

# Foton

112  
Wiosna  
2011

Pismo dla nauczycieli i studentów fizyki oraz uczniów

INSTYTUT FIZYKI ✕ UNIWERSYTET JAGIELLOŃSKI  
SEKCJA NAUCZYCIELSKA POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO



Symulacja wyładowania elektrycznego  
Maszynka do robienia fraktali  
Świat w nanoskali  
Łowienie komet  
Heweliusz  
Atomtria



*90lat*

## **Fizyka bliżej nas**

**10 maja–31 lipca 2011**

Krakowskie Planty między ul. św. Anny a Gołębią

Wystawa plenerowa z okazji jubileuszu 90-lecia PTF



## Einstein w wannie

W Internecie można obejrzeć cykl filmików Kuby Jankowskiego *Matura to bzdura*. Autor w sondzie ulicznej zadaje młodym przechodniom pytania z różnych dziedzin wiedzy. Niestety, fizyka wypada najgorzej, nawet znajomość łaciny wydaje się mocniejsza. I nie chodzi tu tylko o wiedzę encyklopedyczną typu „kto odkrył prawo powszechnego ciężenia” („chyba Einstein, który siedział w wannie”), ale niemożność prostego rozumowania, takiego jak wyliczenie: ile kilometrów w dwie godziny przejeżdża samochód poruszający się z szybkością 20 km/h (30, 60 km – takie padały odpowiedzi). Równość  $E = mc^2$  kojarzy się maturzystom z... Pitagorasem.

Jakie są przyczyny tego stanu rzeczy? Przecież na zadawane pytania powinni potrafić bez zająknięcia odpowiedzieć gimnazjaliści. Przepytywani ludzie z pewnością nie byli uczniami pana Marka Golki, laureata wyróżnionego tytułem Nauczyciel Roku 2010.

Konfrontując wynik sondy ulicznej z sukcesami uczniów Marka Golki możemy zapytać, czy żyjemy w dwóch różnych Polskach? Dlaczego wysiłek tak wielu nauczycieli idzie zupełnie na marne? A może należy samokrytycznie przyznać, że kiepsko uczymy fizyki? Czyżby reformy szły w zupełnie złym kierunku? Skądś jednak biorą się zdolni i wykształceni młodzi ludzie, potrafiący jako studenci samodzielnie napisać dojrzałe, ciekawe artykuły z fizyki, na przykład takie, jak te zamieszczone w niniejszym zeszycie.

Sukces Marka Golki daje nadzieję na napływ na uczelnie doskonałych studentów oraz na poprawę wizerunku nauczyciela fizyki.

Zachęcam do lektury *Fotonu*, w którym rozwijany jest frapujący młodych ludzi temat fraktali. Powinien Państwa i uczniów zaciekawiać także artykuł o atometrii, czyli o tym, jak fizyka pomaga wykrywać niebezpieczne substancje. Mikroskop STS to narzędzie najmodniejszego obecnie działu fizyki – nanofizyki i nanotechnologii; autor wyjaśnia działanie tego urządzenia i jego zastosowanie. W tym zeszycie, oprócz „Odgłosów z jaskini” znalazł się „Kącik zadań”, który oddaliśmy w ręce ucznia. Prezentuje on rozwiązanie zadania z ligi zadaniowej *The Physics Teacher*.

Z.G-M



## Contents

Einstein in a bathtub <i>Zofia Gołqb-Meyer</i> .....	1
Antinuclear tsunami <i>Kazimierz Bodek</i> .....	4
Doses of radioactivity <i>Paweł Moskal</i> .....	9
Atometry as a method for detecting dangerous substances <i>Michał Silarski, Paweł Moskal</i> .....	15
Exploring the nanoscale world – STM microscopy <i>Szymon Godlewski</i> .....	23
Widgets for fractals <i>Marcin Figiel, Tomasz Sabala</i> .....	28
A constant on the edge of chaos <i>Mateusz Denys</i> .....	36
How to command the lightings? <i>Wojciech Ganczarek</i> .....	43
Benoit Mandelbrot (1924–2010) – the father of fractal geometry <i>Zofia Gołqb-Meyer</i> .....	50
Sungrazing Comets <i>Michał Kusiak</i> .....	52
Johannes Hevelius – a hunter for comets <i>Zofia Gołqb-Meyer</i> .....	59
Announcement. Young astrophysicists <i>Zofia Gołqb-Meyer</i> .....	61
What to read. The astronomer and brewer from Gdańsk: Johannes Hevelius (1611–1689) <i>Zofia Gołqb-Meyer</i> .....	62
Problems. Noises from the cave (19). How does an ice cube float <i>Adam Smólski</i> .....	64
Borowice group of teachers.....	66
Problem from Physics Challenge for Teachers and Students <i>Adam Wyrzykowski</i> .....	67
<i>Foton 110</i> erratum.....	70
Announcement. Marek Golka – Teacher of the year 2010! .....	71
What to read. Web page edition of <i>Delta</i> <i>Jan Gaj</i> .....	72
„Nuclear fusion” contest .....	73
Announcement. „Physics and Photography” IX Competition.....	74
Announcement. Summer camp of young astronomers „OSOP 2011” <i>Lucyna Gut</i> .....	75



## Spis treści

Einstein w wannie <i>Zofia Gołąb-Meyer</i> .....	1
Antyatomowe tsunami <i>Kazimierz Bodek</i> .....	4
Dawki promieniowania jądrowego <i>Paweł Moskal</i> .....	9
Atometria jako metoda wykrywania substancji niebezpiecznych <i>Michał Silarski, Paweł Moskal</i> .....	15
Oglądanie świata w nanoskali – mikroskop STM <i>Szymon Godlewski</i> .....	23
Maszynki do fraktali <i>Marcin Figiel, Tomasz Sabala</i> .....	28
Stała w przedsionku chaosu <i>Mateusz Denys</i> .....	36
Zapanować nad piorunami <i>Wojciech Ganczarek</i> .....	43
Benoit Mandelbrot (1924–2010) – ojciec geometrii fraktalnej <i>Zofia Gołąb-Meyer</i> .....	50
Komety muskające Słońce <i>Michał Kusiak</i> .....	52
Jan Heweliusz – łowca komet <i>Zofia Gołąb-Meyer</i> .....	59
Komunikat. Młodzi astrofizycy <i>Zofia Gołąb-Meyer</i> .....	61
Co czytać. Astronom i piwowar z Gdańska Jan Heweliusz (1611–1689) <i>Zofia Gołąb-Meyer</i> .....	62
Odgłosy z jaskini (19). Jak pływa kostka lodu <i>Adam Smólski</i> .....	64
Komunikat grupy Borowice w Kudowie.....	66
Zadania ligi zadaniowej „Wyzwania dla nauczycieli i uczniów” Borysa Korsunsky’ego <i>Adam Wyrzykowski</i> .....	67
Errata do <i>Fotonu</i> 110.....	70
Komunikat. Marek Golka – fizyk – Nauczycielem Roku 2010!.....	71
Co czytać. DeltaMi – nowe internetowe wcielenie <i>Delty</i> <i>Jan Gaj</i> .....	72
Konkurs „Fuzja jądrowa”.....	73
IX Ogólnopolski konkurs fizyczno-fotograficzny „Zjawiska fizyczne wokół nas”.....	74
Komunikat. Obóz Szkoleniowo-Obszerwacyjny PTMA „OSOP 2011” <i>Lucyna Gut</i> .....	75



## Antyatomowe tsunami

*Kazimierz Bodek*

*Instytut Fizyki UJ*

Wybuch ogólnoświatowej antynuklearnej hysterii spowodowanej awarią reaktorów jądrowych w Fukushima Daiichi w następstwie gigantycznego trzęsienia ziemi i towarzyszącego mu uderzenia fali tsunami jest faktem bezspornym. Wydzwięk przeważającej części informacji i opinii pojawiających się w mediach, w tym wypowiedzi niektórych wpływowych polityków, jest dość jednoznaczny: awarie reaktorów jądrowych wykazały, że energetyka oparta na rozszczepieniu jąder atomowych jest tak niebezpieczna i nieprzewidywalna, że jak najszybciej należy się z tej dziedziny wycofać. Warto się jednak zastanowić czy takie stanowisko ma racjonalne uzasadnienie. Niezależnie od intencji animatorów i uczestników tej kampanii, głównym celem ataku są rzesze zwykłych obywateli o niskim poziomie wiedzy przyrodniczo-technicznej. Skutkiem jest zamieszanie, niepewność, wzrost poczucia zagrożenia, strach, a nawet objawy paniki, bo jak inaczej wytłumaczyć masowe wykupywanie zapasów płynu Lugola czy liczników Geigera przez obywateli nowoczesnych Niemiec. Zapewne wbrew swej woli ludzie ci stali się wyznawcami bożka niewiedzy, który po kataklizmie w Japonii przybrał postać „promieniotwórczego” i zażądał kolejnych ofiar.

Zjawisko ma wyraźnie charakter irracjonalny, ale jest groźne nie mniej od samej katastrofy. Jedynym sposobem ograniczenia jego negatywnych następstw jest konsekwentne przywoływanie faktów i przywracanie im właściwych proporcji. Zacząć wypada od tego, że skala kataklizmu, który ostatnio nawiedził północno-wschodnią Japonię, nie ma precedensu. Zniszczenia materialne są ogromne, a życie straciło zapewne ponad 20 tysięcy ludzi. Mimo wszystko liczba ofiar w ludziach jest piętnastokrotnie mniejsza niż w katastrofie o mniejszej skali, która wydarzyła się na Oceanie Indyjskim w grudniu 2004 roku. Jednym z powodów tej dysproporcji (na korzyść Japonii) jest zapewne wysoki poziom technologiczno-materialny i rozwinięte w tym kraju systemy ostrzegawczo-obronne przed trzęsieniami ziemi. Do takiego stanu rzeczy niewątpliwie przyczyniła się energetyka jądrowa, która od pół wieku dostarcza Japończykom tani prąd elektryczny.

Wśród japońskich instalacji jądrowych do największych zniszczeń doszło w elektrowni Fukushima I, gdzie po dwóch tygodniach od katastrofy sytuacja jest nadal groźna. Jest to jedna z najstarszych instalacji, wykorzystująca reaktory na wodę wrzącą drugiej generacji. W przeciwieństwie do systemów wysokociśnieniowych jest to mniej rozpowszechniony typ reaktora energetycznego.

Trzeba wyraźnie podkreślić, że wszystkie reaktory jądrowe w Japonii, w tym te z Fukushima I, wzorowo zareagowały i przetrwały trzęsienie ziemi, mimo że było ono o dwa stopnie (w skali Richtera) silniejsze niż wynikało z przyjętych założeń projektowych dla tej elektrowni. A różnica jest ogromna. Dwa stopnie w skali Richtera oznaczają 100-krotnie większą amplitudę drgań i 1000-krotnie większą ilość wyzwolonej energii. Automatyczne systemy wygasily reakcje łańcuchowe, a zasilanie awaryjne układów chłodzenia reaktorów włączyło się prawidłowo. Nie stwierdzono też żadnych istotnych uszkodzeń mechanicznych samych reaktorów, ich betonowych osłon biologicznych i konstrukcji wewnętrznych. Kłopot pojawił się dopiero po uderzeniu fali tsunami, która była wyższa o jeden metr od założeń projektowych. Fala ta zniszczyła generatory awaryjne (napędzane silnikami Diesla) pozostawiając sprawnym jedynie system zasilania z akumulatorów, które wystarczają tylko na kilka godzin. A stałe chłodzenie nawet wyłączonych reaktorów jest konieczne, gdyż paliwo jądrowe gromadzi w czasie pracy reaktora silnie radioaktywne produkty rozszczepienia. W wyniku rozpadów tych produktów wydzielane jest ciepło, które trzeba odprowadzać, w przeciwnym razie rdzeń się przegrzeje i może ulec stopieniu. Bardzo wysoka temperatura rdzenia doprowadzić może nawet do przetopienia stalowego zbiornika, w którym rdzeń reaktora jest umieszczony i wylania się zawartości na betonową podstawę. Taką awaryjną sytuację przewiduje konstrukcja reaktora: rozlana lava ze stopionego rdzenia będzie powoli stygła w betonowej wannie. Nie jest to jednak pożądany stan, w którym silnie radioaktywne substancje mają bezpośredni kontakt z powietrzem, łatwo mogą się rozprasać i powodować groźne skażenie środowiska. Dlatego też ratowanie wyłączonych po trzęsieniu ziemi reaktorów polega na niedopuszczeniu do ich przegrzania.

Przegrzanie rdzenia reaktora prowadzi do jeszcze jednego groźnego zjawiska: gorące koszulki cyrkonowe prętów paliwowych w kontakcie z wodą, która jest w zbiorniku reaktora i służy do jego chłodzenia i spowalniania neutronów, rozkładają wodę, skutkiem czego w zbiorniku reaktora gromadzi się wodór. Wzrastające ciśnienie musi być zmniejszone przez otwarcie zaworu bezpieczeństwa, aby nie rozsądzić zbiornika. Taki manewr jest znowu bardzo niekorzystny, bo uwalnia do środowiska skażoną radioaktywnie parę wodną oraz wodór, który w kontakcie z powietrzem tworzy mieszanekę piorunującą, a jej eksplozja niszczy konstrukcje zewnętrznych budynków i wywołuje pożary.

Innym, potencjalnie groźnym zjawiskiem, przy braku cyrkulacji w obwodach chłodzenia, jest odparowanie wody z basenów, w których przechowuje się czasowo zużyte pręty paliwowe. Robi się to dlatego, żeby ich radioaktywność spadła, a z nią i wydzielane ciepło, przed wysłaniem do dalszych etapów cyklu paliwowego. Ilości wydzielanego ciepła w basenach są znacznie mniejsze niż w samym reaktorze, ale za to pręty nie są chronione grubymi ścianami stalowe-

go zbiornika. Po odparowaniu wody, radioaktywne paliwo jądrowe uzyskuje bezpośredni kontakt z powietrzem.

Opisane powyżej zjawiska wystąpiły w reaktorach elektrowni Fukushima I, gdyż przez wiele dni nie udało się odbudować zniszczonego zasilania elektrycznego układów chłodzących. Wybuchy wodoru i pożary dokonały poważnych zniszczeń w budynkach zewnętrznych i znajdujących się tam instalacjach. Pod gruzami zginęło kilka osób z personelu elektrowni. Heroiczna walka o przywrócenie sprawności układom chłodzenia trwa nadal w bardzo trudnych i niebezpiecznych warunkach. Improwizowane polewanie reaktorów wodą morską jest częściowo skuteczne i sytuacja powoli się stabilizuje, ale wynik akcji nie jest jeszcze przesądzony. Największym zmartwieniem jest niebezpieczeństwo skażenia okolicy produktami rozszczepienia i aktywnościami, gdyby doszło do dezintegracji i rozproszenia prętów paliwa jądrowego. Jak dotąd nie ma dowodów, że taki proces występuje, ale w celach prewencyjnych wysiedlono około 200 tysięcy mieszkańców. Mimo alarmistycznych i często sprzecznych doniesień, dotychczasowe skażenie okolicy jest przejściowe i niewielkie<sup>1</sup>. Co więcej, nie ma doniesień o objawach choroby popromiennej nawet wśród najbardziej narażonego personelu, który uczestniczy w akcji ratunkowej.

W tym miejscu trzeba powrócić do zasadniczego pytania: czy zaistniała sytuacja w elektrowni Fukushima I jest wystarczającym dowodem na niebezpieczeństwo i nieprzewidywalność energetyki jądrowej, jak twierdzą jej przeciwnicy? Czy straty już poniesione i spodziewane są tak dotkliwe, że jednak należy zrezygnować z rozwoju tej gałęzi przemysłu? Pod wpływem emocji, naturalnych przecież w obliczu wielkiego i bezprecedensowego nieszczęścia, łatwo przeoczyć racjonalne argumenty i przyłączyć się do chóru przeciwników energetyki jądrowej.

Odkładając jednak emocje na bok należy zauważyć, że same reaktory i ich systemy wspomagające zadziałały prawidłowo, mimo że siła trzęsienia ziemi znacznie przekroczyła dopuszczalną granicę. Rozwój wypadków, w tym awaria chłodzenia i wycieki radioaktywności zostały dokładnie przewidziane przez konstruktorów, którzy także stworzyli procedury awaryjne z kolejnymi poziomami obrony. Nie można więc mieć do nich pretensji, że elektrownia uległa awarii. Wręcz przeciwnie, należy im się uznanie za daleko idącą ostrożność i duże współczynniki bezpieczeństwa. Problem leży gdzie indziej. Każde urządzenie, każda instalacja, czy system zbudowany i eksploatowany przez człowieka, obciążony jest ryzykiem, że zdarzy się coś nieprzewidywalnego. Ten rodzaj niepewności fachowcy nazywają ryzykiem resztkowym. W niesprzyjających okolicznościach nawet zwykły kij od miotły może się stać przyczyną wielkiego nieszczęścia. Czy świadomość takiej możliwości powinna prowadzić

---

<sup>1</sup> Media podawały informacje o skażeniu radioaktywnym wody pitnej w Tokio na poziomie 1 Bq/l. Dla informacji podajemy, że najbardziej radioaktywne lecznicze wody mineralne mają odpowiednio: 438 Bq/l w Sieradowie Zdroju i 1654 Bq/l w Szklarskiej Porębie.



do rezygnacji z wytwarzania mioteł? Prawidłowe i racjonalne postępowanie zmierza do jak najlepszego oszacowania ryzyka resztkowego, a rozwój technologiczny polega na budowaniu coraz lepszych urządzeń, w których to ryzyko systematycznie maleje. Wybór określonego poziomu ryzyka nie jest zadaniem inżynierów. To sprawa odbiorcy, dla którego urządzenie będzie pracować. Bożek niewiedzy podpowiada mu, aby wybierał urządzenia „bez ryzyka”, ukrywając jednocześnie, że zerowe ryzyko nie istnieje, a koszty jego zmniejszania gwałtownie rosną. Nieświadomy odbiorca wpadnie w pułapkę i zablokuje sobie możliwość rozwoju, śrubując ponad miarę poziom ryzyka resztkowego. Jest to szczególnie istotne w dziedzinach kosztownych i strategicznych, a energetyka niewątpliwie do takich należy.

Japończycy budując blisko pół wieku temu elektrownię Fukushima Daiichi wybrali najlepszą w tamtym czasie technologię o poziomie ryzyka resztkowego, które przewiduje wystąpienie takiej awarii jak obecna, raz na 10 000 reaktorolat. Jest chyba ironią losu, bo nie może to wynikać z teorii prawdopodobieństwa, że wodne reaktory energetyczne przepracowały mniej więcej 10 000 reaktorolat! Że postawienie na energetykę jądrową, która gwarantuje niskie i stabilne ceny prądu elektrycznego, było dobrym wyborem – nie ma najmniejszej wątpliwości. Stan rozwoju społeczeństwa japońskiego najlepiej o tym świadczy. Dzisiaj wybrano by zapewne reaktory trzeciej generacji o dziesięciokrotnie mniejszym ryzyku resztkowym. Nieustanne doskonalenie technologii sprawiło, że dzisiejsze reaktory wodne są już zabezpieczone na wypadek długotrwałej utraty chłodzenia cyrkulacyjnego oraz nie zwiększają stężenia wodoru przy wzroście temperatury rdzenia. Te konstrukcje zadowolają się awaryjnym chłodzeniem biernym, opartym na konwekcji, a uwalniany w wysokich temperaturach wodór jest katalitycznie wiązany, przez co jego stężenie nie rośnie.

Przysłuchując się doniesieniom medialnym po trzęsieniu ziemi w Japonii zwrócić uwagę musi niebywała dysproporcja w relacjonowaniu i komentowaniu awarii w Fukushimie w porównaniu z ogromem strat ludzkich i materialnych, które z awarią elektrowni nie mają nic wspólnego. Na dalszy plan zeszły dalekosiężne i trudne do naprawienia skutki kataklizmu, a odbiorcy epatowani są konsekwentnie informacjami (bardzo często błędnymi) o rozwoju sytuacji w elektrowni. Informacje te budzą strach i przerażenie niemal na całym świecie, bo większość ludzi nie potrafi racjonalnie ocenić rzeczywistego niebezpieczeństwa. Bożek niewiedzy przyjmuje hojne ofiary od swoich wyznawców. Skala i mechanizmy rządzące tym irracjonalnym zjawiskiem mogłyby być przedmiotem badań dla socjologów. Nie czuję się kompetentny, aby szerzej i głębiej je analizować. Jednak pragnę zwrócić uwagę Czytelnika na kilka aspektów o wymiarze globalnym.

Ten bożek niewiedzy nie jest tylko postacią ze świata mitów. To jedno z wyrafinowanych narzędzi, którym posługują się konkretne i wpływowe grupy interesu. Grupy, które forsują wizję sielankowego świata, nieliczącego się z prawami Przy-

rody, a ich scenariusze pozyskiwania energii niezbędnej naszej cywilizacji są dobrym przykładem, jak dalece te ruchy oderwały się od rzeczywistości. Mimo tego znajdują one posłuch i akceptację. Miał zasadniczy, to twierdzenie, że ludzkości niepotrzebny jest ani węgiel, ani uran, że potrzeby energetyczne można z powodzeniem zaspokoić z innych źródeł, przede wszystkim tzw. „odnawialnych”. Jeden rzut oka na tabelę rozpoznanych energetycznych zasobów kopalnych na Ziemi uświadamia, że właśnie te dwie kategorie, węgiel i uran, stanowią (mniej więcej po połowie) ponad 80% wszystkich rezerw, jakimi dysponujemy. Źródła odnawialne (wiatr, energia słoneczna, biopaliwa) nie zastępują paliw kopalnych nie tylko dlatego, że są zbyt mało wydajne i bardzo drogie, ale też przez to, że drastycznie degradują środowisko, co skrzętnie ukrywają przed opinią publiczną propagandyści i ideologowie przestawienia gospodarki świata na energię odnawialną.

W kontekście dyskusji o alternatywnych (do węgla i uranu) źródłach energii na Ziemi trzeba wspomnieć o fuzji (syntezie) jądrowej, gdzie jądra lekkich pierwiastków, głównie izotopy wodoru i helu, łączą się w cięższe, wyzwalając przy tym ciepło. Jest to kopia procesu, który ogrzewa Słońce. Surowce do wytwarzania energii z syntezy jądrowej są praktycznie niewyczerpalne, ale sam proces potrafimy na razie prowadzić w sposób niekontrolowany (tzw. bomby termojądrowe), a przez to bezużyteczny dla energetyki. Prace nad opanowaniem kontrolowanej syntezy termojądrowej trwają od ponad pół wieku i ich końca nie widać, mimo że angażuje się w badania coraz większe środki. Trudno przewidzieć, kiedy i czy kiedykolwiek to źródło energii stanie się ekonomicznie uzasadnione i konkurencyjne do innych.

Orędownicy alternatywnych źródeł energii przytaczają jeszcze jeden argument, że przejściu na alternatywną energetykę musi towarzyszyć dalece posunięta oszczędność energii. Ten populistyczny i chwytny w rozwiniętych i bogatych społeczeństwach pomysł jest zupełnie nie do przyjęcia w krajach biednych, przeludnionych i rozwijających się. Łatwo zauważyć, że podstawowym warunkiem rozwoju jest zwiększenie konsumpcji energii, przede wszystkim elektrycznej. Twierdzenie to można skwantyfikować opierając się na zależności pomiędzy konsumpcją energii elektrycznej *per capita* w danym kraju, a średnią długością życia jego obywateli. Okazuje się, że aby je przedłużyć o 20 lat (w ubogich krajach afrykańskich ludzie nie dożywają 50 lat), należy zwiększyć zużycie energii 100-krotnie! Przyłączanie się do ideologii wymuszającej oszczędzanie energii w krajach trzeciego świata jest nie tylko nieetyczne, ale nieracjonalne z punktu widzenia elementarnego interesu cywilizacji ludzkiej.

Na koniec trochę optymizmu, który wynika z mojego przekonania, że sumiennie odrobimy zadanie domowe po lekcji pokory udzielonej nam przez Naturę w czasie ostatniego trzęsienia ziemi w Japonii. Symptomy uzasadniające to przekonanie można znaleźć w stonowanych i rzeczowych wypowiedziach większości fachowców odpowiedzialnych za systemy energetyczne w różnych kra-

jach. Wiedza zdobyta w czasie awarii i w trakcie akcji ratunkowej jest bezcenna. Współczesne energetyczne reaktory jądrowe staną się jeszcze bardziej bezpieczne i to bez większych nakładów na badania. Okazało się, że wytrzymałość konstrukcji przy największych nawet kataklizmach jest wzorowa. Przeglądu i poprawienia wymagają natomiast procedury postępowania na wypadek poważnej awarii oraz ilość dostępnych środków, w tym niezależnych źródeł zasilania awaryjnego. Okazało się również, że błędem jest nadmierne wydłużanie pracy starych instalacji i to nie dlatego, że stają się bardziej awaryjne i mniej ekonomiczne, ale przez to, że stosowane dawniej systemy bezpieczeństwa nie wystarczają już obecnemu społeczeństwu, które domaga się jeszcze niższego ryzyka resztkowego.



