

# FIZYKA

w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

394 (LXV) indeks 35810X Nr 5 wrzesień/październik 2024 CENA 45,00 zł (w tym 8% VAT)

## Dlaczego fizyków tak interesują **CZĄSTKI ELEMENTARNE**

### **KOŁO MAXWELLA**

Stany nieważkości i przeciążenia

### **TRZY TANIE NUMERY**

Zajęcia z kulkami, piłkami,  
piłeczkami...

### **JASNOŚĆ GWIAZD**

Lekcja matematyki  
z elementami astronomii

### **BADANIE SKAŁ OSADOWYCH**

Klucz do poznania Kosmosu

### **UCZNIOWIE OLIMPIJCZYCY**

Dlaczego wiedza  
przegrywa ze sportem

### **DYDAKTYKA KONSTRUKTYWISTYCZNA**

Recepta na nauczanie w XXI w.?



- Eksperymenty ze splątanymi fotonami
- Nierówności Bella
- Kubity, teleportacja
- Bramki kwantowe
- Komputery i algorytmy kwantowe
- Kryptografia kwantowa
- Kropki kwantowe



Plik PDF

**20 zł**

(w tym 8% VAT)

**Nowe wydanie specjalne  
– wersja cyfrowa – plik PDF**

Szczegóły i formularz zamówienia – [www.aspress.com.pl/wydania-specjalne/](http://www.aspress.com.pl/wydania-specjalne/)

eprasa.pl e0bcf8788d

## Drodzy Czytelnicy!

Jedną z najbardziej fascynujących dziedzin fizyki jest fizyka cząstek elementarnych. Jest to fizyka najmniejszych cząstek występujących we wszechświecie. Ostatnio odnotowała ona wiele sukcesów takich jak odnalezienie bozonu Higgsa. Wielkim osiągnięciem fizyki cząstek elementarnych było opracowanie teorii kwarków. Fizyką cząstek elementarnych interesują się zazwyczaj nawet ci, którzy publicznie deklarują niechęć do fizyki jako takiej. Podstawy tej dziedziny fizyki zaprezentowała pani Joanna Zalińska w artykule „Fizyka cząstek elementarnych – dlaczego nas interesuje”. Ten artykuł powinien zainteresować nawet osoby, które mają alergie na matematykę, gdyż nie ma w nim równań matematycznych.

Innym interesującym artykułem jest artykuł Stanisława Bednarka poświęcony kołu Maxwella. Eksperyment z kołem Maxwella jest przeprowadzony nie tylko w szkole średniej, lecz także w wielu szkołach wyższych np. na Wojskowej Akademii Technicznej. Warto więc z czasem zapoznać się z jego niuansami. We wspomnianym artykule autor wyszedł poza tradycyjny schemat eksperymentu i umieścił koło Maxwella na szalce wagi, co zwiększyło znacznie potencjał tego eksperymentu.

Inną dziedziną fizyki, która wzbudza zainteresowanie nawet zdecydowanych przeciwników fizyki jest astronomia. Ta dziedzina fizyki wzbudza nawet zainteresowanie malarzy i poetów, którzy lubią patrzeć w gwiazdy doszukując się w nich metafizycznych wartości. Astronom z kolei patrząc na gwiazdę jest w stanie określić jej położenie i jasność. To są dwa najważniejsze parametry wymieniane w katalogach gwiazd. Ale jak obliczyć jasność gwiazd? Tego dowiedzą się Państwo z artykułu Krzysztofa Kowalczyka „Porównywanie jasności gwiazd”.

Kończąc życzę miłej lektury.

Z poważaniem redaktor prowadzący

**Zbigniew Wiśniewski**

## Fizyka wczoraj, dziś, jutro

- 4** Fizyka cząstek elementarnych – dlaczego nas interesuje? ■ Joanna Zalińska  
Fizycy poszukują odpowiedzi na pytania: jakie są elementarne składniki materii, jakie są ich właściwości oraz jakie są siły, które kontrolują ich zachowania.

- 35** Monografia Grzegorza Koczana „Obrona *Fizyki* Arystotelesa”. Ocena dydaktyka ■ Edward Rydygier

## Z naszych lekcji

- 25** Trzy tanie numery z kulkami ■ Tadeusz Wibig  
Pomysły zajęć doświadczalnych, które z założenia nie wymagają poniesienia żadnych kosztów. Wspólnym elementem tych zajęć są kulki, piłki, piłeczki...

- 19** Żywy fizyk – Carl Friedrich Gauss, książę matematyków (princeps mathematicorum) ■ Tadeusz Wibig

- 22** Dydaktyka konstruktywistyczna

■ Grzegorz Karwasz, Katarzyna Wyborska, Zhuldy Akimkhanova, Klaudia Gackowska, Anna Kamińska  
Nowe paradygmaty dydaktyki, które pojawiły się na początku i w połowie XX wieku, a które obecnie, w erze Google’a i Wikipedii powinny powoli zajmować swoje miejsce w codziennej, szkolnej dydaktyce. Mówimy, odpowiednio, o konstruktywizmie i kognitywizmie.



- 30** Czy koło Maxwella może być w stanie nieważkości? ■ Stanisław Bednarek  
Powszechna dostępność wag elektronicznych pozwala wykorzystać znany od dawna przyrząd, którym jest koło Maxwella do przeprowadzenia innych doświadczeń, ilustrujących stany nieważkości i przeciążenia.

- 38** Powtórz, utrwól, poszerz wiedzę. Zadania z fizyki. Cz. 2. ■ Waldemar Reńda

## Astronomia dla każdego

- 40** Srebrni olimpijczycy ■ Damian Jableka

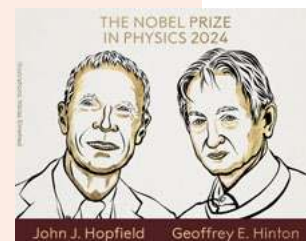
- 41** Uczniowskie Olimpiady Międzynarodowe ■ Jerzy Kuczyński

- 43** Porównywanie jasności gwiazd. Lekcja matematyki z elementami astronomii ■ Krzysztof Kowalczyk

- 46** Badanie właściwości optycznych i składu chemicznego wybranych skał osadowych ■ Marcin Wesołowski, Piotr Potera, Partycja Skała, Joanna Sobaszek  
Piasek stanowi ważny budulec krajobrazu ziemskiego, tworząc wydmy, które to zaobserwowano także na Marsie, Wenus, Tytanie i kometach. Badania własności optycznych piasku mogą więc służyć lepszemu poznaniu tych ciał niebieskich.

## Nagroda Nobla z fizyki 2024

Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki za rok 2024 Królewska Szwedzka Akademia Nauk przyznała Johnowi J. Hopfieldowi (Princeton University, NJ, USA) i Geoffreyowi E. Hintonowi (Uniwersytet w Toronto, Kanada) „za fundamentalne odkrycia i wynalazki, które umożliwiają uczenie maszynowe za pomocą sztucznych sieci neuronowych”.



**FIZYKA**  
w Szkole z Astronomią

NUMER 5 WRZESIEŃ/PAŹDZIERNIK 2024  
394 (LXV) indeks 35810X ISSN 0426-3383

CENA 45,00 zł  
(w tym 8% VAT)

Redakcja Zbigniew Wiśniewski (redaktor prowadzący – fizyks@wp.pl) Adres redakcji ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa Wydawnictwo Agencja AS Józef Szewczyk, ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244, www.aspress.com.pl, NIP: 951-134-91-51 Wydawca i redaktor naczelny Józef Szewczyk, szewczyk24@gmail.com Prenumerata www.aspress.com.pl/prenumerata/, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244 Reklama Jędrzej Chodakowski, jchodakowski1953@gmail.com Skład i łamanie ScanSystem.pl Ewa Szelażyńska Druk i oprawa Paper & Tinta, ul. Ceglana 34, 05-270 Nadma Zdjęcie na okładce: CERN

Redakcja nie zwraca nadesłanych materiałów, zastrzega sobie prawo formalnych zmian w treści artykułów i nie odpowiada za treść płatnych reklam.

# Fizyka cząstek elementarnych

## – dlaczego nas interesuje?

Fizyka cząstek elementarnych zajmuje się najmniejszymi budulcami materii. Fizycy poszukują odpowiedzi na pytania: jakie są elementarne składniki materii, jakie są ich właściwości oraz jakie są siły, które kontrolują ich zachowania.

Joanna Zalipska

Naukowcy potrafią sami wyprodukować rzadkie cząstki elementarne i w tym celu buduje się akceleratory. Badania takie prowadzone są w dużych międzynarodowych laboratoriach, z których największym jest CERN znajdujący się pod Genewą. Na świecie istnieją również inne laboratoria badające cząstki elementarne, między innymi w Japonii wyspecjalizowano się w badaniu takich cząstek jak neutrina. W Polsce kilkaset osób prowadzi badania w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych. W artykule tym będę chciała przedstawić na czym polega praca fizyka cząstek oraz jakie były odkrycia w części eksperymentów, w których Polacy biorą udział.

### Co to są cząstki elementarne?

Każdy z czytelników zna przynajmniej jedną cząstkę elementarną, a mianowicie elektron. Wchodzi on w skład atomu – elektrony krążą na powłokach wokół jądra atomowego. Samo jądro atomowe zbudowane jest z różnej liczby protonów i neutronów, w zależności od tego z atomem jakiego pierwiastka mamy do czynienia.

Proton mający ładunek dodatni i neutron o ładunku zerowym nie są cząstkami elementarnymi. Naukowcy wykazali, że składają się one z mniejszych elementów zwanych kwarkami. Według tego co obecnie nam wiadomo elektrony i kwarki są podstawowymi budulcami materii. To są właśnie cząstki prawdziwie elementarne, a więc w naszym rozumieniu cząstki, które nie mają wewnętrznej struktury, czyli nie są zbudowane z mniejszych składników.

Charakterystyczną cechą kwarków jest to, że nie występują samodzielnie i mają ułamkowy ładunek,  $1/3$  bądź  $2/3$ . Łączą się one w dwójki, albo trójki tworząc cząstkę zwaną odpowiednio mezonem i barionem. Odkryto sześć kwarków: *up* (o ładunku elektrycznym  $+2/3$ ), *down* ( $-1/3$ ), *charm* ( $+2/3$ ), *strange* ( $-1/3$ ), *top* ( $+2/3$ ) oraz *bottom* ( $-1/3$ ), patrz Rysunek 1.

Proton wchodzący w skład jąder atomowych zbudowany jest z dwu kwarków *up* ( $2 \cdot 2/3$ ) i jednego kwarka *down* ( $-1/3$ ), tak, że jego wypadkowy ładunek wynosi  $+1$  (patrz lewy Rysunek 2). Natomiast neutron to dwa kwarki *down* ( $2 \cdot -1/3$ ), oraz jeden kwark *up* ( $+2/3$ ), co daje wypadkowy ładunek elektryczny równy zeru. Ale to nie wszystko, ponieważ kwarki mają swój własny ładunek zwany kolorem. Ładunek kolorowy kwarków może przyjmować trzy wartości: zielony, niebieski i czerwony, jak to widać na Rysunku 2. Kwarki w cząstce wiąże z sobą tzw. oddziaływanie silne. Polega ono na tym, że kwarki komunikują się ze sobą wymieniając gluon, który przedstawiony jest na lewym Rysunku 2 jako sprężynka. Gluon jest bozonem, czyli cząstką przenoszącą oddziaływanie. Przy pomocy takiego nośnika oddziaływania cząstki komunikują się ze sobą, co symbolicznie przedstawione jest na prawym Rysunku 2 [1].

Świat cząstek elementarnych opisywany jest przez teorię zwaną Modelem Standardowym. Cząstki występujące w Modelu Standardowym przedstawione są na Rysunku 1. Mamy tam sześć kwarków oraz gluon – nośnik oddziaływania silnego, o którym była już mowa.

Nasz znany z budowy atomu elektron wchodzi w skład rodziny leptonów. Jest on najlżejszym naładowanym leptonem, ale istnieją dwa cięższe leptony zwane mionem i lep-

tonem tau. Te leptony mają elektryczny ładunek równy -1. W rodzinie leptonów istnieją również cząstki o ładunku zerowym zwane neutrino. Naładowany ujemnie elektron ( $e$ ) ma swojego neutralnego towarzysza neutrino elektronowe ( $\nu_e$ ), cięższemu mionowi ( $\mu$ ) towarzyszy neutrino mionowe ( $\nu_\mu$ ), a leptonowi tau ( $\tau$ ) neutrino taonowe ( $\nu_\tau$ ).

Cząstki z rodziny leptonów oddziałują słabo i mogą wymieniać między sobą trzy nośniki oddziaływania, bozony  $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z^0$ . Do kompletu mamy w tabeli bozonów foton, który pośredniczy w oddziaływaniach elektromagnetycznych, o których dzisiaj nie będzie tutaj mowy. Istnieje jeszcze jeden bardzo ważny bozon – bozon Higgsa,  $H$ , o którego odkryciu będzie mowa w dalszej części artykułu.

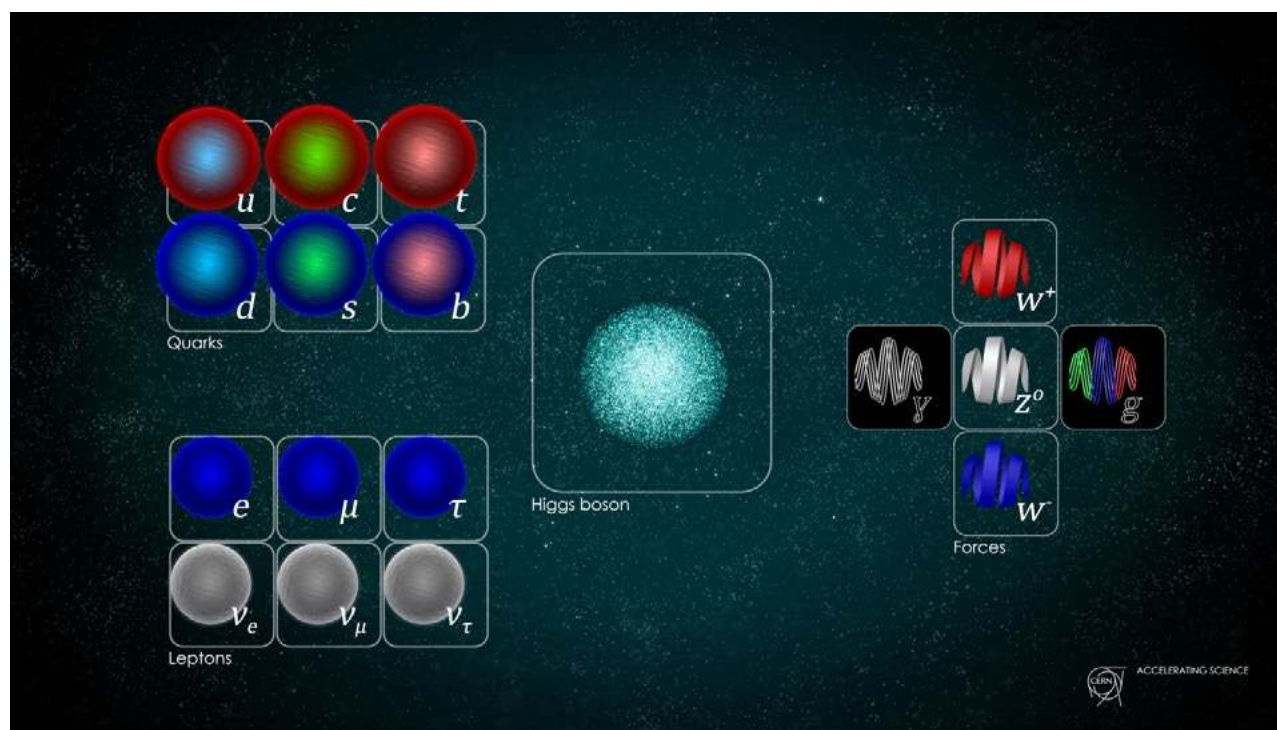
Jak zostało wcześniej powiedziane protony i neutrony, które wchodzi w skład jąder atomowych, zbudowane są tylko z kwarków *up* i *down*. Dodatkowo wokół jąder atomowych krążą najbliższe cząstki z rodziny naładowanych leptonów – elektrony. Ogólnie cała nasza materia widzialna we Wszechświecie zbudowana jest tylko z tych dwu kwarków i elektronu. Jednak istnieją również inne cząstki. I tak kwark *strange* wchodzi w skład budowy cząstki  $\Sigma^0$  zbudowanej z kwarków *up* (-1/3), *down* (+2/3), *strange* (-1/3). Przykładem mezonu jest zbudowany z kwarków *down* (-2/3) i *anty-down* (+2/3) mezon  $\pi^0$  (kwark *anty-*

*down* to antycząstka dla kwarku *down*, charakteryzuje się tym, że ma przeciwny ładunek elektryczny), oraz mezon  $\pi^-$  składający się z kwarków *down* (-1/3) i *anty-up* (-2/3). Podsumowując z sześciu kwarków występujących w Modelu Standardowym można zbudować całe zoo cząstek.

Tylko gdzie te cząstki można znaleźć? Jednym z naturalnych źródeł cząstek jest promieniowanie kosmiczne. Protony, które przychodzą do nas z kosmosu zderzają się z atomami tlenu i azotu w atmosferze ziemskiej, w wyniku czego powstają kaskady cząstek. W kaskadzie takiej występują dodatnio/ujemnie naładowane oraz neutralne mezony  $\pi$ . Naładowane piony rozpadają się na mion i neutrino mionowe. A mion po średnim czasie życia  $2.2 \cdot 10^{-6}$  s rozpada się na elektron, neutrino mionowe i antyneutrino elektronowe. Tak więc już w promieniowaniu kosmicznym występuje cięższy elektron zwany mionem, a rozpad pionów i mionów są naturalnym źródłem neutrino zwanych atmosferycznymi. Nasze Słońce również produkuje neutrino w reakcjach termojądrowych, a neutrino te badamy na Ziemi. Podobnie reaktory jądrowe są źródłem neutrino, które posłużyło do odkrycia neutrino w 1956 roku.

### Do czego służą akceleratory?

Krótko można powiedzieć, że akceleratory służą do produkowania nowych cząstek.



Rysunek 1. Schemat przedstawiający rodziny cząstek elementarnych oraz bozony pośredniczące w oddziaływaniach. Foto: Daniel Dominguez/CERN



Rysunek 2. Lewy: Schemat protonu zbudowanego z dwóch kwarków *up* i jednego *down*. Kwarki mają różne ładunki kolorowe, ale wypadkowy kolorowy ładunek protonu jest neutralny. Sprężynkami oznaczono gluony wymieniane w oddziaływaniu silnym między kwarkami. Prawy: Zobrażenie wymiany bozonu-nośnika oddziaływania - piłki między oddziałującymi cząstkami elementarnymi - ludźmi.



CERN. Foto – Adobe Stock

Jak to się robi? Główna idea polega na tym, żeby rozpędzić znane nam cząstki takie jak elektrony czy protony i je z sobą zderzyć. W wyniku zderzenia powstają inne cząstki i tak np. możemy wyprodukować mion, albo nawet cząstki antymaterii jak pozytron, czyli dodatnio naładowany elektron oraz antymion. W zderzeniach mogą powstawać też bardziej egzotyczne cząstki.

