
- * *Bristle Bot* – Marcin Środa, Oskar Wysocki, Kamil Radlak (II LO Słupsk)
- * *Butelkomania* – Dawid Storman (II LO Słupsk)
- * *Łódka o napędzie magnetohydrodynamicznym* – Monika Storman (II LO Słupsk)
- * Grażyna Linder i Jarosław Linder (II LO Słupsk) – specjalne wyróżnienie za opiekę pedagogiczną

NAGRODA PUBLICZNOŚCI

- * *Tuba Rubensa* – Paweł Trzęsicki, Wiktor Luzarowski, Tomasz Jasek



Akademia Fizyki Lato 2008

Dagmara Sokołowska

Już po raz trzeci zaprosiliśmy uczniów do udziału w sesji naukowej organizowanej przez Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego. Pod nowym szyldem „Akademii Fizyki” kontynuujemy wieloletnią tradycję Zakopiańskich Przedszkoli Fizyki, obejmując akcją coraz szersze grono naszych słuchaczy, niezmiennie zainteresowanych fizyką. Ale nazwa, to nie jedyna zmiana. W edycji Lato 2008 po raz pierwszy oprócz trzydniowej sesji dla uczniów szkół ponadgimnazjalnych, pokusiliśmy się o zorganizowanie jednodniowej serii wykładów dla gimnazjalistów.

Podobnie jak w czerwcu 2008, tak i w przyszłości chcemy utrzymać pewien ramowy schemat obu części Akademii Fizyki. Każda sesja dla gimnazjalistów będzie opóźniona o pół roku w stosunku do cyklu dla szkół ponadgimnazjalnych o tej samej tematyce. Siłą rzeczy jednak gimnazjalistom proponujemy jedynie wybrane wykłady w okrojonej, prostszej i krótszej formie. Taki system doskonale zdał egzamin podczas tegorocznej letniej sesji. 16 czerwca zaproponowaliśmy uczniom gimnazjów „Materiały przyszłości”, po czym okazało się, że uczestnikami wykładów byli nie tylko gimnazjaliści, ale także starsi uczniowie, którzy z różnych względów nie wzięli udziału w spotkaniu lutowym. Upiekliśmy zatem dwie pieczenie na jednym ogniu.

W dniach 17–19 czerwca zaprosiliśmy uczniów na cykl „Wszechświat oddziaływać”. Jak zwykle były prezentacje trudne oraz lekkie i przyjemne; symulacje komputerowe, modele, wykłady czysto teoretyczne i inne, silnie osadzone w fizyce doświadczalnej. Tradycyjnie pojawił się także wykład w języku angielskim wygłoszony przez prof. Nialla Ó Murchadha’a, goszczącego u nas na zaproszenie Instytutu Fizyki. Swoistym rarytasem był magiczny pokaz fizyczny prof. Boba Friedhoffera ze Stanów Zjednoczonych, który przybył do nas dzięki staraniom Konsulatu Amerykańskiego w Krakowie. Ogromną popularnością cieszyły się wykłady doświadczalne dr Marka Gołęba z IF UJ.

Akademii Fizyki odwiedziło w tym roku około 350 uczniów. Wielu z nich wytrzymało z nami przez cztery kolejne dni. Dziękujemy wszystkim zainteresowanym uczniom oraz nauczycielom za rozpropagowanie informacji wśród swoich podopiecznych i zmotywowanie ich do udziału w sesji. Dziękujemy także wszystkim wykładowcom, bez których bezinteresownego zaangażowania w popularyzację fizyki, cykl ten nie mógłby powstać.

Szczegółowy wykaz wygłoszonych wykładów Akademii Fizyki Lato 2008 zamieszczamy poniżej.

Poniedziałek, 16.VI*Pokaz doświadczeń* – dr Marek Gołąb*Ciekle kryształy* – dr Joanna Janik*Nanostruktury* – mgr Krzysztof Sajewicz**Wtorek, 17.VI***A General Introduction to Interactions* – prof. Niall Ó Murchadha*Życie gwiazd* – dr Joanna Jałocha*The Magic of Physics* – prof. Bob Friedhoffer (pokaz prostych, acz zaskakujących doświadczeń z fizyki)**Środa, 18.VI***Symulacje oddziaływania grawitacyjnego wielu ciał na komputerze PC* – dr Andrzej Odrzywołek*Sieci przypadkowe* – dr hab. Piotr Białas*O wektorach w fizyce* – mgr Wiesław Zajiczek*Szósty zmysł* – dr hab. Danuta Kruk**Czwartek, 19.VI***Pokaz doświadczeń* – dr Marek Gołąb*O topologicznych komputerach kwantowych i warkoczykach* – dr hab. Andrzej Sitarz*Na granicy mechaniki kwantowej* – prof. dr hab. Jakub Zakrzewski

* * *

Następne spotkanie w ramach Akademii Fizyki już w lutym 2009.

Sesja dla gimnazjalistów:**10 lutego 2009****9.00–15.00****„Wszechświat oddziaływań”**Sesja dla licealistów:**11–13 lutego 2009****9.00–15.00****„Szkielko i oko
czyli granice poznania”****Szczegółowy harmonogram pojawi się na stronie internetowej:**<http://www.if.uj.edu.pl/akademia/akademia.htm>

Serdecznie zapraszamy!



W Centrum organizowane są „Warsztaty Familijne”: *Co się dzieje ze śmieciami?*. Odbędą się w kolejne weekendy: **25–26 października** oraz **8–9 listopada**, w godzinach: 10.00–11.30 i 13.00–14.30 w Miasteczku Przyrody Młodzieżowego Domu Kultury przy ul. Fabrycznej 1/3 w Warszawie.

Podczas warsztatów dzieci i ich rodzice dowiedzą się, jaka jest dalsza droga śmieci po tym, gdy opuszczą nasz kosz. Wspólnie postaramy się zrozumieć, co to jest utylizacja, zobaczymy czym jest recykling i jak należy segregować odpadki, by Ziemi „było lżej”. Sprawdzimy, co można zbudować z tego, co wyrzucamy i pokażemy, że śmieci mogą być całkiem zabawne. Dowiemy się, co się stanie z naszą planetą za 1000 lat, jeżeli będziemy niemądrze wyrzucać śmieci.

Informacje na stronie: http://www.kopernik.org.pl/warsztaty_familijne.php

Centrum Nauki Kopernik
ul. Mokotowska 17, 00-640 Warszawa
tel. (0-22) 492 05 05; fax: (022) 492 05 00
e-mail: info@kopernik.org.pl

Fundacja Park Militaryny
TWIERDZY MODLIN
serdecznie zaprasza nauczycieli i uczniów na
SPOTKANIA Z NAUKĄ
Zajęcia prowadzone są w formie **wyjazdowych lekcji**
o charakterze **warsztatów naukowych**, podczas których
każdy uczestnik **empirycznie** poznaje prawa rządzące
otaczającym go światem

NAUKA POPRZECZ ZABAWĘ
to hasło przewodnie naszego Cyklu Spotkań z Nauką

Proponowany program edukacyjny obejmuje cztery bloki tematyczne: historyczno-krajoznawczy, fizyczny, chemiczny, przyrodniczy.

00-201 Warszawa, ul. Andersa 26

www.twierdzamodlin.pl

Magnes LHCb



Magnes Alice



Wielki Zderzacz Hadronowy LHC

Zdjęcia: <http://lhc.web.cern.ch>



Tunel wiązki