## Dawki promieniowania jądrowego

*Paweł Moskal*  
*Instytut Fizyki UJ*

### I. Przykłady promieniowania jądrowego

Promieniowanie jądrowe są to cząstki wylatujące z jąder atomowych na skutek zachodzących tam przemian. Może to być na przykład elektron, gdy w wyniku oddziaływania słabego, neutron we wnętrzu jądra atomowego zamienia się w proton, elektron i antyneutrino ( $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$ ). Takiej przemianie podlega na przykład jądro strontu ( $^{90}\text{Sr}$ ) zmieniając się w itr ( $^{90}\text{Y}$ ). Wskaźnik górny oznacza łączną liczbę protonów i neutronów, w tym przypadku wynosi ona 90. Elektrony wylatujące w wyniku reakcji  $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y} + e + \bar{\nu}$  stanowią promieniowanie beta. Promieniowanie beta jest wysyłane także na przykład przez izotopy jodu ( $^{131}\text{I}$ ) i cezu ( $^{137}\text{Cs}$ ). Lecz w tym przypadku oprócz promieniowania beta wysyłane jest także promieniowanie gamma, ponieważ powstałe w wyniku przemiany jądra mają dodatkową energię w stosunku do swojej energii podstawowej. Na przykład  $^{137}\text{Cs}$  zamienia się na wzbudzone jądro baru ( $^{137}\text{Ba}$ ). W tym przypadku wzbudzone jądro  $^{137}\text{Ba}$  przechodzi do stanu podstawowego wysyłając kwant promieniowania elektromagnetycznego o energii 0,66 MeV. Kwanty promieniowania o tak dużej energii (milion razy większej od kwantów światła) nazywane są promieniowaniem gamma. Kwanty gamma są niewidzialne, ale powstają analogicznie jak fotony, przy czym fotony wysyłane są z atomów, gdy elektrony przechodzą z wyższych energetycznie powłok na niższe, a w przypadku jąder przejścia dotyczą protonów i neutronów. **Izotopy  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$  i  $^{137}\text{Cs}$  stanowią najistotniejszy wkład do wzrostu promieniowania w atmosferze w trakcie ewentualnych awarii reaktorów jądrowych.** Innym rodzajem pro-

mieniowania jądrowego są cząstki alfa (czyli połączone ze sobą dwa protony i dwa neutrony), które odrywają się od dużych jąder. Cząstki alfa wysyłane są na przykład z jąder radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ), które rozpadają się na jądro polonu i cząstkę alfa ( $^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po} + \alpha$ ). Radon jest gazem ulatniającym się do atmosfery ze skorupy ziemskiej gdzie powstaje w wyniku rozpadu radu  $^{226}\text{Ra}$ . Jako gaz jest wdychany przez człowieka, a promieniowanie alfa radonu stanowi największy wkład do dawek naturalnego napromieniowania.

## II. Miara szkodliwości napromieniowania

Opis poniższy jest przypomnieniem z artykułu opublikowanego w *Fotonie* 109. Elektron (promień beta) lub jądro helu (promień alfa) przy przechodzeniu przez materię oddziałuje z elektronami za pośrednictwem oddziaływania elektromagnetycznego. Przelatując przez materię elektron odpycha, a cząstka alfa przyciąga do siebie elektrony związane w atomach naświetlanej substancji. W obu przypadkach w wyniku tego oddziaływania elektrony materii przeskakują na wyższe powłoki energetyczne lub są całkowicie odrywane od atomów. W sumie promień beta lub cząstka alfa o energii około 1 MeV może uwolnić kilkadziesiąt tysięcy elektronów. Pośrednio podobne skutki wywołuje promieniowanie gamma. Kwant gamma wpadając do wnętrza materii przekazuje jednemu z elektronów całość lub część swojej energii, a następnie wybity elektron oddziałuje z materią jak promień beta. Zatem miarą napromieniowania może być liczba zjonizowanych atomów lub też energia zdeponowana w materiale. Energię zdeponowaną na jednostkę masy nazywa się **dawką pochłoniętą**, a jej jednostką jest Gy (grej), gdzie  $\text{Gy} = \text{J/kg}$ .

W organizmach żywych skutki biologiczne napromieniowania zależą nie tylko od zdeponowanej energii, ale także od tego, czy dana energia została zużyta na zjonizowanie małej czy dużej liczby komórek. Ponieważ takie same sumaryczne zniszczenia atomów rozłożone na większą liczbę komórek dają większe szanse, iż komórki się zregenerują lub też, że zmiany będą nieistotne z punktu widzenia ich funkcjonowania. Pod tym względem promieniowanie gamma i beta wywołują takie same skutki biologiczne, a są one znacznie mniejsze niż skutki wywołane przez promieniowanie alfa. Energia cząstek alfa i elektronów wysyłanych w przemianach jądrowych jest rzędu MeV. Cząstki alfa mają około 8000 razy większą masę i dwa razy większy ładunek niż elektrony i dlatego poruszają się znacznie wolniej i szybciej wytracają energię wyhamowując na drodze rzędu kilkudziesięciu mikrometrów (czyli średnio tylko w kilku komórkach). Natomiast cząstki beta o podobnej energii przebywają w organizmie drogę średnio kilku milimetrów, czyli wywołują jonizację w około 100 razy większej liczbie komórek, ale za to jonizacja w każdej z komórek jest około 100 razy mniejsza niż przy przejściu cząstki alfa. Dlatego jeśli chodzi o skutki biologiczne lepszą miarą napromieniowania jest **dawka równoważna**, którą otrzymuje się poprzez przemnożenie dawki pochłoniętej przez odpowiedni

współczynnik szkodliwości charakteryzujący rodzaj promieniowania. Okazuje się, że szkody biologiczne powodowane przez cząstki alfa są dwadzieścia razy większe niż przez cząstki beta czy kwanty gamma. Dlatego współczynnik ten wynosi 1 dla promieniowania beta i gamma oraz 20 dla promieniowania alfa. Choć fizyczną jednostką dawki równoważnej jest J/kg, tak samo jak dawki pochłoniętej, to dla odróżnienia charakteru biologicznego dawki równoważnej jej jednostką nie jest Gy lecz Sv (siwert). Nazwa pochodzi od nazwiska pioniera ochrony radiologicznej dr. Rolfa Sieverta.

Molekuły istotne dla życia komórek mogą być uszkodzane zarówno na skutek bezpośredniego zrywania wiązań pomiędzy stanowiącymi je atomami jak również na skutek jonizacji molekuł z otoczenia, z którymi następnie wchodzi w reakcje chemiczne. Na przykład molekuły DNA mogą ulegać utlenieniu rodnikami OH, które powstają w ciągu reakcji chemicznych w wyniku jonizacji cząsteczek wody. W ogólności im większe molekuły tym większa jest szansa ich uszkodzenia przy zadanej dawce napromieniowania. Ze względu na różne właściwości biologiczne różne komórki będą różnie reagować na taką samą dawkę promieniowania. Dlatego przy określaniu skutków napromieniowania należy także uwzględnić wrażliwość poszczególnych narządów czy tkanek. I tak na przykład wrażliwość gruczołów płciowych na promieniowanie jest 2 razy większa niż szpiku kostnego i aż 20 razy większa niż skóry czy powierzchni kości. Po uwzględnieniu wrażliwości otrzymujemy **dawkę skuteczną**, którą podajemy także w Siwertach.

Podobnie jak w przypadku innych zatruc ostateczne skutki dla organizmu zależą w dużej mierze od wydolności systemu immunologicznego. Dlatego nie można określić jednoznacznie jednorazowej dawki śmiertelnej. Określa się natomiast dawkę, po której otrzymaniu połowa populacji umiera w ciągu 30 dni. W przypadku człowieka jest to około 3,5 Sv. Siwert jest miarą zatrucia organizmu promieniowaniem jądrowym tak jak promile są miarą zatrucia alkoholem. Łatwo jest zapamiętać skale, ponieważ podobnie jak w przypadku alkoholu dawka śmiertelna to z grubsza 4 – czy to promile czy też Siwerty.

### III. Dawki otrzymywane w środowisku naturalnym

Działaniu promieniowania jądrowego poddawani jesteśmy nieustannie przez całe życie. Pochodzi ono z naturalnych radionuklidów znajdujących się w skorupie ziemskiej, z promieniowania kosmicznego oraz z izotopów promieniotwórczych wytwarzanych w atmosferze w wyniku reakcji jądrowych wywoływanych przez promieniowanie kosmiczne. Promieniowanie jądrowe naświetla nas także od wewnątrz w wyniku rozpadu radionuklidów wchłanianych drogą pokarmową i oddechową. Największy wkład do otrzymywanej przez nas dawki ma promieniowanie radonu  $^{222}\text{Rn}$ . Radon jako gaz wydostaje się na powierzchnię Ziemi i jest przez nas wdychany. W ciągu roku otrzymujemy z tego powodu dawkę

w wysokości około 1,3 mSv. Radon może gromadzić się w zamkniętych pomieszczeniach powodując, że w istocie największe dawki otrzymujemy w domu. Stężenia radonu w domach mogą istotnie się różnić i często zdarza się, że dawka od radonu wynosi nawet kilkanaście mSv na rok. Ponadto większe stężenie radonu i produktów jego rozpadu może występować także w wielu kopalniach. Według danych z 1999 roku w Polsce ponad 4% górników w kopalniach rud metali i węgla brunatnego otrzymało roczne dawki powyżej 5 mSv.

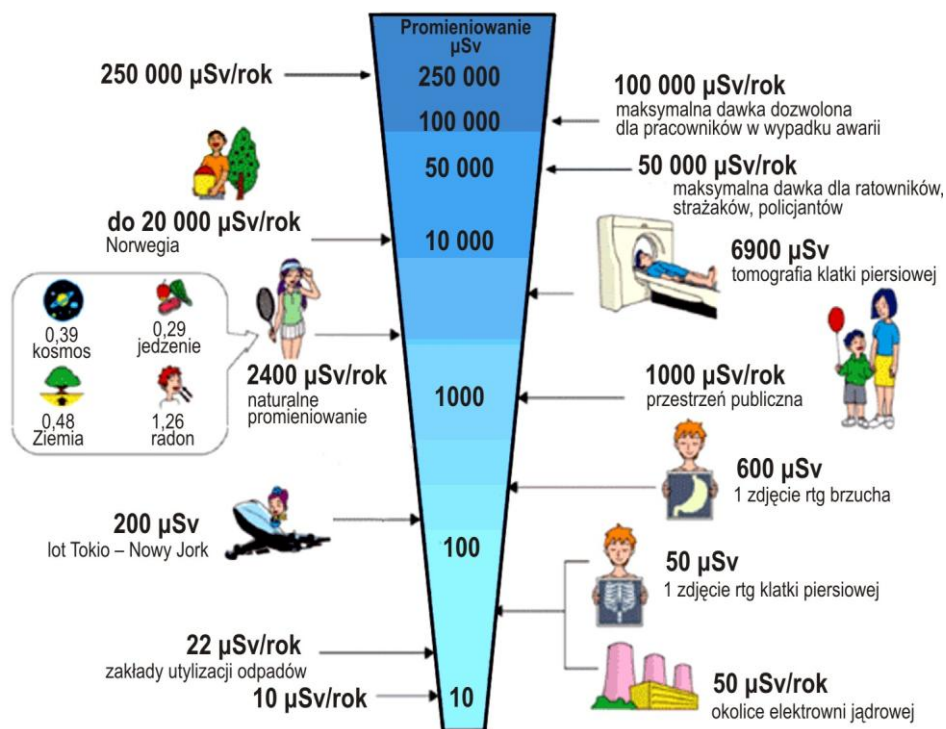
Rocznie w wyniku promieniowania kosmicznego otrzymujemy dawkę około 0,3 mSv, a wewnętrzne napromieniowanie z powodu zawartości w ciele potasu  $^{40}\text{K}$  wynosi około 0,2 mSv. Ze względu na promieniowanie kosmiczne podwyższenie dawki następuje także wraz z wysokością. Dlatego na przykład 10-godzinny lot samolotem na wysokości 11 kilometrów powoduje dodatkową dawkę wynoszącą około 0,02 mSv. Łącznie średnia dawka w Polsce w wyniku naturalnego napromieniowania wynosi około 2,3 mSv, co w ciągu całego życia daje około 200 mSv. Ale ponad 5% ludzkości żyje na terenach o wielokrotnie podwyższonej zawartości pierwiastków promieniotwórczych. Takie obszary rozrzucone są po Azji, Europie, Afryce i Ameryce. Na przykład w Norwegii naturalne promieniowanie wynosi w niektórych miejscach nawet 20 mSv na rok, a w Indiach w prowincji Kerali ze względu na złoża zawierające cer i lantan mieszkańcy otrzymują dawki kilkadziesiąt razy wyższe niż w Polsce. Można znaleźć nawet takie obszary, jak na przykład w mieście Ramsar w Iranie, gdzie lokalne dawki są 1000 razy większe niż przeciętnie ze względu na źródła wody zawierającej duże stężenie radu.

#### **IV. Dawki w wyniku diagnostyki medycznej**

Dodatkowo wiele osób jest napromieniowywanych za pomocą promieniowania rentgenowskiego lub w wyniku zastosowania izotopów promieniotwórczych w nowoczesnej diagnostyce medycznej. Podczas wykonywania zdjęć rentgenowskich otrzymujemy dawki w zakresie od 0,1 do kilku mSv. Na przykład zdjęcie klatki piersiowej powoduje dawkę około 0,1 mSv, a zdjęcia kręgosłupa czy prześwietlenia płuc wywołują dawki około 4 mSv. Większe dawki pacjenci otrzymują w badaniach wymagających podawania preparatów promieniotwórczych. W wysoko rozwiniętych krajach powszechnie stosuje się Pozytonową Tomografię Emisyjną. Jest to najbardziej skuteczna metoda diagnozowania nowotworów. Niestety, ze względu na wysokie koszty w Polsce działa dopiero kilka takich tomografów. Metoda ta bazuje na podawaniu pacjentowi cukru zawierającego promieniotwórczy fluor  $^{18}\text{F}$ . W trakcie badania, na kilka godzin, pacjent stanowi źródło promieniotwórcze emitujące około 200 000 000 promieni gamma na sekundę, otrzymując dawkę około 10 mSv. Czyli kilka razy więcej niż średnia dawka roczna na terenie Polski, ale jednocześnie kilka razy mniej niż dawki roczne na obszarach o podwyższonej radioaktywności. Podobne dawki, otrzymujemy w trakcie tomografii komputerowej, powszechnie stoso-

wanej także w Polsce. Mieszkaniec Polski z powodu diagnostyki medycznej otrzymuje średnio dawkę w wysokości 0,85 mSv.

### Przyjmowane dawki promieniowania jonizującego w życiu codziennym



Sv (sievert) = równoważna dawka napromieniowania  
 $\mu\text{Sv} = 10^{-6} \text{ Sv}$ ;  $\text{mSv} = 10^{-3} \text{ Sv}$

Ilustracja wykonana na podstawie [http://asset.soup.io/asset/1680/9547\\_8c75.gif](http://asset.soup.io/asset/1680/9547_8c75.gif)

### V. Przypomnienie efektu hormezy radiacyjnej

Nasze komórki są cały czas uszkodzane głównie na skutek reakcji chemicznych wywoływanych w organizmie przez wolne rodniki. Szacuje się, że w wyniku przemian metabolicznych w organizmie człowieka powstaje około  $10^9$  uszkodzeń na dzień, a układ immunologiczny musi sobie na bieżąco z nimi radzić. Warto podkreślić, że uszkodzenia wywoływane na skutek jonizacji naturalnym napromieniowaniem w dawkach około 3 mSv w ciągu roku są ponad  $10^5$  razy mniejsze. Jak niedawno opisaliśmy w *Fotonie* 110, okazuje się że promieniowanie jonizujące w małych dawkach pozytywnie pobudza układ immunolo-

giczny. Potwierdza to wiele doświadczeń wykonywanych na zwierzętach oraz obserwacja napromieniowanych ludzi. Na przykład systematyczne zestawienie danych z terapii pacjentek leczonych na gruźlicę za pomocą promieniowania jądrowego wykazało, że dla dawek rzędu 100 do 200 mSv szanse zachorowania na raka znacznie maleją. Zmniejszona śmiertelność i prawdopodobieństwo zachorowania na białaczkę została stwierdzona także wśród tych mieszkańców Hiroszimy i Nagasaki, którzy zostali napromieniowani dawkami w zakresie do 200 mSv. Z jednej strony wraz ze wzrostem dawki napromieniowania wzrasta liczba uszkodzeń DNA, ale z drugiej strony promieniowanie pobudza pozytywnie układ immunologiczny i w efekcie wpływ na organizm jest korzystny w zakresie dawek do 200 mSv. Należy zauważyć, że 200 mSv jest dawką prawie 100 razy przekraczającą średnią roczną dawkę promieniowania otrzymywaną przez ludzi na terenie Polski. W obliczu powyższych faktów nie ma powodów do wpadania w panikę jeśli, tak jak niedawno w Tokio, poziom promieniowania w ciągu tygodnia podniesie się 10 czy nawet 100 razy.

#### Literatura

- [1] A. Hrynkiewicz, *Dawki i działanie biologiczne promieniowania jonizującego*, Państwowa Agencja Atomistyki (1993).
- [2] A. Hrynkiewicz, *Promieniotwórczość naturalna w środowisku*, „Postępy Fizyki”, t. 44, z. 5, 439 (1993).
- [3] Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki, 2(42)/2000.
- [4] Z. Jaworski, *Dobroczynne promieniowanie*, „Wiedza i Życie”, 3/1997, 20–29.
- [5] L. Dobrzyński, *Hormeza – Zjawiska powszechnie znane i nieznanne*, <http://www.ipj.gov.pl/pl/szkolenia/matedu/hormeza.htm>.
- [6] K.W. Fornalski, L. Dobrzyński, *Pracownicy przemysłu jądrowego a promieniowanie jonizujące*, PTJ, vol. 52, z. 2, 29 (2009).





## Atometria jako metoda wykrywania substancji niebezpiecznych

Michał Silarski, Paweł Moskal  
Instytut Fizyki UJ

**Streszczenie.** W artykule zostaną przedstawione nowe metody wykrywania materiałów niebezpiecznych. Podstawę tych metod stanowi oddziaływanie neutronów z materią. Wiązka neutronów przechodząc przez substancję powoduje wzbudzenie jąder atomowych do wyższych stanów energetycznych. Jądra te przechodząc w stan podstawowy emitują kwanty  $\gamma$  o energii zależnej od rodzaju pierwiastka, toteż detekcja tego promieniowania umożliwia określenie względnej zawartości atomów różnych pierwiastków w badanej substancji. Dlatego – w odróżnieniu od powszechnie stosowanych metod – zastosowanie neutronów pozwala na określenie nie tylko kształtu, ale również stechiometrii badanych przedmiotów. Daje to możliwość wykrywania na przykład min lub nawet małych ilości materiałów niebezpiecznych ukrytych w pojazdach, bagażach, itp. Metoda ta, zwana *atometrią*, może stać się w niedalekiej przyszłości dobrą alternatywą lub uzupełnieniem dla stosowanych dotychczas technik, a jej potencjalne zastosowania obejmują również medycynę i przemysł.

**Słowa kluczowe:** Fizyka jądrowa, neutrony, atometria, wykrywanie materiałów niebezpiecznych

### 1. Wstęp

Stosowane obecnie metody wykrywania substancji niebezpiecznych są oparte przede wszystkim na wykorzystaniu promieniowania rentgenowskiego, analizie śladowych ilości substancji, metodach radarowych i detektorach indukcyjnych (wykrywacze metali). Dwie pierwsze metody stosowane są przede wszystkim w systemach bezpieczeństwa lotnisk, natomiast metody radarowe i indukcyjne wykorzystuje się do detekcji niewybuchów, niewypałów, min, itp. Badanie śladowych ilości substancji opiera się głównie na wykorzystaniu zwierząt (najczęściej psów) oraz spektrometrów ruchliwości jonów. Odpowiednio wytrenowane psy potrafią wyczuć nawet najmniejsze ślady materiałów wybuchowych lub narkotyków, jednak ich czas pracy jest mocno ograniczony. Ponadto nie mogą one pracować bez ciągłego nadzoru ze strony opiekuna interpretującego ich zachowanie i pomagającego podczas kontaktu z pasażerami. Sprawia to, że wykorzystanie psów na lotniskach jest stosunkowo drogie i nie daje pewności wykrycia potencjalnego zamachowca lub przemytnika. W odróżnieniu od zwierząt spektrometry ruchliwości jonów pozwalają na przeskanowanie każdego pasażera. Przechodzi on przez odpowiednio przygotowaną komorę, która pobiera, analizuje i identyfikuje śladowe ilości substancji pozostających na ciele i ubraniu człowieka. Do pobierania próbek wykorzystuje się powietrze „zdmuchujące” cząsteczki substancji lub ciepło ciała powodujące ich odparowanie. Śladów materiałów niebezpiecznych można poszukiwać również na przedmio-

tach mających kontakt z dłońmi pasażera (np. dokumenty, karta pokładowa, itp.). Opisanie wyżej metody zabezpieczeń nie umożliwiają jednak bezpośredniego wykrycia materiałów niebezpiecznych, a tylko wskazują, że pasażer miał z nimi kontakt, co może prowadzić do fałszywych alarmów w przypadku osób zawodowo zajmujących się np. materiałami wybuchowymi. Poza tym metody te zawodzą w przypadku najnowszych narkotyków czy materiałów wybuchowych o małej lotności.

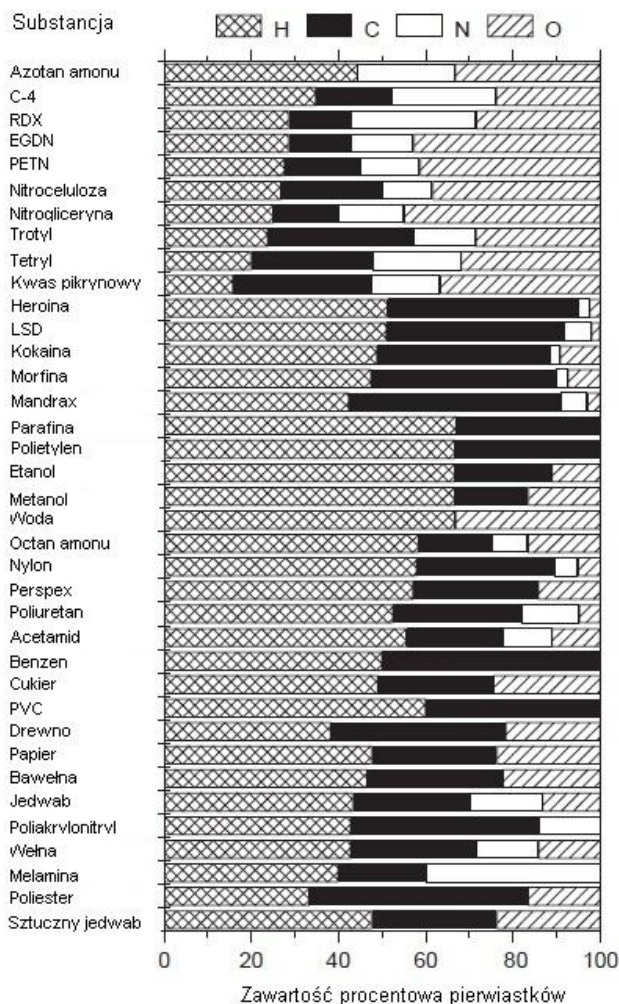
W systemach zabezpieczeń powszechnie stosowane są również skanery promieniowania rentgenowskiego, których technologia wytwarzania jest dobrze rozwinięta i stosunkowo tania. Wykorzystują one procesy oddziaływania promieniowania X z elektronami i pozwalają na określenie rozkładu gęstości i kształtów badanych przedmiotów. Na ich podstawie podejmuje się decyzje, czy skanowane przedmioty zawierają potencjalnie groźne związki. Napotykamy tu na istotne ograniczenia spowodowane małym prawdopodobieństwem oddziaływania promieniowania X z pierwiastkami lekkimi, takimi jak azot, tlen, wodór czy węgiel, z których zbudowana jest większość materiałów wybuchowych i narkotyków. Ponadto nowoczesnym materiałom wybuchowym można nadać w zasadzie dowolny kształt, co praktycznie uniemożliwia ich wykrycie [1].

W praktyce wojskowej i antyterrorystycznej do wykrywania ukrytych ładunków wybuchowych (niewybuchy, miny, pozostałości wojenne, itp.) stosuje się przede wszystkim bardzo czułe wykrywacze metali i georadary. Niestety pozwalają one jedynie na wykrycie obecności elementów metalowych lub określenie kształtu obiektów pod powierzchnią gruntu. Dlatego detekcja każdego podejrzanego przedmiotu wymaga dodatkowego sprawdzenia przez człowieka. Metody te charakteryzują się również wysoką liczbą fałszywych alarmów i mogą zawodzić w przypadku np. min z obudowami kompozytowymi.

Ograniczenia opisanych wyżej metod oraz rosnące zapotrzebowanie na mobilne urządzenia pozwalające na efektywne rozminowywanie skłaniają do poszukiwania alternatywnych sposobów wykrywania materiałów niebezpiecznych. Jedną z najbardziej obiecujących metod jest *atometria*, polegająca na analizie stechiometrii (składu chemicznego) badanej substancji za pomocą wiązek neutronów [1,2].

## **2. Wykrywanie materiałów niebezpiecznych z wykorzystaniem neutronów**

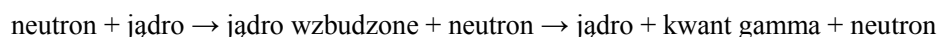
Zdecydowana większość substancji niebezpiecznych to związki organiczne lub ich mieszaniny. Zbudowane są one więc przede wszystkim z wodoru, tlenu, węgla i azotu. Jak widać na rys. 1, cechą charakterystyczną materiałów wybuchowych jest stosunkowo duża zawartość azotu i tlenu, natomiast narkotyki bogate są w wodór i węgiel. Ponadto skład pierwiastkowy tych substancji różni się od składu materiałów stosowanych powszechnie w przemyśle i w życiu codziennym [1].

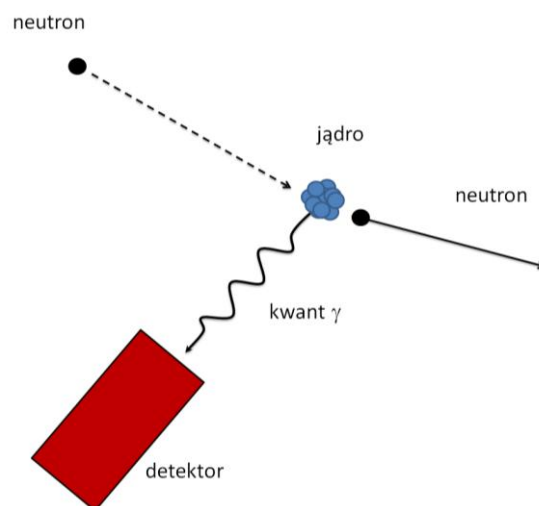


Rys. 1. Skład pierwiastkowy niektórych substancji (zaadaptowano z artykułu [1])

Cechy te pozwalają na odróżnienie materiałów wybuchowych lub narkotyków ukrytych wśród innych substancji podczas analizy stechiometrycznej podejrzanych przedmiotów.