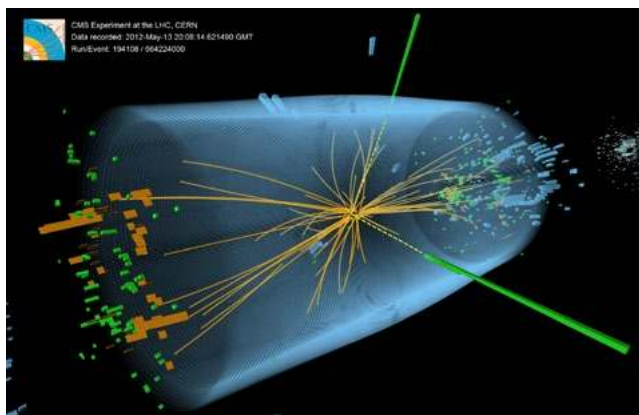
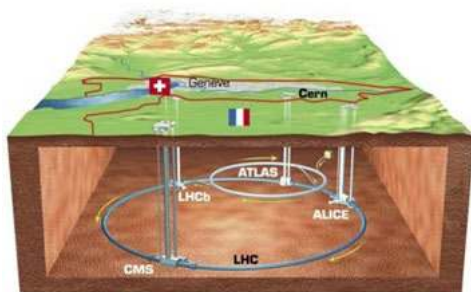
Można sobie zadać pytanie, po co potrzebne jest rozpędzanie cząstek, które zderzamy do wysokich energii? Odpowiedź jest prosta: im większa energia rozpędzonych protonów w wiązce tym większa energia dostępna w centrum zderzenia, a więc można wyprodukować cięższą cząstkę.

Ma to związek ze znanym równaniem Alberta Einsteina  $E=mc^2$ . Pokazuje ono, że energia tożsama jest z masą cząstki. Na tej podstawie można powiedzieć, że masa ciała jest równa całkowitej energii ciała w stanie spoczynku podzielonej przez kwadrat prędkości światła w próżni (299 792 458 m/s).

Warto tutaj zwrócić czytelnikowi uwagę na to, że jednostką masy/energii w fizyce cząstek elementarnych jest elektronowolt  $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{ J}$ . Jeden elektronowolt to energia, którą uzyskuje elektron przechodząc przez różnicę potencjałów jednego volta. Masa cząstek najczęściej podawana jest w gigaelektronowoltach, czyli  $1\text{ GeV} = 10^9\text{ eV}$ . Przykładowo masa protonu to  $0,938\text{ GeV}/c^2$ , a masa elektronu to  $0,000511\text{ GeV}/c^2$  [2].

Fizycy długo zadawali sobie pytanie skąd bierze się masa cząstek. Z odpowiedzią przyszedł Peter Higgs, który 40 lat temu opracował mechanizm nadawania masy cząstkom w polu pewnego bozonu, który nazwano bozonem Higgsa. Teoria ta przewidywała istnienie bozonu Higgsa, którego jeszcze wtedy nie znano. By potwierdzić jego istnienie, został wybudowany w CERNie Wielki Zderzacz Hadronów (*Large Hadron Collider*) pokazany na lewym Rysunku 3 [3].

Sukcesem tego przedsięwzięcia było ogłoszenie odkrycia bozonu Higgsa 4 lipca 2012 roku. Odkrycie to



Rysunek 3. Lewy: Schemat przedstawiający pierścień akceleratora LHC, czyli Wielkiego Zderzacza Hadronów. Na pierścieniu zaznaczone jest położenie czterech eksperymentów: CMS, ATLAS, LHCb i ALICE. Prawy: Wizualizacja zderzenia proton-proton w detektorze CMS, w którym mogła powstać cząstka Higgsa rozpadająca się na dwie gammy.

było tak znaczące, że rok później w 2013 roku nagrodę Nobla otrzymali dwaj teoretycy F. Englert i P. Higgs za odkrycie teoretycznego mechanizmu, który pozwolił zrozumieć skąd cząstki biorą masę, co zostało potwierdzone doświadczalnie przez eksperymenty ATLAS i CMS przy Wielkim Zderzaczu Hadronów.

Wielki Zderzacz Hadronów przyspiesza protony do wysokich energii  $7 \text{ TeV} = 7 \cdot 10^{19} \text{ eV}$  i zderza z sobą dwie przeciwbieżne wiązki protonów. Energia nominalna dla zderzeń proton – proton, to  $7 \text{ TeV} + 7 \text{ TeV} = 14 \text{ TeV}$  ( $2 \cdot 10^{-6} \text{ J}$ ). Protony przyspieszane są w pierścieniu – akceleratorze, który ma 27 km obwodu i znajduje się 150 metrów pod ziemią na granicy Francji i Szwajcarii w laboratorium CERN. Protony poruszają się w pierścieniu z prędkością bliską prędkości światła  $v = 99,9999991\% c$ . Zgrupowane są one w paczki. W jednej paczce znajduje się około  $10^{11}$  protonów i około 3000 paczek krąży jednocześnie w pierścieniu. Przecięcie wiązek, czyli zderzenie, następuje co  $25 \text{ ns} = 25 \cdot 10^{-9} \text{ s}$  we wnętrzu czterech detektorów: ATLAS, CMS, LHCb i ALICE [2].

### Do czego służą detektory?

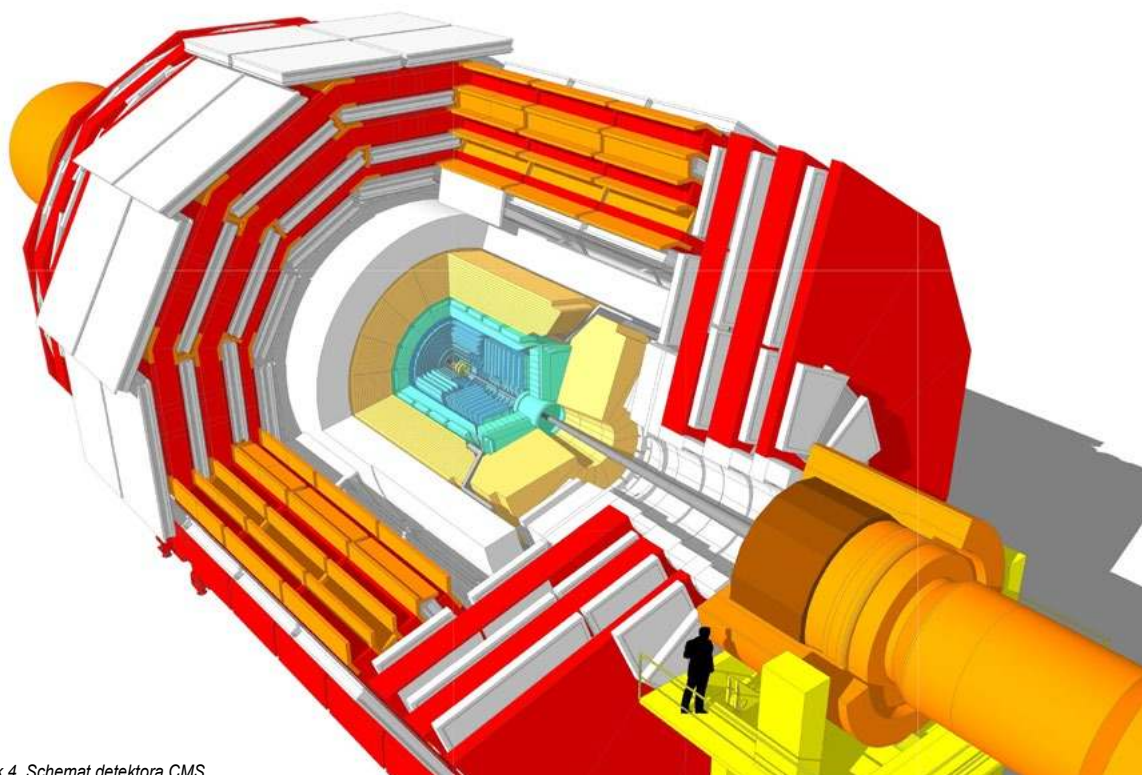
Przykład tego, co się dzieje podczas zderzenia pokazany jest na prawym Rysunku 3. Widzimy tam wizualizację zderzenia, w którym powstaje cząstka Higgsa rozpadająca się na dwa fotony gamma  $H \rightarrow \gamma\gamma$ . Fotony pokazane są wewnątrz detektora jako dwie przerywane żółte linie, które deponują energię w jednym z podzespołów (kalorymetrze elektromagnetycznym) widzianą jako dwie *zielone wieże*. Pozostałe cząstki produkowane w zderzeniu zaznaczone są jako pomarańczowe linie, fizycy mówią, że są to tory cząstek.

Nie da się zrobić zdjęcia cząstkom powstałym w zderzeniu przy użyciu aparatu fotograficznego. Potrzebujemy do tego wyspecjalizowanych urządzeń, które potrafią zarejestrować różne cząstki. Przykład takiego urządzenia pokazany jest na Rysunku 4. Jest to detektor CMS (*Compact Muon Solenoid*).

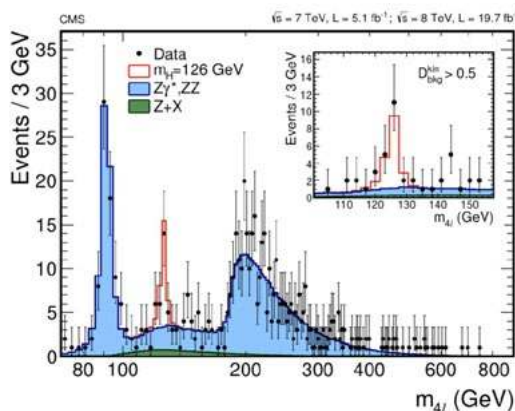
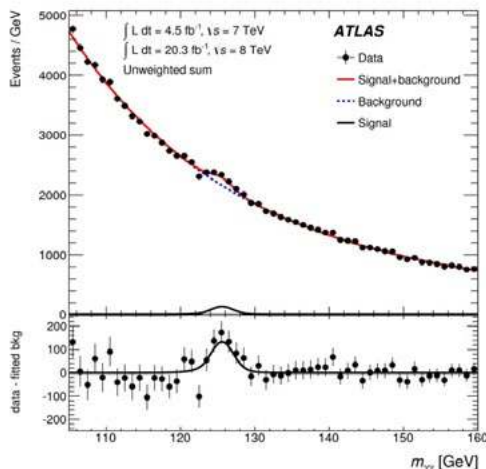
Zarówno ten detektor, jak i inne, fizycy muszą zaprojektować i zbudować sami. Jest to zespół wyspecjalizowanych urządzeń. Zaczynając od środka mamy zaznaczony na niebiesko detektor śladowy służący do rozróżniania torów od wielu cząstek powstałych w zderzeniu. Dalej mamy kalorymetr elektromagnetyczny (jasno niebieski), którym można zmierzyć energię fotonów; następnie kalorymetr do pomiaru energii hadronów (jasno żółty). Wszystko to znajduje się wewnątrz magnesu (biały) wytwarzającego wewnątrz pole 4 Tesli, a na zewnątrz 2 Tesle. Wewnątrz jarzma magnesu znajdują się komory mionowe, którymi możemy mierzyć wychodzące z oddziaływania miony.

Pole magnetyczne potrzebne jest dlatego, że tory cząstek naładowanych zakrzywiają się w polu magnetycznym. Krzywizna toru w polu magnetycznym zależy od masy cząstki i jej prędkości. W ten sposób możemy identyfikować rodzaj cząstki oraz rekonstruować jej pęd.

Tak jak zostało powiedziane w poprzednim rozdziale, zderzamy nie pojedyncze protony, a paczki składające się z wielu protonów. W związku z tym przy przecięciu wiązek następuje zderzenie wielu protonów (kilkadziesiąt na jedno przecięcie paczek protonowych). Nasz detektor musi je rozróżnić. To jest duże wyzwanie dla detektora śladowego, który rekonstruuje wierzchołek (punkt) oddziaływania pojedynczych protonów patrząc do jakiego punktu celują poszczególne tory.



Rysunek 4. Schemat detektora CMS.



Rysunek 5. Lewy: Rozkład zrekonstruowanej masy  $\gamma\gamma$ . Prawy: Rozkład zrekonstruowanej masy 4 leptonów/mionów.

Dane z detektora i jego wszystkich podzespołów szczytowane są elektronicznie i zapisywane na dyskach. Kolejnym wyzwaniem przy tym eksperymencie jest ilość gromadzonych danych. Jednym słowem, nie da się zapisać wszystkiego, ponieważ byłoby tego za dużo. Potrzebna jest wstępna preselekcja danych, które należy zapisać do późniejszej obróbki. Taki system wyzwalania, który decydował, które przypadki są dla nas interesujące i które należy zapisać na dysku został zaprojektowany przez polską grupę w eksperymencie CMS.

Do kompletu informacji należałoby podać jak duży jest taki detektor, a mianowicie ma on 29 m długości, 15 m średnicy i waży 14000 ton. W zespole CMS pracuje ponad 3000 fizyków z 41 krajów w tym z Polski około 25 osobowa grupa [4].

## Poszukiwanie bozonu Higgsa

Bozon Higgsa może powstać w zderzeniu dwu protonów m.in. poprzez oddziaływanie dwu gluonów znajdujących się w każdym z protonów. Przewidywano, że cząstka Higgsa jest ciężka, a więc rozpada się praktycznie zaraz po powstaniu. W związku z tym nie da się zarejestrować toru cząstki Higgsa w detektorze. Więc jak ją można zbadać? Fizycy badają produkty rozpadu cząstki Higgsa. Jednym, jak mówimy, kanałem rozpadu jest już wspomniany wcześniej rozpad Higgsa na dwa fotony  $H \rightarrow \gamma\gamma$ . Dlatego w detektorze badano przypadki, w których rejestrowano dwa fotony, tak jak to pokazuje Rysunek 4.

W kalorymetrze elektromagnetycznym mierzona jest energia każdego z fotonów. Następnie fizycy rekonstruują masę obiektu, z którego rozpadu mogły powstać dwa fotony, co pokazuje lewy Rysunek 6 zrobiony dla przeana-

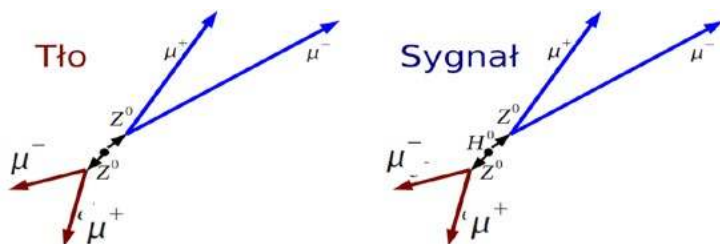
lizowanych danych eksperymentu ATLAS. Obiekt taki powinien być widoczny na wykresie w postaci „górk”. Niebieską linią jest zaznaczone tło, które udaje nam rozpad bozonu Higgsa na dwa fotony. Natomiast sygnał plus tło reprezentowany jest przez czerwoną linię. Po odjęciu tła od zarejestrowanych danych dostajemy „górkę” pokazaną na dolnym wykresie lewego Rysunku 5. Właśnie ten pomiar został uznany za odkrycie bozonu Higgsa w 2012 roku [4].

Bozonu Higgsa poszukuje się również w innych kanałach, czyli sposobach rozpadu, między innymi w przypadku, kiedy Higgs rozpada się na dwa bozony  $Z^0$ , z których każdy rozpada się z kolei na dwa miony (patrz prawy Rysunek 6). Tutaj jako sygnału poszukujemy przypadków z czterema mionami rejestrowanymi w oddziaływaniu. Oczywiście istnieje tło do tego procesu, czyli przypadki pochodzące z innych źródeł, które w naszym detektorze będą wyglądały tak samo jak sygnał rozpadu bozonu Higgsa. Przykład tła pokazany jest na lewym diagramie Rysunku 6. Tutaj w zderzeniu powstają dwa bozony  $Z^0$  (bez cząstki Higgsa) i rozpadają się one na dwa miony. I tak jak to było w poprzednim przypadku tutaj również rekonstruujemy masę pierwotnego obiektu, czyli masę czterech mionów,  $m_{4l}$  (gdzie  $l$  oznacza lepton, dla nas mion). Rozkład taki pokazany jest na prawym Rysunku 5. Tutaj na niebiesko zaznaczone jest tło: pierwszy niebieski pik odpowiada produkcji  $Z\gamma$ , natomiast drugi dwu bozonom  $ZZ$ . Wyraźnie widać, że pomiędzy tymi pikami znajduje się czerwony pik pochodzący od naszego sygnału, czyli  $H \rightarrow 4\mu$  [5].

Istnieją również inne kanały rozpadu, w których rekonstruuje się masę cząstki Higgsa. Ostateczny wynik z uśrednioną masą, to:  $m_{\text{Higgs}} = 125,25 \pm 0,17 \text{ GeV}/c^2$ .

Od razu widać, że jest to ciężka cząstka - dla porównania przypomniemy sobie, że masa protonu to  $0,938 \text{ GeV}/c^2$ , a masa elektronu to  $0,000511 \text{ GeV}/c^2$ . Należy tu zwrócić uwagę, że pomiar masy cząstki podany jest z błędem, to wartość  $\pm 0,17$ . Fizycy zawsze podają wynik pomiaru z błędem.

Błąd pomiaru, to nie pomyłka, ale niepewność pomiaru, którą wyznacza się doświadczalnie. Żeby to zrozumieć wyobraźmy sobie, że mamy linijkę o długości 20 cm z 1 mm podziałką. Mamy ją zmierzyć długość sali gimnastycznej w szkole i prosimy, żeby pomiar wykonało 50 uczniów. Każdy z nich zmierzy trochę inną



Rysunek 6. Lewy: Diagram rozpadu  $ZZ$  powstałych w oddziaływaniu proton-proton. Tło do poszukiwanego rozpadu Higgsa. Prawy: Sygnał, czyli rozpad Higgsa na  $ZZ$  i 4 miony.

wartość, ponieważ i linijka ma swoją dokładność 1 mm a przede wszystkim każdy wykona pomiar z różną precyzją. Żeby dostać wynik ostateczny, to uśredniamy pomiary 50 uczniów i podajemy ich rozrzut. Procesy te opisuje dział zwany rachunkiem błędów, który studenci fizyki uczą się na pierwszym roku studiów. Mówi on, że w 68% jesteśmy pewni, że cząstka Higgsa ma masę w przedziale  $(125,25 - 1 \cdot 0,17 \text{ do } 125,25 + 1 \cdot 0,17) \text{ GeV}/c^2$ . Natomiast na 99.7% jesteśmy pewni, że masa ta znajduje się w przedziale  $(125,25 - 3 \cdot 0,17 \text{ do } 125,25 + 3 \cdot 0,17) \text{ GeV}/c^2$ .

Obecnie bada się w Wielkim Zderzaczu Hadronów właściwości cząstki Higgsa i poszukuje nowej fizyki poza Modelem Standardowym uznawanym za najlepszy opis świata cząstek elementarnych.

### Inne pomiary w Wielkim Zderzaczu Hadronów

Przy Wielkim Zderzaczu Hadronów istnieją jeszcze dwa eksperymenty LHCb i ALICE, które nie badają cząstki Higgsa a zajmują się inną tematyką z fizyki cząstek. W eksperymencie LHCb bada się produkcję cząstek, które zbudowane są z kwarku *bottom*. W eksperymencie tym wykryto *pentakwark*, czyli hadron egzotyczny składający się z pięciu kwarków. Jest to nietypowa cząstka, ponieważ standardowo hadrony zbudowane są z dwu lub trzech kwarków (mezony i bariony).

Natomiast w eksperymencie ALICE (i w eksperymencie CMS również) bada się zderzenia ciężkich jonów przyspieszanych w akceleratorze.

Zgodnie z teorią Wielkiego Wybuchu, w którym powstał nasz Wszechświat jakieś  $10^{-6}$  sekundy po wielkim wybuchu kwarki, gluony i elektrony nie były związane, tylko wolne. Następnie Wszechświat się rozszerzał i kwarki zaczęły łączyć się w bariony i mezony – powstał proton i neutron, a następnie powstawały atomy. Po tysiącu milionów lat uformowały się gwiazdy i galaktyki. Fizycy zastanawiali się, czy możemy się *cofnąć w czasie* i stworzyć w laboratorium warunki panujące  $10^{-6}$  sekundy po Wielkim Wybuchu. Czy jesteśmy w stanie zaobserwować stan z wolnymi kwarkami, czyli plazmę kwarkowo-gluonową (taką *zupę z kwarków*)?

Zanim przejdziemy do kwarków, chciałabym, żeby czytelnik przypomniał sobie stany skupienia wody i jak dochodzi do przejścia między nimi. Woda może istnieć w trzech stanach skupienia: stałym, ciekłym i parze wodnej. Przez ochładzanie wody, poniżej  $0^\circ\text{C}$  (przy standardowym ciśnieniu atmosferycznym) przechodzimy do stanu stałego – lodu. Natomiast podgrzewając wodę tworzymy parę powyżej  $100^\circ\text{C}$ . Przejście pomiędzy stanami skupienia wody nazywane jest przejściem fazowym, jednak same molekule wody się nie zmieniają. Dodatkowo punkt przejścia fazowego zależy również od ciśnienia. I tak wysoko w górach, gdzie ciśnienie jest niższe woda będzie wrzała poniżej temperatury  $100^\circ\text{C}$ .

W świecie materii istnieje jeszcze jeden stan zwany plazmą. Zwykły stan materii składa się z wolnych atomów i molekuł, jednak wysoka temperatura i ciśnienie niszczy te struktury dzięki czemu atomy tracą swoje elektrony i tworzy się plazma. Plazma składa się z negatywnie nała-

dowanych elektronów i pozytywnie naładowanych jąder atomowych (np. nasze Słońce znajduje się w stanie plazmy).

Analogicznie przy wysokim ciśnieniu i temperaturze po Wielkim Wybuchu kwarki, gluony i elektrony znajdowały się w stanie plazmy. Obecnie plazma kwarkowo-gluonowa może istnieć w centrum gwiazd neutronowych albo czarnych dziur. Naukowcy uważają, że można takie warunki uzyskać podczas zderzania wysokoenergetycznych wiązek ciężkich jonów. I tak w Wielkim Zderzaczu Hadronów zderzano z sobą całkowicie obdarte z elektronów jądra złota i ołowiu przy bardzo wysokich energiach.

W zderzeniu produkowane jest kilkanaście tysięcy cząstek, a więc znacznie więcej niż w zderzeniach protonów używanych do badania cząstki Higgsa. Stan plazmy kwarkowo-gluonowa trwa bardzo krótko, bo  $10^{-23}$  sekundy, więc nie jesteśmy w stanie zaobserwować jej bezpośrednio. Ochładzając się kwarki i gluony tworzą cząstki, które możemy zaobserwować w naszych detektorach. Badając te cząstki i ich liczebności fizycy wywnioskowali, że udało im się wytworzyć w laboratorium stan plazmy kwarkowo-gluonowej.

### Fizyka cząstek na świecie

Zacznijmy od tego, że w samym laboratorium CERN są eksperymenty, które nie są związane z Wielkim Zderzaczem Hadronów. Takim eksperymentem jest między innymi COMPASS, który bada spiny cząstek – pewną własność kwantową cząstek będącą ich wewnętrznym momentem pędu.

Dodatkowo CERN posiada infrastrukturę, która pozwala fizykom testować prototypy przyszłych detektorów. I tak fizycy, którzy chcą badać neutrino w Stanach Zjednoczonych wybudowali ProtoDUNE i wykazali, że prototyp ich detektora działa.

Podobnie fizycy w grupie badającej neutrino w Japonii, w której to grupie autorka tego artykułu prowadzi swoje badania, testowali tam prototyp nowego detektora śladowego i będą w niedalekiej przyszłości testowali nowe fotopowielacze, czujniki światła, których chcemy użyć za kilka lat w nowym eksperymencie neutrinowym w Japonii.

Fizyce neutrin (o której będzie w następnym rozdziale) poświęcone jest i było wiele doświadczeń. Obecnie szczególnie interesujące jest badanie neutrin akceleratorowych zarówno w Japonii w eksperymencie T2K przy akceleratorze JPARC jak i w Stanach Zjednoczonych w eksperymencie Nova w Fermilabie. Oba te laboratoria konstruują już kolejne, bardziej precyzyjne eksperymenty zwane odpowiednio Hyper-Kamiokade i DUNE.

Istnieje również fizyka neutrin nie związana z akceleratorami, gdzie bada się neutrino atmosferyczne, te ze Słońca albo przylatujące z Kosmosu. Mam tu na myśli takie eksperymenty jak wielki zbiornik wodny Super-Kamiokade w Japonii, eksperyment IceCube wykorzystujący lód na Antarktydzie, bądź budowany właśnie Km3Net, który będzie miał umieszczone czujniki światła w Morzu Śródziemnym.

Badaniu fizyki zapachu związanego z cząstkami, w których skład wchodzi kwark *bottom* zajęło się kolejne

laboratorium - KEK w Japonii z działającym przy nim eksperymencie Belle. Wiadomo, że druga generacja kwarków (*charm*, *strange*) i leptonów (mion) jest o rząd wielkości cięższa od pierwszej generacji (*up*, *down*, elektron). A trzecia generacja (*top*, *bottom*, lepton tau) jest jeszcze cięższa.

Model Standardowy nie daje odpowiedzi, dlaczego tak się dzieje i rozwiązania tego problemu poszukuje się w eksperymencie Belle. Bada się tam również asymetrie w rozpadach cząstek zbudowanych z kwarku *bottom*. Tego typu badania prowadzone są również przy eksperymencie LHCb w CERNie.

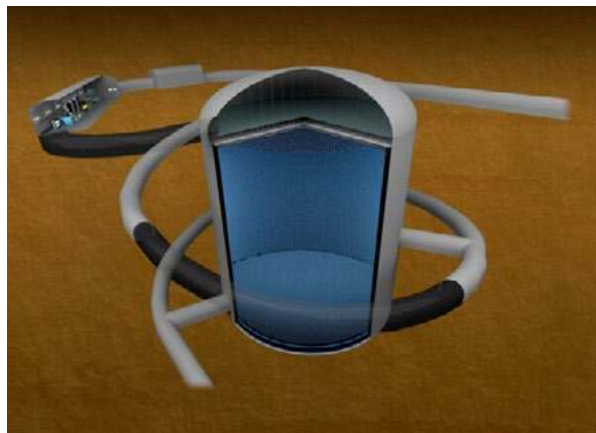
Opisałam tu tylko kilka laboratoriów, oczywiście jest ich więcej. W Europie jest laboratorium DESY pod Hamburgiem, w Stanach Brookhaven National Laboratory, SLAC, w Kanadzie TRIUMF. Jeśli ktoś jest zainteresowany badaniami tam prowadzonymi zachęcam do zapoznania się ze stronami internetowymi danych laboratoriów [6].

### O co chodzi z neutrinami?

Również neutrino, które są neutralnymi towarzyszami leptonów naładowanych, można produkować przy użyciu akceleratorów. Jeden z takich eksperymentów (T2K) w którym polska grupa bierze udział, znajduje się w Japonii w miejscowości Tokai i wysyła on wiązkę neutrino do dalekiego detektora znajdującego się w Kamioce. Stąd nazwa eksperymentu *Tokai-2-Kamiocka*, czyli T2K (patrz Rysunek 7) [7].

W laboratorium JPARC w Tokai znajduje się akcelerator, który przyspiesza protony do energii 30 GeV. Tylko tutaj nie zderza się przeciwbieżnych wiązek protonów, ale wysyła się jedną wiązkę protonów na stacjonarną tarczę węglową. Protony zderzając się z węglową tarczą produkują wtórne cząstki piony i kaony, które rozpadają się na antymion i neutrino mionowe,  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ . W ten sposób powstaje wiązka neutrino mionowych, która wysyłana jest na odległość blisko 300 km do dalekiego detektora Super-Kamiokande.

W akceleratorze powstaje  $5,2 \cdot 10^{15}$  neutrino dziennie, a mniej niż jedno na dzień jest obserwowane w dalekim detektorze. To pokazuje jak niechętnie neutrino oddziałują z materią. Jest to sytuacja wręcz odwrotna do tego co obserwuje się w detektorach przy Wielkim Zderzaczu Hadronów, gdzie liczba zdarzeń jest bardzo duża i obserwujemy w każdym wiele cząstek. Skoro neutrino tak niechętnie zderzają się z materią, to potrzebujemy silnych źródeł neutrino oraz dużych, masywnych detektorów.



Schemat budowanego obecnie eksperymentu Hyper-Kamiokande na górnym rysunku, oraz jeden z fotoczuJNIKÓW światła tzw. multi-PMT, na dolnym rysunku, który będzie użyty w tym eksperymencie. Został on zmontowany na Politechnice Warszawskiej, przez grupę elektroników biorących udział w projektowaniu tego czuJNIKA światła. Będzie on teraz testowany na wiązce w CERNie, jak zostało wspomniane w części Fizyka cząstek na świecie.

Jednym z największych detektorów fizyki cząstek jest detektor Super-Kamiokande, który jest zbiornikiem w kształcie walca o wymiarach 40 m średnicy i 40 m wysokości [7]. Zbiornik ten wypełniony jest 50 kt ultra-czystej wody. Na ściankach zbiornika umieszczone są detektory światła tzw. fotopowielacze. Samego neutrino nie widać, bo jest ono cząstką neutralną. Natomiast neutrino oddziałuje w wodzie znajdującej się w zbiorniku, to produkuje mion jeśli oddziaływało neutrino mionowe,  $\nu_\mu$ , albo elektron, jeśli oddziaływało neutrino elektronowe,  $\nu_e$ .



Rysunek 7. Schemat przedstawiający eksperyment T2K. W górnym rysunku zaznaczony jest schemat wiązki. Dolne zdjęcia przedstawiają od prawej: akcelerator w laboratorium JPARC służący do produkcji wiązki neutrino, stację bliskich detektorów służącą do pomiaru typów oddziaływań neutrino i spektrum wiązki blisko punktu produkcji, daleki detektor Super-Kamiokande służący do badania oscylacji neutrino.

Cząstki naładowane, takie jak mion czy elektron, poruszające się odpowiednio szybko wytwarzają w wodzie elektromagnetyczną falę uderzeniową, analogicznie jak myśliwiec wytwarza akustyczną falę uderzeniową przekraczając prędkość dźwięku. Jest to źródło tzw. promieniowania Czerenkowa. Światło to, mierzone jest przez fotopowielacze na ściankach zbiornika. Tworzy ono kształt pierścieni dla zatrzymujących się w wodzie mionów i elektronów. Po kształcie pierścienia jesteśmy w stanie odróżnić, czy światło zostało wyemitowane przez mion czy przez elektron. Dzięki temu odróżniamy oddziaływania neutrin mionowych i neutrin elektronowych.

Pozwala nam to badać tzw. proces oscylacji neutrin. Neutrino potrafią bowiem zmieniać swoją tożsamość. Oznacza to, że jeśli w naszej wyprodukowanej wiązce są na początku tylko neutrino mionowe,  $\nu_\mu$ , to po przebyciu 300 km część neutrin może zmienić się w neutrino taonowe  $\nu_\tau$ , bądź neutrino elektronowe  $\nu_e$ . Prawdopodobieństwo tej przemiany zależy od energii neutrin  $E$ , oraz od drogi, którą neutrino przebędzie od miejsca swojej produkcji  $L$ .

Zależność prawdopodobieństwa od  $L/E$  pokazana jest na Rysunku 8. Na początku mamy maksymalną liczbę neutrin mionowych zaznaczonych na czerwono. W miarę jak podróżują one przez ziemię do dalekiego detektora Super-Kamiokande ich ilość maleje. Natomiast zwiększa się ilość przede wszystkim neutrin taonowych przedstawionych na rysunku na zielono oraz pojawia się trochę neutrin elektronowych zaznaczonych na niebiesko.

Detektor Super-Kamiokande znajduje się w takiej odległości, żeby prawdopodobieństwo tej przemiany było maksymalne. Ma to również związek z dobraniem odpowiedniej energii produkowanych neutrin przy pomocy akceleratora [8].

Eksperyment T2K wykazał, że taki proces oscylacji  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  istnieje. Obecnie fizycy interesują się tym procesem dla wiązki antyneutrino mionowych  $\bar{\nu}_\mu$ . W tym przypadku przy pomocy akceleratora produkujemy wiązkę  $\bar{\nu}_\mu$  z rozpadu  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ . Najbardziej interesujące jest dla nas sprawdzenie, czy proces zmiany tożsamości neutrin zachodzi z takim samym prawdopodobieństwem dla neutrin jak i dla antyneutrino. Czy może  $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) \neq P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ . Jeśli tak, to byłaby wtedy łamana tzw. symetria  $CP$  [9].

Jakie to miałyby dla nas konsekwencje? Po wspomnianym już wcześniej Wielkim Wybuchu, w którym powstał nasz Wszechświat, powstało tyle samo materii co antymaterii. W miarę jak Wszechświat się ochładzał, materia

zderzała się z antymaterią i anihilowała tworząc promieniowanie. Jednakże obecnie nasz Wszechświat, gwiazdy, planety zbudowane są z samej materii. Czyli musiała pojawić się nadwyżka materii nad antymaterią, skoro wszystko nie zanihilowało.

Nasuwa nam to pomysł, że pewnie procesy we wczesnym Wszechświecie musiały zachodzić asymetrycznie dla materii i antymaterii. Jeśli byśmy wykazali w naszym eksperymencie neutrinowym, że antyneutrino oscylują inaczej niż neutrino, to mielibyśmy przykład, że takie asymetryczne procesy zachodzą w fizyce cząstek (wiemy, już że zachodzą w kwarkach, ale są za słabe). Byłby to krok na przód w zrozumieniu, dlaczego wokół nas nie obserwujemy antymaterii, a samą materię.

Obecnie buduje się nowe eksperymenty z jeszcze większym zbiornikiem wodnym Hyper-Kamiokande, który ma być wypełniony 260 kt wody [7]. Będzie on zlokalizowany również w Japonii i będzie używał jeszcze intensywniejszej wiązki antyneutrino mionowych konstruowanej w laboratorium JPARC. W związku z tym oczekujemy zaobserwować więcej neutrin i zbadać proces asymetrii oscylacji neutrin i antyneutrino.

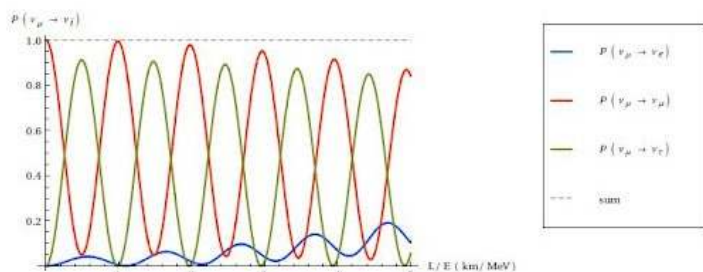
## Parę słów na zakończenie

Mam nadzieję, że pokazałam Państwu, że fizyka cząstek elementarnych jest fascynującą dziedziną, która próbuje odpowiedzieć na podstawowe pytania dotyczące naszego Wszechświata i tego z czego jest on zbudowany. Badanie zachowań różnych cząstek elementarnych, jak bozon Higgsa czy neutrino, pozwala nam zbadać i zweryfikować nasz Model Standardowy, który opisuje zachowanie się cząstek elementarnych. Prowadzone przez nas badania są wyzwaniem technologicznym, bo zarówno trzeba zbudować akceleratory potrafiące przyspieszyć cząstki do dużych energii i osiągnąć wysoką intensywność wiązki, jak i zaprojektować i zbudować detektory, żeby móc rejestrować cząstki.

Przez ostatnie 100 lat wiele osiągnięto w zrozumieniu podstawowych budulców materii, którymi są cząstki elementarne, ale jest wciąż jeszcze wiele pytań na które szukamy odpowiedzi.

Dr Zalińska Joanna

Narodowe Centrum Badań Jądrowych



Rysunek 8. Zależność prawdopodobieństwa oscylacji neutrina od  $L/E$ . Patrz wytłumaczenie w tekście.

## LITERATURA:

- [1] „Cząstki elementarne” M. Kazana, wykład na Festiwalu Nauki.
- [2] „O cząstkach i oddziaływaniach elementarnych oraz o Wielkim Wybuchu”, B. Boimska, wykład na Festiwalu Nauki.
- [3] Strona internetowa laboratorium CERN, gdzie czytelnik może znaleźć inne użyteczne informacje, <https://home.cern>
- [4] „Czego już dowiedzieliśmy się o Wielkim Zderzacz Hadrónów (LHC)”, A. Kalinowski.
- [5] „Podróż do świata cząstek elementarnych”, M. Kazana, wykład na Festiwalu Nauki, 28.09.2019.
- [6] Strony internetowe laboratoriów fizyki cząstek elementarnych, gdzie można znaleźć informacje o wspomnianych w rozdziale projektach badawczych i nie tylko o nich, <https://www.kek.jp/en/>, <https://j-parc.jp/c/en/index.html>, <https://www.fnal.gov/>, <https://www.bnl.gov/world/>, [https://www.desy.de/index\\_eng.html](https://www.desy.de/index_eng.html), <https://www.triumf.ca/>, <https://www.slac.stanford.edu/>
- [7] Strony internetowe eksperymentów T2K, Super-Kamiokande i Hyper-Kamiokande, <https://t2k-experiment.org/>, <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/sk/>, <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/hk/>
- [8] „Wielkie wodne detektory neutrin”, J. Zalińska, wykład na Festiwalu Nauki, wrzesień 2020.
- [9] Artykuł o publikacji wyników oscylacji  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ , <https://www.ncbj.gov.pl/aktualnosci/polski-udzial-w-japonskim-eksperymentcie-t2k>

# Trzy tanie numery z kulkami

Tadeusz Wibig

Na Trzecim Kongresie Nauczycieli Fizyki, jaki odbył się we wrześniu w Poznaniu odbyły się warsztaty zatytułowane „Trzy tanie numery z kulkami”. Przedstawiono w ich trakcie trzy pomysły zajęć doświadczalnych, które z założenia nie wymagają poniesienia żadnych kosztów.

Często słyszy się, że przeszkodą dla wzbogacania lekcji o element doświadczeń są braki w wyposażeniu szkolnych pracowni fizycznych w nowoczesny sprzęt, zestawy pomiarowe sterowane komputerowo i dostosowane do nich odpowiednie oprogramowanie, a to wszystko kosztuje. Przy odrobinie inwencji w niektórych przynajmniej tematach można obyć się bez komputerów, bez wyspecjalizowanych przyrządów, bez całej „nowoczesnej” technologii.

Zajęcia te przeznaczone są dla uczniów szkół licealnych z zacięciem fizyczno-matematycznym. W wersji „dla ambitnych” nadają się doskonale na zajęcia pozaszkolne wychodzące poza zakres podstaw programowych.

Wspólnym elementem tych zajęć są kulki, piłki, piłeczki, z którymi można, jak pokazujemy, bez dodatkowych nakładów i przygotowań robić rzeczy bardzo fizyczne i bardzo kształtujące.