Jak już wspomniano, analizę taką można przeprowadzić za pomocą wiązek neutronów. Cząstki te są pochłaniane lub rozpraszane niesprężyście na jądrach atomowych badanego przedmiotu, co powoduje wzbudzenie jąder np. w reakcji:





Rys. 2. Schemat ilustrujący oddziaływanie neutronów z materiają badanego przedmiotu

Jądra te przechodząc do stanu podstawowego wysyłają kwanty gamma, których energia zależy od rodzaju jądra. Kwanty te można rejestrować np. za pomocą detektorów półprzewodnikowych. Uwzględniając prawdopodobieństwo oddziaływania neutronów z różnymi jądrami oraz wydajność detektora na rejestrację kwantów gamma o danej energii otrzymujemy liczby atomów pierwiastków budujących badany obiekt. Jednoznaczne informacje o stechiometrii dostaje się dopiero po unormowaniu otrzymanych liczb do zawartości jednego z pierwiastków, np. tlenu. I tak np. dla heksogenu stosunek liczb atomów węgla, azotu i wodoru do liczby atomów tlenu wynosi: C : N : O : H = 0,5 : 1 : 1 : 1 (tab. 1).

Tabela 1. Stosunki liczb atomów węgla, azotu i wodoru do liczby atomów tlenu w cząsteczkach niektórych substancji niebezpiecznych

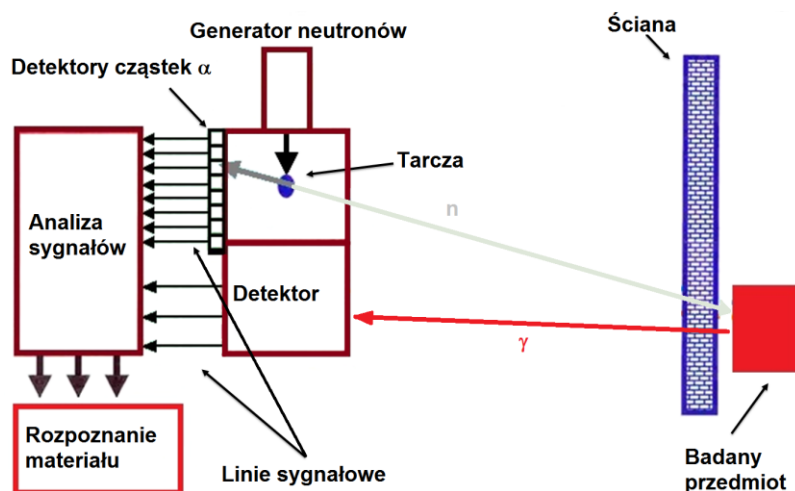
Substancja	Wzór sumaryczny	Stosunek C : N : O : H
Trotyl	$C_7H_5N_3O_6$	1,2 : 0,5 : 1 : 0,8
Tetryl	$C_7H_5N_5O_8$	0,9 : 0,6 : 1 : 0,6
Heksogen	$C_3H_6N_6O_6$	0,5 : 1 : 1 : 1
Kokaina	$C_{17}H_{21}NO_4$	4,25 : 0,25 : 1 : 5,25
Heroina	$C_{21}H_{23}NO_5$	4,2 : 0,2 : 1 : 4,6

Ważną zaletą tej metody jest duża przenikliwość zarówno neutronów jak i kwantów  $\gamma$ , pozwalająca na poszukiwanie materiałów niebezpiecznych ukrytych pod ziemią, za przeszkodą, itp. Ponadto, jak wspomniano wcześniej, skład

pierwiastkowy materiałów wybuchowych lub narkotyków pozwala na odróżnienie ich od nieszkodliwych substancji organicznych. Sprawia to, że atometria jest jak dotąd jedyną metodą pozwalającą na bezinwazyjne wykrywanie i identyfikację materiałów niebezpiecznych.

Z wielu procesów oddziaływania neutronów z materią najbardziej odpowiednie dla atometrii okazało się rozpraszanie niesprężyste, choć inne procesy, jak np. aktywacja termicznymi neutronami mogą być wykorzystywane w konkretnych zastosowaniach jako procesy pomocnicze [1, 2]. Badany obiekt naświetlany jest wiązką szybkich neutronów, które rozpraszają się niesprężysto na jądrach atomowych, wzbudzając je. Rejestrowane są jednocześnie kwanty  $\gamma$  pochodzące od jąder  $^{12}\text{C}$  (energia 4,43 MeV),  $^{16}\text{O}$  (energia 6,13 MeV) oraz  $^{14}\text{N}$  (energii 2,31 MeV i 5,11 MeV) [1].

Schemat urządzenia wykorzystującego atometrię do wykrywania materiałów wybuchowych został przedstawiony na rys. 3. Neutrony produkowane są przez generator [4] w zderzeniach jąder deuteru i tarczy trytowej w reakcji:  $\text{D} + \text{T} \rightarrow \alpha + \text{n}$ . Ze względu na znacznie większą energię uwalnianą w tej reakcji w porównaniu z energią deuteru, zarówno cząstka  $\alpha$  jak i neutron produkowane są praktycznie izotropowo w każdym kierunku w przestrzeni. Stwarza to istotne trudności w pomiarach ze względu na produkcję kwantów gamma pochodzących od oddziaływania z otoczeniem, które stanowią dla nich tło.



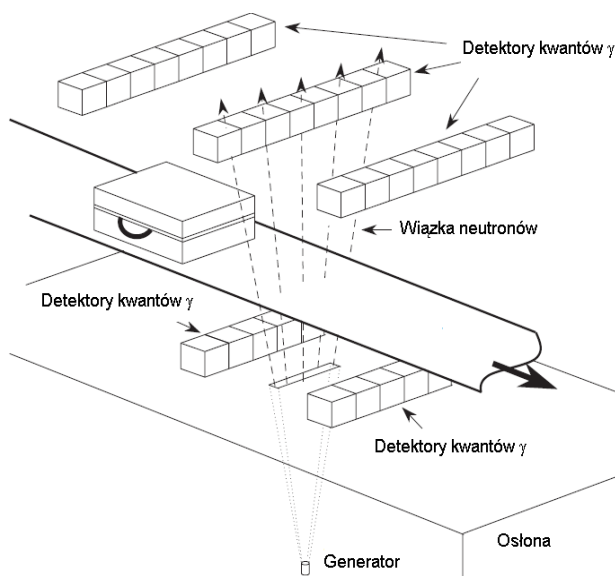
Rys. 3. Schemat wykrywacza materiałów niebezpiecznych opartego na atometrii (zaadaptowany z prezentacji [5])

Może być ono znacznie zmniejszone poprzez określenie kierunku emisji cząstki  $\alpha$ . Wykorzystuje się w tym celu pomiary położenia cząstki  $\alpha$  w detektorze umieszczonym wewnątrz generatora (rys. 3). Położenie to wraz ze znanym po-

łożeniem tarczy daje zarówno kierunek ruchu cząstki  $\alpha$  jak i neutronu (ze względu na kinematykę reakcji jest on emitowany w przeciwnym kierunku). Pozwala to na wybranie wiązki neutronów padającej na badany przedmiot poprzez pomiar kwantów gamma w koincydencji z rejestrowaną cząstką  $\alpha$ . Dodatkowy pomiar czasu przelotu kwantów  $\gamma$  pozwala na określenie tomograficznego obrazu składu chemicznego substancji [6]. Sygnały z obu detektorów analizowane są przy użyciu specjalnie zaprojektowanych algorytmów, które rekonstruują względną zawartość pierwiastkową i prowadząc analizę statystyczną decydują, czy badany obiekt zawiera materiały niebezpieczne.

### 3. Zastosowanie atometrii w systemach zabezpieczeń oraz ruchomych wykrywaczach materiałów wybuchowych

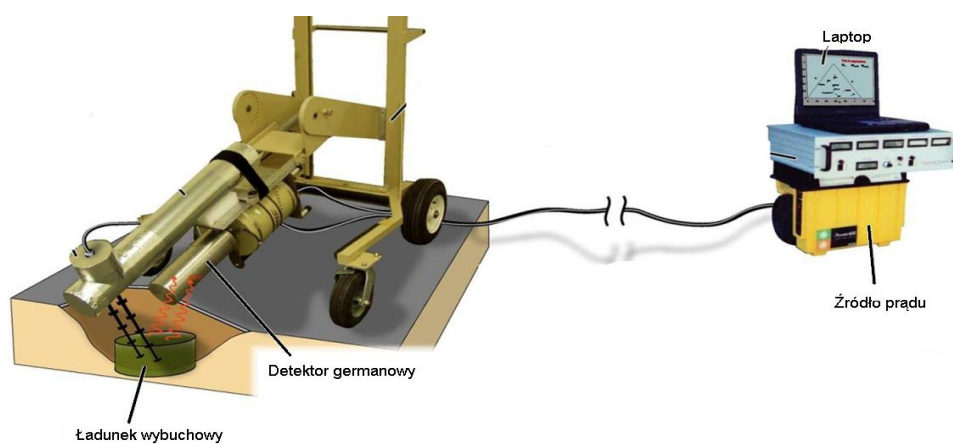
W systemach zabezpieczeń lotnisk, urzędów itp. urządzenia wykorzystujące neutrony mogłyby być zbudowane analogicznie do powszechnie używanych skanerów promieniowania X. Schemat takiego urządzenia przedstawiono na rys. 4. Przedmioty podlegające kontroli transportowane są za pomocą taśmociągu do komory odizolowanej od otoczenia grubymi osłonami. Następnie są one naświetlane szybkimi neutronami, a układ detektorów otaczających komorę rejestruje wysyłane przez jądra atomowe kwanty gamma. Oprócz niesprężystego rozpraszania neutronów można wykorzystać tu dodatkowo metodę aktywacji termicznymi neutronami oraz pomiary osłabienia wiązki przechodzącej przez badany przedmiot.



Rys. 4. Schemat skanera neutronowego zintegrowanego z systemem zabezpieczeń lotniska (zadaptowano z artykułu [1])

Napotyka tu na dwa zasadnicze problemy. Po pierwsze podczas kontroli na lotniskach czas skanowania bagażu nie może istotnie wydłużać odprawy pasażerów. Powoduje to, że stosowane generatory muszą produkować wiązki o dużych natężeniach, co wymusza z kolei budowę grubych osłon przeciw promieniowaniu, zwiększając istotnie rozmiary i masę skanera. Dlatego nie ma pewności, czy w przyszłości metody wykorzystujące neutrony będą mogły zastąpić całkowicie skanery promieniowania X, czy staną się drugim stopniem zabezpieczeń. Są one natomiast wyśmienite do wykrywania przemytu materiałów wybuchowych, narkotyków czy broni chemicznej, gdzie czas skanowania nie gra kluczowej roli. Dużą zaletą skanerów neutronowych w tym przypadku jest możliwość inspekcji całych kontenerów czy samochodów ciężarowych i wykrywanie nawet niewielkich ilości tych substancji.

W zastosowaniach wojskowych i antyterrorystycznych do rozminowywania terenu oraz wykrywania bomb najważniejsza jest mobilność skanera. Musi on więc mieć niewielką masę i rozmiary. Zastosować tu można kompaktowe generatory neutronów o niewielkiej masie i detektory półprzewodnikowe. Całość może być umieszczona na specjalnie zaprojektowanej zdalnie sterowanej platformie lub robocie (rys. 5). Pozwala to na wykrywanie ładunków wybuchowych bez narażania życia i zdrowia sapersa dokonującego np. rozminowania. Skanery neutronowe można umieścić również na pojazdach, lecz powstaje wtedy istotny problem z ochroną załogi przed szkodliwymi skutkami napromieniowania neutronami.



Rys. 5. Przykład konstrukcji mobilnego wykrywacza materiałów niebezpiecznych (zaadaptowano z [5])

#### 4. Podsumowanie

Atomometria jest obecnie jedyną metodą pozwalającą na bezinwazyjne określenie stechiometrii substancji i ma olbrzymi potencjał zastosowań. Poza wykrywaniem materiałów niebezpiecznych, przemytu lub ataków terrorystycznych atomometria może być stosowana także w geologii i przemyśle (analiza składu chemicznego skał, kopalni, itp.). Jak dotychczas nie jest to jednak metoda stosowana powszechnie, a urządzenia ją stosujące produkowane są tylko w Stanach Zjednoczonych.

#### Literatura

- [1] A. Buffler, *Contraband detection with fast neutrons*, Rad. Phys. Chem., **71** (2004), 853–861.
- [2] B.C. Maglich, *Birth of „Atomometry” – Particle Physics Applied To Saving Human Lives*, AIP Conf. Proc. **796**, (2005), 431–438.
- [3] E.H. Seabury, A.J. Caffrey, *Explosives Detection and Identification by PGNAA*, Idaho National Laboratory technical report nr INL/EXT-06-01210 (2010).
- [4] W.C. Lee, D.B. Mahood, P. Ryge, P. Shea, T. Gozani, *Thermal neutron analysis (TNA) explosive detection based on electronic neutron generators*, Nucl. Instrum. Methods **B 99** (1995), 739–742.
- [5] B.C. Maglich, *Birth of „Atomometry” – Particle Physics Applied To Saving Human Lives*, prezentacja na konferencji LEAP 2005, Bonn-Jülich, Niemcy (<http://www.fz-juelich.de/leap05/talks> )
- [6] R. Loveman, J. Bendahan, T. Gozani, J. Stevenson, *Time of flight fast neutron radiography*, Nucl. Instrum. Methods **B 99** (1995), 765–768.





## Oglądanie świata w nanoskali – mikroskop STM

*Szymon Godlewski*

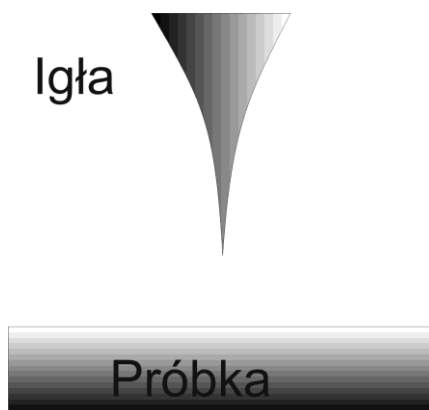
*Instytut Fizyki UJ*

Od zarania dziejów człowiek przejawiał wielką ciekawość otaczającego go świata. Prowadził obserwacje najpierw za pomocą zmysłów, którymi dysponował, a później w miarę rozwoju dostępnej techniki konstruował coraz to nowe przyrządy, które pomagały mu „podglądać” coraz dokładniej otaczającą go materię. W obserwacji i badaniach świata ogromną – jeśli nie największą – rolę odegrał wzrok. Z tego powodu, gdy wyczerpały się możliwości obserwacji gołym okiem, skonstruowano lupę, a później, zestawiając kilka soczewek w jeden układ, mikroskopy optyczne, które dały możliwość zagłębienia w mikroświat. Jednak metody optyczne nie dają nieograniczonych możliwości uzyskiwania powiększenia obserwowanej materii, co jak dobrze wiemy, ma źródło w ograniczeniach natury dyfrakcyjnej. W miarę rozwoju nowoczesnej fizyki, w tym przede wszystkim mechaniki kwantowej, zauważono, że można do obserwacji bardzo małych struktur zastosować nie tylko fale elektromagnetyczne, ale również fale materii. Tak powstały między innymi mikroskopy elektronowe, w których za powstający „obraz” badanego obiektu odpowiadają szybko poruszające się elektrony. Dzięki temu możliwe stało się uzyskiwanie zdolności rozdzielczych na poziomie nanometrów. Ciągły rozwój wielu dziedzin nauki i techniki, jak np. inżynieria materiałowa, elektronika, czy też inżynieria biomedyczna, stwarzały niezaspokojone zapotrzebowanie na uzyskiwanie obrazów struktury powierzchni badanych obiektów o coraz wyższej rozdzielczości, aż do atomowej włącznie.

Przełom w badaniach nastąpił na początku lat 80. XX wieku, gdy dwóch pracowników działu rozwoju firmy IBM w Zurychu, Gerd Binnig i Heinrich Rohrer, skonstruowało pierwszy skaningowy mikroskop tunelowy. Co ciekawe, idea działania takiego urządzenia opierająca się na dobrze znanym już od dziesięcioleci zjawisku tunelowym nie jest wcale nowa. Zadziwiające, że pierwszy mikroskop tunelowy został skonstruowany tak późno. Wiązało się to jednak nie tyle z niezajomością zjawiska, na którym opiera się zasada jego działania, co z ograniczeniami natury technicznej. O doniosłości znaczenia wynalazku świadczą może fakt, że wynalazcy uhonorowani zostali nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki w roku 1986. Jako że mikroskop tunelowy stał się w ostatnich latach niezwykle popularnym narzędziem do badania struktury powierzchni, warto pokrótce omówić jego działanie. Zanim przejdziemy do omawiania podstaw fizycznych działania tego urządzenia warto jeszcze zaznaczyć, że nazwa mikroskop może być nieco myląca. Zazwyczaj kojarzy się ona z obrazami uzyskiwa-

nymi metodami optycznymi, tymczasem w mikroskopie STM „obraz” badanej struktury otrzymuje się analizując oddziaływanie mikroskopu z badaną powierzchnią, a dokładniej – przepływający prąd tunelowy, co nie ma żadnego związku z optyką. Nazwę mikroskop należy zatem w tym przypadku utożsamiać z możliwością uzyskania bardzo dokładnej informacji (mapy przestrzennej) o strukturze atomowej czy też elektronowej badanej powierzchni i nie należy utożsamiać jej z zasadami działania mikroskopów optycznych.

Zasadniczy element mikroskopu tunelowego stanowi atomowo ostra igła wykonana z metalu, którą utrzymuje się w bardzo małej odległości, rzędu kilku angstrémów ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ) od powierzchni badanego podłoża (rys. 1).



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie mikroskopu tunelowego (STM)

By umożliwić tak precyzyjne usytuowanie igły i próbki względem siebie, jeden z elementów przytwierdza się sztywno do stelaża mikroskopu, a drugi montuje na bardzo czułych elementach piezoelektrycznych. Dzięki temu, przykładając odpowiednie różnice potencjałów do piezoelementów, można kontrolować ich długość, a zatem i wzajemną odległość igły od próbki. Całość montuje się następnie na wspornikach, które izolowane są od zewnętrznych drgań mechanicznych przy użyciu specjalnych sprężyn tłumiących.

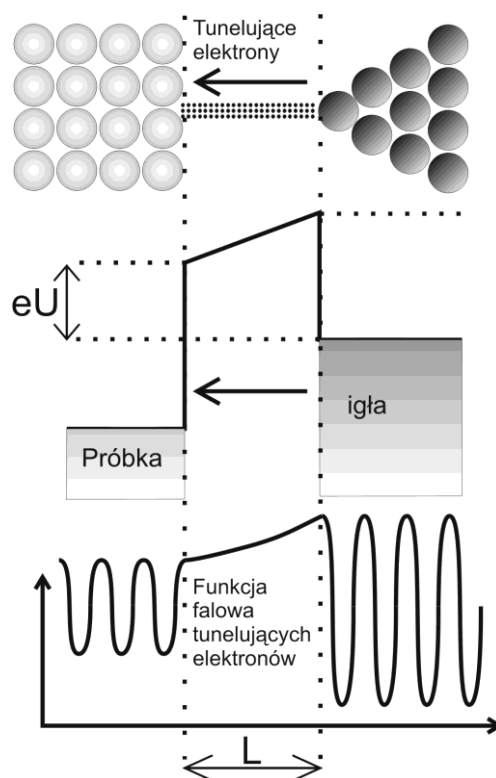
Zasada działania mikroskopu tunelowego opiera się na zjawisku tunelowym. Pomiedzy igłą mikroskopu, a próbkę przykładają się różnice potencjałów rzędu 1V. Ponieważ próbka i igła nie pozostają w kontakcie, to elektrony napotykają na barierę potencjału i nie mogą w klasyczny sposób przemieszczać się między igłą i próbką. Jednakże w myśl mechaniki kwantowej możliwe jest „przenikanie” cząstek przez taką barierę, tj. w naszym przypadku między igłą i próbką, jeżeli tylko znajdą się one dostatecznie blisko siebie. Zjawisko takie nazywamy zjawiskiem tunelowym. Jeżeli zatem między igłą i próbką znajdujące się w odległości rzędu kilku  $\text{\AA}$  przyłożymy różnicę potencjałów, to od igły do próbki tunelować będą elektrony tworząc prąd tunelowy. Przyjrzyjmy się nieco

blżej zjawisku tunelowania elektronów w mikroskopie (rys. 2). W najprostszym ujęciu barierę potencjału między próbką i igłą można zastąpić barierą prostokątną, co pozwala rozwiązać zagadnienie w sposób analityczny. Nie będziemy się w tym miejscu wdawać w szczegóły rozwiązania, które nie będą nam zresztą potrzebne. Zwrócimy jedynie uwagę na istotne wnioski, jakie z niego wynikają. Przede wszystkim okazuje się, że zależność natężenia  $I$  prądu tunelowego od szerokości  $L$  bariery, a więc odległości igła-próbka jest niezwykle silna. Mówiąc dokładniej spełnia zależność:

$$I \approx \exp(-2\kappa L)$$

gdzie  $\kappa$  jest stałą zaniku prądu tunelowego, mówiącą jak szybko maleje prąd tunelowy przy oddalaniu ostrza od próbki.

Oznacza to, że wartość prądu tunelowego bardzo szybko, bo wykładniczo maleje wraz ze wzrostem odległości próbki od igły. Przy zmianie tej odległości o wartość odpowiadającą 1 Å natężenie prądu może zmienić się o rząd wielkości. To właśnie jest źródłem możliwości osiągnięcia niewiarygodnie wysokiej pionowej zdolności rozdzielczej przez mikroskop STM.

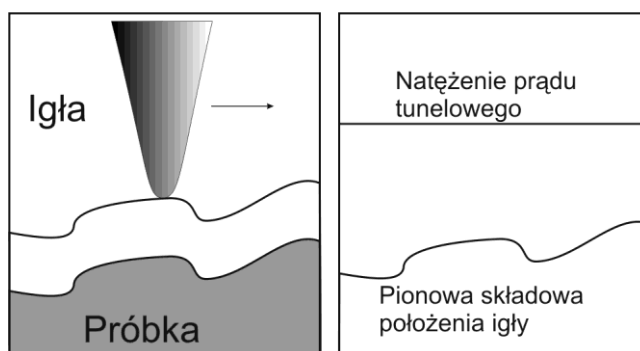


Rys. 2. Schemat procesu tunelowania elektronów pomiędzy igłą i próbką

Zasadniczo wyróżnia się dwa podstawowe tryby pracy mikroskopu:

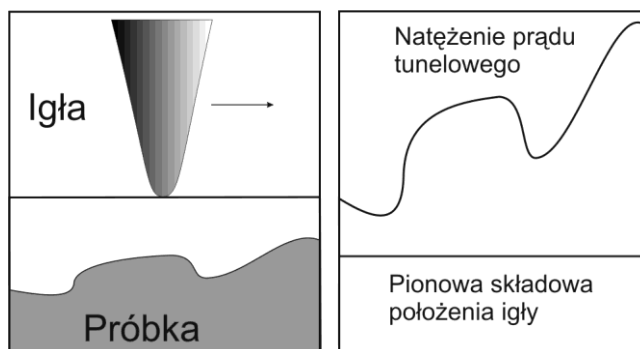
- tryb stałego oddziaływania,
- tryb stałej wysokości.

W trybie stałego oddziaływania dzięki wykorzystaniu układu sprzężenia zwrotnego utrzymywane jest stałe natężenie prądu tunelowego między igłą a próbką. Dzieje się tak dzięki odpowiedniemu doborowi wysokości ostrza nad powierzchnią, tak by natężenie prądu nie zmieniało się. Obraz powierzchni uzyskuje się przesuwając igłę ponad powierzchnią i rejestrując odległość igły od powierzchni w każdym punkcie. Pracę w tym trybie przedstawia rysunek 3.



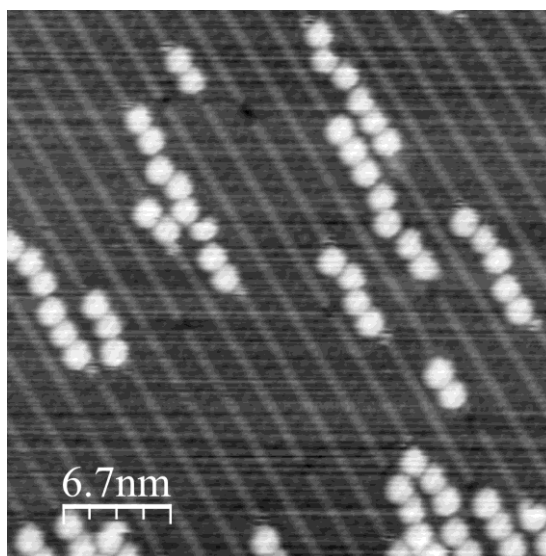
Rys. 3. Mikroskop STM pracujący w trybie stałego prądu

W trybie stałej wysokości niezmienna pozostaje odległość igły od powierzchni, zmienia się natomiast natężenie prądu tunelowego. Tym razem wielkością niosącą informację o podłożu jest wartość natężenia prądu tunelowego rejestrowana dla poszczególnych punktów położenia igły. Pracę mikroskopu w tym trybie przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Mikroskop STM pracujący w trybie stałej wysokości

Na rys. 5 przedstawiony jest obraz łańcuchów zbudowanych z molekuł PTCDA (di-bezwodnik-perylenu-3,4,9,10-tetra-karboksyłowy) na półprzewodnikowej powierzchni antymonku indu uzyskany w Zakładzie Fizyki Nanostruktur i Nanotechnologii Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego.



Rys. 5. Obraz STM łańcuchów zbudowanych z molekuł PTCDA na powierzchni antymonku indu

W okresie ostatnich dwudziestu lat mikroskop tunelowy stał się jednym z najczęściej używanych narzędzi w fizyce powierzchni pozwalając nie tylko obrazować niezwykle małe struktury, ale również dając wgląd w ich własności elektronowe na poziomie pojedynczych orbitali atomowych, bądź molekularnych. Ponadto rozwój technik mikroskopowych pozwolił na wykonywanie kontrolowanego przemieszczania (manipulacji) atomów i molekuł na badanych powierzchniach przy użyciu mikroskopu STM, jest to jednak już temat na osobne opracowanie.