## Numer pierwszy: rozpraszanie elastyczne

Badanie zderzeń cząstek elementarnych jest właściwie jedyną metodą poznania ich własności, mechanizmów oddziaływania i w ogóle fizyki mikroświata. Fizycy na całym świecie zderzają niemal wszystko ze wszystkim i patrzą, co z tego wychodzi, czyli fachowo mówiąc badają stany końcowe.

W akceleratorach takich jak LHC w CERNie rozpędza się protony do energii 7 TeV (takie energie uzyskaby cząstka naładowana jednostkowym ładunkiem elektrycznym  $e$ , gdyby przyspieszyć ją w polu elektrycznym wy-

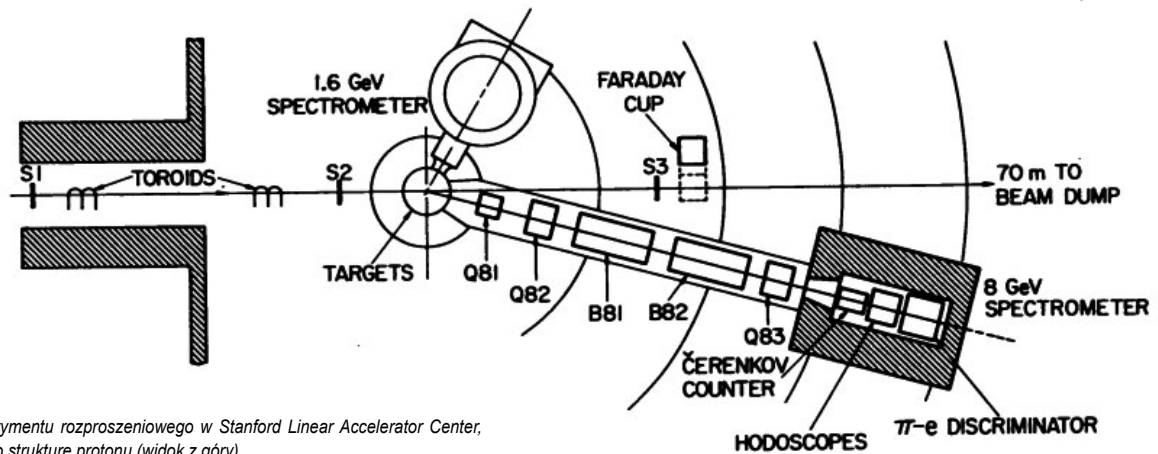
tworzonym przez różnicę potencjałów tysięcy miliardów woltów!) i zderza się je ze sobą. W większości ciekawych przypadków ich energia kinetyczna zamienia się ( $E=mc^2$ ) w masę i powstają setki i tysiące nowych cząstek elementarnych. Zadziwiający świat fizyki zderzeń wysokich energii ciągle czeka na pełne poznanie i ciągle setki, tysiące fizyków starają się świat ten uporządkować i zrozumieć. Nie jest to proste!

W pewnych szczególnych, a zarazem bardzo ciekawych przypadkach mamy do czynienia ze zdarzeniami, w których w stanie początkowym mamy cząstkę wiązki nalatującą na taką samą spoczywającą cząstkę tarczy i w stanie końcowym mamy do czynienia z dwiema pod każdym względem identycznymi cząstkami. Takie zderzenia nazywamy elastycznymi, a ściślej rozproszeniami elastycznymi.

Oczywiście w procesach takich musi się zachowywać pęd cząstek (pęd nalatującej cząstki musi być równy wektorowej sumie pędów obu cząstek po zderzeniu) i ich sumaryczna energia (w przypadku nierelatywistycznym, gdy względne prędkości cząstek są znacznie mniejsze niż prędkość światła, energia kinetyczna cząstki nalatującej musi się równać sumie energii kinetycznych cząstek po rozproszeniu, w przypadku dużych energii przymiotnik „kinetyczna” należy zastąpić przymiotnikiem „całkowita”).

Badając rozproszenia cząstek elementarnych odkryto kwarki wewnątrz protonu, bozony pośredniczące oddziaływań słabych  $W^\pm$  i  $Z^0$  i cały świat Modelu Standardowego (tak się dziś nazywa obowiązująca, acz nie poznana do końca teoria mikroświata).

Teoretyczne opisanie ze wszystkimi kwantowymi niuansami natury takiego rozpraszania jest oczywiście dość złożone i nie zawsze do końca policzalne. Studiowanie procesów rozpraszania elastycznego rozpoczniemy więc od badania zjawiska nieco prostszego, nierelatywistycznego i klasycznego (nie-kwantowego), do którego opisu



Schemat eksperymentu rozpraszającego w Stanford Linear Accelerator Center, w którym odkryto strukturę protonu (widok z góry)

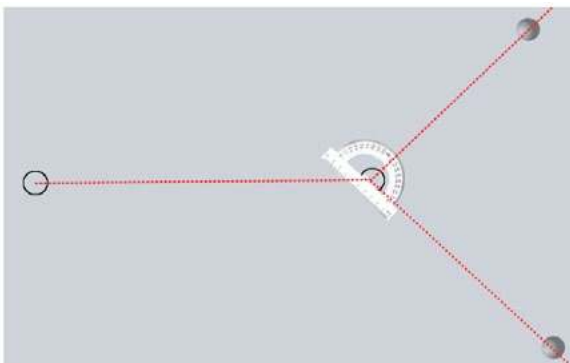
wystarcza mechanika newtonowska. Zbadamy rozpraszanie sztywnych toczących się po stole kulek.

### Doświadczenie

Do wykonanie doświadczenia potrzebne będą minimum trzy osoby, a najlepiej cztery lub więcej. W doświadczeniu używać trzeba piłki/piłeczki/kulki np. tenisowej, małej kulki gumowej, metalowej, plastikowej. Dobrze jest wykonać doświadczenie dla kilku różnych rodzajów piłeczek odbijających się różnie, co pozwoli, być może, wyciągnąć jakieś ciekawe wnioski. Kilka dodatkowych pytań stawiamy niżej w „rozszerzeniu dla ambitnych”.

### Kolejność czynności:

1. Zaznaczamy na wypoziomowanym stole z użyciem np. cienkiej taśmy klejącej punkt, w którym umieścimy rozpraszającą kulkę. W razie potrzeby robimy w taśmie delikatny dołek (nie uszkadzając stołu!).
2. Umieszczamy w tym punkcie kulkę tarczy.
3. Celując drugą rozpraszającą kulką wiązki staramy się trafić w tę rozpraszającą.
4. Jeden z uczestników eksperymentu (powiedzmy, że ten stojący z lewej strony stołu, nazwijmy go lewym detektorem) stara się złapać, zatrzymać kulkę w chwili, gdy osiągnie lewą krawędź stołu.
5. Drugi uczestnik pełniący funkcję prawego detektora robi to samo z kulką, która kierowała się w prawo.
6. Osoba mierząca kąt umieszcza kątomierz z jego punktem środkowym w miejscu, gdzie ustawiona była kulka przed zderzeniem.
7. Kolejna osoba podaje obu osobom detekcyjnym (lewej i prawej) końce nitki, którą ci trzymają delikatnie naprężoną.



8. Nitkę tę zaczepiamy (np. wykałaczką) w miejscu środkowym kątomierza.
9. Osoba mierząca odczytuje wartość kąta rozpraszania.
10. Osoba rejestrująca zapisuje wynik i powtarzamy czynności od punktu 2.
11. Sukcesywnie osoba rejestrująca może konstruować histogram otrzymywanych wyników. Klasy histogramu mogą być oczywiście dowolne. Zależy to od ilości czasu, jaki chcemy poświęcić doświadczeniu. Rozsądną wielkością jest 10-20 stopni.
12. Kończymy eksperyment, gdy histogram wygląda w miarę sensownie.

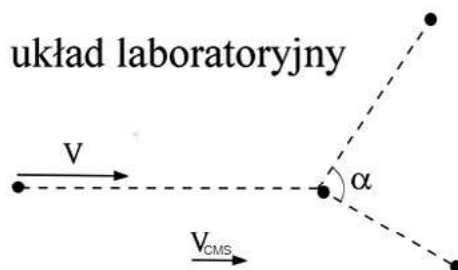
### Teoretyczne objaśnienie problemu

Zderzenia kulek można rozpatrywać w co najmniej dwóch wygodnych układach odniesienia: układzie laboratoryjnym, w którym początkowo jedna tylko porusza się (cząstka wiązki), druga zaś stoi (cząstka tarczy). Jest to układ związany w naszym doświadczeniu ze stołem. Z punktu widzenia ludzi leniwych, którzy lubią upraszczać sobie rachunki, znacznie ciekawszym jest układ środka masy (z angielska CMS) zdefiniowany tak, że całkowity pęd wszystkich cząstek przed (ale i oczywiście po) zderzeniu jest równy zeru.

Układ środka masy porusza się względem układu laboratoryjnego jednostajnie z prędkością

$$V_{\text{CMS}} = V / 2$$

w kierunku osi  $x$  (w prawo na naszym rysunku)

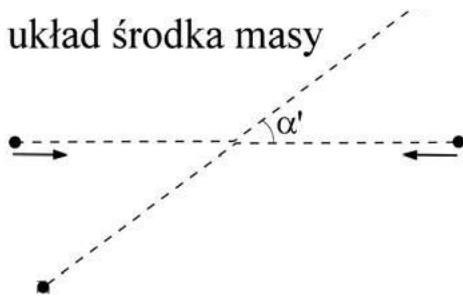


Składowe prędkości obu kulek w układzie środka masy przed zderzeniem są równe, czyli, jak widać, od wszystkich prędkości odejmuje się wektor  $V_{\text{CMS}}$

$$V_{1x\text{CMS}} = V / 2, \quad V_{1y\text{CMS}} = 0,$$

$$V_{2x\text{CMS}} = -V / 2, \quad V_{2y\text{CMS}} = 0,$$

## układ środka masy



a po zderzeniu kulki rozlatują się z takimi samymi prędkościami co do wartości, ale pod jakimś kątem  $\alpha'$  i ich składowe są teraz równe

$$V'_{1x\text{CMS}} = V/2 \sin \alpha', \quad V'_{1y\text{CMS}} = V/2 \cos \alpha',$$

$$V'_{2x\text{CMS}} = -V/2 \sin \alpha', \quad V'_{2y\text{CMS}} = -V/2 \cos \alpha',$$

Powrót do układu laboratoryjnego polega na dodaniu prędkości  $V_{\text{CMS}}$  do wszystkich prędkości „primowanych” (przypominamy, że  $V_{\text{CMS}}$  ma tylko składową w kierunku  $x$ ).

$$V'_{1x} = V/2 \sin \alpha' + V/2, \quad V'_{1y} = V'_{1y} = V/2 \cos \alpha',$$

$$V'_{2x} = -V/2 \sin \alpha' + V/2, \quad V'_{2y} = V'_{2y} = -V/2 \cos \alpha'.$$

Z lekcji analizy wektorowej wiadomo, że iloczyn skalarny wektorów o składowych  $(x_1, y_1)$  i  $(x_2, y_2)$  jest równy

$$\vec{X} \cdot \vec{Y} = (x_1, y_1)(x_2, y_2) = x_1 x_2 + y_1 y_2$$

a z drugiej strony wiadomo, że

$$\vec{X} \cdot \vec{Y} = XY \cos(\vec{X}, \vec{Y}).$$

Policzmy, jaka ma wartość iloczyn skalarny  $\vec{V}'_1 \cdot \vec{V}'_2$

$$\begin{aligned} \vec{V}'_1 \cdot \vec{V}'_2 &= V'_{1x} V'_{2x} + V'_{1y} V'_{2y} \\ &= (V/2 \sin \alpha' + V/2)(-V/2 \sin \alpha' + V/2) \\ &\quad + (V/2 \cos \alpha')(-V/2 \cos \alpha') = \\ &= V/2 [(1 + \sin \alpha')(1 - \sin \alpha') - \cos^2 \alpha'] = 0. \end{aligned}$$

Zastosowaliśmy tu na końcu wzór zwany powszechnie *jedynką trygonometryczną*.

Jeśli iloczyn skalarny ma być zawsze równy zero dla każdych wartości  $X$  i  $Y$ , to zerem musi być  $\cos(\vec{X}, \vec{Y})$ , czyli cosinus kąta między prędkościami cząstek po zderzeniu. A zatem kąt pomiędzy wektorami prędkości obu kulek w układzie laboratoryjnym jest równy dokładnie  $90^\circ$ .

Można to samo wykazać także nie odwołując się do zasad analizy wektorowej, a jedynie do elementarnych wiadomości z geometrii (i do zasad zachowania).

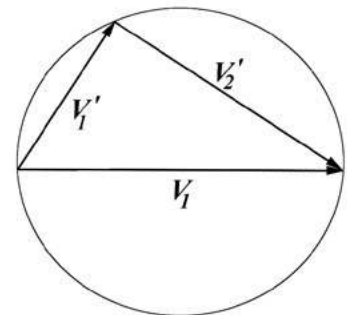
Z zasady zachowania pędu wiemy, że

$$\vec{V}'_1 + \vec{V}'_2 = \vec{V}_1$$

czyli wektory  $\vec{V}'_1$ ,  $\vec{V}'_2$  i  $\vec{V}_1$  tworzą trójkąt w rodzaju tego narysowanego obok.

Z zasady zachowania energii wiemy także że

$$V_1^2 + V_2^2 = V_1'^2$$



Czyli, że trójkąt ten jest trójkątem prostokątnym (twierdzenie Pitagorasa!). Wektory  $\vec{V}'_1$  i  $\vec{V}'_2$  są jego przyprostokątnymi, a wektor  $\vec{V}_1$  przeciwprostokątną. Jeśli zakresić okrąg o promieniu  $|\vec{V}_1|/2$ , to średnica tego okręgu będzie miała długość  $|\vec{V}_1|$ . Wektory  $\vec{V}'_1$  i  $\vec{V}'_2$  utworzą kąt oparty na jego średnicy ( $\vec{V}'_1 + \vec{V}'_2 = \vec{V}_1$ ). A zatem musi to być trójkąt prostokątny ( $V_1'^2 + V_2'^2 = V_1^2$ ), niezależnie od tego jaka byłaby wartość kąta  $\alpha'$ , czy  $\alpha$ , czyli jakkolwiek rozlatywałyby się kulki po zderzeniu, kąt pomiędzy ich torami musi być prosty.

### Rozszerzenie dla ambitnych

Okazuje się, że zmierzone w naszym doświadczeniu kąty nie zawsze bywają równe dokładnie  $90^\circ$ , a często zdarzają się kąty bardzo od tej wartości różne. Aby przeanalizować dokładnie problem, dlaczego otrzymany przez nas histogram nie jest idealny (nie wszystkie kąty są równe dokładnie  $90^\circ$ ), warto wykonać całe doświadczenie używając różnych kulek (tenisowych, gumowych, albo małych kulek metalowych).

Zupełnie innym problemem są zderzenia kulek o różnych masach. Odpowiedź na pytanie, jaki byłby kąt rozlotu, gdyby kulki miały różne masy nie jest prosta. Można odwołać się tu do własnej intuicji (fizycznej). Można zapisać na kartce nasze przewidywania, a potem sprawdzić je doświadczalnie. Podobnie z pytaniem, czy w przypadku różnych mas ma znaczenie, czy nalatująca kulka jest cięższa, czy lżejsza?

**Histogram**, (po polsku fachowo nazywa się *szeregiem rozdzielczym*) to właściwie nic innego jak wygodny sposób prezentacji wyników pomiarów

Najlepiej to zilustrować na przykładzie:

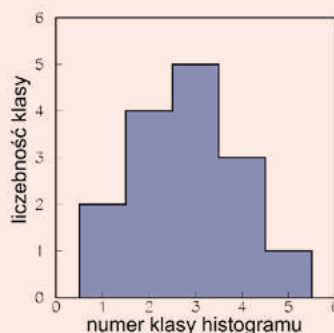
Powiedzmy, że dokonaliśmy pomiarów (w takich samych warunkach!) jakiejś zmiennej fizycznej  $x$ , która losowo przyjmować może różne wartości:

8, 3, 7, 13, 4, 5, 11, 5, 8, 4, 10, 9, 10, 8, 2.

Skądinąd (z innych wcześniejszych pomiarów) wiemy, że wyniki te powinny mieścić się w jakiś granicach od  $x_{\text{dolne}}$  do  $x_{\text{górne}}$ , w naszym przypadku powiedzmy od 0 do 15.

Mając do dyspozycji 15 wyników przedział (xdolne, xgórne) dzielimy na jakieś 5 przedziałów (liczba 5 została wybrana zgodnie ze zdrowym rozsądkiem, są pewne reguły ułatwiające jej wyznaczenie, ale nie są to reguły ostateczne i nie są to jakieś prawa natury). Przedziały te to (0, 3], (3, 6], (6, 9], (9, 12], (12, 15]. I znowu to, z której strony domniemy te przedziały jest kwestią umowy. I teraz sprawdzamy po kolei, do którego przedziału wpadają kolejne pomiary: pierwszy (8) do trzeciego, drugi (3) do pierwszego itd. W rezultacie liczebności w każdym przedziale (nazywa się je klasami histogramu) to: 2, 4, 5, 3, 1.

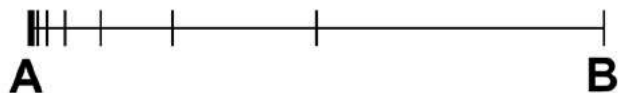
Można to zilustrować na wykresie:



Najciekawszym problemem, jaki może rzucić światło na „niedoskonałość” naszych pomiarów jest sprawdzenie, czy gdyby zamienić kulki żetonami, monetami (dyskami, które by się po stole suwały, nie obracając się jak kulki), to wpłynęłoby to na otrzymane wyniki. A odpowiedź na pytanie, skąd bierze się ta różnica byłaby zwieńczeniem naszych wysiłków poświęconych badaniom zderzeń elastycznych.

## Numer drugi: paradoks Zenona

Problem strat energii w zderzeniach ma luźny związek z tym czym zajmowali się starożytnie Grecy bardzo dawno temu. Dwa i pół tysiąca lat temu ktoś zauważył, że aby przejść z punktu A do B najpierw trzeba pokonać połowę tej drogi. Być może był to Zenon z Elei, ale pewności nie ma. To zupełnie oczywiste stwierdzenie jest absolutnie niezaprzeczalne, ale Zenon poszedł dalej, choć może słowo „poszedł” nie jest tu najwłaściwsze. Aby przejść połowę drogi, najpierw trzeba przejść i jej połowę. Idąc dalej tą drogą (choć słowo „idąc” też może i tu być mylące) zanim przejdziemy połowę połowy, musimy przejść jej połowę. Ten odcinek będzie oczywiście połową połowy połowy. Nie ma żadnego powodu, aby procedury tej nie powtórzyć i tak mamy do przejścia odcinek będący połową połowy połowy odcinka AB. Z teoretycznego punktu widzenia dzielenie odcinków na połowy nie ma końca. Każdy odcinek można przepołowić. A zatem, jak argumentuje Zenon, nim w dojdziemy z punktu A do B wykonać będziemy musieli nieskończoną skończonych kroków.