## Maszynki do fraktali

*Studenci: Marcin Figiel, Tomasz Sabala*  
*Pod opieką prof. dr. hab. Macieja A. Nowaka*  
*Instytut Fizyki UJ*

### 1. Wstęp

W poprzednim numerze (*Foton 111*) znalazł się artykuł pt. *Fraktale*, w którym na prostych przykładach przedstawiliśmy zagadnienie samopodobieństwa, ułamkowego wymiaru oraz zbiorów Julii. Czytelnikom niezaznajomionym z tymi tematami gorąco polecamy lekturę wspomnianego artykułu, którego ten tekst jest kontynuacją. Z jego treścią można zapoznać się także w Internecie (link podany na końcu artykułu).

Wszystko, co mówimy, jest zakodowane językiem, którego używamy. Składa się on z abstrakcyjnych pojęć określających przedmioty, czynności czy cechy. Pojedyncze pojęcia składają się w większe grupy tworzące zdania, które niosą ze sobą więcej treści niż pojedyncze słowo. Okazuje się, że fraktale także można zapisać za pomocą „słów” – prostych instrukcji, których zestawienie daje zaskakujący efekt w postaci skomplikowanej matematycznej struktury. Do takiej konstrukcji może służyć abstrakcyjne pojęcie wirtualnej maszyny zwanej MRCM (*multiple reduction copy machine* – maszyna wielokrotnie redukująca i kopiująca), czyli tytułowa maszynka do fraktali.

### 2. Czym jest MRCM?

Wyobraźmy sobie jakąś maszynę. Aby mogła ona pracować, trzeba jej dostarczyć materiału, nasza maszyna będzie działać na obrazkach. Nad tym materiałem ma ona wykonać konkretne czynności, a na koniec zwraca „obrobiony” materiał. Jeżeli dołożymy sprzężenie zwrotne, to otrzymamy maszynę, która działa w nieskończoność „obrabiając” to, co już „obrobiła”. Mamy teraz maszynę działającą w cyklu. Teraz przyjrzyjmy się jej działaniu. Załóżmy, że nasza maszyna pomniejsza to, co do niej wrzucamy (choć dozwolone są wszystkie transformacje afiniczne – skalowanie, obrót, odbicie, jednokładne odwzorowania itp.).

Jeżeli dodatkowo założymy, że wynik składa się z wielu pomniejszonych kopii obrazka początkowego, otrzymamy właśnie MRCM. MRCM można odnieść w matematyce do deterministycznych iterowanych układów funkcji (*deterministic iterated function systems* – IFS). Każda taka maszyna charakteryzuje się tym, ile tworzy kopii obrazka wejściowego, jak bardzo pomniejszona lub przekształcona jest każda z kopii oraz jak poukładane są kopie tworząc ostateczny obrazek.

## 2.1. Transformacje afiniczne

W tym miejscu warto wspomnieć, czym dokładnie są transformacje afiniczne. Wiemy, że nasza maszyna może dokonywać skalowania, obrotów, odbić oraz odwzorowań jednokładnych. Nasza MRCM pracuje na płaskich obrazkach, podzbiorach płaszczyzny. Taka płaszczyzna może być opisana za pomocą kartezjańskiego układu współrzędnych: dobrze znanych osi  $x$  oraz  $y$ . Położenie każdego punktu  $P$  płaszczyzny możemy określić względem początku układu podając jego współrzędne:  $P = (x_p, y_p)$ . Takie punkty można dodawać lub mnożyć przez skalar (liczbę). Przy dodaniu punktów  $P_1 = (x_1, y_1)$  i  $P_2 = (x_2, y_2)$  powstanie punkt  $P_3 = (x_1 + x_2, y_1 + y_2)$ . A jeżeli pomnożymy punkt  $P_1$  przez liczbę  $b$  to otrzymamy punkt  $P_4 = (bx_1, by_1)$ . Co jednak najbardziej interesuje nas w tej dziedzinie, to odwzorowania afiniczne. Odwzorowania te przekształcają jedne punkty płaszczyzny w inne. Są one liniowe, czyli dla każdego punktu  $P_1$  oraz  $P_2$ , na które działa odwzorowanie  $F$  oraz liczb  $p$  i  $q$  prawdziwe jest równanie:  $F(pP_1 + qP_2) = pF(P_1) + qF(P_2)$ . Transformacje, które wykonuje nasza maszyna, można zapisać w języku takich właśnie odwzorowań. Załóżmy, że mamy punkt  $P = (x, y)$ , który przekształcany jest w punkt  $F(P) = (u, v)$ . Wtedy możemy zapisać:

$$u = ax + by + c$$

$$v = dx + ey + f$$

Takie odwzorowanie jest zdefiniowane przez 6 liczb  $a, b, c, d, e, f$ . Za obroty, skalowania i tego typu przekształcenia odpowiedzialne są współczynniki  $a, b, c, d$ , natomiast pozostałe dwa za translację (przesunięcie).

## 2.2. Cechy MRCM

Wyobraźmy sobie maszynę, która pobiera obrazek początkowy, pomniejsza go 2 razy i umieszcza 3 kopie w wierzchołkach trójkąta równobocznego. Weźmy za obrazek początkowy:



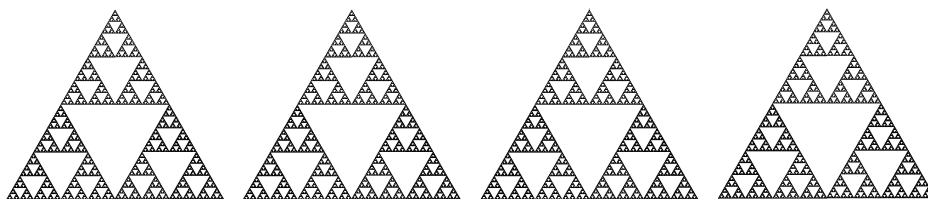
Rys. 1. Przykładowy obrazek początkowy

W wyniku działania maszyny otrzymamy:



Rys. 2. Pierwsze kroki działania maszyny na naszej róży

Po trzech cyklach działania maszyny widzimy coś zbliżonego do trójkąta Sierpińskiego. Zobaczmy, co się stanie, gdy użyjemy właśnie jego jako obrazka początkowego:



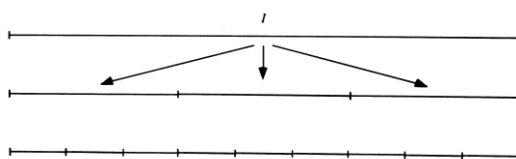
Rys. 3. Działanie maszyny nad trójkątem Sierpińskiego

Dana maszyna działająca na trójkąt Sierpińskiego nic nie zmieniła. Taki obrazek, do którego dąży maszyna niezależnie od obrazka na wejściu, nazywamy atraktorem. Do jednego atraktora może jednak dążyć wiele maszyn. Dodatkowo dana maszyna daje taki sam wynik niezależnie od wejściowego obrazka. To fascynujące, że nieważne, co wrzucimy do naszej maszyny, i tak otrzymamy taki sam wynik. Wyobraźmy sobie, że chcielibyśmy poznać sposób działania jakiejś konkretnej maszyny MRCM. W takim wypadku wystarczy uruchomić maszynę tylko raz: jeden cykl zdradzi nam wszystkie przekształcenia, które dokonywane są nad wejściowym obrazkiem. Oczywiście musimy wybrać kształt na tyle dowolny, by dało się zauważyć wszystkie przekształcenia afiniczne, bowiem wybierając przykładowo kwadrat nie dałoby się zauważyć np. odbicia lustrzanego czy obrotu o  $90^\circ$ . Sposób przekształcenia wejściowego obrazka przez MRCM nazwiemy schematem. Okazuje się, że przy użyciu MRCM można tworzyć nie tylko fraktale, ale różne inne struktury. Jednak ich opis przy użyciu tej metody wcale nie jest prostszy od innych, więc nie poświęca się temu dużo uwagi.



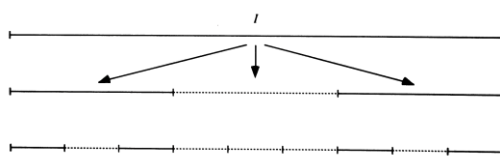
### 2.3. Konstrukcje fraktali

Teraz pokażemy, jak za pomocą deterministycznych iterowanych funkcji (które, jak już powiedzieliśmy, są matematycznym odpowiednikiem MRCM) konstruować znany nam już zbiór Cantora oraz dywan Sierpińskiego. Weźmy odcinek o długości 1. Niech nasza funkcja transformuje go zgodnie ze schematem:



Rys. 4. Przekształcenie odcinka w identyczny odcinek

Uzyskana transformacja nie jest zbyt ciekawa, zmienia odcinek w odcinek o tej samej długości. Jednak wystarczy „wyrzucić” środkową część, aby po kilku iteracjach otrzymać charakterystyczne punkty zbioru Cantora, według schematu:



Rys. 5. Przekształcenie odcinka w zbiór Cantora

Wynik działania możemy obejrzeć na poniższym obrazku:

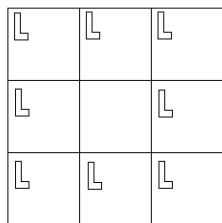


Rys. 6. Kolejne etapy powstawania zbioru Cantora

Chcąc zapisać te transformacje w języku MRCM musielibyśmy tylko ustalić, że obrazek początkowy skalujemy do  $1/3$  wielkości i umieszczamy na środku przeciwległych końców obrazka wynikowego.

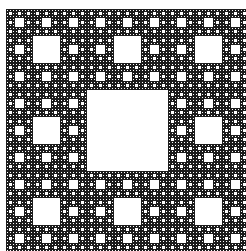
Skonstruujmy teraz dywan Sierpińskiego. Zróbmy schemat działania takiej funkcji. Niech bierze ona obrazek wejściowy, skaluje go do  $1/9$  początkowej

wielkości (powierzchni) i umieszcza 9 kopii tak, aby na siebie nie zachodziły. Schemat wygląda tak:



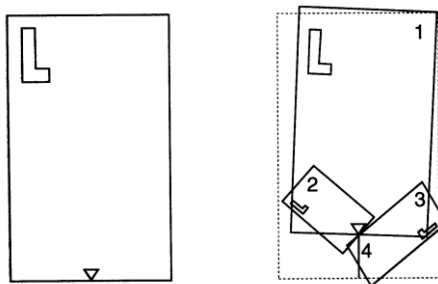
Rys. 7. Schemat działania maszyny. Pola z literką L to kopie rysunku wejściowego

Teraz usuńmy tę część, która znajduje się w środku. Jeżeli przeprowadzimy odpowiednio wiele iteracji, to otrzymamy taki kształt:



Rys. 8. Dywan Sierpińskiego

Co ciekawe, bardzo prosto można stworzyć na pierwszy rzut oka skomplikowane twory, takie jak paproć Barnsleya. Jest ona zakodowana za pomocą tylko czterech przekształceń, którym odpowiadają na poniższym schemacie kopie obrazka po lewej, oznaczone cyframi 1, 2, 3, 4. Transformacja 4 to przekształcenie wejściowego obrazka w kształt bliski odcinkowi. Transformacje zaś 1, 2 oraz 3 to proste translacje, obroty i przeskalowania, a w przypadku 3 obrazek został również rozciągnięty.



Rys. 9. Schemat przekształceń, dzięki którym otrzymamy paproć Barnsleya

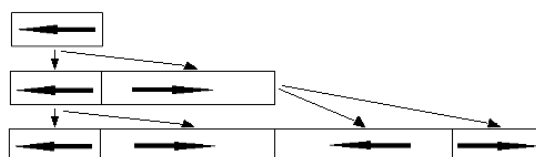
Kompletna paproć przedstawia się następująco:



Rys. 10. Gotowa paproć. Podobieństwo do naturalnej jest uderzające

### 3. L-układy

Założmy, że mamy prosty wielokomórkowy organizm, algę. Składa się ona tylko z jednego łańcucha komórek. Są dwa rodzaje komórek: wyspecjalizowane, które nie dzielą się, oraz niewyspecjalizowane, które ulegają podziałowi. W wyniku podziału powstają dwie komórki, z których jedna jest nieznacznie większa od drugiej. Założmy, że alga ułożona jest poziomo. Rozmnażaniem się komórek tego organizmu rządzą proste zasady: lewa komórka potomna lewej komórki potomnej jest mniejsza oraz prawa komórka potomna prawej komórki potomnej również jest mniejsza. Zaczynając od mniejszej, lewej komórki potomnej schematycznie wygląda to tak:



Rys. 11. Schemat mnożenia się komórki algi

Założmy, że chcielibyśmy zapisać zasady wzrostu algi w systematyczny sposób. Oznaczmy sobie strzałką, odpowiednio lewą i prawą, z której strony powstała komórka potomna. Oznaczmy też małą komórkę literą *A*, a dużą komórkę literą *B*. Wtedy nasz schemat wyglądał będzie tak:

$$\begin{array}{c} \overline{A} \\ \overline{AB} \\ \overline{ABBA} \end{array}$$

Zasady wzrostu komórki można więc zapisać jako:

Stan początkowy:  $\bar{A}$

Zasady:

$$\bar{A} \rightarrow \bar{A}\bar{B}$$

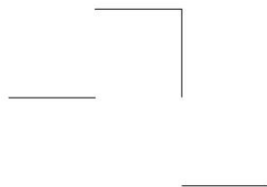
$$\bar{A} \rightarrow \bar{B}\bar{A}$$

$$\bar{B} \rightarrow \bar{A}\bar{B}$$

$$\bar{B} \rightarrow \bar{B}\bar{A}$$

Zbiór reguł oraz stan początkowy (zwany axiomem) stanowią istotę L-układów.

Chcielibyśmy teraz zająć się tworzeniem klasycznych fraktali za pomocą L-układów. Jako pierwszy weźmiemy krzywą Kocha, ale najpierw wprowadzimy pewne oznaczenia. Oznaczmy  $F$  jako odcinek o ustalonej długości,  $f$  jako odcinek o długości takiej, jak  $F$ , którego jednak nie rysujemy na naszym obrazku,  $\oplus$  jako obrót przeciwnie do ruchu wskazówek zegara o ustalony kąt  $\alpha$ , a  $\oslash$  jako obrót zgodnie z ruchem wskazówek zegara o taki sam kąt  $\alpha$ . Za pomocą tych znaków będziemy mogli zakodować konstrukcję wyspy Kocha jak i innych fraktali. Zobaczmy, jak to wygląda w praktyce. Rysować zaczynamy od dowolnego punktu w prawo. Załóżmy, że długość  $F$  to 1, a kąt, o który chcemy obracać, to  $\alpha = 90^\circ$ . Przykładowa instrukcja  $F, \oplus, f, \oslash, F, \oslash, F, f, \oplus, F$  wygląda następująco (rysujemy kolejne graficzne interpretacje symboli):



Rys. 12. Rysunek pokazujący, jak graficznie zinterpretować przykładową instrukcję

Takie oznaczenia są bardzo wygodne w języku L-układów. Zapiszemy w nim klasyczną konstrukcję znanej nam już krzywej Kocha. Aby utworzyć naszą krzywą musimy wziąć parametr  $\alpha = 60^\circ$  i zacząć od prostej linii (która jest teraz naszym axiomem).

Axiom:  $F$

Zasady:

$$F \rightarrow F, \oplus, F, \oslash, \oslash, F, \oplus, F$$

$$\oplus \rightarrow \oplus$$

$$\oslash \rightarrow \oslash$$

Parametr:  $\alpha = 60^\circ$

W rzeczywistości powstający obraz jest coraz większy, ale wystarczy przeskalować go i otrzymamy to, co chcieliśmy. Zapręgnijmy teraz nasze nowo odkryte narzędzie do konstrukcji prostej trawy. Potrzebne nam będzie jeszcze jedno oznaczenie na rozgałęzienia: będą to nawiasy kwadratowe. To, co będzie w nie ujęte, należeć będzie do jakiegoś odgałęzienia. Dodatkowo wprowadzimy symbol  $B$ , który będzie po prostu pomijany przy rysowaniu. Przykładowe zasady wyglądają tak:

Axiom:  $B$

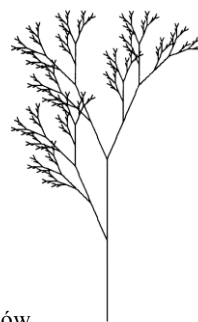
Zasady:

$$F \rightarrow FF$$

$$B \rightarrow F[\oplus B] F[\oslash B] \oplus B$$

Parametr:  $\alpha = 20^\circ$

Stosując je otrzymamy:



Rys. 13. Takie i wiele podobnych roślin można łatwo stworzyć za pomocą L-systemów

Opisane przykłady to tylko bardzo proste przypadki omawianych zagadnień. Bardziej zaawansowane L-układy mogą uwzględniać w zasadach np. sąsiedztwo danego symbolu i reagować na nie. Takie L-układy, zwane parametrycznymi, służą do tworzenia zadziwiająco realistycznych modeli biologicznych oraz przepięknych krajobrazów, często wykorzystywanych w filmach *science fiction*.

#### 4. Podsumowanie

Maszynki do fraktali to bardzo proste konstrukcje mające zadziwiające właściwości. Zestaw prostych poleceń zarówno w MRCM jak i L-systemach może pomóc nam w uzyskaniu różnorodnych fraktali. Te z kolei możemy wykorzystać w sposób różnorodny. Od zastosowań artystycznych do naukowych.

#### Literatura

- [1] Peitgen Heinz-Otto, Jürgens Hartmut, Saupe Dietmar, *Granice chaosu. Fraktale, cz. I*, PWN, Warszawa 2002
- [2] Kudrewicz Jacek, *Fraktale i chaos*, WNT, Warszawa 2007.
- [3] Pierański Piotr, *Fraktale: od geometrii do sztuki*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 1992.
- [4] <http://www.if.uj.edu.pl/Foton/111/index.html>



## Stała w przedśmionku chaosu

*Mateusz Denys*

*Student V roku fizyki na Uniwersytecie Warszawskim*

Liczba  $\pi$ , pierwiastek z dwóch, podstawa logarytmów naturalnych – to stałe matematyczne znane od wieków. Każda z nich – gdyby tylko umiały mówić – mogłaby opowiedzieć swoją historię. Wszystkie są fundamentalnymi wielkościami, bez których dzisiejsza matematyka miałaby zupełnie inne oblicze (czy w ogóle mogłaby istnieć?). Jest jednak wielkość, bez której matematycy obywaliby się aż do 1975 roku. Aż dziw bierze, że dopiero wtedy ją odkryto: jest bowiem fundamentalna, występuje w szerokiej klasie funkcji, dobrze uwidacznia się w przyrodzie i... z pewnością zasługuje na chwilę uwagi! Mowa o stałej Feigenbauma<sup>1</sup>. Jej przykład pokazuje, że w matematyce wciąż może być wiele do odkrycia.

Jeśli spytamy kogoś, ile wynosi liczba  $\pi$ , zapewne odpowie bez namysłu (choć, ściśle rzecz biorąc, niepoprawnie): trzy i czternaście setnych. Ale będzie nam musiało dopisać niezwykle szczęście, żeby przypadkowo zagadnięta osoba odpowiedziała na pytanie, ile wynosi, chociaż w grubym przybliżeniu, stała Feigenbauma. Otóż jest to:

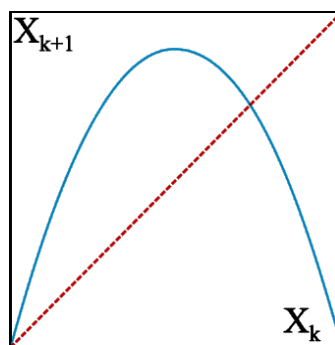
4,6692016091029906718532038204662016172581855774757686327456513430...

Odkrył ją Mitchell Jay Feigenbaum, Amerykanin, którego dziadkowie ze strony ojca pochodzili spod Warszawy. Wszystko zaczęło się, gdy Feigenbaum przeniósł się z Virginia Polytechnic Institute do Los Alamos, gdzie zlecono mu próbę rozwiązania zagadnienia turbulencji metodą renormalizacji Wilsona. Tego zagadnienia rozwiązać mu się ostatecznie nie udało, lecz – jak sam powiedział – skierowało go to „w cudownym kierunku”. Feigenbaum zafascynował się metodą renormalizacji, pierwotnie używaną do badania przejść fazowych, która – jak się okazało – nadaje się także do analizowania przepływów turbulentnych<sup>2</sup>. Dzięki użyciu dosyć młodego wówczas narzędzia badawczego, jakim był kalkulator programowalny, trzydziestoletniemu wówczas naukowcowi udało się obliczyć, najpierw z dokładnością trzech miejsc po przecinku, pewną granicę... Ale po kolei.

<sup>1</sup> Ilekroć w tym artykule będzie mowa o stałej Feigenbauma, będę miał na myśli tzw. pierwszą stałą Feigenbauma. Zainteresowanych tzw. drugą stałą Feigenbauma i innymi subtelnościami teorii chaosu odsyłam do książki Michała Tempczyka *Teoria chaosu dla odważnych* (patrz: Literatura).

<sup>2</sup> Rzeczywiście, przejście od stanu zwykłego przepływu liniowego do stanu przepływu turbulentnego przypomina przejście fazowe.

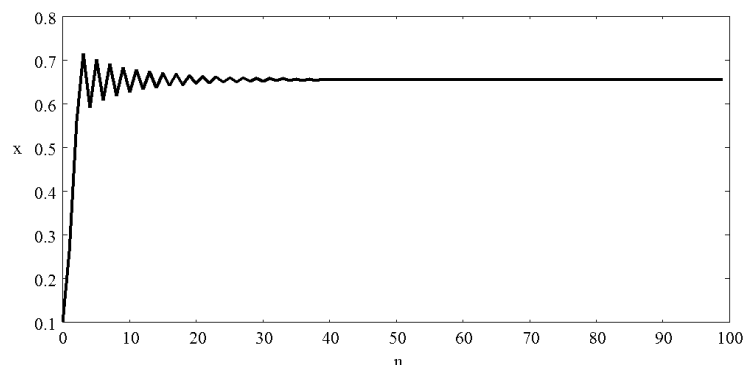
Aby wprowadzić stałą Feigenbauma, posłużymy się funkcją matematyczną zwaną odwzorowaniem logistycznym. Funkcja ta w tym kontekście została spopularyzowana przez Sir Roberta Maya w jego artykule w piśmie *Nature*, choć ze względu na uniwersalność stałej Feigenbauma można by tu użyć wielu innych odwzorowań. Odwzorowanie logistyczne ma postać  $x_{n+1} = \lambda x_n(1 - x_n)$ . Na dobrą sprawę, jest to zwykle równanie paraboli  $y = a(x - x^2)$ , ale zapisane w formie iteracji. Zaczynamy od pewnej wartości początkowej  $x_0$ , obliczamy  $x_1$ , po czym podstawiamy je z powrotem po prawej stronie, aby obliczyć  $x_2$  itd. Obrazowo pokazuje to rys. 1: opisana przed chwilą procedura to po prostu „przeskakiwanie” pomiędzy krzywą odwzorowania logistycznego (parabola) a krzywą  $y = x$  naprzemiennie poziomymi i pionowymi ruchami (zaczynamy od paraboli). Każdorazowe przechodzenie na prostą  $y = x$  i stamtąd z powrotem na parabolę odpowiada podstawianiu wcześniej obliczonego  $y$  po prawej stronie równania jako nowego  $x$ .



Rys. 1. Krzywa odwzorowania logistycznego (parabola) i prosta  $y = x$  (linia przerywana)

W ten sposób otrzymujemy coś, co może być na przykład prostym modelem rozwoju populacji zwierząt w pewnym środowisku. Kolejne  $x$  mogą przyjmować wartości od 0 do 1, gdzie 0 oznacza populację zerową, natomiast 1 – maksymalne możliwe „upakowanie” zwierząt w tym środowisku. Ogólnie rzecz biorąc, jeśli zwierząt jest niewiele, to mają do dyspozycji duże zasoby pożywienia, w związku z czym mogą się silnie rozmnażać ( $x_{n+1} > x_n$ ). Natomiast jeśli jest ich bardzo dużo, to następuje przesylenie – zwierzęta wymierają z powodu braku zasobów naturalnych ( $x_{n+1} < x_n$ ). Łatwo sprawdzić, że odwzorowanie logistyczne daje takie właśnie zachowanie się populacji (np. dla  $\lambda = 3$  i  $x_n = 0,2$  oraz  $x_n = 0,8$ ). Aby powiedzieć coś więcej o tym zachowaniu, musimy podać wartość parametru  $\lambda$ , zwanego *parametrem bifurkacyjnym*. To od niego zależy, jak jakościowo będzie się zachowywała liczebność populacji w kolejnych okresach czasu (w długim okresie nie zależy to od  $x_0$ ). Aby funkcja nie była rozbieżna i byśmy nie obserwowali ujemnych wartości,  $\lambda$  musi się zawierać w przedziale  $[0,4]$ . I tak dla  $\lambda$  między 0 a 1 populacja na pewno wyginie ( $x_n \rightarrow 0$ ).

Dla  $\lambda$  między 1 a 3  $x_n$  będzie zbiegała do wartości  $1 - 1/\lambda$  tym wolniej, im większe  $\lambda$ . Rys. 2 pokazuje tę zbieżność dla  $\lambda = 2,9$ .

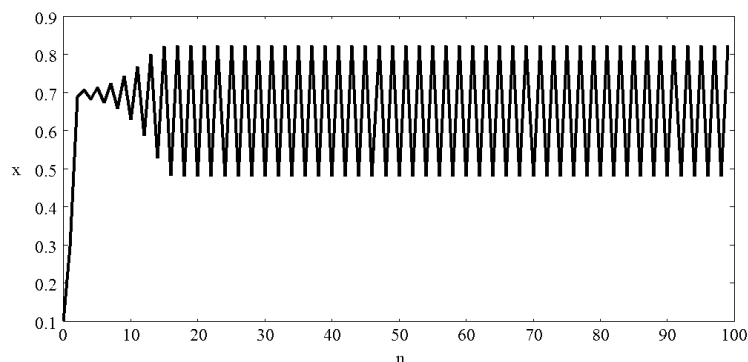


Rys. 2. Rozwój populacji dla  $\lambda = 2,9$

$1 - 1/\lambda$  jest *punktem stałym* odwzorowania logistycznego – jednym z dwóch spełniających równanie  $x = \lambda x(1 - x)$  (drugim jest zero). Mówimy, że dla tych wartości  $\lambda$  punkt ten jest *atraktorem*, albo że jest *ściągający*, bo „ściąga” do siebie wielkość populacji.

Co dalej? 3 jest wartością graniczną, dla której zbieżność, inaczej niż dla pozostałych wartości  $\lambda$ , nie jest liniowa, tylko znacznie wolniejsza<sup>3</sup>.

Powyżej trzech zaczynają się wartości  $\lambda$ , dla których punkt  $1 - 1/\lambda$  staje się *odpychający*, a długookresowa wielkość populacji zaczyna oscylować. Najpierw ( $3 < \lambda < 1 + \sqrt{6}$ ) między dwiema wartościami (rys. 3).



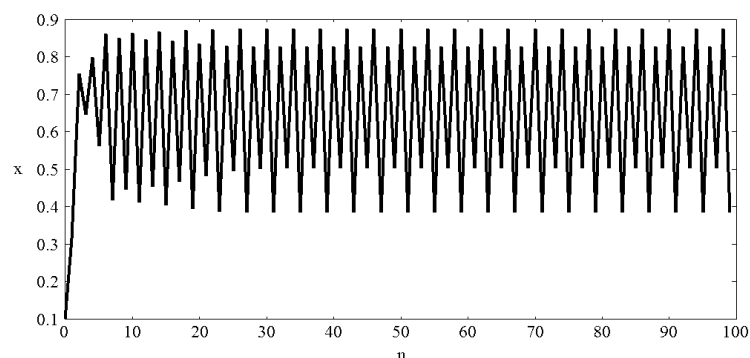
Rys. 3. Rozwój populacji dla  $\lambda = 3,3$

Potem, wraz ze wzrastającym  $\lambda$ , między czterema (rys. 4), ośmioma, szesnastoma itd. To tzw. *podwajanie okresu* jest coraz szybsze, tzn. kolejne przedziały

<sup>3</sup> Podobnie jest ze zbieżnością do zera wielkości populacji dla  $\lambda = 1$ .



$\lambda$  odpowiadające liczbom 2, 4, 8, 16, 32, są coraz mniejsze. Warto zauważyć, że wartości, między którymi oscyluje wielkość populacji, za każdym razem nie zależą od warunków początkowych, lecz jedynie od  $\lambda$ .



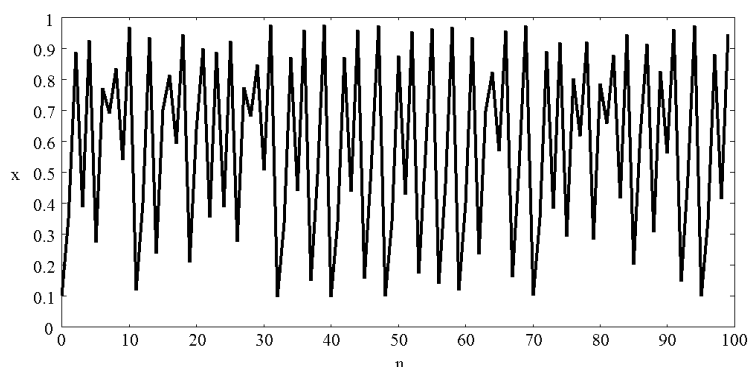
Rys. 4. Rozwój populacji dla  $\lambda = 3,5$

I tu właśnie pojawia się stała Feigenbauma. Jeśli przez  $\lambda_k$  oznaczmy wartość  $\lambda$ , dla której następuje  $k$ -te podwojenie okresu, to stała Feigenbauma będzie dana przez graniczny stosunek dwóch następujących po sobie przedziałów  $\lambda$ :

$$\delta = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\lambda_{k+1} - \lambda_k}{\lambda_{k+2} - \lambda_{k+1}}.$$

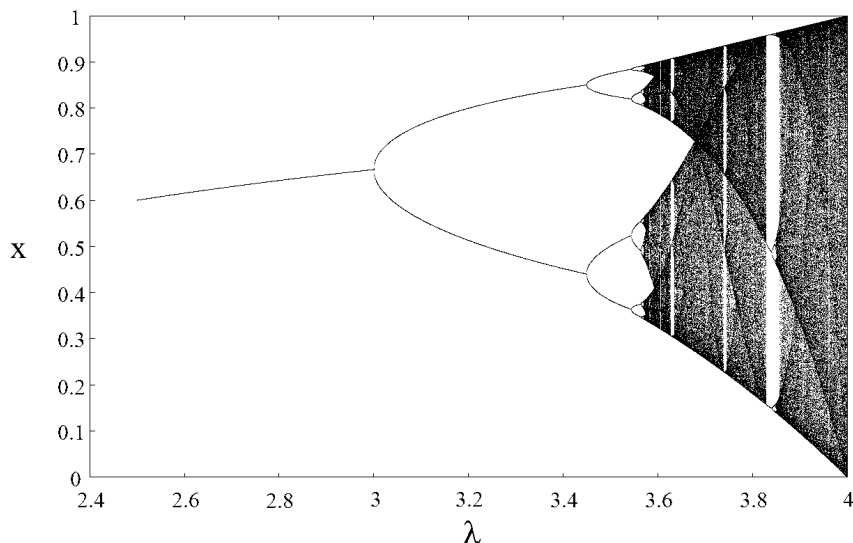
Można powiedzieć, że stała Feigenbauma pojawia się w przedśionku zachowania chaotycznego. Dlaczego?

Bowiem gdy kaskada podwajania okresu znika, osiągając stałą Feigenbauma, od  $\lambda$  równego około 3,5699 zaczyna się zachowanie, w którym wielkość populacji skacze beładnie od jednej wartości do drugiej, jakby w wyniku losowania, tak jak na rys. 5.



Rys. 5. Rozwój populacji dla  $\lambda = 3,9$

Pojawia się chaos deterministyczny – dlaczego chaos, wyjaśnia poprzednie zdanie. Deterministyczny, bo wszystko opisywane jest prostym deterministycznym wzorem na  $x_{n+1}$ . Wszystko, co powiedzieliśmy do tej pory, można podsumować tzw. *diagramem bifurkacji* (czyli rozdwojeń), przedstawionym na rys. 6.

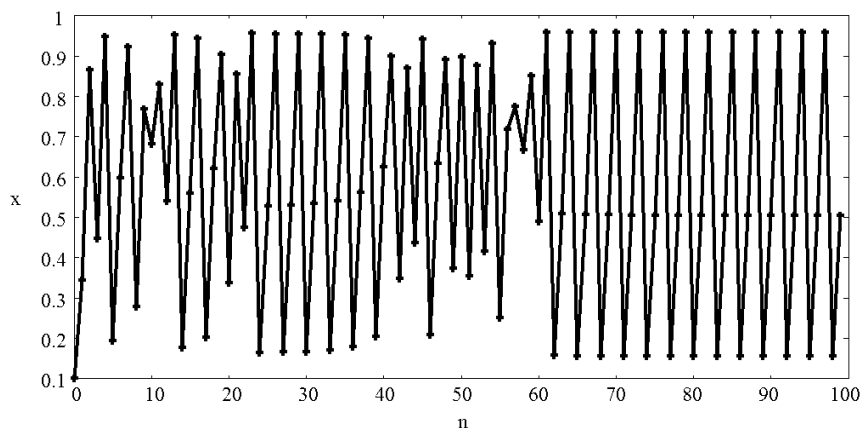


Rys. 6. Diagram bifurkacji

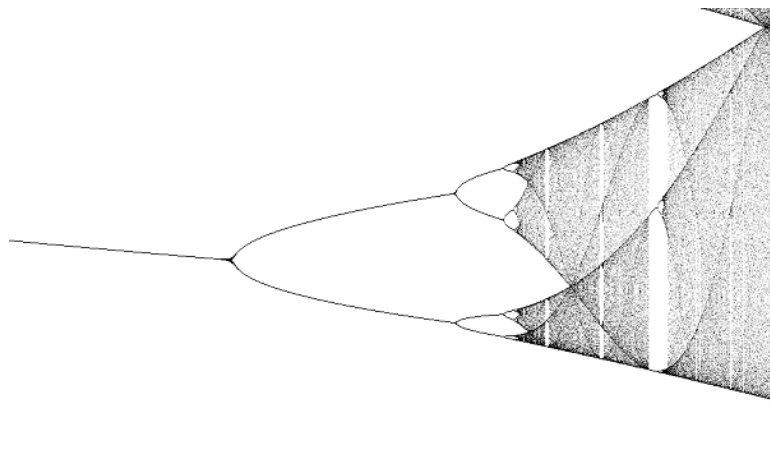
Na osi poziomej odkładamy  $\lambda$ , zaś na pionowej – wartości, między którymi oscyluje populacja w długim okresie, czyli dla  $n$  większego od pewnej dużej liczby (na rys. 6 jest to 5000). Dla zachowania chaotycznego mamy oczywiście całe continuum takich wartości<sup>4</sup>, ale, jak łatwo zauważyć, dla  $\lambda$  mniejszego od 4 nie wszystkie liczby od 0 do 1 mogą być osiągnięte. Poza tym okazuje się, że w „morzu” chaosu, który na wykresie widnieje jako czarne pole, znajdują się tzw. *wyspy stabilności* – czyli w tym przypadku obszary, w których nagle pojawia się zachowanie okresowe z okresem na przykład 3 (i potem 6, 12, 24 itd.) lub 5 (i potem 10, 20, 40...) albo z dowolnym innym okresem, który też się podwaja i też stosunek odpowiednich przedziałów dąży do stałej Feigenbauma, w miarę jak okres się zwiększa<sup>5</sup>. Początek jednej z takich wysp stabilności – zachowanie populacji dla  $\lambda = 3,83$  – przedstawia rys. 7. Kolejne  $x_n$  są na nim zaznaczone punktami, aby widać było trzy wartości, między którymi oscyluje populacja w długim okresie.

<sup>4</sup> Na rys. 6 zaznaczono punkty  $x_n$  tylko dla  $n$  od 5000 do 5249, aby było widać „strukturę” diagramu bifurkacji.

<sup>5</sup> Tego typu wyspy stabilności nazywane są *oknami periodycznymi*.

Rys. 7. Rozwój populacji dla  $\lambda = 3,83$ 

Dodajmy jeszcze, że diagram bifurkacji charakteryzuje się samopodobieństwem, tzn. jego fragment po powiększeniu jest bardzo podobny do całości, co widać na rys. 8.

Rys. 8. Fragment diagramu bifurkacyjnego dla przedziału  $\lambda: 3,56-3,575$  oraz  $x: 0,45-0,54$ 

Po raz pierwszy Feigenbaumowi udało się obliczyć stałą, którą później nazwano jego imieniem, w sierpniu 1975 roku, z dokładnością zaledwie trzech miejsc po przecinku. Przez pewien czas próbował on wyrazić ją przez jakąś prostą kombinację innych znanych matematykom wielkości, co oczywiście było skazane na niepowodzenie, bowiem, jak dziś już wiemy, jest to stała fundamentalna. Pojawia się w wielu innych odwzorowaniach, na przykład w trygonometrycznym ( $x_{n+1} = \lambda \sin \pi x_n$ ). Feigenbaum sprawdził, że w różnych odwzorowa-

niach wynosi ona dokładnie tyle samo, choć mogłoby się wydawać, że dla każdego odwzorowania powinniśmy otrzymywać inną wartość. Jak się okazuje, dokładnie taka sama stała Feigenbauma występuje w każdej funkcji ściśle wklęsłej określonej na pewnym przedziale, posiadającej w tym przedziale jedno maksimum i odwzorowującej ten przedział w siebie. W przyrodzie jest bardzo duża klasa zjawisk opisywanych tego typu funkcjami, więc stałą Feigenbauma spotyka się w wielu procesach dynamicznych czy to chemicznych, czy biologicznych, czy fizycznych. Reakcje chemiczne, dynamika serca, rytmy mózgu, strumienie, wahadła, oscylatory... – spotykamy ją wszędzie tam, gdzie występuje kaskada podwajania okresu, niezależnie od tego, jakie równanie prowadzi do tej kaskady.

### Literatura

- [1] James Gleick, *Chaos – narodziny nowej nauki*, przeł. P. Jaśkowski, Zysk i S-ka, Poznań 1996.
- [2] Ian Stewart, *Czy Bóg gra w kości? Nowa matematyka chaosu*, przeł. W. Komar, M. Tempczyk, PWN, Warszawa 2001
- [3] Michał Tempczyk *Teoria chaosu dla odważnych*, PWN, Warszawa 2002

#### Internet:

- [1] <http://smp.if.uj.edu.pl/~baryluk/strona1-chaos/log.htm> – o odwzorowaniu logistycznym.
- [2] <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Feigenbaum.html> – biografia Feigenbauma.
- [3] <http://brain.cc.kogakuin.ac.jp/~kanamaru/Chaos/e/BifArea/> – prosty aplet rysujący diagram bifurkacyjny.
- [4] <http://pirate.shu.edu/~wachsmut/Workshops/Camden/Bifurcate.html> – następny aplet, nieco bardziej zaawansowany.
- [5] <http://multifraktale.stach.org.pl/> – bardzo ładna strona o chaosie, fraktalach i multifraktalach.
- [6] <http://pl.wikipedia.org/wiki/> – hasła Stała Feigenbauma, bifurkacja, teoria chaosu, odwzorowanie logistyczne, Mitchell Jay Feigenbaum.



## Zapanować nad piorunami

Wojciech Ganczarek  
Instytut Fizyki UJ

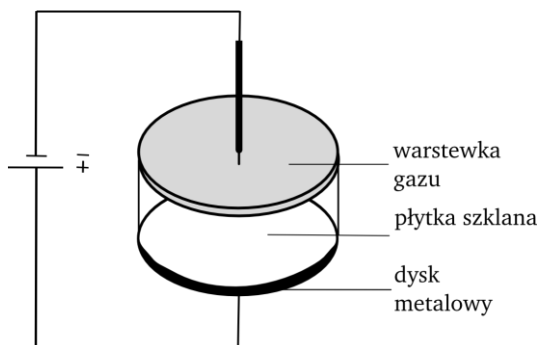
### 1. Wstęp

Po reakcji na widok błyskawicy możemy odróżnić zwykłą osobę od fizyka. Przeciętny Kowalski widząc piorun z pewnością poszuka miejsca, by skryć się przed deszczem. Fizyk natomiast pomyśli o rozwiązaniu równania Laplace'a i o strukturze fraktalnej błyskawicy. Na taki właśnie pomysł wpadli panowie Niemeyer, Pietronero i Wiesmann (zob. [1]) i o tym piszę w niniejszym opracowaniu.

### 2. Piorun kontrolowany

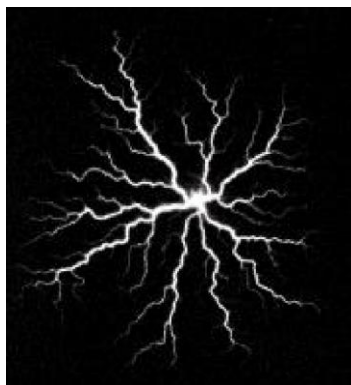
Okazuje się, że za pomocą bardzo prostego modelu komputerowego można „odtworzyć” zachowanie przebicia dielektryka przez prąd elektryczny. Kiedy jednak tworzymy pewien model, to chcemy go porównać z doświadczeniem, które powinno być powtarzalne, a jego parametry łatwo kontrolowane. Trudno powiedzieć, aby zjawisko atmosferyczne, jakim jest uderzenie pioruna, spełniało takie wymagania. Dlatego Niemeyer i Pinnekamp, zanim zabrali się za pisanie programu, przeprowadzili odpowiednie doświadczenie [2].

Mechanizm powstawania błyskawicy na niebie to materiał na niejeden artykuł podobnej długości. Dlatego poprzestańmy na tym, że wyładowanie atmosferyczne powstaje w wyniku gigantycznej różnicy potencjałów między chmurą a powierzchnią Ziemi (na Ziemi potencjał jest wyższy). Powoduje to tzw. *przebiecie* prądu – przejście ładunków elektrycznych przez atmosferę. Towarzyszy temu zresztą jonizacja powietrza, dzięki której po burzy powietrze pachnie... „jak po burzy”. Podobna sytuacja miała miejsce w eksperymencie Niemeyera. Dla uproszczenia fizyk zaplanował analizę zagadnienia w dwóch (a nie w trzech) wymiarach. Jak to zrealizował doświadczalnie? Na rys. 1 przedstawiono schemat układu eksperymentalnego. Na cylindrycznej izolującej płytce szklanej znajduje się cienka warstwa gazu (sześćfluorku siarki, który ze względu na dużą gęstość można po prostu „wylać” na płytkę). Układ utrzymywano pod stałym ciśnieniem 0,3 MPa. (tj. 3000 hPa). Do płytki przyłożono dwie elektrody: jedną punktową na górze, drugą, w kształcie metalowego cienkiego dysku, na dole. Dzięki temu rozchodzenie się wyładowania w gazie jest indukowane tylko przez składową pola elektrycznego równoległą do płytki. W ten sposób uzyskujemy sytuację odpowiadającą piorunowi rozchodzącemu się w dwóch wymiarach: do kolistej elektrody od punktowej elektrody położonej w środku tej kolistej.



Rys. 1. Schematyczny szkic układu doświadczalnego do eksperymentu Niemeyera [2]

Jak wyglądał sam eksperyment? W skrócie można powiedzieć, że za pomocą elektrod przyłożono impuls napięcia  $V = 30 \text{ kV}$  o czasie trwania  $1 \mu\text{s}$  i zaobserwowano strukturę przedstawioną na rys. 2.



Rys. 2. Wyładowanie elektryczne w gazie – tzw. figury Lichtenberga – uzyskane w eksperymencie Niemeyera (rysunek pochodzi z [1])

### 3. Piorun z komputera

Po tym przydługim wstępie opiszę wreszcie, jak samemu wytworzyć taki piorun. Bez użycia sześćfluorku sodu – wykorzystując jedynie komputer i odrobinę wiedzy. Nawet drobiny cienkiej warstwy gazu, o jakiej wspomniałem omawiając eksperyment, stanowią układ fizyczny o gigantycznej liczbie stopni swobody ( $\sim 10^{23}$ ), więc aby móc cokolwiek obliczyć, należy wiele rzeczy zaniedbać – jak to zwykle w fizyce bywa. Na rys. 2 widać, że wyładowanie rozchodzi się wąskimi kanałami. Będziemy przyjmować, że te kanały tworzą powierzchnię ekwipotencjalną, nie martwiąc się zupełnie fluktuacjami ładunków i niezerowym oporem elektrycznym zjonizowanego gazu (jest on na tyle mały, że takie założenie jest rozsądne). Co jeszcze należy dodać? Potencjał

elektryczny w pewnej przestrzeni, który otrzymujemy rozwiązując równanie Laplace'a (można o nim przeczytać w dowolnym podręczniku do elektrodynamiki)

$$\Delta\phi = 0,$$

z odpowiednimi warunkami brzegowymi. U nas warunki brzegowe są określone przez potencjały elektrod: umówmy się, że elektroda w środku ma potencjał równy 0, natomiast elektroda kolista – równy 1 (lub jakiegokolwiek innej wartości).

#### Przypomnienie

Natężenie pola elektrycznego to gradient potencjału:  $E = -\text{grad } \Phi$ , ponadto natężenie pola elektrycznego spełnia prawo Gaussa:  $\text{div } E = \rho$ .

Kiedy gęstość prądu  $\rho$  wynosi 0, podstawiając pierwsze równanie do drugiego dostajemy właśnie równanie Laplace'a:  $\Delta\Phi = 0$ , gdzie  $\Delta$  to operator zwany laplasjanem.

W dwóch wymiarach  $\Delta$  jest to po prostu skrócony zapis wzoru:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

Wszystko, co powiedzieliśmy do tej pory, było ściśle matematycznym podejściem do zagadnienia. Rozwiązanie równania Laplace'a z tak określonymi warunkami brzegowymi jest znane, problemy powstają, kiedy piorun zaczyna się rozrastać – wtedy zmieniają się warunki brzegowe, ponieważ na powierzchni zajmowanej przez piorun też mamy potencjał 0 (powierzchnia ekwipotencjalna). Robimy pierwsze przybliżenie: zamiast ciągłej przestrzeni będziemy rozpatrywać zagadnienie na dyskretnej sieci punktów, konkretnie na kwadratowej kratce.

Rozpocznemy wędrówkę pioruna od środka koła (tam, gdzie mamy potencjał 0 – warunek brzegowy odpowiadający elektrodzie). Jako że zagadnienie umieściliśmy na kwadratowej kratownicy, zaczynając wędrówkę od środka, piorun może udać się w cztery różne strony (patrz rys. 3). Pojawia się więc problem: którą stronę wybrać? Teraz pora na gwóźdź programu! Otóż ogólnie rzecz biorąc elektrony wędrują najchętniej (lub „mądrzej”: z największym prawdopodobieństwem) do jak najwyższego potencjału. Ponieważ jednak nasz układ jest dość skomplikowany, to ciężko stwierdzić, jaka jest dokładnie zależność potencjału i prawdopodobieństwa w danym punkcie. Dlatego wprowadzamy pierwszy (i jak się okaże: ostatni) parametr modelu  $\eta$  i założymy, że prawdopodobieństwo wybrania danej drogi zależy od potencjału<sup>1</sup> podniesionego do pewnej potęgi:

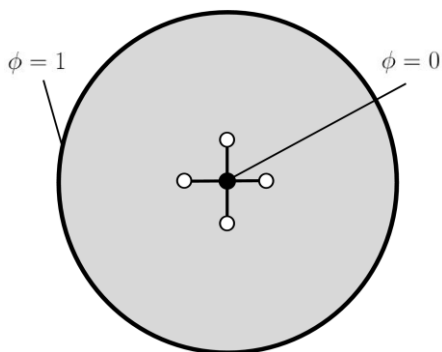
$$p(i, j) \sim (\phi_{i,j})^\eta,$$

<sup>1</sup> Dokładniej: od różnicy potencjałów, ale u nas różnica ta jest równa  $\Phi - \Phi_c = \Phi$ , ponieważ  $\Phi_c = 0$ .

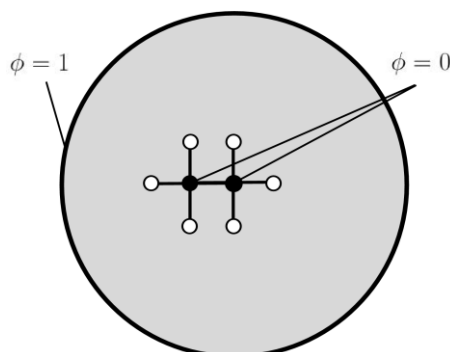
gdzie przez  $p(i,j)$  oznaczono prawdopodobieństwo zajęcia przez piorun pewnego punktu indeksowanego przez  $(i,j)$ , natomiast  $\Phi_{i,j}$  to potencjał w tym punkcie. Unormowane prawdopodobieństwa wyglądają następująco:

$$p(i,j) = \frac{(\phi_{i,j})^\eta}{\sum_{k,l} (\phi_{k,l})^\eta},$$

gdzie suma przebiega po wszystkich punktach, które aktualnie sąsiadują z punktami zajmowanymi przez błyskawicę. Czyli w którą z czterech stron wybierze się w końcu piorun? Oznaczmy poszczególne punkty (białe koła na rys. 3) liczbami 1, 2, 3 i 4. Aby dokonać tego wyboru, losujemy liczbę  $r$  z przedziału  $(0,1)$  (z rozkładu jednorodnego) i sprawdzamy czy  $r < p_1$ . Jeśli tak, to piorun zajmuje punkt 1. Jeśli nie, to sprawdzamy czy  $r < p_1 + p_2$  itd. Załóżmy, że piorun rozprzestrzenił się w lewą stronę.



Rys. 3. Modelowy układ, w którym rozprzestrzenia się piorun – stadium początkowe. Zaczernione koło symbolizuje początkowy obszar (punkt) zajmowany przez błyskawicę, puste koła oznaczają punkty, w których w następnym kroku może znaleźć się piorun



Rys. 4 Modelowy układ, w którym rozprzestrzenia się piorun - po pierwszym kroku

Na rys. 4 widać, że w następnym kroku mamy już do wyboru aż 6 punktów, które w kolejnym kroku może zająć piorun. Wykonajmy więc następny krok i jeszcze wiele kolejnych, aż w końcu dotrzemy do elektrody kolistej.

Pozostaje jeszcze jeden „drobny” szczegół: skąd wziąć potencjały? Tak jak już napisałem, w tym celu należy rozwiązać równanie Laplace’a na naszej kwadratowej kratownicy. Właśnie: właściwie dlaczego akurat na kratownicy? Bo tak jest łatwiej! Rozwiązanie (a dokładniej: dobre przybliżenie rozwiązania) możemy uzyskać za pomocą odpowiednich metod numerycznych (tu np. metod relaksacji na sieci). Zastosujemy tutaj jedną z nich. Najpierw dygresja matematyczna: funkcje spełniające równanie Laplace’a (plus pewne założenia) nazy-

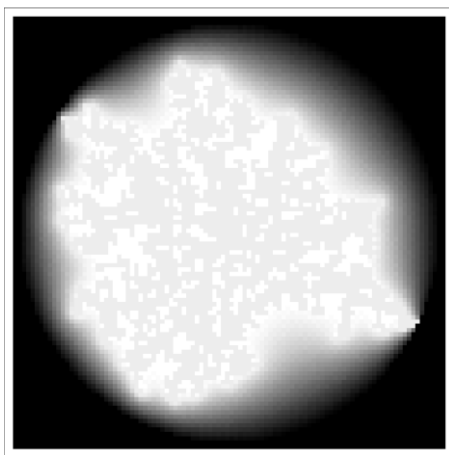


wamy funkcjami harmonicznymi. Można dla nich pokazać (twierdzenie o wartości średniej funkcji harmonicznymi), że średnia wartość funkcji na brzegu kuli jest równa wartości funkcji w środku kuli. W naszej zdyskretyzowanej przestrzeni (tzn. na naszej kwadratowej kracie) kulę o środku w danym punkcie stanowią czterej najbliżsi sąsiedzi tego punktu. Możemy więc zapisać:

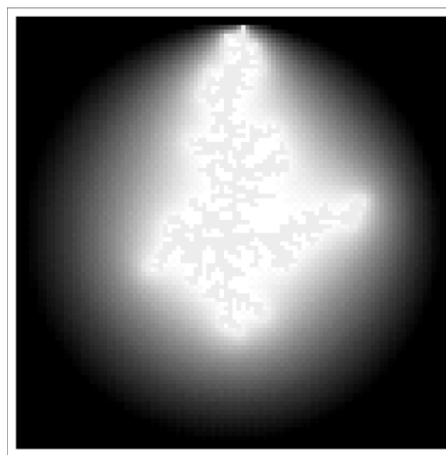
$$\phi_{i,k} = \frac{1}{4}(\phi_{i+1,k} + \phi_{i-1,k} + \phi_{i,k+1} + \phi_{i,k-1}),$$

dla każdego indeksu  $i,k$ . Pozostaje teraz wykonać powyższe podstawienie iteracyjne dla wszystkich punktów na naszej sieci: zaczynamy od pewnej wartości potencjału, np. 0,5 w każdym punkcie i wykonujemy powyższe podstawienie dla każdego punktu sieci (oprócz punktów, na których określamy warunki brzegowe, tj. oprócz elektrod!). Przeprowadzając tę procedurę odpowiednio dużą ilość razy (autorzy oryginalnej pracy [1] podają, że zwykle wystarcza około 5–50) uzyskujemy zbieżność metody. Zbieżność oznacza, że kiedy wykonamy naszą procedurę np. 35. raz, to za 36. razem wyniki nie zmieniają się z dokładnością np. do czwartego miejsca po przecinku (napisałem „np.”, ponieważ to już od nas zależy, jaką dokładność chcemy uzyskać). I to wszystko! Proste, prawda?