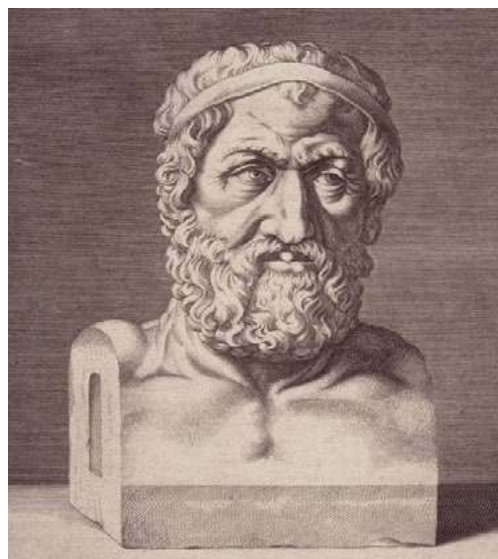
Arystoteles w swojej Fizyce (VI; 9) streścił to tak:

*„...to, co jest w ruchu, musi dotrzeć do połowy drogi, zanim dotrze do celu.”*

Konstrukcja ta prowadzi do stwierdzenia, że jeśli już gdzieś stoimy, to nie ma żadnej szansy, aby ruszyć dokądkolwiek. Wszelki ruch jest zdaniem Zenona po prostu niemożliwy.

Od tamtych zamierzonych czasów rozumowanie to niepokoiło wiele znamienitych umysłów. Niektórzy uważali je za niepoważne i rozważanie go za niegodne ich intelektu. Inni próbowali powiedzieć coś sensownego, co w końcu doprowadziło do matematycznych pojęć, ciągu, szeregu, zbieżności itp. Dziś jest to zrozumiałe dla każdego ucznia szkoły średniej o profilu matematycznym rozszerzonym, choć zapewne zdolni uczniowie nierozszerzeni matematycznie też potrafią paradoks Zenona teoretycznie rozwiązać.

Wydaje się, że od mniej więcej 200 lat sprawa jest załatwiona i nie budzi żadnych wątpliwości to, że suma nieskończonej liczby elementów, z których każdy jest większy od zera, może nie być nieskończona. A jednak sprawa nie jest tak oczywista. Ciągłe istnieją ludzie, dla których paradoks dychotomiczny Zenona pozostaje paradoksem. I nie są to wyłącznie ci, którzy ominęli maturę z matematyki na (dzisiejszym) poziomie rozszerzonym, albo też ci, którzy na lekcjach zajmowali się akurat czymś całkiem innym.



Zenon z Elei – wikipedia.org

Pouczającym jest sprawdzenie co pokażą przeglądarki internetowe po wpisaniu hasła „paradoks dychotomiczny” (najlepiej w wersji anglojęzycznej). Możemy tam znaleźć całkiem współczesne rozważania filozofów, ale także i fizyków, w których dyskutuje się dyskretną naturę czasu i przestrzeni, efekty kwantowe i relatywistyczne. Gdyby Zenon mógł przeczytać to, co piszą o jego pomysłach ludzie po upływie dwóch i pół tysiąca lat, mógłby się zdziwić.

## Doświadczenie

Do wykonanie doświadczenia potrzebne będą minimum dwie osoby, a najlepiej trzy lub cztery. W doświadczeniu używać trzeba piłki/piłeczki tenisowej, pingpongowej, piłki do siatkówki, małej gumowej piłeczki. Dobrze jest wykonać doświadczenie dla kilku różnych rodzajów piłeczek odbijających się różnie, co pozwoli być może wyciągnąć jakieś ciekawe wnioski.

### Kolejność czynności

Pierwszy etap:

1. Osoba Upuszczająca ujmuję piłkę w rękę.
2. Odmierzamy wysokość 1 metra od ręki do podłogi w miejscu w miarę pustym, odległym od ścian, szaf, ławek, krzeseł i innych ludzi.
3. Osoba Upuszczająca upuszcza piłkę (z prędkością początkową  $V=0$ ).
4. Po odbiciu piłki od podłogi wznosi się ona i Osoba Łapiąca ma za zadanie złapać ją w chwili, gdy się ona zatrzyma (osiągnie prędkość  $V=0$ ).
5. Mierzmy wysokość, na jaką wzniosła się piłka (i gdzie została złapana).
6. Powtarzamy pomiary od punktu 3 około pięciu razy i wyliczamy średnią wysokość złapania odbitej piłki.
7. Liczymy współczynnik strat energii dzieląc średnią wysokość wzniesienia przez początkowy 1 metr.

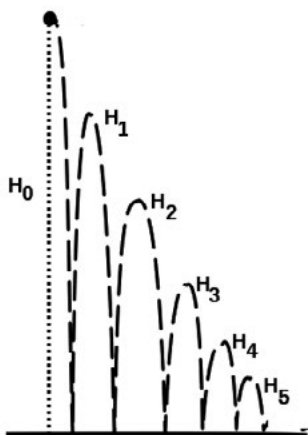
Drugi etap:

1. Osoba Upuszczająca trzyma piłkę 1 metr nad podłogą.
2. Osoba Mierzająca Czas, ze stoperem w dłoni mówi „START” i tym momencie włącza stoper, a Osoba Upuszczająca upuszcza piłkę ( $V=0!$ ).

3. Piłka odbija się od podłogi raz, dwa, trzy,... coraz niżej i niżej.
4. Osoba Mierząca Czas stara się uchwycić moment, w którym piłka przestaje się odbijać.
5. Powtarzamy pomiary od punktu 2 kilka (5-10) razy i wyliczamy średni czas do zatrzymania.

Opracowanie: porównujemy zmierzony średni czas z czasem „teoretycznym” równym sumie odpowiedniego szeregu geometrycznego (patrz rachunki poniżej).

### Teoretyczne objaśnienie problemu



Stopień elastyczności zderzeń opisuje się podając wartość współczynnika elastyczności, czyli ułamek energii, jaki pozostaje piłce po zderzeniu. Zależy on oczywiście od materiału z którego wykonana została spadająca na podłogę kulka, od techniki jej wykonania, ale także od tego z czego i jak zrobiona jest sama podłoga. Przykładowo współczynnik elastyczności zgodnie z normami odpowiednich światowych federacji sportowych jest równy:

- dla piłeczki tenisowej od 0.86 do 0.88, albo 0.85-0.87, albo 0.83-0.85 zależnie od typu piłeczki (ITF),
- dla piłeczki pingpongowej ~0.936 (ITTF),
- dla piłki od koszykówki (też można takiej użyć w naszym doświadczeniu) od 0.85 do 0.90 (FIBA).

Oznaczmy przez współczynnik elastyczności, czyli część energii jaka pozostaje piłce po zderzeniu (w naszym przypadku z podłogą)

$$k = \frac{E_1}{E_0} = \frac{mgH_1}{mgH_0} = \frac{H_1}{H_0}$$

gdzie  $H_0$  to wysokość z jakiej upuściliśmy piłkę, a  $H_1$  to wysokość na jaką uniosła się piłka po odbiciu od podłogi.

Taki sam ułamek energii tracony jest w każdym zderzeniu, a więc

$$H_1 = H_0 \times k$$

$$H_2 = H_1 \times k = H_0 \times k^2$$

$$H_3 = H_2 \times k = H_1 \times k^2 = H_0 \times k^3$$

$$H_4 = H_3 \times k = H_0 \times k^4$$

$$H_5 = H_0 \times k^5$$

.....

Każdy ruch od położenia maksymalnego do podłogi i po odbiciu ponownie do kolejnego zatrzymania ( $V = 0$ ) w maksimum jest ruchem jednostajnie przyspieszonym, w którym przyspieszenie jest przyspieszeniem ziemskim. Zgodnie ze szkolnymi znanymi wzorami

$$t_0 = \sqrt{\frac{2H_0}{g}} \quad \text{– pierwszy spadek upuszczonej piłki,}$$

$$t_1 = 2 \times \sqrt{\frac{2H_1}{g}} \quad \text{– podniesienie się po pierwszym odbiciu i drugi spadek,}$$

$$t_2 = 2 \times \sqrt{\frac{2H_2}{g}} \quad \text{– podniesienie się po drugim odbiciu i trzeci spadek.}$$

Sumując wszystkie te cząstkowe czasy otrzymujemy

$$\begin{aligned} t_0 + t_1 + t_2 + \dots \\ &= \sqrt{\frac{2H_0}{g}} + 2 \times \sqrt{\frac{2H_1}{g}} + 2 \times \sqrt{\frac{2H_2}{g}} + 2 \times \sqrt{\frac{2H_3}{g}} + \dots \\ &= \sqrt{\frac{2H_0}{g}} + 2 \times \sqrt{\frac{2H_0 k}{g}} + 2 \times \sqrt{\frac{2H_0 k^2}{g}} + 2 \times \sqrt{\frac{2H_0 k^3}{g}} + \dots \\ &= 2 \sqrt{\frac{2H_0}{g}} \left( \frac{1}{2} + \sqrt{k} + (\sqrt{k})^2 + (\sqrt{k})^3 + (\sqrt{k})^4 + \dots \right) \end{aligned}$$

Jest to, ja widać szereg geometryczny o ilorazie  $\sqrt{k}$ . Możemy zatem zsumować wszystkie wyrazy aż do nieskończoności i otrzymamy wynik skończony, bo iloraz jest przecież zawsze mniejszy od jedności.

$$T = t_0 + t_1 + t_2 + \dots = t_0 + \frac{t_1}{1 - \sqrt{k}} = 2 \sqrt{\frac{2H_0}{g}} \left( 1/2 + \frac{\sqrt{k}}{1 - \sqrt{k}} \right)$$

### Rozszerzenie dla ambitnych

Przy porównaniach wyników doświadczeń z przedstawioną wyżej teorią mogą pojawić się istotne rozbieżności. Oczywiście nie świadczą one o tym, że teoria grawitacji Newtona jest błędna, a raczej o tym, że w naszych doświadczeniach nie wszystko zostało uwzględnione.

Aby znaleźć odpowiedź na pytanie o to, o czym zapomnieliśmy, dobrze jest wykonać dodatkowe eksperymenty z innymi rodzajami piłek, z piłkami o różnych ciężarach itp.

Definiując rozbieżność eksperymentu i teorii jako

$$\text{rozbieżność} = R = \frac{|T_{\text{zmierzony}} - T_{\text{obliczony}}|}{T_{\text{obliczony}}}$$

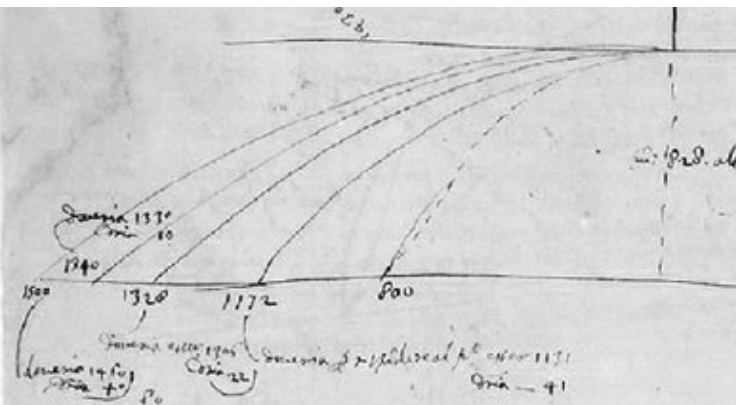
możemy zbadać

- czy na R wpływa wartość współczynnika elastyczności?
  - czy R zależy od masy piłki?
  - czy R zależy od początkowej wysokości?
- i inne, które doprowadzą ostatecznie do lepszej zgodności teorii i doświadczenia.

### Numer trzeci: Galileusz na równi

Żywoć i skomplikowane naukowe losy jednego z największych fizyków wszechczasów opisywaliśmy w dwóch tekstach w „Fizyce w Szkole” na początku 2022 roku, więc postaramy się nie powtarzać, a zainteresowanych odsyłamy do archiwum.

Wszyscy zapewne znają opowieść o zrzucaniu przez Galileusza z Krzywej Wieży w Pizie różnych przedmiotów i pokazywaniu gawiedzi, że wszystkie one spadają tak samo. Jest to prawdą tylko w części, ale nie o to chodzi.



Oryginalne notatki Galileusza z rozważań nad rzutem poziomym

Problem swobodnego spadku był wielkim problemem tamtych czasów, problemem natury niemal zasadniczej.

Zdaniem Arystotelesa, największego wtedy autorytetu naukowego szybkość spadania zależy od ciężaru ciała. Ciała cięższe są silniej ściągane w dół (grawitacja!), a zatem spadać muszą szybciej. Galileusz w roku 1612, kiedy zrzucać miał swoje kule, pisał

„Aristoteles mówi, że stułuntowa kula spadnie z wysokości 100 łokci szybciej niż kula jednoluntowa upuszczona z wysokości 1 łokcia. Ja mówię, że dotrą one na ziemię w tym samym czasie. Przeprowadzając doświadczenie można stwierdzić, że większa kula wyprzedzi mniejszą o dwa cale.”

Brzmi to dziwnie. Nie tego uczyliśmy się w szkole.

Z czasem jednak Galileusz zmienił zdanie, na szczęście. Sformułowanie znanej nam dziś ostatecznej galileuszowskiej teorii swobodnego spadku zabrało mu wiele lat. Opisał je dopiero w swoim naukowym testamencie *Discorsi e dimonstrazione matematiche intorno a due nuove scienze* w 1638 roku:

... definiuje ruch jednostajnie przyspieszony, jako taki, w którym prędkość wzrasta o tę samą wartość w kolejnych krokach czasu i stwierdza, że taki jest właśnie ruch spadających ciał. Dodatkowo na drodze geometrycznej wykazuje, że droga przebyta w ruchu jednostajnie przyspieszonym jest proporcjonalna do kwadratu czasu w jakim odbywa się ten ruch. Rozpatruje też kwestię znanego z podręczników szkół średnich (dziś tylko w profilu rozszerzonym) ruchu dwuwymiarowego zwanego „rzutem poziomym”: ruch pocisków składa się z kombinacji jednostajnego ruchu poziomego i jednostajnie przyspieszonego ruchu pionowego, co prowadzi do ruchu po paraboli.

Mamy tu i znane ze szkoły równanie na drogę w ruchu jednostajnie przyspieszonym

$$s = \frac{at^2}{2}$$

i koncepcję prędkości jako wektora, który można rozłożyć na składowe i składowe te dalej składać, jeśli przyjdzie nam na to ochota. Koncepcja wektora w sposób matematycznie poprawny, znany nam dziś z podręczników fizyki, pojawiła się dopiero w połowie XIX wieku, ale sens tego pojęcia Galileusz ujął doskonale.

Warto zdać sobie sprawę z tego, że w czasach, gdy Galileusz tworzył podstawy nowożytnej fizyki, jego możliwości eksperymentalne były bardzo ograniczone. Dziś każdy ma w swoim telefonie stoper i nie uważa tego za coś nadzwyczajnego, ale w czasach Galileusza nie tylko

nie było smartfonów, ale nie było też zegarków w ogóle. Nieznana była ani sekunda, ani metr. Wszystko to musiało zostać dopiero wymyślone i Galileusz miał w tym niewątpliwie swój udział.

Zachodzi więc oczywiste pytanie, jak mógł on odkryć, że  $s = at^2 / 2$  skoro nie mógł mierzyć dokładnie czasu?

### Doświadczenie

Proponowany eksperyment pokaże, jak można zweryfikować, że rzeczywiście  $s = at^2 / 2$  i to nie mając, jak Galileusz, zegarka. Czy w ten sposób do problemu podszedł Galileusz, nie wiadomo, ale nie można tego wykluczyć. Do wykonania doświadczenia potrzebne będą minimum dwie osoby. W doświadczeniu używać trzeba raczej ciężkiej piłeczki np. tenisowej.

### Kolejność czynności

1. Stolik, szkolną ławkę (im dłuższa, tym lepsza) podeprzeć należy z jednej strony tak, aby otrzymać równią pochyłą o niewielkim kącie nachylenia ( $\sim 10^\circ$ ).
2. Zmierzyć wysokość, na jaką podniesiona została powierzchnia równi w najwyższym punkcie.
3. Oznaczyć na tak powstałej równi punkt w połowie jej długości  $\frac{1}{2}$ , a potem jeszcze dwa punkty w połowach tych połówek  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{1}{4}$ .
4. Umieścić kulkę na samej górze równi ( $h_0 = h$ ) (rysunek poniżej).
5. Puścić ją pozwalając staczać się jej swobodnie.
6. Zaobserwować na podłożu, w którym miejscu kulka upadnie.
7. Zmierzyć odległość tego punktu do miejsca na podłożu dokładnie pod dolnym końcem równi ( $L$ ).
8. Powtórzyć czynności od punktu 4 kilka razy zapisując wyniki.
9. Wyciągnąć z tych wyników średnią  $\langle L \rangle$ , podnieść ją do kwadratu  $\langle L \rangle^2$  i wynik ten zapisać.
10. Zrobić to samo (od pkt 4. do 9.) lecz zamiast spuszczać kulkę z najwyższego punktu zrobić to z punktu w  $h_1 = \frac{3}{4}h$  długości równi.
11. Powtórzyć to (od pkt 4. do 9.) startując z połowy  $h_2 = \frac{1}{2}h$  i z jej ćwierci  $h_3 = \frac{1}{4}h$ .
12. Narysować wykres  $\langle L \rangle^2$  w funkcji wysokości, z jakiej puszczano kulkę ( $h$ ).

### Szybkie teoretyczne objaśnienie problemu

Prędkość końcową (poziomą) zjazdu z równi oblicza się z zasady zachowania energii:

$$E_p = mgh = E_k = \frac{mv_k^2}{2}; \quad \rightarrow v_k = \sqrt{2gh}$$

czas spadku ze stołu o wysokości  $H$  obliczamy ze wzoru Galileusza (ruch pionowy jednostajnie przyspieszony):

$$H = \frac{gt^2}{2} \quad \rightarrow t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$$

odległość od końca stołu do miejsca dotarcia kulki do podłogi wyznaczamy ze wzoru na drogę w ruchu (poziomym) jednostajnym

$$L = v_k t \quad \rightarrow L = 2\sqrt{Hh} \quad \text{czyli} \quad h = \frac{L^2}{4H}$$

Jeśli punkty ułożą się na linii prostej (i to przechodzącej przez początek układu!), będzie to dowód na to że rzeczywiście droga przebyta w jakimś czasie w ruchu jednostajnie przyspieszonym jest proporcjonalna do kwadratu tego czasu (patrz teoretyczna ramka na poprzedniej stronie).

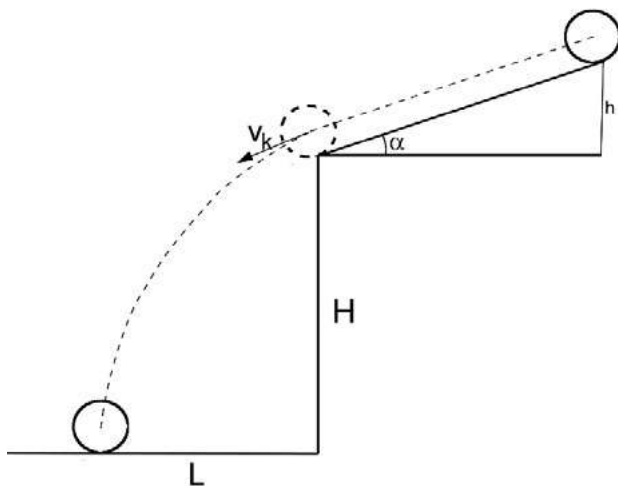
Elementarne rachunki pokazane w ramce pozwalają wyznaczyć nieznaną skądinąd wysokość stołu ( $H = L^2 / 4h$ ) Można spróbować wykorzystując cztery wykonane serie pomiarów obliczyć  $H$ . Porównanie ze sobą tych czterech wartości z rzeczywistością może być zaskoczeniem. Stół realny będzie prawdopodobnie o 25% niższy.