Zobaczymy teraz, co z tego wyszło. Do modelu wprowadziliśmy parametr: wykładnik  $\eta$ . Należy więc oczekiwać, że otrzymamy różne wyniki dla różnych  $\eta$ . Jak widać na rysunkach 5–8, im mniejszy jest wykładnik, tym „gęstsza” jest błyskawica.

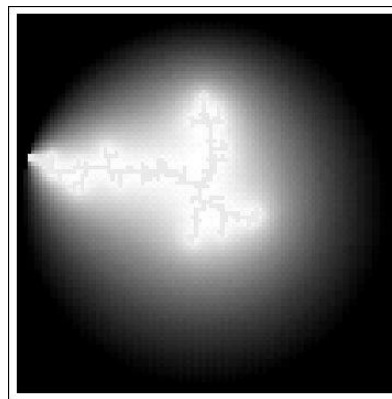
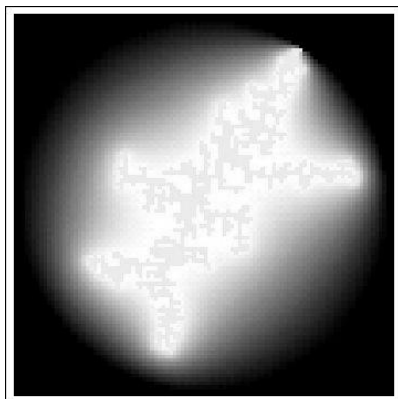


Rys. 5. Wynik symulacji pioruna na kole  $\eta = 0,5$ . Jednolicie szary kształt symbolizuje piorun, natomiast odcienie szarości odpowiadają potencjałowi: czerni – 1, biel – 0



Rys. 6. Wynik symulacji pioruna na kole,  $\eta = 1$

Rysunki 5–10 wykonano za pomocą programu Mathematica na bazie wyników symulacji napisanej w języku C++.

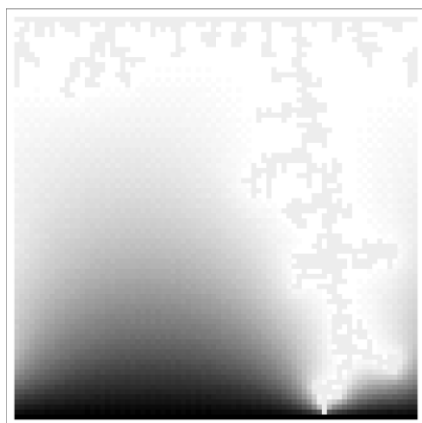


Rys. 7. Wynik symulacji pioruna na kole,  $\eta = 1,2$  Rys. 8. Wynik symulacji pioruna na kole,  $\eta = 2$

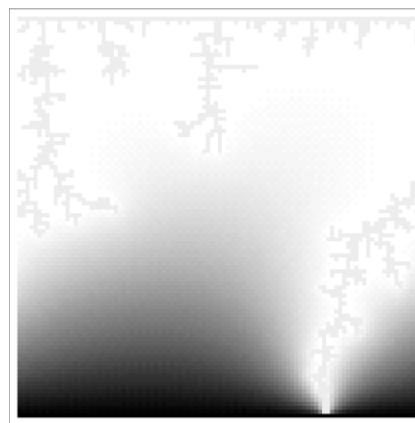
Łatwo to wyjaśnić: gdy wykładnik jest mniejszy, różnice między prawdopodobieństwami się zmniejszają (tak jak  $\sqrt{2}$  i  $\sqrt{3}$  są sobie bliższe niż 2 i 3), dlatego wybór dalszej drogi pioruna jest mniej selektywny ze względu na potencjał. W szczególności dla  $\eta = 0$  piorun wypełnia całą przestrzeń – odpowiada to tzw. modelowi Eden, najprostszemu modelowi rozprzestrzeniania się komórki rakowej. Widać również, że wygenerowane symulacje pioruna układają się w charakterystyczne, rozgałęzione kształty. Rysunek jest podobny sam do siebie oglądany w różnych skalach. Słowem – otrzymujemy coś na kształt *fraktali*. Fraktale, jak widać chociażby na rysunkach 5–8, nie zajmują całej powierzchni, na której się znajdują. Na przykład u nas między gałęziami piorunów pozostają puste przestrzenie. Okazuje się, że można piorunom przyporządkować niecałkowity wymiar przestrzeni [3]. Zamiast przywoływać ścisłą definicję wymiaru fraktalnego ograniczę się do wprowadzenia pewnej intuicji z nim związanej. Popatrzmy na jakiś jeden konkretny punkt na kartce czasopisma *Foton*. Jeśliby mierzyć masę czytanej kartki zawartą w kolejnych kołach o promieniach  $r$  i o środku w wybranym punkcie, to otrzymamy zależność  $m(r) \sim r^2$ , jako że kartka jest dwuwymiarowa. Jeśliby uczynić to samo dla fraktali, to otrzymalibyśmy zależność  $m(r) \sim r^D$ , gdzie  $D$  jest właśnie wymiarem fraktalnym. Autorzy pracy [1] zastosowali analogiczną procedurę do wygenerowanych wyładowań i okazało się, że wymiar fraktalny piorunu, który otrzymali doświadczalnie (rys. 2,  $D$  w przybliżeniu 1,7) jest bardzo zbliżony do wymiaru dla opisanego modelu przy  $\eta = 1$  ( $D$  w przybliżeniu 1,75). Dla porównania dla  $\eta = 0$  otrzymujemy  $D = 2$ .

Kiedy mamy już zaprogramowany sposób rozprzestrzeniania się pioruna (nasz algorytm oparty o własność wartości średniej funkcji harmonicznych) możemy generować pioruny w innych sytuacjach fizycznych (tj. z różnymi warunkami brzegowymi). To, co nasuwa się jako pierwsze, to oczywiście błyskawica schodząca z nieba w gorący sierpniowy wieczór: wystarczy za warunki

brzegowe wybrać  $\Phi = 0$  na niebie i  $\Phi = 1$  na ziemi (patrz rys. 9 i 10). Warto jeszcze dodać pewną techniczną uwagę: im gęstsza wybieramy sieć, tym lepsza dokładność (i ładniejszy obrazek), ale i dłuższe obliczenia.



Rys. 9. Symulacja wyładowania atmosferycznego,  $\eta = 1,2$



Rys. 10. Symulacja wyładowania atmosferycznego,  $\eta = 1,5$ . Widać, że nałożono po lewej i prawej stronie okresowe warunki brzegowe – błyskawica wychodzi z lewej strony i „wpada” znów z prawej

#### 4. Zakończenie

Mam nadzieję, że udało mi się przekonać czytelnika, jak łatwo zapanować nad piorunami. Za pomocą bardzo prostego modelu (**tylko** jeden parametr!) „inwestując” jedynie równanie Laplace’a, możemy z dużą zgodnością odtworzyć obrazy, które obserwujemy w skomplikowanych układach wielu cząstek, jakimi są gazy. A dodatkowo, porównując wymiary fraktalne dla różnych wykładników  $\eta$ , poznać z grubsza jakościowe prawo, na którego podstawie powstają wyładowania. Zmieniając warunki brzegowe możemy sprawdzać, jak będzie układało się wyładowanie w różnych warunkach fizycznych. Należy jednak pamiętać, że w stosunku do rzeczywistych zjawisk prezentowany tutaj model jest oczywiście ogromnym uproszczeniem – jakkolwiek daje dobre wyniki i cieszy oko. Istnieją przecież ludzie bardzo pechowi, którzy nigdy na żywo nie widzieli błyskawicy – jakoś tak się dzieje, że zawsze zbyt późno odwracają głowę. Dysponując odpowiednim programem możemy stworzyć takiemu „nieszczęśnikowi” film (animację kolejnych kroków symulacji, klatka po klatce), niechaj ogląda pioruny do woli!

#### Bibliografia

- [1] L. Niemeyer, L. Pietronero i H.J. Wiesmann, *Phys. Rev. Let.* **52**, 1033 (1984).
- [2] L. Niemeyer i F. Pinnekamp [w:] *Gaseous Dielectrics III*, Pergamon, Nowy Jork (1982).
- [3] B. Mandelbrot, *Fractals: Form, Chance and Dimension*, Freeman, San Francisco (1977).

Artykuł z kolorowymi rysunkami znajduje się w internetowym wydaniu *Fotonu*.



## Benoit Mandelbrot (1924–2010) – ojciec geometrii fraktalnej

Zofia Gołąb-Meyer

„Chmury to nie kule, szczyty górskie to nie stożki, linie wybrzeża to nie koła, kora drzew nie jest gładka, a błyskawice nie rozchodzą się po liniach prostych” – Benoit Mandelbrot, wstęp do książki *Fraktalna geometria natury*.

20 października 2010 roku zmarł w wieku 85 lat niezwykły matematyk XX wieku Benoit Mandelbrot. Człowiek, który jako tzw. matematyk stosowany wywarł wpływ na ekonomię, fizjologię i medycynę oraz meteorologię.

Benoit Mandelbrot jest twórcą tzw. geometrii fraktalnej, opisującej nieregularne kształty występujące w przyrodzie, takie jak linia brzegowa, zbocza górskie, systemy komórkowe, kształty toru błyskawicy czy płatków śniegu. Mandelbrot pokazał, że fraktale mogą być przedmiotem interesujących badań i praktycznych zastosowań (np. w grafice komputerowej, komponowaniu muzyki).



Benoit Mandelbrot  
Źródło: <http://pl.wikipedia.org/>

Benoit Mandelbrot, a właściwie wtedy Benedykt, urodził się w Warszawie w 1924 roku w rodzinie litewskich Żydów. Była to rodzina o dużych tradycjach intelektualnych, która po I wojnie światowej osiadła w Warszawie. Matka Benedykta była lekarką, ojciec zaś pomimo intelektualnych ciągót, zarabiał na rodzinę produkując i sprzedając odzież. Dzięki temu pomógł swemu młodszemu o szesnaście lat bratu zrobić karierę akademicką. Stryj Benedykta Szolem został wybitnym francuskim matematykiem, profesorem w Clermont-Ferrand. Był on uczniem Poicarégo i Hadamarda – klasycznym analitykiem. Jak Mandelbrot kiedyś stwierdził, miał on zupełnie odmienny od niego samego gust matematyczny. Na przykład uważał geometrię za skończoną naukę, dobrą do igraszek matematycznych dla dzieci. Sam Benoit uważał się głównie za geometrę.

Mandelbrot naukę szkolną rozpoczął z dwuletnim opóźnieniem z powodów zdrowotnych. W tym czasie stryj wprowadzał małego Benedykta w świat szachów, orientacji na mapach oraz techniki szybkiego czytania. Ojciec planował dla uzdolnionego syna karierę inżyniera i początkowo – niejako w opozycji do stryja – Benoit oddalał się od matematyki, poświęcając czas innym zainteresowaniom.

W 1936 roku cała rodzina przeniosła się do Francji. Stryj Szolem został profesorem matematyki w Clermont-Ferrand. Benoit zaczął uczęszczać do liceum

w Paryżu, a od wybuchu wojny – w Tulle, niedaleko Clermont-Ferrand. Rodzina uważała bowiem, że – ze względu na żydowskie pochodzenie – małe miasto będzie bezpieczniejsze. Okazało się, że w prowincjonalnej szkole uczyli jednak bardzo dobrzy nauczyciele, którzy podobnie jak Mandelbrotowie, byli uciekinierami z dużych miast. Zadbali oni o rozwój utalentowanego ucznia. Młody Mandelbrot szybko nadrobił język francuski i historię. Doskonały nauczyciel matematyki dopingował swego wychowanka do dodatkowej pracy. Pomimo tego sam Mandelbrot uważa się za samouka w wielu dziedzinach.

Do niezwykle trudnych egzaminów wstępnych do Ecole Normale Superiere i Ecole Polytechnique wystartował z powodzeniem bez zwyczajowych dwuletnich kursów przygotowawczych. Mandelbrot zaobserwował u siebie szczególnie zmysł geometryczny, który np. pozwalał mu na wykorzystywanie tricków przy liczeniu całek.

W 1945 roku po powrocie stryja ze Stanów Zjednoczonych rodzina zaczęła toczyć niekończące się dyskusje na temat przyszłości utalentowanego chłopca. W 1947 roku Mandelbrot uzyskał dyplom inżyniera. Równocześnie przyznano mu stypendium na dalsze studia w USA. Studiował w Pasadenie, ale doktoryzował się na Uniwersytecie Paryskim. Pracował najpierw w słynnym francuskim Centre National de la Recherche Scientifique, następnie w telewizyjnym centrum badawczym. Prace badawcze kontynuował w Princeton i w MIT, gdzie ostatecznie został wykładowcą. Przez dwadzieścia lat – do 1975 roku – mieszkał wraz z żoną Aliette i dwojgiem dzieci w Genewie. Oprócz MIT związany był także z uniwersytetem w Lille i paryską Politechniką, a od roku 1958 z nowojorskim ośrodkiem IBM.

Mandelbrot był laureatem wielu prestiżowych nagród. Został kawalerem Legii Honorowej, laureatem Amerykańskiej Akademii Sztuk i Nauk, członkiem wielu towarzystw i najważniejszych gremiów naukowych oraz doktorem honorowym siedmiu uniwersytetów. Otrzymał Medal Barnarda, nagrodę *Magna est Veritas* amerykańskiej Narodowej Akademii Nauk, Medal Franklina, niemiecką nagrodę Humboldta, izraelską nagrodę Harveya i nagrodę Fundacji Wolffa, a także wiele innych laurów europejskich, izraelskich i amerykańskich. Uniwersytet Warszawski i Polskie Towarzystwo Matematyczne w 2005 roku odznaczyło go Medalem Sierpińskiego.

Oprócz prac czysto matematycznych publikował artykuły z zakresu: lingwistyki, ekonometrii, demografii, meteorologii, bakteriologii, neurofizjologii, telekomunikacji, teorii szyfrów, geofizyki, akustyki, hydrodynamiki, termodynamiki i astronomii.

Jego imię zostało uwiecznione w nazwie jednej z planetoid, a także w nazwie fraktala zwanego „żukiem Mandelbrota” lub „jabłkiem Mandelbrota” (ilustracje na tylnej okładce).



## Komety muskające Słońce – Sungrazing Comets

*Michał Kusiak*  
*Student astronomii UJ*

Sungrazing Comets to międzynarodowy program poszukiwania komet w małych odległościach od Słońca.

26 grudnia 2010 roku sonda kosmiczna SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) po ponad piętnastu latach prowadzonej misji badawczej zanotowała odkrycie **dwutysięcznej** komety przemierzającej się blisko Słońca. Informacja o tym wyczynnie odbiła się szerokim echem w wielu światowych mediach popularnonaukowych. Jej dorobek stanowi bowiem ponad 50% wszystkich komet znalezionych w całej opisanym historii astronomii, a jest to tym większy sukces, ponieważ sama sonda nie została zaprojektowana z myślą o identyfikowaniu drobnych ciał w Układzie Słonecznym.



**Kometa Ikeya-Seki**  
(oficjalne oznaczenie C/1965 S1)

Misja sondy SOHO rozpoczęła się 2 grudnia 1995 roku. Zaprojektowany przez agencje kosmiczne ESA i NASA próbnik został wystrzelony z przylądka Cape Canaveral na Florydzie za pomocą rakiety Atlas II. Plan misji zakładał umiejscowienie słonecznego obserwatorium w jednym z bardzo osobliwych miejsc w przestrzeni międzyplanetarnej. Po wielu manewrach orbitalnych sonda została ulokowana w odległości 1,5 mln km od Ziemi, w punkcie libracyjnym L1, gdzie siły grawitacyjne Słońca i naszej planety równoważą się. Sonda wykonuje pełny obieg wokół Słońca niemal dokładnie z tym samym okresem co Ziemia. Przyniosło to spore korzyści, ponieważ wszelkie dane obserwacyjne, jakie zostają zebrane za pośrednictwem SOHO, są na bieżąco przesyłane na Ziemię.

Zasadniczym celem całego przedsięwzięcia było przeprowadzenie badań Słońca oraz jego heliosfery. Z upływem czasu wykształciła się również dość praktyczna gałąź badań, polegająca na prognozowaniu tak zwanej „pogody kosmicznej”, czyli regularnego oceniania ryzyka i potencjalnych skutków zjawisk zachodzących na powierzchni Słońca, m.in. koronalnych wyrzutów masy i ich wpływu na naszą planetę. Projekt okazał się bardzo użyteczny, gdyż przynosi on znaczące korzyści m.in. pod kątem ochrony wszelkiego rodzaju satelitów telekomunikacyjnych. Mogłyby one ulec awarii w wyniku negatywnego oddziaływania większego zagęszczenia materii słonecznej, docierającej w pobliże Ziemi kilkadziesiąt godzin po wystąpieniu takiego wyrzutu.

Na pokładzie zamieszczono kilkanaście przyrządów mających różne zadania i działających w różnych zakresach spektralnych. Wśród nich największą rolę, jeśli chodzi o identyfikowanie nowych komet, odegrały koronografy LASCO C3, LASCO C2 oraz od czasu do czasu detektor SWAN. Zakres widma, w jakim pracują przyrządy LASCO, mieści się w przedziale 400–800 nm, przy czym LASCO C2 jest szczególnie czuły w okolicy 600 nm. Jak wykazały wieloletnie badania, taki dobór widma był niezwykle trafny z punktu widzenia odkrywania nowych komet. Pojawiły się bowiem informacje, że 85% komet, jakie odkrywane były za pośrednictwem sondy SOHO, należących do tzw. Grupy Kreutza<sup>1</sup>, w swoim widmie ma niezwykle intensywną linię sodu (589 nm). Przełożyło się to na znaczącą liczbę detekcji obiektów pochodzących z tej formacji. Małe komety, o rozmiarach kilkunastu metrów średnicy, w tak bliskiej odległości od Słońca tworzą wokół swojego jądra zazwyczaj już tylko otoczkę pyłową<sup>2</sup>. Wszelkie molekuly są produkowane w małych ilościach, a żywotność jest silnie zredukowana przez zjawisko fotodysocjacji, powodujące bardzo szybki ich rozpad. W przypadku komet Kreutza spora ilość sodu zadecydowała właśnie o bardzo dobrej widoczności poszczególnych składników na zdjęciach LASCO.

Sonda SOHO rozpoczęła pracę z początkiem 1996 roku, ale pierwszą kometę odkrył dopiero w sierpniu S. Stezelberger – jeden z członków projektu LASCO. W ciągu następnych trzech lat personel pracujący przy obróbce danych z koronografów rozpoznał około 50 kolejnych obiektów. Liczba odkryć zaczęła jednak przemawiać za tym, żeby stworzyć odrębny projekt, który skupiałby się na identyfikowaniu i badaniu nowo pojawiających się komet w pobliżu Słońca. Postanowiono zatem stworzyć platformę komunikacyjną, która zrzeszałaby nie tylko astronomów zawodowych, ale również amatorów za pośrednictwem Internetu. Pomysł okazał się strzałem w dziesiątkę. Pierwszym miłośnikiem astronomii, który dokonał odkrycia za pośrednictwem Internetu został Terry Lovejoy z Australii. Na zdjęciach z 31 lipca i 1 sierpnia 1999 roku znalazł dwie komety pochodzące z Grupy Kreutza. Ten fakt zmobilizował kolejnych amatorów do rozpoczęcia własnych poszukiwań, co przekładało się na gwałtowny wzrost liczby odkryć. W 2003 roku sonda SOHO odkryła 500. kometę, a znaleziska dokonał astronom amator z Niemiec Rainer Kracht, obecnie lider całego

---

<sup>1</sup> Grupa Kreutza – zbiorowisko małych komet powstałych w wyniku rozpadu jednej dużej komety pod wpływem sił pływowych Słońca. Charakterystyczny dla tych komet jest punkt peryhelium położony ekstremalnie blisko Słońca (tuż przy fotosferze). Zdecydowana większość komet Kreutza (odkrywanych przez sondy kosmiczne SOLWIND, SMM, SOHO i STEREO) uznawana jest za komety jednopojawieniowe, ponieważ oddziaływanie Słońca podczas przelotu fragmentu powoduje ich całkowity rozpad.

<sup>2</sup> Duża kometa w wyniku oddziaływania Słońca zaczyna uwalniać w przestrzeń kosmiczną gaz i pył tworząc początkowo tzw. komę, głowę. Z biegiem czasu jądro komety zaczyna wyrzucać materię tworząc dwa warkocze: pyłowy i gazowy, które mogą być skierowane pod nieco różnymi kątami względem ruchu komety.

projektu i niezwykle aktywny badacz komet SOHO, odkrywca m.in. dwóch nowych grup komet nazwanych jego imieniem oraz kilku komet okresowych z potwierdzonymi oddziaływaniami niegrawitacyjnymi wpływającymi na ich ruch orbitalny. Dorobek naukowy Krachta przyczynił się do rozwinięcia idei samodzielnych obserwacji astrometrycznych takich obiektów, co w wyraźny sposób widoczne jest w praktyce. Przynajmniej kilku miłośników astronomii na świecie oprócz poszukiwań na bieżąco analizuje nowo odkryte komety, licząc między innymi astrometrię i orbity, a wyniki wykorzystywane są w dalszych badaniach, prowadzonych głównie przez Instytut Minor Planet Center.

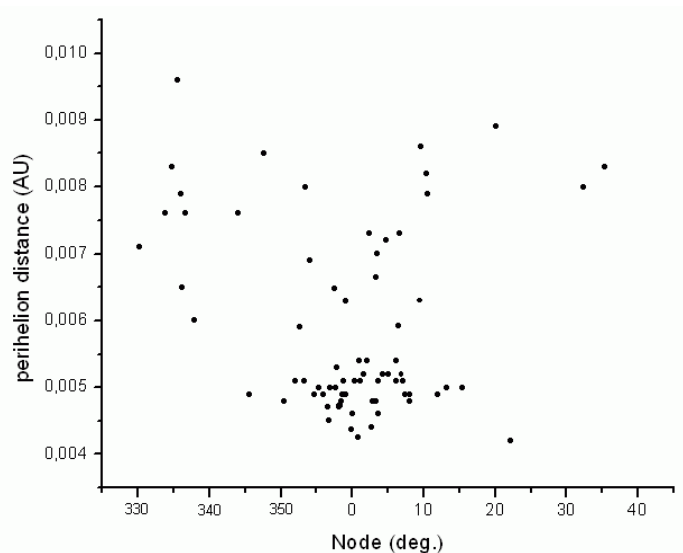
### **Co odkrywamy na zdjęciach SOHO, czyli krótka charakterystyka poszczególnych grup**

Do chwili rozpoczęcia badań przez sondę SOHO w naukowych publikacjach dotyczących komet dostępne były wyłącznie informacje o grupie Kreutza. Publikacja napisana przez niemieckiego astronoma Heinricha Kreutza została oparta na analizie kilku obiektów opisanych w XI i XIX wieku, których niemal identyczne orbity sugerowały, że są powiązane ze sobą fizycznie. Sporą część swojego życia poświęcili tej grupie komet dr Brian Marsden, szef Minor Planet Center, Zdenek Sekanina i Paul Chodas z Jet Propulsion Laboratory. Wspólnie wykazali, że obiekty opisane przez Kreutza, a także kolejna seria obiektów z tej grupy obserwowana w latach 60. XX wieku, pochodzą prawdopodobnie z rozpadu jednej gigantycznej komety, której pojawienie datowane jest na około czwarte stulecie naszej ery. Silne oddziaływania pływowe działające podczas bardzo bliskiego przejścia przez peryhelium (tuż przy fotosferze Słońca) przyczyniły się do rozpadu obiektu. Nadana dzięki temu dodatkowa energia oraz oddziaływania związane z rotacją poszczególnych jąder kometarnych spowodowały, że względne szybkości fragmentów (rzędu kilkunastu–kilkudziesięciu metrów na sekundę) utworzyły dwie podgrupy (rys. 1 i 2) oraz odsunęły potencjalne fragmenty po przelocie koło Słońca w XI wieku na mniej więcej równe odległości między sobą. Ich ponowne pojawienie się miało miejsce w ostatnich dwóch stuleciach. Co więcej, obiekty obserwowane za pośrednictwem sondy SOHO mogą świadczyć o możliwości pojawienia się kolejnej serii większych fragmentów, gdyż roczna częstość odkryć ma tendencję zwyżkową (rys. 3), a model teoretyczny ewolucji Grupy Kreutza przewiduje właśnie taki scenariusz.