### Teoretyczne objaśnienie problemu dla jeszcze bardziej ambitnych

Moment bezwładności kulki wzg. osi przechodzącej przez jej środek jest równy jak wiadomo:

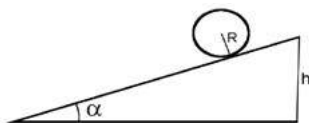
$$I_c = \frac{2}{5} mR^2,$$

Kulka toczy się dlatego, że siła tarcia przeciwdziałając ześlizgiwaniu się kulki powoduje, że punkt styczności kulki z płaszczyzną nie porusza się (nie ślizga się), a zatem jest chwilową osią obrotu.



Z twierdzenia Steinera moment bezwładności względem osi przechodzącej przez punkt na brzegu kulki, w miejscu jej styczności z równią, jest równy:

$$I = I_c + mR^2 = \frac{7}{5} mR^2,$$



Druga zasada dynamiki w ruchu obrotowym mówi, że:

$$M = I\varepsilon,$$

$M$  – moment siły,  $\varepsilon$  – przyspieszenie kątowe.

Moment siły ciężkości względem osi chwilowego obrotu jest równy

$$M = Rmg \sin \alpha, \text{ czyli } \varepsilon = \frac{M}{I} = \frac{Rmg \sin \alpha}{\frac{7}{5} mR^2} = \frac{5}{7} \frac{g}{R} \sin \alpha.$$

Przyspieszenie kątowe środka kulki w układzie, w którym spoczywa punkt jej styku z równią, jest takie samo

jak przyspieszenie kątowe każdego punktu na brzegu kulki w układzie, w którym spoczywa jej środek. Przyspieszenie liniowe środka i punktu na brzegu w obu tych przypadkach jest też takie samo i obowiązuje w nich ten sam znany związek obu przyspieszeń:

$$a = \varepsilon r, \text{ czyli } a = \frac{5}{7} g \sin \alpha.$$

Staczając się z takim przyspieszeniem (liniowym) kulka (jej środek) na dole równi (o wysokości  $h$ ) osiągnie prędkość  $v_k$  równą

$$v_k = at$$

gdzie czas jej ruchu otrzymamy z równania opisującego drogę w ruchu jednostajnie przyspieszonym będzie równy

$$s = \frac{h}{\sin \alpha} = \frac{at^2}{2} \rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{a \sin \alpha}}$$

czyli ostatecznie:

$$v_k = \sqrt{\frac{10}{7} gh}$$

Gdyby kulka ześlizgiwała się (bez toczenia) przyspieszenie liniowe każdego jej punktu byłoby równe

$$F = ma \rightarrow a = g \sin \alpha$$

a zatem jej prędkość końcowa (na końcu równi) równałaby się

$$v'_k = \sqrt{2gh}$$

Kulka zaczynając spadać ze stołu o wysokości  $H$  z prędkością  $v_k$  ( $v'_k$ ) nachyloną trochę do poziomu (o kąt  $\alpha$ ) porusza się ruchem jednostajnym poziomo ze stałą prędkością

$$v_k \cos \alpha$$

i pionowo ruchem jednostajnie przyspieszonym z prędkością początkową  $v_k \sin \alpha$  i przyspieszeniem ziemskim  $g$ .

Oba te ruchy trwają tak samo długo, a więc

$$L = v_k t \cos \alpha \quad \text{ i } \quad H = \frac{gt^2}{2} + v_k t \sin \alpha,$$

stąd

$$t = \frac{1}{g} \left( \sqrt{v_k^2 \sin^2 \alpha + 2gH} - v_k \sin \alpha \right),$$

A ponieważ interesuje nas zależność  $L$  od  $H$

$$L = v_k \cos \alpha \frac{\left( \sqrt{v_k^2 \sin^2 \alpha + 2gH} - v_k \sin \alpha \right)}{g}.$$

Jeśli  $\alpha$  jest małe,  $\cos \alpha$  jest bardzo bliskie 1, a  $\sin \alpha$  0 i otrzymujemy w przybliżeniu

$$L = \sqrt{\frac{20}{7}} hH = 1.69 \sqrt{hH}$$

a dla zsuwania się

$$L' = 2\sqrt{gH}$$

## Żywoty fizyków

# Carl Friedrich Gauss (1777-1855)

## książę matematyków (*princeps mathematicorum*)

Tadeusz Wibig

Urodził się w ubogiej rodzinie i od młodości bez żadnej racjonalnej, genetycznej przyczyny wykazywał szczególne uzdolnienia matematyczne. Jako genialne dziecko mając 3 lata umiał już dodawać, w szkole nie mając jeszcze lat dziesięciu, jak mówią, zaskoczył nauczyciela sumując w pamięci wszystkie liczby od 1 do 100.

System edukacji w Brunswiku zauważył potencjał młodego Gaussa i otoczono go wszechstronną opieką dostarczając podręczników, a nawet wyszukując sponsorów, aby mógł przestać z ekonomicznej konieczności miedlić len i mógł zająć się nauką. Mając 11 lat samodzielnie poznał dwumian Newtona i teorię ciągów i szeregów.

Książę Brunswiku Karl Wilhelm, niewątpliwie za wstawiennictwem jego nauczyciela wysłał młodego Gaussa do *Gymnasium Martino-Katharineum*. Tam szybko poznał on grekę i łacinę, a także nauczył się poprawnie wyślawiać po niemiecku. Po trzech latach Książę ufundował dla niego stypendium w wysokości 10 talarów rocznie, co dało mu szansę na dalsze studia uniwersyteckie w Getyndze. Szybko poznał tam prace Eulera, Lagrange'a, Newtona, a w wolnych chwilach opracował jedną z podstawowych metod analizy danych pomiarowych znaną dziś jako metoda najmniejszych kwadratów.

Jego matematyczny geniusz był wyjątkowo wielokierunkowy. Nie mając 20 lat wymyślił, jak przy użyciu cyrkla i linijki wykreślić siedemnastokąt foremny. W wieku 22 lat obronił doktorat, w którym udowodnił tak zwane podstawowe twierdzenie algebry<sup>1</sup>. Wcześniej próbowali tego inni, d'Alembert, Euler, Lagrange, Laplace, żeby wymienić tych najbardziej znanych. Ich dowody były jednak nie do końca poprawne. Zresztą i dowód Gauss też miał jedną małą lukę, ale była ona naprawdę malutka, a usunięta została dopiero przez Rosjanina Ostrowskiego w 1920 roku.

Po ukończeniu studiów Książę Brunswiku podniósł mu uposażenie do 400 talarów, a gdy Gauss odrzucił w 1802

<sup>1</sup> w skrócie: każde równanie wielomianowe ma tyle pierwiastków, jaki jest jego stopień (niektóre mogą być wielokrotne, co trzeba też uwzględnić).

<sup>2</sup> W 2013 r. neurobiolog z *Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie* w Getyndze odkrył, że mózg Gaussa został z powodu błędnego oznakowania zamieniony z mózgiem lekarza Conrada Heinricha Fuchsa, który zmarł w Getyndze kilka miesięcy po Gaussie. Wszystkie więc badania mózgu Gaussa przeprowadzone przed 1998 rokiem (z wyjątkiem pierwszych badań Rudolfa i Hermanna Wagnerów) odnoszą się do mózgu Fuchsa, a nie Gaussa

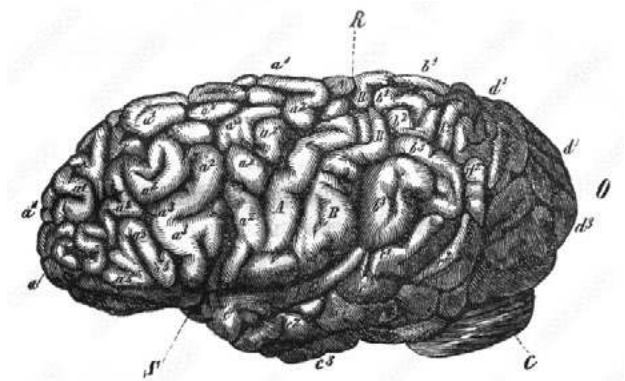


roku propozycję przeprowadzki do Petersburga, do 600 talarów rocznie. Po śmierci swego dobrodzieja w bitwie pod Jeną, uciął się strumień pieniędzy i Gauss w 1807 r. przyjął stanowisko profesora astronomii i dyrektora obserwatorium astronomicznego w Getyndze. Nie był to chyba zły wybór, bo mimo płynących zewsząd propozycji zmiany pracy, na stanowisku tym pozostał do śmierci w roku 1855.

Dzień po śmierci Gaussa jego mózg został usunięty, zakonserwowany i zbadany przez Rudolfa Wagnera, który stwierdził, że jego masa była nieco powyżej średniej i wynosiła 1,492 gramów. Powierzchnia kory mózgowej została określona przez syna Wagnera, Hermanna, w jego pracy doktorskiej na 219,588 milimetrów kwadratowych<sup>2</sup>.

Wymienienie wszystkich odkryć matematycznych Gaussa jest bardzo trudne, tyle ich jest i zawsze coś można pominąć. W dziele *Disquisitiones Arithmeticae* napisanym, gdy miał lat dwadzieścia kilka zajął się, jak sam napisał, *zagadnieniami odnoszącymi się do tej części matematyki, która dotyczy liczb całkowitych*. Było tam i małe twierdzenie Fermata, i fundamentalne twierdzenie arytmetyki (znane ze szkoły twierdzenie o rozkładzie na czynniki pierwsze), prawo wzajemności reszt kwadratowych, co mówi szerokiej publiczności niewiele, tak jak i teoria form kwadratowych, pierwiastków z jedynki, sposobów sprawdzania, czy dana liczba jest liczbą pierwszą, ogólna koncepcja kongruencji i wiele innych rzeczy, o których jako laik wolałbym się nie wypowiadać.

Problemem liczb pierwszych Gauss zajmował się i później. Interesowało go jak często zdarzają się one wśród liczb naprawdę wielkich i znalazł logarytmiczne rozwiązanie. Przez chwilę zajmował się też Wielkim Twierdzeniem Fermata, które udowodnił dla  $n=3$  i 5. Dowiódł też



Mózg Gaussa.

twierdzenia o najgęstszym upakowaniu jednakowych kulek w dużym pudełku.

Z rzeczy praktycznych i używanych do dziś należy wspomnieć o metodzie dość efektywnego całkowania numerycznego znaną jako kwadratura Gaussa. Wprowadził też metodę eliminacji (zwaną metodą Gaussa-Seidela) do algorytmów rozwiązywania dużych układów równań liniowych. Używał metody szybkich transformat Fouriera na 160 lat przez jej uznanymi współcześnie twórcami Cooley'em i Tukey'em.

Z fizycznego punktu widzenia osiągnięcia Gaussa są nieco mniej imponujące, nie nazywa się go wszak „księciem fizyków”. Jego nazwisko wiąże się jednak przede wszystkim z prawem Gaussa mówiącym o związku strumienia pola elektrycznego wypływającego przez zamkniętą powierzchnię z ładunkiem w niej zamkniętym

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0}$$

W postaci różniczkowej

$$\nabla E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

jest ono jednym z czterech klasycznych równań Maxwella w ich powszechnie znanej formie.

Znany jest też, choć mniej, z praktycznych prac nad budową telegrafu, o czym pisaliśmy w „Fizyce w Szkole” (64/1 36, 2019). Wynalazł on też, przy okazji niejako, magnetometr wibracyjny, w którym pole wyznaczało się obserwując drgania małego magnesu stałego zawieszonego na cienkiej nici. Jego zainteresowania magnetyzmem, w tym magnetyzmem ziemskim zaowocowały powołaniem Towarzystwa Magnetycznego (*Magnetischer Verein*) i rozpoczęciem pomiarów ziemskiego pola magnetycznego w 61 stacjach na pięciu kontynentach.

Gauss w roku 1832 zaproponował standaryzację układu jednostek miar. Jako podstawę przyjął w nim milimetr, miligram i sekundę. W 1873 Brytyjczycy z Maxwellem i Kelvinem na czele zmienili to na centymetr-gram-sekunda i tak powstał układ znany jako CGS, który czasem nazywa się też

Gauss doceniany był bardzo jeszcze za życia. Był członkiem wielu Akademii i Towarzystw Naukowych:

Russian Academy of Sciences. (1802),  
Academy of Sciences in Göttingen (1802/ 1807),  
French Academy of Sciences (1804/ 1820),  
Royal Society of London (1804),  
Royal Prussian Academy in Berlin (1810),  
National Academy of Science in Verona (1810),  
Royal Society of Edinburgh (1820),  
Bavarian Academy of Sciences of Munich (1820),  
Royal Danish Academy in Copenhagen (1821),  
Royal Astronomical Society in London (1821),  
Royal Swedish Academy of Sciences (1821),  
American Academy of Arts and Sciences in Boston (1822),  
Royal Bohemian Society of Sciences in Prague (1833),  
Royal Academy of Science, Letters and Fine Arts of Belgium (1841/1845),  
Royal Society of Sciences in Uppsala (1843),  
Royal Irish Academy in Dublin (1843),  
Royal Institute of the Netherlands (1845/ 1851),  
Spanish Royal Academy of Sciences in Madrid (1850),  
Russian Geographical Society (1851),  
Imperial Academy of Sciences in Vienna (1848),  
American Philosophical Society (1853),  
Cambridge Philosophical Society,  
Royal Hollandish Society of Sciences in Haarlem.

układem Gaussa. Istotnie różne od znanych nam jednostek układu SI są jednostki związane z elektromagnetyzmem. W szczególności gęstość strumienia pola magnetycznego mierzy się w nim w gaussach (**G**, albo **Gs**). Odpowiada to indukcji magnetycznej w układzie SI, którą mierzy się w teslach (**T**). Tesla jest 10000 razy większa od gaussa.

## Doświadczenie domowe:

### Przyciąganie się magnesów

#### A. Potrzebne materiały

1. Dwa nieduże magnesy neodymowe (np. 5 mm × 5 mm × 1 mm)
2. Linijka plastikowa
3. Kartka cienkiej (~0.2 mm) tekturki
4. Cienki drucik miedziany
5. Kawałek gazy lub innego lekkiego materiału, delikatnej siateczki
6. 10 dag fasoli, może być grochu, a ambitniejsi mogą użyć nawet ryżu
7. Podpórki, na których spocznie konstrukcja; mogą to być książki

#### B. Narzędzia: klej (może być zwykła „kropelka”), nożyczki, pęseta (niekoniecznie)

#### C. Kolejność czynności

1. Do jednego z magnesików po jednej jego stronie przykleić cienki miedziany drucik.
2. Z gazy uformować niewielki woreczek, taki by zmieściło się tam kilkadziesiąt fasolek.
3. Woreczek zamocować do drucików przyklejonych do magnesu.
4. W woreczku u góry wyciąć dziurę, przez którą będzie się wsypywało doń fasolki.

5. Z cienkiej tekturki wyciąć 10-20 kwadratów o rozmiarze  $\sim 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ .
6. Linijkę ułożyć na podpórkach z książek.
7. Na linijce na środku ułożyć jeden magnes (ten bez drucików).
8. Drugi magnes umieścić pod nim po drugiej stronie linijki tak, aby magnesy przyciągały się.
9. Przy użyciu pęsety delikatnie wrzucić do woreczka ziarenko fasoli.
10. Odczekać chwilę.
11. Jeśli woreczek wisi jeszcze wrócić do punktu 9 zliczając wrzucone fasolki.
12. Jeśli woreczek pod własnym ciężarem odpadnie, zapisać w tabelce aktualną liczbę fasolek  $N$  i liczbę kartoników pod górnym magnesem  $n$  (na początku jest ich 0).
13. Opróżnić woreczek.
14. Umieścić pod górnym magnesem jeden (kolejny) z wyciętych kwadratów z tekturki.
15. Powtarzać czynności od punktu 7 aż nam się znudzi albo woreczek opadał będzie od razu.

Po wykonaniu pomiarów należy uzupełnić tabelę wpisując w dwie kolejne kolumny logarytm (dziesiętny) liczby fasolek  $N$  i liczby kartoników  $n$ . I tu istotna uwaga. Do liczby kartoników musimy dodać pewną wielkość, oznaczmy ją przez  $n_0$ , która jest bliżej nieznana, a zawiera w sobie informację o grubości linijki i geometrii samych magnesów.

Do liczby fasolek też musimy coś dodać. To coś ( $n_0$ ) odpowiadać musi za ciężar woreczka i dolnego magnesu razem z drucikami. Trudno eksperymentalnie wyznaczyć te wartości. Weryfikuje się je metodą prób i błędów oglądając otrzymane wyniki i porównując je z „teorią”.

Aby zobaczyć, co nam wyszło musimy zrobić odpowiedni wykres. Na osi poziomej odłożymy logarytm czegoś, co odpowiada odległości między magnesikami  $x = \log_{10}(n + n_0)$ , a na osi pionowej logarytm siły przyciągania w momencie oderwania się woreczka  $y = \log_{10}(N + N_0)$ .

Zonglując w rozsądnych granicach wartościami  $n_0$  i  $N_0$  uzyskać powinniśmy złamaną linię, która dla wartości niedużych odpowiada zależności

$$N + N_0 \sim 1/(n + n_0)^2$$

czyli

$$\log_{10}(N + N_0) \sim A - 2 \log_{10}(n + n_0),$$

| n | N  | $\log_{10}(n + n_0)$ | $\log_{10}(N + N_0)$ |
|---|----|----------------------|----------------------|
| 0 | 55 | 0.78                 | 1.76                 |
| 1 | 41 | 0.85                 | 1.64                 |
| 2 | 22 | 0.90                 | 1.40                 |
| 3 | 24 | 0.95                 | 1.43                 |
| 4 | 17 | 1.00                 | 1.30                 |
| 5 | 14 | 1.04                 | 1.23                 |
| 6 | 10 | 1.08                 | 1.11                 |
| 7 | 7  | 1.11                 | 1.00                 |
| 8 | 5  | 1.15                 | 0.90                 |
| 9 | 3  | 1.18                 | 0.78                 |



co na wykresie logarytmiczno-logarytmicznym jest linią prostą:

$$y = A - 2x$$

a dla wartości większych

$$N + N_0 \sim 1/(n + n_0)^3$$

czyli

$$\log_{10}(N + N_0) \sim B - 3 \log_{10}(n + n_0),$$

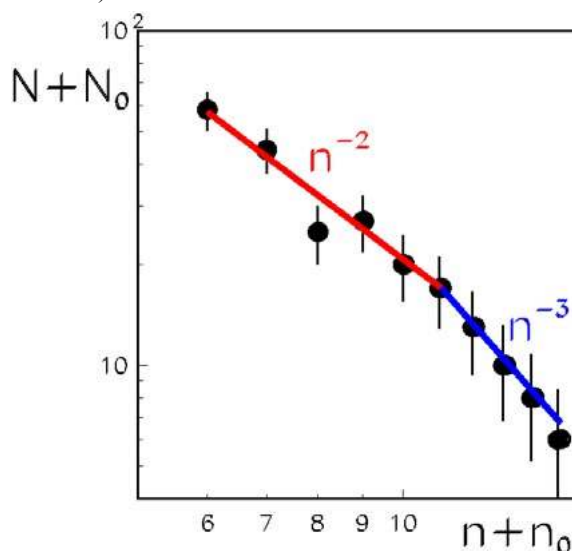
co na tym wykresie jest też linią prostą, ale o większym nachyleniu:

$$y = B - 3x$$

A dlaczego spodziewamy się takich zależności, to już inna sprawa i odpowiedź na to pytanie wymaga trochę, acz niezbyt skomplikowanych rachunków.

W doświadczeniu, jakie zrobiliśmy, wartości  $n_0$  i  $N_0$  dopasowaliśmy „na oko” i wyszło nam, że nieźle sprawdzają się wartości  $n_0 = 6$  i  $N_0 = 3$ .

Tabela i rysunek pokazują wyniki naszych pomiarów. (Zauważmy, że skale pionowa i pozioma są „logarytmiczne”!)



# Dydaktyka konstruktywistyczna

Foto – Dreamstime

W poprzednim artykule pt. „Dydaktyka dydaktyczna” opisaliśmy, jak nauczanie, zgodnie z definicją Komeńskiego<sup>1</sup>, powinno stać się „user-friendly” a nie być katorgą dla ucznia a stresem dla nauczyciela. W kolejnych dwóch tekstach wskażemy na dwa nowe paradygmaty dydaktyki, które pojawiły się na początku i w połowie XX wieku, a które obecnie, w erze Google’a i Wikipedii powinny powoli zajmować swoje miejsce w codziennej, szkolnej dydaktyce. Mówimy, odpowiednio, o konstruktywizmie i kognitywizmie. Trudno rozdzielić te dwa pojęcia – oba podkreślają aktywny udział ucznia, tak w samokształceniu jak w trakcie budowania wiedzy w szkolnej klasie. Omówimy te dwie recepty nauczania na XXI wiek w dwóch „podejściach”. W tym artykule omówimy koncepcje konstruktywizmu i ich konsekwencje dla dydaktyki fizyki.

Grzegorz Karwasz, Katarzyna Wyborska, Zhuldy Akimkhanova, Klaudia Gackowska, Anna Kamińska

## Konstruktywizm Piageta

Jean Piaget (1896-1980), biolog z wykształcenia, wielki erudyta w swych dojrzałych pracach, jest twórcą tzw. psychologii rozwojowej, czyli dziedziny zasadniczej w pracy nauczyciela szkolnego. Co prawda, jak pisze włoski pedagog Piero Crispiani, praca dobrego nauczyciela jest pasją i bardziej przypomina wirtuozerię artysty niż wyuczone rzemiosło, a doświadczenie zdobywa się w rozmowach w pokoju nauczycielskim, ale świadomość ograniczeń rozwojowych dzieci w różnym wieku bardzo w edukacji pomaga. Piaget podzielił okresy rozwojowe na cztery stadia. Do wieku dwóch lat dziecko (niemowlak) poznaje zewnętrzny świat fizyczny. W literaturze nazywa się ten okres „senso-motoryczny” – piszemy o tym w dal-

szej części artykułu. W wieku 3-7 lat dziecko kształtuje umiejętności zrozumienia języka i związanych z nim konstrukcji umysłowych. Wiek 7-11 lat „piagetowcy” nazywają rozwojem konkretnych umiejętności operacyjnych, a powyżej 12 lat – umiejętności formalnych.

I dopiero w wieku 19-20 lat rodzi się w umyśle młodego człowieka umiejętność konstruowania świata abstrakcyjnego. A to otwiera młodemu człowiekowi nową, zaskakującą perspektywę - dlatego najlepsze prace teoretyczne pisane są w wieku 25-27 lat.

Ta różnorodność jest indywidualną cechą rozwojową: uczniowie w klasie *muszą* się różnić. Nie wszyscy uczniowie w wieku 19 lat potrafią przetłumaczyć treść zadania maturalnego na określone wzory do zastosowania – nie

<sup>1</sup> Przypominamy słowa Komeńskiego z *Didactica Magna*: „Jeśli nauczyciele będą wymowni i uprzejmi, a surowością nie będą odstręczali od siebie umysłu, lecz przeciwnie będą przywabiali do siebie przychylnością ojcowską, słowami i gestykulacją; jeśli nauki, jakie wykładają, zalecać będą z powodu ich doskonałości, przyjemności i łatwości; jeśli pilnych niekiedy będą chwalili (a pomiędzy mniejszych niekiedy rozdawali jabłka, orzechy, cukierki); jeśli ich do siebie przywołają i pokażą (albo u siebie albo podczas publicznej nauki) ryciny tego, czego kiedyś mają się uczyć, obrazy, instrumenty optyczne albo geometryczne, globusy i tym podobne rzeczy, które zdołają ich zadziwić; dalej, jeśli niekiedy będą uwiadomiali rodziców o ich postępach – jednym słowem, jeśli mile będą obchodzili się z dziećmi, to łatwo zdobędą sobie ich serca, tak dalece, że pobyt w szkole będzie im miłszy niż w domu.” [2]

wypracowali jeszcze połączenia między światem realnym a jego przedstawieniem matematycznym. Mówimy „egzamin dojrzałości”. Ale czy wszyscy są w tym samym wieku tak samo dojrzały? Może Centralna Komisja tego nie rozumie?

Winieta na stronie [3] o rozwoju umysłowym, rys. 1. pokazuje jak niemowlak uczy się trzymać szklankę z wodą, przedszkolak rozumie pojęcie „woda” jako stan skupienia [4], uczeń szkoły podstawowej porównuje ilość wody w szklance szerokiej i szklance wysokiej, a nastolatek dokonuje tych operacji w swym umyśle. Oczywiście, nauczanie przedszkolne i szkolne od zawsze realizuje te stadia, ale warto o tych ograniczeniach pamiętać, kiedy dziecko nie potrafi odpowiedzieć na określone pytanie: być może, coś w jego poprzednim etapie rozwojowym zostało pominięte. Istotne jest, aby na każdym poziomie nauczania zapewnić (a w zasadzie „wysycić”) potencjalne możliwości percepcyjne dziecka. Stąd w programie włoskiego przedszkola 3-letnie dzieci bawią się lodem i wodą, podnoszą klocki lekkie i ciężkie i przesuwają dłoń po powierzchni gładkiej i szorstkiej. Znana jest zresztą w Polsce „metoda” Montessori prostych obiektów dydaktycznych. Należy jednak podkreślić, że wielcy reformatorzy edukacji jak Jan Komieński, Johann Pestalozzi czy Maria Montessori czerpali inspirację nie tylko z motywacji praktycznych, ale moralnych i religijnych. Może kiedyś rozwinie my te koncepcje szerzej...

Zaskakujący jest fakt, że Piaget przywołał dla swojej teorii nie jakieś statystyczne wyniki na tysiącach „egzemplarzy”, ale indywidualne obserwacje, na własnej trójce dzieci. Tak! indywidualnie nasze (tzn. nauczyciela w szkole) doświadczenia z własnymi uczniami, dziećmi czy wnukami mają tę samą wartość naukową co jakaś wydumana czasem statystyka.

### Konstruktywizm niemowlaka

Piaget w „Narodzinach inteligencji dziecka” zamieszcza mnóstwo obserwacji różnych umiejętności, od patrzenia do dotykania i artykulacji dźwięków, stopniowo zdobywanych przez dziecko. Dla nas fizyków, istotne są

umiejętności świadczące o zdobywaniu wiedzy o prawach fizyki.

Najbardziej zabawne jest, kiedy dziecko, po zgrubnym zrozumieniu praw statyki (należy stać na wyprostowanych nogach i nie kiwać się nadmiernie), próbuje zrobić pierwsze kroki. Początkowo są one nieco jak ruchy Browna: niemowlak przesuwając stopę w dość przypadkowym kierunku, więc nie posuwa się do przodu. Dość szybko synchronizuje ruch obu nóg, ale nadal nie jest to chodzenie, lecz przenoszenie środka ciężkości w miejsce, gdzie się udało stopę postawić.

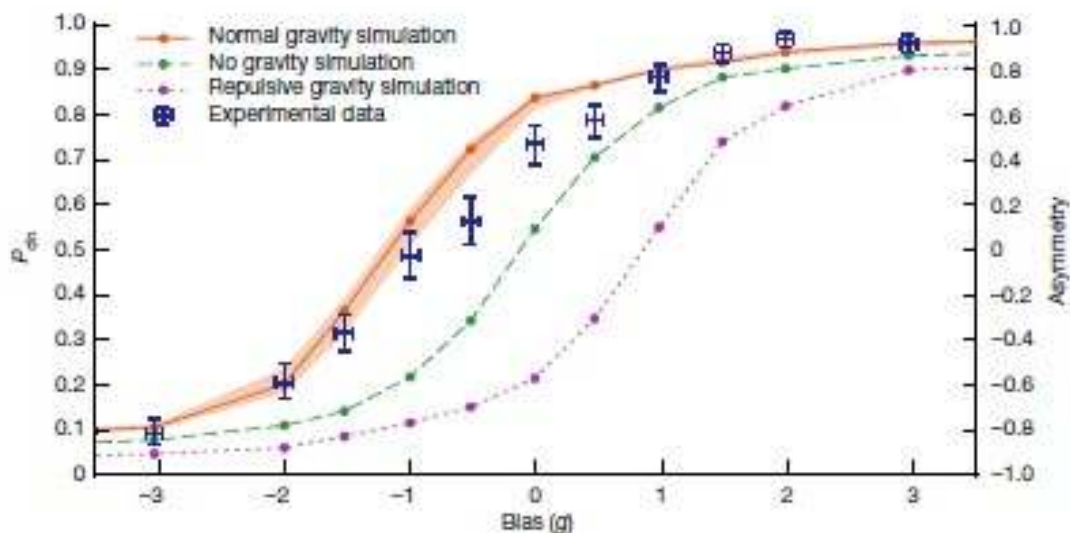
Dorosły chodzi zupełnie inaczej: jest to odpychanie się od ziemi, jak wiosłowanie w kajaku. Bez tarcia dorosły chodzić nie potrafi. Stopa nie służy do przestawiania, ale do odpychania podłogi do tyłu. Stąd konstrukcja sportowego buta, o twardej pięcie, szorstkiej podeszwie i elastycznej części na palce. Profesor fizyki zapytał kiedyś studenta, jakim prawem pan tu wszedł. „Prawem tarcia” odpowiedział student i dostał piątkę. Niemowlakowi brak tarcia nie przeszkadza: w razie czego w przewidziany sposób opuści swój środek ciężkości na „glebę”. Ale ta różnica w mechanice chodu wyjaśnia, dlaczego roboty potrafią precyzyjnie podać jajko, ale z kroczeniem mają spore kłopoty.

Ale doświadczenia z fizyki zaczynają się, jak tylko dziecko otworzy oczy i zacznie rozróżniać światło i cień. Dłonią sprawdza, czy twarz matki jest wklęsła czy wypukła. Nie jest to wcale takie oczywiste jak pokazaliśmy na jednym z naszych eksponatów na wystawie „Fiat Lux” [5]. Kiedy niemowlak potrafi skoordynować chwytność dłoni z obrazem, próbuje, czy da się zdemontować ojca nos czy ucho. Jedynie z okularami to się udaje: widać, nie stanowi integralnej części głowy.

Kiedy dziecko zaczyna siadać, mózg musi dokonać operacji znacznie trudniejszej: przestawić odwrócony obraz na siatkówce. Nie jest to zadanie proste, wymaga skoordynowania ze wskaźnikiem pionu (błędniakiem w uchu, a później również czujnikami siły w stopach). Kiedy oglądamy telewizję leżąc na boku, obraz jest dla oka widoczny, ale ucho nie rozumie fonii. Jeszcze gorzej,



Rys. 1. Etapy rozwoju według Piageta: od poznawania świata obiektów do świata wyobrażeń o świecie fizycznym. Niemowlak cieszy się, że umie utrzymać szklankę z wodą, nastolatek sprawdza doświadczalnie objętość dwóch szklanek, a dopiero dorosły zamartwia się, czy szklanka jest w połowie pełna czy pusta. Wzór [3], wykonanie KW za pomocą Playground AI.



Rys. 2. Czy na antymaterię działa anty-grawitacja: pomiary miejsca anihilacji anty-wodoru, przy założeniu grawitacji i antygravitacji. Na osi poziomej warunki pułapkowania atomów anty-wodoru, symulujące różne wartości przyspieszenia grawitacyjnego. Źródło: CERN [6]

jeśli mózg jest bardzo zmęczony (albo zamroczony): rozchodzi się koordynacja układu pixeli z dwóch siatekówek i zamiast obrazu trójwymiarowego widzimy dwa oddzielne, niezachodzące na siebie: prowadzenie samochodu wymaga wówczas zakrycia jednego oka (albo najbezpieczniej – dłuższego odpoczynku).

Ulubionym doświadczeniem jednej z naszych (GK) wnuczek, kiedy miała pół roku, było sprawdzanie odwracalności doświadczeń z mechaniki: czy przetaczanie pomarańczy na prawo po stoliku i na lewo czymś się różni. Kiedy do pomarańczy dodaliśmy mandarynkę, wnuczka sprawdzała prawa zderzeń sprężystych. Przypominamy tu cytowane przez nas już kilkakrotnie sformułowania Arystotelesa: „Ciało raz puszczone w ruch porusza się przed siebie, dopóki nie stanie mu na drodze inne, cięższe ciało”. Wnuczce zajęło około pół godziny weryfikacja (a w zasadzie samodzielne skonstruowanie) tego prawa, nawet jeśli nie była jeszcze w stanie tych swych odkryć zwerbalizować.

Najciekawsze doświadczenie z fizyki dziecko przeprowadza tak gdzieś w wieku jednego roku – kiedy już stoi, ale jeszcze nie chodzi. Dla rodziców szczególnie irytujące jest, kiedy dziecko, już stojące, wyrzuca z kojca poszczególne zabawki, a mama musi je następnie podnieść z podłogi. Fizyk rozumie, że dziecko po prostu sprawdza prawo grawitacji (czy działa również „na odwrót”). W pewnym sensie podobne doświadczenie przeprowadzono we wrześniu ub. r. w CERN: czy na antymaterię działa antygravitacja. Wynik jest negatywny, a w zasadzie prawie negatywny: atomy anty-wodoru spadają z przyspieszeniem  $0,75 \pm 0,13$  (błąd systematyczny + statystyczny)  $\pm 0,16$  g (niepewność symulacji). W 2032 $\pm 5$  roku zostanie za to doświadczenie przyznana nagroda Nobla.

Innymi słowy, w granicach niepewności pomiaru, nawet zabawki z antymaterii nie wrócą same do kojca. Byłaby jeszcze inna szansa na powrót zabawek do kojca. Nie wyklucza tego mechanika statystyczna Boltzmanna, która przypisuje określone prawdopodobieństwo  $p$ , że energia ciała w temperaturze  $T$  wyniesie  $E$ :

$$p(E) = \exp(-E/kT),$$

gdzie  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$  jest stałą Boltzmanna.

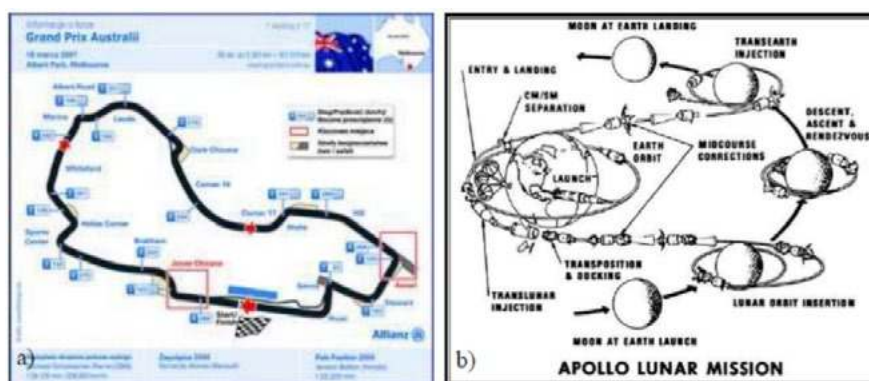
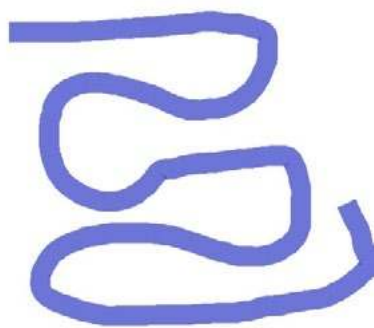
Ponieważ energia drewnianego klocka spadającego z kojca to jakieś 0,1 J, w temperaturze 300 K prawdopodobieństwo powrotu wynosi około  $10^{-19}$  czyli praktycznie zero. Ale bardziej szczegółowo, należałoby znaleźć fizyczne źródło energii, aby ciało samo podskoczyło. Jak wiemy, wszystkie atomy drgają termicznie, nawet w temperaturze zera kelwinów. Ta energia drgań „zerowych”  $E = \frac{1}{2}h\nu$ , gdzie  $h$  jest stałą Plancka wynika z mechaniki kwantowej. Dla jednej cząsteczki  $H_2O$ , energia drgań, np. zginających, wynosi  $0,7 \cdot 10^{-19}$  J. Aby ciało podskoczyło, drgania zerowe wszystkich atomów musiałyby mieć ten sam kierunek i tę samą fazę. A ciało podskoczyłoby na wysokość mniej niż średnica atomów: to nie jest rozumowanie, ale czysta bzdura!

Oczywiście, rozważania o klockach wskazujących do kojca są żartem, ale pokazują, jak można uczyć fizyki przez zabawne dygresje. Uczą nas poszukiwania praw fizyki nawet tam, gdzie nam o nich nie mówią: samodzielne konstruowanie fizyki jako nauki.

## Konstruktywizm Amaldiego

Psychologia rozwojowa Piageta pokazuje, jak dziecko stopniowo, rok po roku (a raczej stopień po stopniu) jest w stanie pojąć zagadnienia i określenia coraz bardziej skomplikowane. Kiedy już zaczyna mówić (jakieś 2-3 lata) znakomicie rozumie sytuacje teraźniejsze i miejscowe. Nie ma jednak pojęcia czasu i możliwości: nasza obserwacja pokazuje fascynację historią z zegarem („co robi Myszka Miki o godzinie siódmej”) u trzyletniego dziecka. O ile pojęcie przestrzeni kształtuje się w umyśle dziecka bardzo szybko (piszemy o tym nieco dalej), to czas pozostaje wielkością abstrakcyjną.

Nie znika ta trudność i w starszym wieku. Mnóstwo podręczników swobodnie „zongluje” wykresami x-y i t-y: dla dorosłego wykres wielkości w funkcji czasu nie jest żadną koncepcyjną trudnością, dla dziecka – tak!



Rys. 3. Pojęcie trajektorii (czyli wykres ruchu na płaszczyźnie x-y) jest koncepcyjnie prostsze niż wykresy położenia w funkcji czasu. Źródło: G.K. i in. Toruński poręcznik [6].

Rozróżnienia między wykresami w przestrzeni (czyli trajektoriami) i w czasie (abstrakcyjnymi) nauczyliśmy się (GK) od Ugo Amaldiego i jego „Fizyki interaktywnej” (Zanichelli, Bologna, 1999). Wykres w przestrzeni łatwo zilustrować, dając dziecku ołówek i prostokątną kartkę, a w dzisiejszych czasach komputerową mysz, rys. 3a. Można też nagrać fotokomórką lot muchy po pokoju. (W tych dniach miał miejsce zamach na Donalda Trumpa. Na jednej z fotografii przypadkowo uwieczniono prostoliniowy odcinek lotu pocisku.) W naszym „Poręczniku” do fizyki pokazujemy tor wyścigów samochodowych w Australii, rys. 3b, a zaraz obok – już bardziej abstrakcyjną trajektorię lotu Apollo na Księżyc, rys. 3 c.