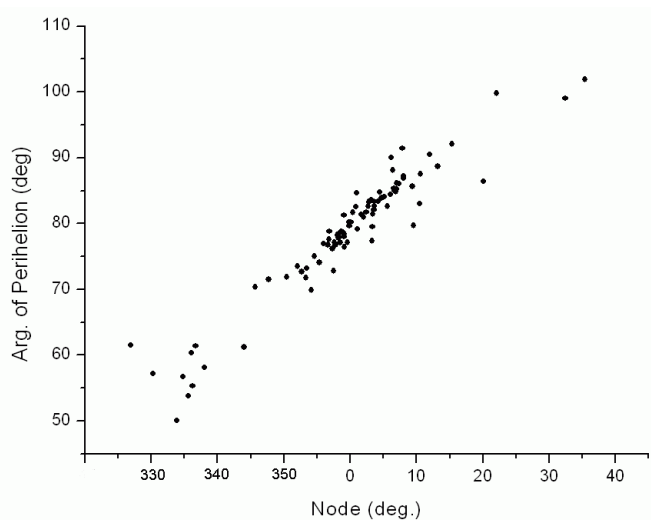
W tych dwóch przypadkach obie zależności pokazują, jak ważne w procesie ewolucji Grupy Kreutza miały także oddziaływania grawitacyjne Jowisza. Warto pamiętać, że w naszym Układzie Słonecznym zaraz po Słońcu Jowisz zawsze odgrywa „pierwsze skrzypce” wpływając na ruch mniejszych ciał po ich orbitach. Elementy geometryczne komet Kreutza z upływem czasu zostały zaburzone poprzez jego perturbacje. Z kolei różnice w odległościach w peryhelium wynikają bezpośrednio z faktu rozpadu macierzystej komety w wyniku sił pływ-



wowych Słońca i nadania poszczególnym fragmentom dodatkowego „zastrzyku” energii i pędu.



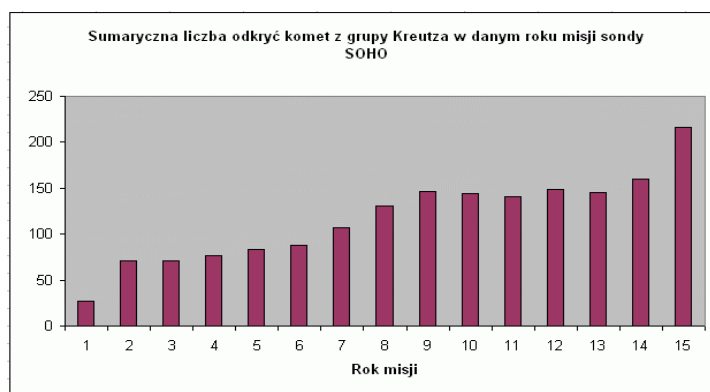
Rys. 1. Zależność geometryczna odległości peryhelium od długości węzła wstępującego<sup>3</sup>



Rys. 2. Zależność: argument szerokości peryhelium od długości węzła wstępującego

<sup>3</sup> Węzeł, punkt na orbicie ciała niebieskiego, który przecina płaszczyznę ekliptyki. Punkt, w którym obiekt przechodzi z ujemnych do dodatnich szerokości ekliptycznych, nazywamy węzłem wstępującym.

Komety z Grupy Kreutza odkrywane przez SOHO to obiekty, których rozmiary nie przekraczają zwykle 20–30 metrów średnicy. Tak małe rozmiary i niekorzystne ułożenie orbit w przestrzeni powoduje, że możemy je obserwować jedynie w czasie bliskiego przelotu koło Słońca. Każda z odkrytych komet rozpada się w wyniku oddziaływań pływowych i silnego ciśnienia wiatru słonecznego. W początkowych latach swojej misji SOHO notowała 50–100 pojawień członków tej grupy. W 2010 roku, ta liczba wzrosła do 200 (rys. 3).



Rys. 3. Statystyczne roczne zestawienie odkryć komet Kreutza; 1996 (1. rok misji), 2010 (15. rok misji)

Miłośnicy astronomii rozpoczynający swoje poszukiwania w projekcie skupiają z reguły uwagę na identyfikowaniu obiektów wyłącznie z tej grupy, gdyż na podstawie wieloletnich obserwacji wyznaczono pewne obszary zdjęć, na których w sposób sezonowy one się pojawiają. To ułatwia w jakiś sposób pracę i po zdobyciu odpowiedniego doświadczenia daje realne szanse na odkrycie nowej komety.

W trakcie trwania misji SOHO dokonano identyfikacji nowych grup komet. Najmniej jak dotąd poznana jest grupa odkryta przez niemieckiego amatora Maika Meyera, który poprzez samodzielne obliczenia orbit spostrzegł identyczność w elementach orbit dla kilku komet. Grupę Meyera stanowi około 5% wszystkich odkrywanych obiektów za pośrednictwem SOHO. Do tej pory odkryto ich ponad sto. Charakterystyczny dla tych komet jest gwiazdopodobny wygląd. Przypuszcza się, że formacja jest znacznie starsza aniżeli grupa Kreutza, stąd obiekty mogły być wielokrotnie narażone na oddziaływanie Słońca i utracić w tym czasie sporą część materiału tworzącego zwykle otoczkę i warokcz podczas bliskiego przejścia w okolicy peryhelium.

Niezwykle ciekawe okazały się jednak dwie kolejne grupy (odkryte przez Rainera Krachta i Briana Marsdena), których składniki obserwowane są od początków misji, a co więcej, są kometami krótkookresowymi. Obiekty z grup Krachta i Marsdena o dostatecznie dużych rozmiarach potrafią przetrwać przejście przez

peryhelium i zwykle pojawiają się ponownie po blisko 5–6 latach. Powstały one najprawdopodobniej w wyniku rozpadu okresowej komety 96P/Machholz, która z podobnym okresem powraca w pobliże Słońca. Obie grupy stanowią około 3% wszystkich obiektów odkrywanych za pośrednictwem sondy SOHO, a w ich skład wchodzi około 70 komet.

### **Działania polskie w projekcie oraz zestawienie odkryć w 2010 roku**

Pierwsze próby poszukiwań komet SOHO przez Polaków datowane są na lata 2000–2002, jednak z powodu ograniczonego dostępu do Internetu nie przyniosły one większych efektów (w powszechnym użyciu nadal był modem telefoniczny i łącza internetowe o dość niskiej przepustowości). Dopiero w 2006 roku doszło do przełomu, kiedy swoje pierwsze komety w ciągu kilkudziesięciu godzin odkrył Arkadiusz Kubczak z Piotrkowa Trybunalskiego. Kolejne lata przynosiły coraz lepsze rezultaty, co wzbudziło spore zainteresowanie wśród polskich miłośników astronomii. Obecnie w projekcie uczestniczy kilkunastu Polaków, z czego pięciu odkryło komety: Eryk Banach, Marek Kałużny, Arkadiusz Kubczak, Michał Kusiak (autor artykułu) oraz Rafał Reszelewski. Ostatni z wymienionych dokonał swojego odkrycia w maju 2010 roku jako trzynastoletni uczeń gimnazjum, co wraz z Hanjie Tan z Chin czyni go najmłodszym uczestnikiem projektu, któremu udało się odnaleźć kometa.

Rok 2010 zakończył się w sposób niezwykle udany dla polskich uczestników. W tym czasie zanotowaliśmy łącznie 59 odkryć nowych komet, co dało nam drugie miejsce wśród krajów biorących udział w projekcie. Co więcej, ubiegły rok był czasem próby dla samego projektu. W grudniu 2009 NASA ucięła sporą część funduszy na prowadzenie działań w ramach kilku misji kosmicznych, co przełożyło się również na blisko półroczne zawieszenie projektu SOHO Sungrazing Comets. Nie oznaczało to jednak końca poszukiwań. Na ten czas koordynator projektu Karl Battams (z Naval Research Lab w Waszyngtonie) przekazał mi tymczasowo część swoich obowiązków, dzięki czemu od grudnia 2009 do czerwca 2010 centrum działań projektu znalazło się w naszym kraju. W tym okresie skatalogowanych zostało ponad 120 nowych komet, a dalsze badania rozpoczęto w lipcu. Był to także okres, w którym zanotowano niezwykle dużą liczbę pojawień komet z Grupy Kreutza. Wśród nich 7 komet o nieprzeciętnie dużej jasności.

- **C/2009 Y4 (STEREO)** na zdjęciach STEREO HI1A (z 30.12.2009), odkrywca: Alan Watson (Australia)
- **C/2010 B3 (STEREO)** na zdjęciach STEREO HI1A (z 17.01.2010), odkrywca: Alan Watson (Australia)
- **C/2010 E6 (STEREO)** na zdjęciach STEREO HI1A (z 10.03.2010), odkrywca: Alan Watson (Australia)
- **SOHO-1932** na zdjęciach LASCO C3 (z 19.10.2010), odkrywca Bo Zhou (Chiny)

- **SOHO-1948** na zdjęciach LASCO C3 (z 12.11.2010), odkrywca Masanori Uchina (Japonia)
- **SOHO-1954** na zdjęciach LASCO C3 (z 17.11.2010), odkrywca Michał Kusiak (Polska) – rys. 4
- **SOHO-1990** na zdjęciach LASCO C3 (z 19.12.2010), odkrywca Michał Kusiak (Polska)

W trakcie poszukiwań, oficjalnie zanotowano trzy tak zwane „kamienie milowe”, czyli odkrycie komet z nadanymi okrągłymi numerami katalogowymi:

- SOHO-1800: Masanori Uchina (Japonia), 6.02.2010
- SOHO-1900: Zhijian Xu (Chiny), 11.08.2010
- SOHO-2000: Michał Kusiak (Polska), 26.12.2010



Rys. 4. SOHO-1954 odkryta 17 listopada 2010 roku. Jedna z najjaśniejszych komet z Grupy Kreutza w 2010 roku

Name (Country)	Discoveries
Michał Kusiak (Poland)	55
Bo Zhou (China)	44
Masanori Uchina (Japan)	43
Jiangao Ruan (China)	35
Zhijian Xu (China)	26
Alan Watson (Australia)	17
Robert Matson (US)	9
Rainer Kracht (Germany)	6
Keith Nakonechny (Canada)	3
Arkadiusz Kubczak (Poland)	2
Hua Su (China)	2
Tony Hoffman (US)	1
Rafał Reszelewski (Poland)	1
Bin Wang (China)	1
Hanjie Tan (China)	1
Shishir Deshmukh (India)	1
Man-To Hui (China)	1
Marek Kaluzny (Poland)	1

Zestawienie wykonane na podstawie informacji ze stron: Sungrazing Comets i BAA Comet Section

W 2010 roku w projekcie wzięło udział około 30 osób z całego świata spośród ponad 100 zarejestrowanych. 18 z nich odkryło przynajmniej jedną kometę:

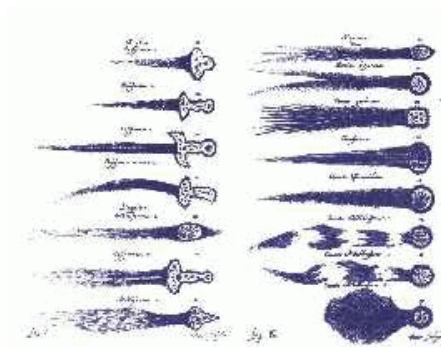
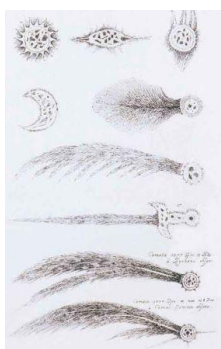
Rok 2011 rozpoczął się w projekcie odkryciem kolejnych komet, w tym także przez Polaków. Życzę wszystkim pasjonatom tego tematu, żeby przyniósł on równie ciekawe wyniki jak w roku ubiegłym, a co najważniejsze, żeby uczestnicy z naszego kraju poprzez swoje poszukiwania pogłębiali możliwie jak najszerszej swoją wiedzę.



## Jan Heweliusz – łowca komet

Zofia Gołąb-Meyer

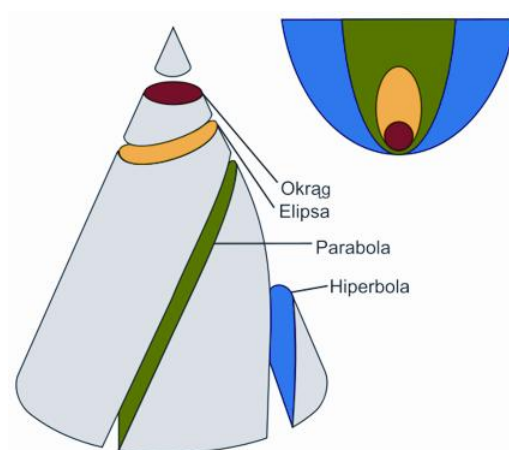
W polu zainteresowań wybitnego gdańskiego astronoma Jana Heweliusza żyjącego w XVII wieku znajdowały się również komety. Obserwował, opisywał, szkicował i analizował ich ruch. W 1682 roku udało mu się zaobserwować kometę znaną później pod nazwą komety Halleya. Pracował w swoim własnym obserwatorium w Gdańsku, niekiedy razem z żoną. Poniżej oryginalne rysunki z 1668 roku sporządzone przez Heweliusza.



Heweliusz swoje spostrzeżenia na temat komet zawarł, nie licząc pomniejszych dzieł, w dwóch większych publikacjach: w 1665 roku w *Prodromus cometicus*, zaś w 1688 roku w *Cometographia* opisał obserwacje 9 komet.



Zwróćcie uwagę na piękne ilustracje. Analizując ruch komet Hewelisz słusznie podejrzewał, że ich tory mogą być krzywymi stożkowymi, czyli takimi, które powstają z przecięcia stożka z płaszczyzną. Do krzywych stożkowych należą okręgi, elipsy, parabole, hiperbole. Prawidłową interpretację torów komet podał w późniejszych czasach Edmund Halley.



Krzywe stożkowe

Chociaż Heweliusz trudnił się astrologią, to jednak odcinał się od przypisywania kometom jakichś astrologicznych i wróżbiarskich właściwości.



## KOMUNIKAT

### Młodzi astrofizycy

Zofia Gołąb-Meyer

#### 13-letni Rafał Reszelewski odnalazł nieznaną kometę

13-letni Rafał Reszelewski, uczeń gimnazjum ze Świdwina jest najmłodszym uczestnikiem projektu SOHO, który odkrył kometę. Astronomią interesuje się od prawie dwóch lat, a łowami komet zaledwie 3 miesiące.

(patrz: artykuł Michała Kusiaka, s. 52)



#### Najmłodsza odkrywczyni supernowej

Królewskie Towarzystwo Astronomiczne Kanady (RASC) doniosło, że dziesięcioletnia Kanadyjka Kathryn Aurora Gray jest najmłodszą osobą, która odkryła supernową.

Kathryn Aurora Gray mieszka w Kanadzie w prowincji New Brunswick. Dziewczynka razem z ojcem obserwowала (poprzez połączenie komputerowe z teleskopem) odległe galaktyki. Oboje w ramach hobby zajmują się astronomią.

Odszukanie supernowej zajęło Katarzynie zaledwie 15 minut. Korzystając ze specjalnego programu komputerowego porównała dwa obrazy nieba, jeden zachowany z 1 stycznia 2011 oraz najnowszy zapisany przez jej ojca. Kiedy w jednym z obrazów czegoś brakuje, program wstawia mrugający obiekt, który Katarzyna zidentyfikowała jako supernową.

Kosmiczna eksplozja zdarzyła się w galaktyce UGC 3378 w gwiazdozbiórze Żyrafy, która jest oddalona od Ziemi o 240 mln lat świetlnych. Supernowe są to eksplozje gwiazd o masie większej od naszego Słońca. Są one źródłem większości pierwiastków tworzących planety, w tym Ziemię. Odkrycia supernowych mają znaczenie przy szacowaniu rozmiaru Wszechświata.

Supernowe zaliczają się do efektownych zjawisk na niebie. Jasność podczas eksplozji jest tak wielka, że może oświetlić całą galaktykę.







## CO CZYTAĆ

### Astronom i piwowar z Gdańska Jan Heweliusz (1611–1689)

Zofia Gołqb-Meyer

28 stycznia 2011 roku minęło 400 lat od narodzin wielkiego astronoma Jana Heweliusza. Z tej okazji ukazało się wiele artykułów na jego temat zarówno drukiem, jak i w Internecie.

W Internecie szczególnie polecamy doskonały artykuł Jarosława Włodarczyka *Piwowar z Gdańska*, z którego zaczerpnięte Państwo informacje nie tylko o edukacji Heweliusza, jego pracy naukowej, dziełach przez niego napisanych, zbudowanym obserwatorium, lecz także o działalności biznesowej, kontaktach naukowych oraz z władcami. Artykuł jest pięknie ilustrowany (<http://www.wiw.pl/nawinki/astro nomia/200101/20010130-002.asp>).



Czytając życiorys Heweliusza można zapomnieć, iż żył on 400 lat temu w zupełnie innej niż współczesna Europie. W czasach, w których nie jeździły pociągi, nie latały samoloty, nie było telefonów, a i poczta dopiero raczkowała. Tymczasem Heweliusz był niesłychanie nowoczesny. Genialnie łączył pracę naukową ze społeczną (był rajcą) i z prowadzeniem interesów (browary).

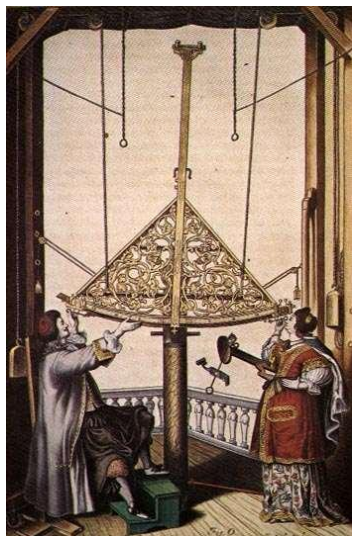


Luneta do obserwacji Słońca metodą projekcji. Rycina z dzieła Heweliusza *Machinae coelestis pars prior* (Gdańsk 1673)

Heweliusz dbał o kontakty w władcami, zabiegał o swój PR. Badania Heweliusza wspierał król Jan Kazimierz i nadał mu przywilej na prowadzenie drukarni. W roku 1677 król Jan Sobieski przyznał mu pensję w wysokości 1000 florenów rocznie, w roku 1678 zwolnił od płacenia podatków z browarów, a po pożarze w 1679 roku sfinansował mu powtórne urządzenie obserwatorium.

Heweliusz nie zaniedbywał też życia rodzinnego. Miał sporą gromadkę dzieci, a młodą i utalentowaną żonę wciągnął do pomocy nie tylko w interesach, ale przede wszystkim w pracy naukowej. To ona, Elżbieta z domu Koopmann, zadbała o jego spuściznę i prowadziła dalej badania po śmierci męża. Wydała też dwie książki z wynikami obserwacji Heweliusza.





Heweliusz z drugą żoną, Elżbietą, prowadzą obserwacje wielkim oktantem. Do celowania ku gwiazdom służyły przeziernice nie wyposażone w lunetę. Rycina z dzieła *Machinae coelestis pars prior* (Gdańsk 1673)

Na ten temat można więcej przeczytać w książce Kornelii Stepan, *Żona Astronoma. Historia Elżbiety Katarzyny Heweliusz*, Wyd. Bukowy Las, Wrocław 2010 oraz w artykule Juliusza Domańskiego *Jan i Elżbieta Heweliuszowie*, opublikowanym w „Fizyce w Szkole” Nr 1, 2011.

Polecamy też kalendarz Fundacji Gdańskiej, *Almanach 2011*, który zawiera piękne ilustracje i na każdy miesiąc krótkie artykuły o Heweliuszu:

1. *Gdańszczanin* – Helena Dzienis
2. *W Gimnazjum Akademickim* – Lech Mokrzecki
3. *Browarnik* – Andrzej Januszajtis
4. *Badacz Księżycy* – Jarosław Włodarczyk
5. *Rajca miejski* – Jerzy Samp
6. *Wydawca i drukarz* – Ewa Ogonowska
7. *Uczony-artysta* – Karolina Targosz
8. *Twórca zegara wahadłowego* – Grzegorz Szychliński
9. *Mąż swoich żon* – Voula Saridakis
10. *Królewscy mecenas* – Karolina Targosz
11. *Uranograf* – Jarosław Włodarczyk
12. *Żywa legenda Gdańska* – Jerzy Samp

<http://www.fundacjagdanska.pl/pliki/12portretow.pdf>

Ciekawe artykuły dotyczące Heweliusza można też znaleźć na stronie pani Małgorzaty Czerniakowskiej, pracownicy Archiwum Gdańskiego (<http://emmcz.republika.pl/>) oraz na stronie *Zwojów*: Andrzej Kobos *Kilkoro sławnych gdańszczan* (<http://zwoje-scrolls.com/zwoje43/text14.htm>).



## Odgłosy z jaskini (19) Jak pływa kostka lodu

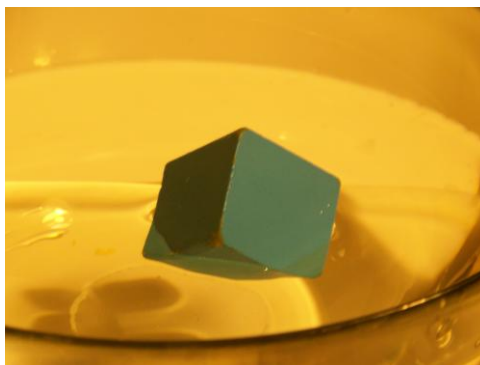
*Adam Smólski*

Zaintrygowało mnie zadanie z matury rozszerzonej w 2010 roku. Oto jego początek:

**Zadanie 6. Siła wyporu (10 pkt)**  
Drewniany sześcian o gęstości  $900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  i boku  $a = 5 \text{ cm}$  umieszczono w naczyniu z wodą o gęstości  $1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

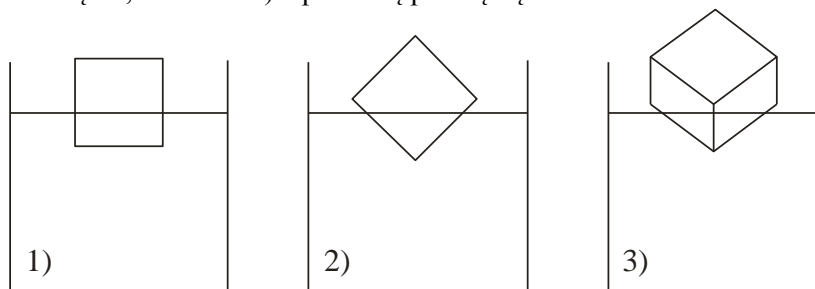
Nie chodzi mi bynajmniej o to, że na rysunku ściana sześcianu nie jest kwadratem ani że rysunek nie respektuje stosunku gęstości – takie wady to już niestety rutyna. Podana gęstość pasuje też raczej do lodu, stąd nasz tytuł.

Zastanowiło mnie, czy na pewno sześcian pływa w takiej pozycji. Owszem, leciutki, np. ze styropianu, na pewno będzie poziomo „leżał” jedną ze ścian na wodzie. Ale powyżej pewnej gęstości położenie „na płask” już nie jest stabilne – sześcian obróci się jednym z wierzchołków ku górze. Sprawdziłem to doświadczalnie dla klocka o gęstości około  $500 \text{ kg/m}^3$ :

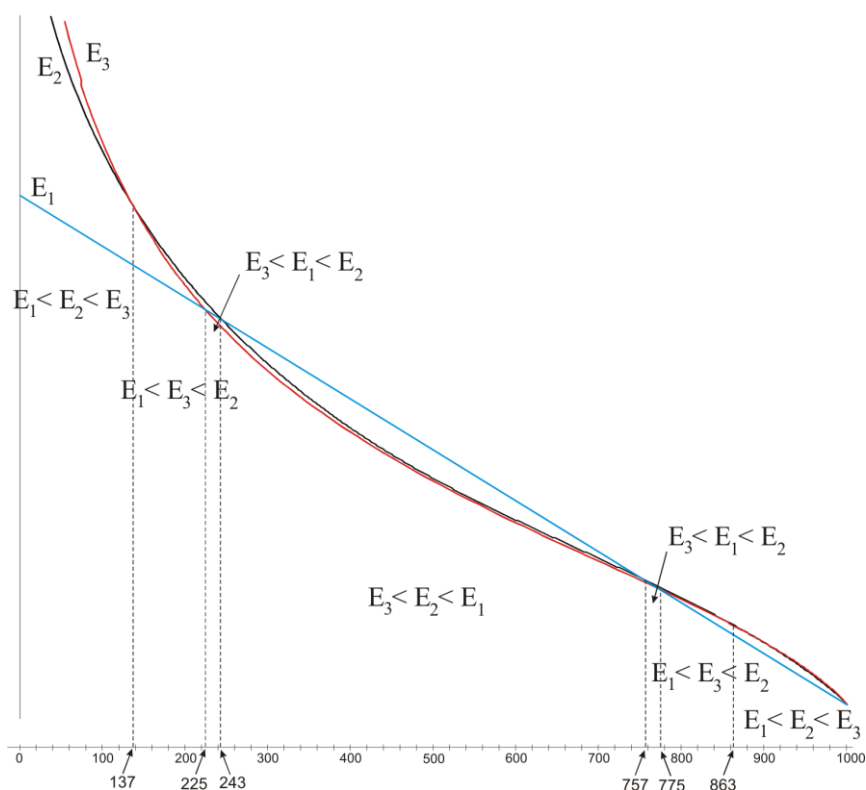


Jaka jest graniczna gęstość i czy zmian stabilnego położenia jest więcej?

Sprawa wymagała oczywiście teoretycznego zbadania. Obliczałem łączną energię potencjalną układu sześcian–woda w trzech położeniach równowagi, być może chwiejnej: 1) z poziomą ścianą, 2) z poziomą płaszczyzną przeciwległych krawędzi, wreszcie 3) z pionową przekątną.



Czytelnikowi oszczędzę śledzenia rachunków, które są mozolną dłubaniną. Oto wykresy energii potencjalnej w zależności od gęstości sześcianu (po odjęciu energii, jaką ma woda, gdy sześcian nie jest jeszcze zanurzony), podzielonej przez masę sześcianu (czyli jest to energia przypadająca na kilogram materiału sześcianu).



Wykresy przecinają się w sześciu punktach. Na dole podane są krytyczne gęstości (w  $\text{kg/m}^3$ ), w przybliżeniu do trzech cyfr znaczących.

Zdaję sobie sprawę, że położenie, w którym energia potencjalna nie ma absolutnego minimum, też mogłoby być stabilne (minimum byłoby tylko lokalne), ale nie przypuszczam, by tak mogło być w przypadku sześcianu. Jednak w pełni tego nie zbadałem.

Jeśli takich tylko lokalnych minimów nie ma i w rozpatrywanych położeniach znajdujemy minima absolutne, to widzimy, że położenie 2 nigdy nie bywa stabilne. Dla małych gęstości (do  $225 \text{ kg/m}^3$ ) stabilne jest położenie 1, potem aż do  $775 \text{ kg/m}^3$  położenie 3 i powyżej znowu położenie 1. Brawo Centralna Komisja Egzaminacyjna, dla podanej w zadaniu gęstości rzeczywiście sześcian pływa „płasko”, choć nie wygląda to tak, jak na rysunku.



## Komunikat grupy Borowice w Kudowie

Informujemy ze smutkiem, że odeszła nasza koleżanka Grażyna Generowicz, nauczycielka fizyki III LO im Mikołaja Kopernika w Kaliszu. Oto co napisali po jej odejściu uczniowie:

Są odejścia, których nie rozumiemy, są wyroki, wobec których pozostajemy bezsilni i – po ludzku – bezradni.

Cierpimy, bo z niedowierzaniem i bólem przyjęliśmy wiadomość o odejściu Nieodżałowanej Pani Profesor, Wspaniałego Fizyka, Naszej Drogiej Koleżanki, Człowieka Wyjątkowego, ś.p. Grażyny Generowicz.

W swoim pięknym życiu, za krótkim życiu, pokazała nam jak łączyć zawód z pasją i marzeniami. Pomysły, plany, znakomita organizacja i wyjątkowa pracowitość – to wszystko ofiarowała nam i to zostawia w testamencie, inspirując do działania. [...] W słońcu ogrzejemy się ciepłem Twojej obecności, opromieni nas uśmiech, którego nigdy nie zapomnimy. W spadającym meteorycie dostrzeżemy iskierkę – zachętę, by kontynuować Twoje dzieła; wielkie dzieła na miarę człowieka. Dziękujemy za każdą rozmowę, wiedzę i talent.

Wdzięczni za uśmiech, ludzką wyrozumiałość i serce, tak wielkie jak galaktyka... widocznie Bóg potrzebował lekcji fizyki. [...]





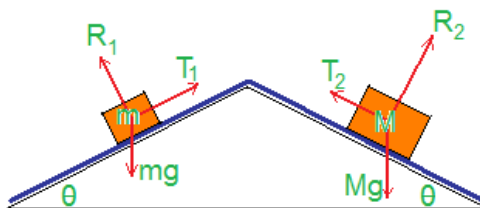
## Zadania ligi zadaniowej „Wyzwania dla nauczycieli i uczniów” Borysa Korsunsky’ego

*Adam Wyrzykowski*

*V Liceum Ogólnokształcące im. A. Witkowskiego, Kraków*

W październikowym zeszycie *The Physics Teacher* 2010 (i w Internecie) w rubryce *Physics Challenge for Teachers and Students* prowadzonej przez Borysa Korsunsky’ego znajduje się następujące zadanie:

*Nieskończenie lekka płaska taśma jest położona na trójkątnej równi pochyłej jak pokazano na rysunku. Na taśmie znajdują się dwa klocki. Współczynniki tarcia statycznego i kinetycznego między taśmą i klockami wynoszą odpowiednio  $\mu_s$  oraz  $\mu_k$ . Nie ma tarcia pomiędzy taśmą i równią. Dane są kąt  $\theta$  i masy klocków  $m$  oraz  $M$ . Zakładając, że  $M > m$ , znajdź przyspieszenie taśmy wzdłuż równi po tym, jak klocki zostaną jednocześnie puszczane. Rozważ wszystkie możliwe przypadki.*



Rozwiązanie opiera się na analizie dwóch przypadków:

i) Najpierw rozważmy przypadek, w którym żaden z klocków nie ślizga się po taśmie. Równania ruchu są następujące:

$$ma = T_1 - mg \sin \theta \quad (1a) \qquad mg \cos \theta = R_1 \quad (1b)$$

$$Ma = Mg \sin \theta - T_2 \quad (2a) \qquad Mg \cos \theta = R_2 \quad (2b)$$

gdzie  $a$  – przyspieszenie klocków i taśmy wzdłuż równi. Pozostałe oznaczenia są wyjaśnione na rysunku ( $\vec{T}_1$  i  $\vec{T}_2$  są siłami tarcia działającymi na odpowiednie klocki). Z III zasady dynamiki Newtona  $\vec{T}_1 = -\vec{N}_1$  i  $\vec{T}_2 = -\vec{N}_2$ , gdzie  $\vec{N}_1$  i  $\vec{N}_2$  są siłami naciągającymi taśmę (działającymi na taśmę). Ponieważ taśma jest nieskończenie lekka, siły działające na nią (aby nie spowodować nieskończonego przyspieszenia) mają równe wartości i przeciwne zwroty. Stąd:

$$N_1 = N_2 \quad (3a)$$

$$T_1 = T_2 \quad (3b)$$

Dodajemy teraz stronami równania (1a) i (2a) oraz korzystamy z warunku (3), żeby dostać  $(M + m)a = (M - m)g \sin \theta$ . Zatem:

$$a = \frac{M - m}{M + m} g \sin \theta \quad (4)$$

Żaden z klocków nie ślizga się po taśmie, kiedy spełnione są oba poniższe warunki:

$$T_1 \leq \mu_s R_1 \quad (5a) \quad T_2 \leq \mu_s R_2 \quad (5b)$$

Podstawiając  $a$  ze wzoru (4) do (1a), dostajemy po prostych przekształceniach wartość  $T_1$  równą, zgodnie ze wzorem (3), wartości  $T_2$ . Obliczamy:

$$T_1 = T_2 = \frac{2Mm}{M + m} g \sin \theta \quad (6)$$

Ze wzorów (5a), (6) oraz (1b), dostajemy  $\frac{2Mm}{M + m} g \sin \theta \leq \mu_s mg \cos \theta$ . Stąd po prostych przekształceniach dostajemy warunek braku poślizgu między klockiem o masie  $m$  i taśmą :

$$\frac{2M}{M + m} \operatorname{tg} \theta \leq \mu_s \quad (7a)$$

Analogicznie ze wzorów (5b), (6) oraz (2b), dostajemy warunek braku poślizgu między klockiem o masie  $M$  i taśmą:

$$\frac{2m}{M + m} \operatorname{tg} \theta \leq \mu_s \quad (7b)$$

Skoro  $M > m$ , więc z warunku (7a) wynika (7b). Zatem warunki (7a) i (7b) są oba spełnione, gdy zachodzi (7a). Stąd warunek stosowalności przypadku i):

$$\frac{2M}{M + m} \operatorname{tg} \theta \leq \mu_s \quad (8)$$

Dla malejących wartości  $\mu_s$  warunek (7a) przestaje być spełniony wcześniej niż (7b) – klocek o masie  $m$  zaczyna wtedy ślizgać się po taśmie. Zatem w drugim przypadku:

**ii)** Klocek o masie  $m$  ślizga się, zaś klocek o masie  $M$  – nie. Oznaczmy i w tym przypadku  $a$  – przyspieszenie taśmy (równe przyspieszeniu klocka o masie  $M$ ). Ponownie dostajemy równania (2a) i (2b) dla cięższego klocka, natomiast dla lżejszego klocka zachodzi:

$$R_1 = mg \cos \theta \quad (9a)$$

Co więcej, podczas poślizgu lżejszego klocka, siła tarcia działająca na niego wynosi:

$$T_1 = \mu_k R_1 \quad (9b)$$

Taśma jest nieskończenie lekka, więc warunek  $T_1 = T_2$  zachodzi jak ostatnio. Zatem:

$$T_2 = T_1 = \mu_k R_1 = \mu_k mg \cos \theta \quad (10)$$

gdzie użyto równań (9a) oraz (9b). Ze wzorów (2a) i (10), dostajemy

$$Ma = Mg \sin \theta - \mu_k mg \cos \theta.$$

Stąd:

$$a = \left( \sin \theta - \frac{m}{M} \mu_k \cos \theta \right) g \quad (11)$$

Pierwszym warunkiem stosowalności przypadku ii) jest niespełnienie warunku dla i), tzn.:

$$\mu_s < \frac{2M}{M+m} \operatorname{tg} \theta \quad (12a)$$

Jest to pierwszy warunek stosowalności przypadku ii).

Drugim warunkiem jest brak poślizgu między klockiem o masie  $M$  i taśmą:

$$T_2 \leq \mu_s R_2 \quad (12b)$$

Ze wzorów (12b), (10) oraz (2b), dostajemy warunek:

$$\mu_k mg \cos \theta \leq \mu_s Mg \cos \theta \Rightarrow \frac{\mu_k}{\mu_s} \leq \frac{M}{m} \quad (13)$$

Ponieważ  $\mu_k / \mu_s < 1$  i z treści zadania wiemy, że  $m < M$  – więc warunek (13) jest zawsze spełniony. Podsumowując wszystkie poprzednie wyniki otrzymujemy wzory na przyspieszenie taśmy:

$$a = \begin{cases} \frac{M-m}{M+m} g \sin \theta & \text{dla } \mu_s \geq \frac{2M}{M+m} \operatorname{tg} \theta \\ \left( \sin \theta - \frac{m}{M} \mu_k \cos \theta \right) g & \text{dla } \mu_s < \frac{2M}{M+m} \operatorname{tg} \theta \end{cases}$$

Rozwiązania zadań z ligi zadaniowej *Physics Challenge for Teachers and Students* są dostępne na stronach *The Physics Teacher* po dwóch miesiącach od publikacji. Prezentowane powyżej zadanie nosi tytuł „Rubbing and ribbon”.



## Errata do *Fotonu* 110

Szanowni Czytelnicy,  
okazało się, że do dwóch artykułów w *Fotonie* 110 wkradły się błędy, za co przepraszamy i zamieszczamy korektę.

1. W artykule Adama Smólskiego „Odgłosy z jaskini (17) – Rozrzutny odrzut” na s. 33 w przedostatnim wzorze na moc unoszoną przez gazy „zgubiło się” oczywiste  $\Delta t$

~~$$P_{\text{gaz}} = \Delta M \cdot \frac{w^2}{2}$$~~

poprawny wzór to

$$P_{\text{gaz}} = \frac{\Delta M}{\Delta t} \cdot \frac{w^2}{2}$$

2. Zadanie z „Turnieju Młodych Fizyków 2010”, dotyczące ciekłego światłowodu (s. 39) zawiera błędy i niedopowiedzenia. Poniżej poprawny fragment artykułu dotyczący rys. 4 (s. 41):

Na rysunku 4 widać, że w trójkącie ABC

$$\beta > 90^\circ$$

a zatem:  $\delta < 90^\circ - \alpha$ .

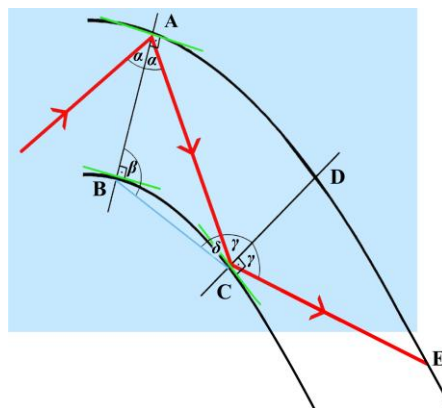
Ponadto  $\delta > 90^\circ - \gamma$ ,

co wynika z faktu, że krzywizna BC jest wklęsła.

Połączenie tych nierówności daje wynik  $\gamma > \alpha$ , co oznacza, że przy drugim od-

biciu kąt padania promienia lasera na granicę ośrodków jest większy od początkowego, tak więc promień zostanie uwięziony w strumieniu wody.

Podobne rozumowanie można przeprowadzić dla odbicia od wypukłej krzywizny w punkcie E, dla kolejnych odbić, jak również dla całego obwodu przekroju strumienia, ponieważ promień nie musi poruszać się w płaszczyźnie rys. 4.



JB

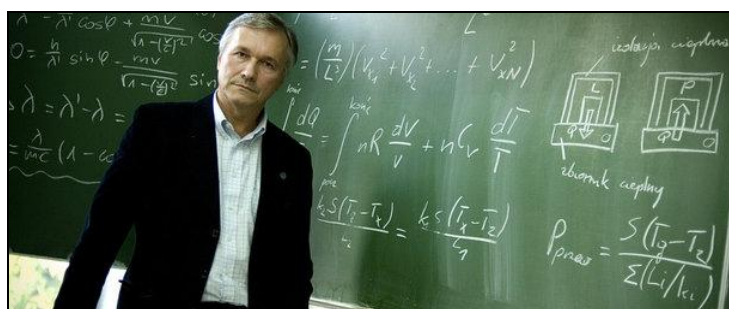




## KOMUNIKAT

### Marek Golka – fizyk – Nauczycielem Roku 2010!

Nauczycielem Roku 2010 został wybrany Marek Golka z Radomia, nauczyciel jednego z podobno najbardziej nielubianych przedmiotów – fizyki.



Marek Golka obecnie jest nauczycielem fizyki w 5 Publicznym Gimnazjum im. Jacka Malczewskiego. W gimnazjum tym uruchomił prawdziwe wzorcowe laboratorium fizyczne. Organizuje z rozmachem, z życzliwym poparciem dyrekcji szkoły i VI Liceum w Radomiu, festiwale fizyki, w których udział biorą setki uczniów nawet z odległych szkół.

My znamy nazwisko Marka Golki głównie jako wychowawcy pokoleń olimpijczyków. To nie do wiary: Marek Golka, ucząc w VI LO im. Jana Kochanowskiego w Radomiu dochował się przez 40 lat pracy 270 finalistów i aż 105 laureatów olimpiad fizycznych, astronomicznych i technicznych. W 2006 roku uczniowie pana Golki uzyskali trzy złote i trzy srebrne medale na międzynarodowych olimpiadach. Czyżby akurat Radom był siedliskiem wybitnych talentów, czy raczej Marek Golka starannie je wylawia i potem szlifuje?

Marek Golka nie tkwi z uczniami w klasie czy nawet w świetnie wyposażonej pracowni, lecz zabiera uczniów na wycieczki naukowe, np. do Lublina, Warszawy, a nawet do CERNu w Szwajcarii. Zaprasza też naukowców na spotkania z uczniami.

Oczywiście Polskie Towarzystwo Fizyczne już dawno doceniło działalność pana Golki i wyróżniło go nagrodą w 1999 roku. Jedna z najlepszych szkół w Polsce, XIII LO w Szczecinie, zaprosiła pana Golkę do współpracy!

Gratulujemy koledze Markowi Golce wyróżnienia i dziękujemy Mu za to, iż społeczny wizerunek nauczyciela fizyki dzięki niemu polepsza się.



## CO CZYTAĆ

**DeltaMi**  
 – nowe internetowe wcielenie *Delty*  
[www.deltami.edu.pl](http://www.deltami.edu.pl)

Jan Gaj

*Delta* ma już ponad 35 lat, a pierwsze internetowe wydanie ukazało się w 2004 roku. W Internecie były publikowane tylko niektóre artykuły z wydań „papierowych”. Teraz to się zmieni – będą na tych stronach umieszczane nowe wydania *Delty* w całości. W miarę upływu czasu będzie udostępniana zawartość elektronicznego archiwum *Delty*, w którym – przez dziesięciolecia – nazbierało się tysiące artykułów i zadań.

Mamy nadzieję, że nowy portal spodoba się Czytelnikom – tym bardziej, że to dopiero początek zmian...

Redakcja *Delty* poleca:

Kącik doświadczeń.

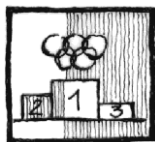
Nowe pomysły.

Zrób to sam.



Z głębokim smutkiem informujemy, że w dniu 19 lutego 2011 roku zmarł Profesor Jan Gaj, przewodniczący Komitetu Redakcyjnego *Delty*, wybitny fizyk, znakomity popularyzator nauki, wspaniały nauczyciel akademicki i wielki przyjaciel młodzieży. Był autorem kultowej wśród fizyków książki *Laboratorium fizyczne w domu* (Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985).





## Konkurs „Fuzja jądrowa”

Konkurs „Fuzja jądrowa” dla uczniów gimnazjum i szkół ponadgimnazjalnych w roku szkolnym 2010/2011.

Krajowy Punkt Kontaktowy Euratom przy Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie organizuje konkurs dla młodzieży szkolnej z zakresu fuzji jądrowej oraz zagadnień związanych z pozyskiwaniem energii, energetyką przyszłości oraz podstawowych zagadnień z dziedziny fizyki i chemii jądrowej.

Konkurs jest częścią projektu „Fuzja w szkole i społeczeństwie” realizowanego przez KPK Euratom-IFPiLM od ponad trzech lat. Projekt wychodzi na przeciw współczesnym potrzebom edukacyjnym w zakresie współpracy instytutów naukowych ze szkołami edukacji publicznej w celu przybliżania uczniom najnowszych osiągnięć naukowych.

Celem konkursu jest:

- popularyzacja wiedzy na temat fuzji jądrowej, jako źródła energii przyszłości,
- rozwijanie zainteresowań fizyką i naukami przyrodniczymi wśród młodzieży,

Konkurs jest trzyetapowy:

1. etap szkolny – przygotowują i przeprowadzają nauczyciele fizyki typując maksymalnie trzech uczniów do etapu rejonowego z danej szkoły,
2. etap rejonowy/wojewódzki,
3. etap ogólnopolski.

Do udziału w konkursie zapraszamy uczniów z gimnazjum oraz I i II klas szkół ponadgimnazjalnych z całej Polski.

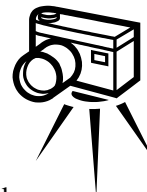
Nauczyciele fizyki lub chemii są proszeni o zgłaszanie swoich uczniów do konkursu do odpowiedniego rejonu lub bezpośrednio do Instytutu do Pani Doroty Błoniarz-Łuczak [dorota.bloniarz-luczak@ipplm.pl](mailto:dorota.bloniarz-luczak@ipplm.pl)

Lista szkół organizujących etap rejonowy, regulamin konkursu „Fuzja Jądrowa”, zgłoszenie do konkursu na stronie:

<http://www.kpk.ifpilm.pl/msgview.php?id=689>



**IX Ogólnopolski konkurs  
fizyczno-fotograficzny  
„ZJAWISKA FIZYCZNE WOKÓŁ NAS”**



Oferta dla uczniów z gimnazjów i szkół ponadgimnazjalnych  
**styczeń–maj 2011**

Organizatorzy konkursu: Starosta Wieluński, Młodzieżowy Dom Kultury („Domek Harcerza”) w Wieluniu, Koło młodych fizyków przy MDK w Wieluniu.

Warunki udziału w konkursie: Konkurs jest adresowany do uczniów szkół gimnazjalnych i ponadgimnazjalnych (wiek uczestników: 13–19 lat)

Warunkiem udziału w konkursie jest przesłanie lub osobiste dostarczenie do Młodzieżowego Domu Kultury **własnoręcznie wykonanych zdjęć** przedstawiających dowolnie wybrane zjawiska fizyczne, dostrzeżone w otaczającej przyrodzie lub świadomie wyeksponowane w przeprowadzonym przez ucznia eksperymencie. **Każdy uczestnik konkursu powinien dołączyć negatyw lub płytę CD z zapisem cyfrowym przesłanych zdjęć.**

Konkurs rozstrzygniemy w dwóch kategoriach:

- a) fotografie przedstawiające określone **zjawiska fizyczne zaobserwowane w otaczającej przyrodzie**
- b) serie zdjęć ilustrujące **eksperymenty fizyczne**

**Termin nadsyłania fotografii** (kolorowych lub czarno-białych, formatu 13 x 18 cm lub 15 x 21 cm, poprawnych technicznie) **upływa 20 maja 2011 roku** (decyduje data stempla pocztowego).

**Koordynator konkursu:** Zenona Stojeczka, e-mail: [zstojecka@o2.pl](mailto:zstojecka@o2.pl)

**Informacji o konkursie udziela i prace przyjmuje:**  
**Sekretariat MDK, ul. 3 Maja 29, 98-300 Wieluń, Tel. (43) 843-87-80**  
**[www.mdkwielun.pl](http://www.mdkwielun.pl), e-mail: [mdkwielun@wp.pl](mailto:mdkwielun@wp.pl)**



## KOMUNIKAT

### **Obóz Szkoleniowo-Obserwacyjny PTMA „OSOP 2011”**

*Lucyna Gut*

Oddział Krakowski Polskiego Towarzystwa Miłośników Astronomii zaprasza na jedenasty **Obóz Szkoleniowo-Obserwacyjny PTMA „OSOP 2011”**.

Obóz odbędzie się w dniach **25–30 lipca 2011** w schronisku „Hala Boracza” w rejonie Węgierskiej Górki i Żabnicy (Beskid Żywiecki, 20 km na południe od Żywca, 120 km z Krakowa). Celem obozu jest zapoznanie uczestników z podstawami obserwacji nieba.

Przewidziane są zarówno dzienne zajęcia teoretyczne, jak też obserwacje nocne. Instruktorami będą doświadczeni obserwatorzy, członkowie PTMA. Ponadto przewidziane są wykłady popularnonaukowe z dziedziny astrofizyki, kosmologii i meteorologii. Planowane są także wycieczki turystyczne po Beskidzie Żywieckim (Prusów, Sucha Góra, Abrahamów, Hala Rysianka, Hala Lipowska, Romanka, Pilsko). W programie również objazd Beskidów Pętlą Beskidzką, zwiedzanie lokalnych atrakcji turystycznych (forty w Węgierskiej Górze, elektrownia szczytowo-pompowa Żar) i ognisko.

Przewidywany koszt obozu wynosi około 240 zł/osobę. Kwota ta obejmuje: noclegi w schronisku (z pościelą), obiadykolacje (schronisko dysponuje znakomitą, regionalną kuchnią), ubezpieczenie.

Organizatorzy Obozu zapewniają możliwość oglądania nieba dużym teleskopem amatorskim. Transport z Krakowa w zależności od liczby chętnych.

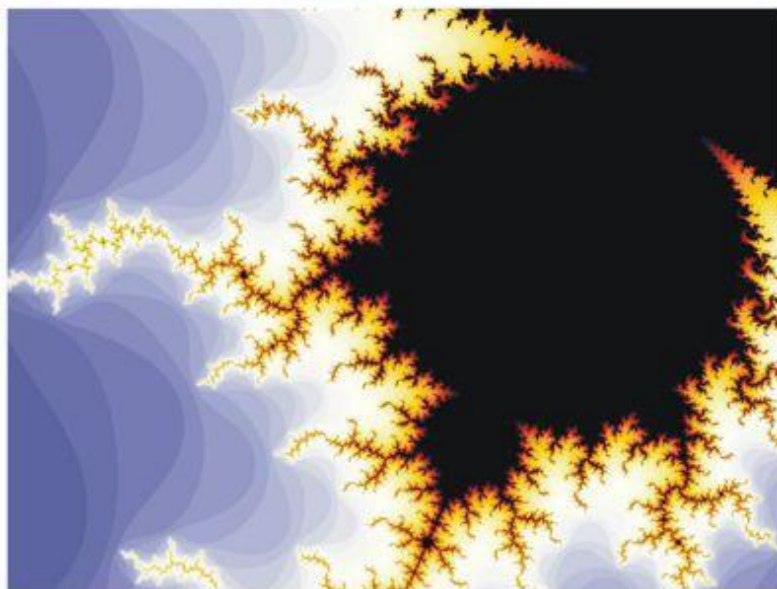
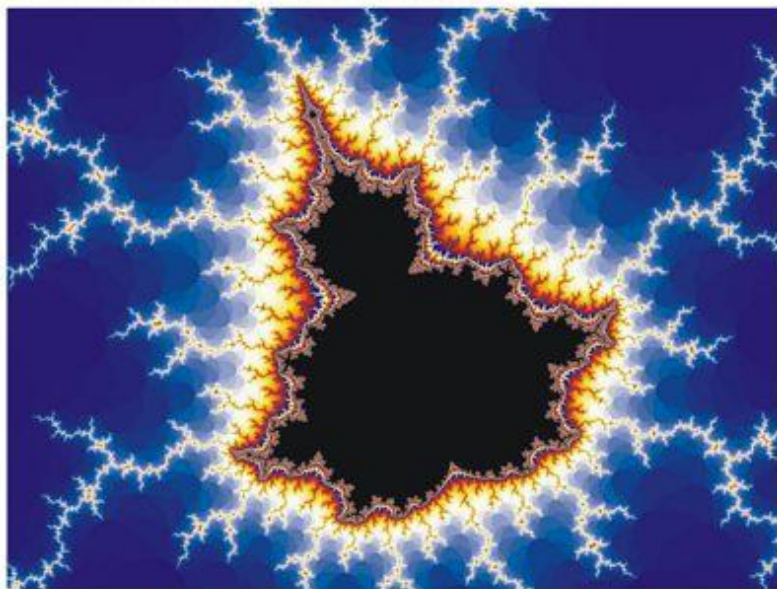
Warunkiem uczestnictwa w obozie jest:

- Członkostwo PTMA (osoby nie należące do PTMA muszą się wcześniej zapisać).
- Ukończone 18 lat. Osoby w wieku 16–18 lat muszą przedstawić pisemną zgodę rodziców. Osoby w wieku poniżej 16 lat mogą brać udział w Obozie wyłącznie wraz z pełnoletnim opiekunem.

Liczba miejsc: maksymalnie 34. Listę uczestników musi zaakceptować Zarząd Oddziału Krakowskiego PTMA. Termin przyjmowania zgłoszeń upływa z dniem **10 czerwca 2011**.

Zgłoszenia oraz pytania prosimy kierować bezpośrednio do kierownika Obozu, dr. Marcina Kolonki, e-mail: kolonko@ifj.edu.pl lub marcinet1@gmail.com bądź do skarbnika Obozu, inż. Jacka Burdy, e-mail: optyjacek@poczta.onet.pl, telefon 508 086 737.

## Fraktale Mandelbrota



Zdjęcia: [www.shutterstock.com](http://www.shutterstock.com)