Wykres t-y trzeba skonstruować. Ugo Amaldi czyni to przy okazji wprowadzania pojęcia ruchu prostoliniowego i prędkości w ruchu jednostajnym. Sekwencję obrazów przedstawiamy na rys. 4. Jako pierwsza pojawia się trajektoria: komputerowa gierka pokazując ruch myszy. W kolejności Amaldi wprowadza (abstrakcyjne) pojęcie punktu materialnego: samochód na odcinku prostej drogi, widziany z kosmosu (rys. 4a). Kolejne etapy konstrukcji wymagają przypomnienia, że fizyka nowożytna jest nauką 1) obserwacyjną, 2) upraszczającą, 3) matematyczną. Pokazujemy tę sekwencję na rys. 4.

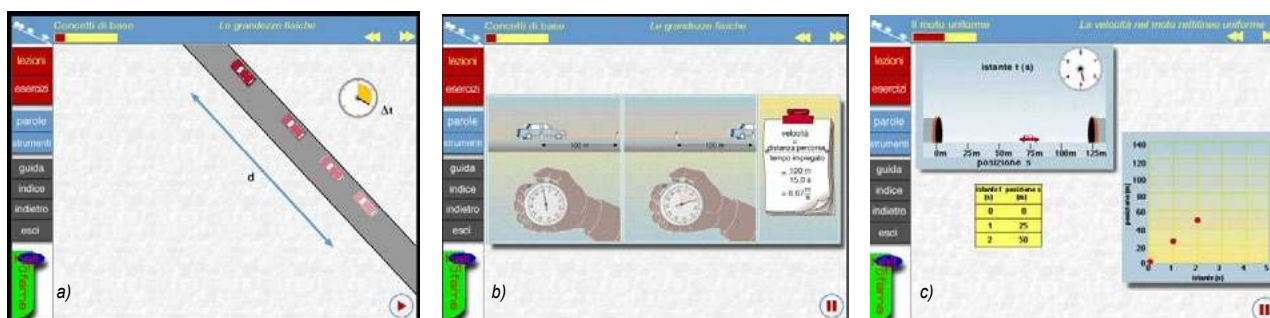
Pomiar w fizyce jest ściśle zaplanowany i wymaga usunięcia z przestrzeni obserwacyjnej nieistotnych szczegółów. Dla skonstruowania pojęcia prędkości potrzebny jest odcinek prostoliniowy, stosunkowo krótki i dobrze zdefiniowany: kawałek odkrytej drogi między dwoma tunelami

(rys. 4c). Z kolei należy zdefiniować wielkości mierzone oraz przyrządy pomiarowe: dla odległości są to słupki ustawione co 100 metrów wzdłuż drogi, dla czasu – sekundnik ze wskazówką (bardziej obrazowy niż stoper w telefonie komórkowym). Kiedy wirtualny samochód mija kolejne słupki z głośnika komputera słyszymy „bip!”. W kolejnej sekwencji tej multimedialnej mini-lekcji, w czasie realnym (przy każdym „bip”) pojawiają się kolejne wiersze tabelki: czas i przebyta (od początku ruchu, czyli początku widocznego odcinka szosy) - odległość. Ale do wykresu czas-położenie droga jeszcze daleka. Najpierw pojawiają się jedynie punkty pomiarowe (prawy panel na rys. 4c). W kolejnych krokach (nie pokazanych na rys. 4) obliczamy prędkość na poszczególnych odcinkach jako ilorazy przebytej drogi i czasu. Linia prosta na wykresie  $x(t)$  jest konstrukcją abstrakcyjną: zakładając, że pomiędzy punktami pomiarowymi samochód nie znika w jakimś tunelu czasoprzestrzennym, dokonujemy interpolacji, a później też ekstrapolacji na przyszły ruch samochodu.

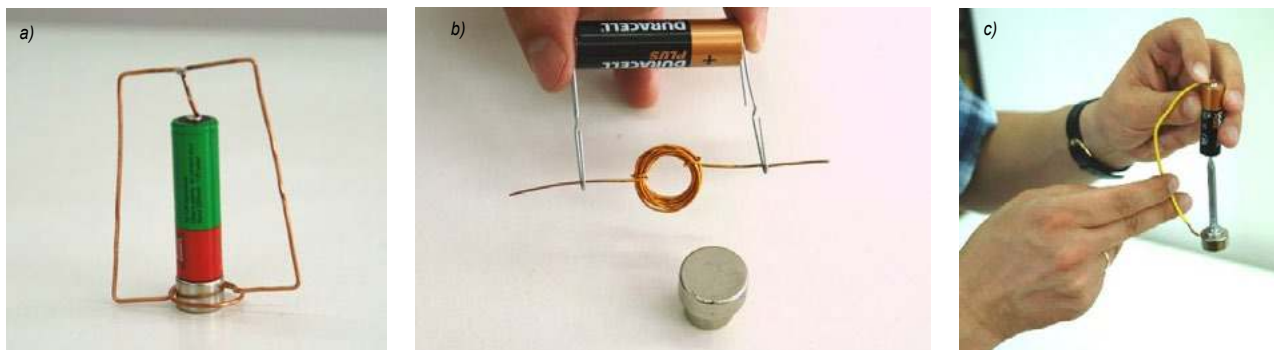
W naszym Poręczniku [7] wykresy  $x(t)$  i  $v(t)$  odróżniamy poprzez inne tło: wykres  $v(t)$  jest już zupełnie abstrakcyjną konstrukcją, jako że  $v$  nie jest mierzone, ale obliczane.

### Konstruktywizm własnymi rękoma

Jak pisaliśmy powyżej, wiek 7-11 lat to kształtowanie w osobowości dziecka m.in. umiejętności praktycznych. Warto to „okno” percepcyjne wykorzystać dla „przemycenia” treści z fizyki, poprzez doświadczenia „własnymi rękoma”.



Rys. 4. Konstruowanie pojęcia prędkości w ruchu jednostajnym prostoliniowym. a) definiujemy pojęcia punktu materialnego i trajektorii prostoliniowej, b) definicje w fizyce są operatywne: co i czym mierzymy, c) definicje wymagają abstrakcji: wybieramy odcinek prostoliniowy, zaznaczamy w tabelce czas pomiaru  $t$  i położenie samochodu  $x$ , następnie nanosimy punkty na układ współrzędnych  $t-x$ . Linie prostą przeciągniemy jako przybliżenie tych punktów (a jednocześnie ich interpolację i ekstrapolację). Źródło: U. Amaldi, Fisica Interattiva, Zanichelli 1999.



Rys. 5. Konstruktywizm „własnymi rękoma”. Trzy proste silniczki z magnesem neodymowym. Projekt KDF UMK „Mosem” ([https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/howa\\_strona/?q=node/71](https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/howa_strona/?q=node/71)). Konstruktywizm (i kognitywizm), oprócz zasadniczego, istotnego przekazu powinien ilustrować rozwiązania alternatywne, a przez to rozwijać wyobraźnię i kreatywność.

Nurek Kartezjusza to piękne i proste doświadczenie, które każdy powinien spróbować. Potrzebny jest korek, kilka gwoździ (najlepiej różnych rozmiarów) i butelka po mleku. Dzisiaj dąb korkowy staje się rzadkością, a korki syntetyczne nie są dostatecznie porowate. W zastępstwie można użyć kawałka styropianu albo w alternatywnej konfiguracji – kawałek słomki od napojów zgięty w pół (i obciążony np. spinaczem). Ważne, aby nasz nurek miał w sobie nieco powietrza.

W temacie pływania można sprawdzać, jak toną „komórki” plastikowej wytłoczki z bombonierzy z czekoladkami, kiedy wkładamy do nich małe kamyczki. W USA kupiliśmy zeszyt z modelami papierowych samolotów. W temacie termodynamiki i stanów skupienia można też budować spadochrony z papierowych foremek na ciasteczka i sprawdzać, czy spadają ruchem jednostajnym. (Dorośli mogą obserwować, czy bańki w pokalu do piwa wędrują w górę podobnym ruchem; istotna jest dynamika narastanie tych baniek oraz lepkość cieczy – szampan tak dobrze nie działa). Ważna w tym wszystkim jest zabawa własnymi rękoma, procedury budowania i poprawiania, porównywanie wyników, współzawodnictwa, i umiejętności obserwacji świata.

Neodymowy magnes, baterijka i kawałki drutu pozwolą na zbudowanie różnego rodzaju mini-silniczków. Do silniczka z rys. 5a używamy drutu o średnicy 1 mm: należy zeszkrobać izolację z wewnętrznej strony dolnej pętli tak, aby zapewnić kontakt elektryczny: silniczek uruchamiamy małym stuknięciem. Dla wyjaśnienia kierunku obrotu nie wchodzimy w infantylną i dydaktycznie bezużyteczną regułę prawej (a dla leworęcznych – lewej?) dłoni. Konstruktywistycznie czekamy, aż uczniowie sami wpadną na

pomysł odwrócenia biegunów magnesu lub baterijki. Uniwersalny wzór, tak na siłę elektromagnetyczną (Lorenza)  $\mathbf{F}$  jak moment pędu i moment siły, otrzymają uczniowie na studiach, jak tylko zostanie wprowadzony iloczyn wektorowy  $\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ , gdzie  $\mathbf{v}$  określa prędkość ruchu ładunku  $q$  a  $\mathbf{B}$  – wektor indukcji magnetycznej. Szczegóły działania silniczka z rys. 5a opisane zostały w artykule [8].

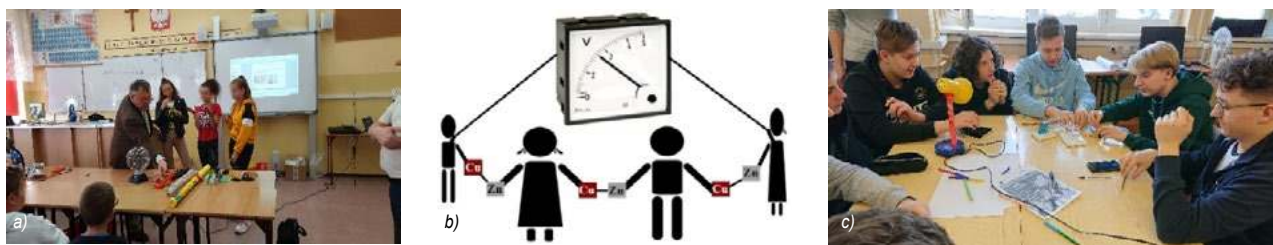
Kolega inżynier skarżył się, że jego silniczek z rys. 5b „nie działa”. Jasne! Silniczek nie ma prawa działać, bo jest zbyt prosty. W „prawdziwym” silniku są na przemian umieszczone bieguny północne i południowe a prąd przepływa przez „zamiennik” (po grecku *komutator*). Nasz silniczek nic takiego nie ma. Ale przypadkowość kontaktu elektrycznego między spinaczem a końcówkami drutu oraz niejednorodność pola magnetycznego (umieszczamy silnik ponad magnesem, ale nieco poza punktem maksymalnego pola magnetycznego) zapewnia działanie. I oczywiście, dla uzyskania obrotów trzeba nim lekko zakręcić.

W silniczku na rys. 5c miękka końcówka drutu działa jak szczotka w prawdziwym silniku. Ferromagnetyczny gwóźdź koncentruje linie indukcji magnetycznej; „przykleja się” on do baterijki, bo nikiel w obudowie baterijki 1,5 V jest również ferromagnetyczny (w odróżnieniu od cynku w baterijkach 1,2 V).

W temacie mechaniki odsyłamy Czytelnika do stron „Fizyki zabawek” [9]. Wiele z pokazanych prostych obiektów dydaktycznych (PED) można próbować skonstruować samodzielnie. Z pewnością krzywą najszybszego toru (brachistochronę, z dwóch kawałków plastikowego korytka na przewody elektryczne), wahadło Maxwella, yo-yo a może nawet odwracający się bączek – tippe top. Z gwoźdź,



Rys. 6. Konstruktywizm w nauczaniu mechaniki: doświadczenia możliwe do wykonania i w klasie i w domu. (a) Wiszący ptak z „Fizyki zabawek” (b) Skaczące piłeczki na lekcji na sali gimnastycznej w Villacidro, Sardynia, maj 2024. (c) Sprężyna slinki (GK i ZhA), wykłady na Uniwersytecie Al-Farabi, czerwiec 2024. Foto Maria Karwasz.



Rys. 7. Konstruktywizm na lekcji o ogniwie Volty: podział ról, współpraca grupowa, zabawa. (a) „Ludzka Bateria” (SP Dąbrowa Biskupia, 2019, KW), (b) schemat doświadczenia, (c) praca w grupach na lekcji o ogniwie Volty (Zespół Szkół Energetycznych w Gdańsku, 2019, AK).

korka i dwóch widelców konstruujemy wiszącego ptaka, ryc. 6a. (Uwaga, wbicie widelców w korek wymaga pomocy nauczyciela). Ważne jest próbowanie własnymi rękoma – im więcej nieudanych prób, tym bardziej kompletne dydaktyczne doświadczenie. Kawałki (oczyszczonych) kości z wieprzowych żeberk kręcą się w jedną stronę, jak celtyckie czółenka. Nie mówiąc już o skaczących piłeczkach – jakichkolwiek, kauczukowej i ping-pongowej, koszykowej i tenisowej itd. Natomiast nasze (GK) próby wyrzutu w kosmos dzieci na Sardynii, rys. 6b, node/1067, nie były udane: piłka zbyt duża i lekka a dzieci zbyt ciężkie.

Konstruowanie wiedzy za pomocą PED oznacza nie tylko różne próby inżynieryjne, ale przede wszystkim eksploatację bogactwa możliwości dydaktycznych. Sprężyna slinky „schodzi” po schodach, jak to pokazujemy na naszych stronach internetowych, ale wykorzystujemy ją również do pokazania fali poprzecznej (czyli drgania struny), fali podłużnej (czyli dźwiękowej w powietrzu) a w geo-sejmologii – fali S i P. Dwie fale zgodne w fazie a propagujące z przeciwnych kierunków dają falę stojącą, rys. 6c.

Konstrukcją wymagającą współdziałania, a przy tym zapewniającą mnóstwo zabawy jest „ludzka bateria”. Spośród liczego grona chętnych uczniów wybieramy grupę i ustawiamy ich w szeregu. Każdy uczeń otrzymuje blaszkę – miedzianą i cynkową – i trzyma ją tak, jak pokazano na rys. 7b. Kiedy zamykamy obwód, nagle wskazówka woltomierza wychyla się, rys. 7a. (Słyszeliśmy o podobnym doświadczeniu przeprowadzanym z maszyną elektrostatyczną. Absolutnie zakazane! Jeśli któreś z dzieci ma wadę serca, skończy się tragicznie.)

Z PEDów konstruujemy również sekwencyjne narracje. Działanie samochodu zasilanego wodorem (nie używamy tu naszego publicystycznego skrótu „samochód na wodę”, bo jedna z redakcji radiowych wzięła to na serio i koniecz-

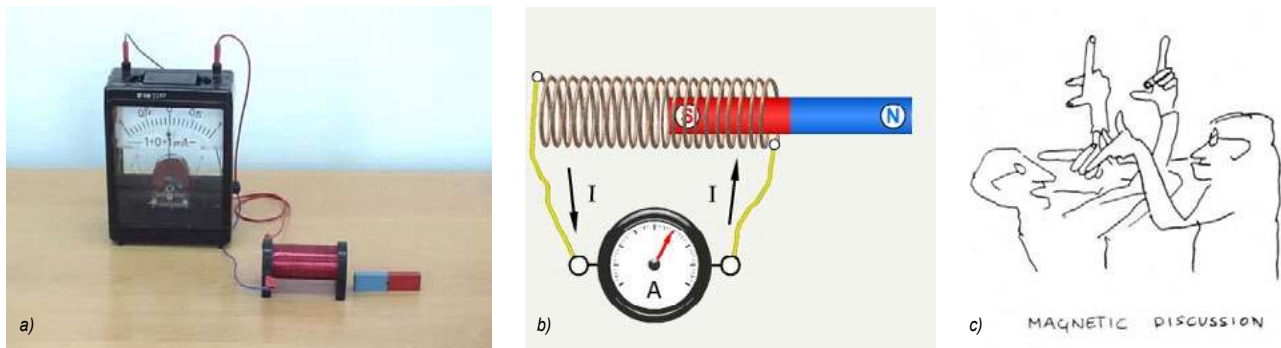
nie prosiła o receptę, jak wlać wodę do baku) wymaga pokazania poszczególnych elementów. Zaczynamy od działania różnego rodzaju ogniw fotowoltaicznych, rys. 8, poprzez elektrolizę wody (rys. 8b) aż do gotowego samochodu (ostatnio kupiliśmy taki, choć niezbyt dobrze działający w Czechach, w firmie „Horizon” – kilka mamy na stanie w Katedrze Dydaktyki Fizyki UMK, wysłamy gratis do pierwszych trzech szkół, które się do nas zgłoszą).

Jak wspomnieliśmy, konstruktywizm liczy już sto lat. Był wielokrotnie postulowany w dydaktyce, ale nie znalazł jeszcze szerokiej implementacji. Co więcej, rodzi się obawa, że „zawodowi” dydaktycy fizyki nie dostatecznie zgłębili zagadnienia psychologii i pedagogiki. A pisał o tym w koncepcji PCK (Pedagogical Contents Knowledge) Lee Shulman, prawie 40 lat temu [10]. Zwraca on uwagę na znaczenie wiedzy pedagogicznej w kontekście nauczania. Koncepcja PCK odnosi się do umiejętności nauczycieli w łączeniu wiedzy przedmiotowej z umiejętnościami pedagogicznymi, co pozwala im skutecznie przekazywać wiedzę uczniom. Shulman podkreśla, że nauczyciele powinni nie tylko znać swój przedmiot, ale także rozumieć, jak najlepiej go uczyć, dostosowując metody do potrzeb uczniów. Jego prace miały ogromny wpływ na rozwój teorii edukacyjnych i praktyk nauczycielskich, a koncepcja PCK pozostaje aktualna w dzisiejszym dyskursie na temat edukacji.

Konstruktywizm wchodzi do praktyki nauczania bardzo powoli, a jeszcze wolniej do oficjalnych zaleceń dydaktycznych. Już kilkanaście lat temu Unia Europejska wprowadziła hasło „inquiry-based teaching”, czyli nauczanie oparte na zadawaniu pytań. W kontekście dydaktyki fizyki często mówi się o metodzie „SPES”, która obejmuje cztery etapy: sytuacja, przewidywanie, eksperyment i synteza. Na rysunku 9 poddajemy krytyce to podejście. Przykładowo, jeśli na stole umieścimy sztabkowy



Rys. 8. Samochód zasilany wodorem: wymogi obrazowości, sekwencyjności oraz kompletności narracji na lekcji konstruktywistycznej. (a) Jak działa ogniwo fotowoltaiczne (SP Dąbrowa Biskupia, 2019, KW). (b) Praca w grupie: jak działa ogniwo Volty (na przykładzie dwóch elektrod i cytryny). (c) Różne przykłady ogniw fotowoltaicznych, a w głębi samochodzik zasilany wodorem (X LO Gdynia, 2019, AK).



Rys. 9. Pozorne nauczanie konstruktywistyczne, a w rzeczywistości zbyt szczegółowe i niepotrzebne dla zrozumienia zjawiska (projekt EU MOSEM). (a) Co się stanie, jeśli włożymy magnes do zwojnicy: odpowiedź jest oczywista: wskazówka się wychyli. (b) W którą stronę się wychyli? Jest to absolutnie dydaktycznie niepotrzebne, jak to pokazuje rysunek (c) znakomitego fizyka jądrowego Bruna Touschka, źródło: Il Saggiatore.

magnes, zwojnicę, miernik prądu oraz dwa przewody, to oczywiste jest, że przewodami należy połączyć amperomierz (lub woltomierz) z cewką, a magnes wsunąć do tej ostatniej. W tym przypadku pytanie staje się jednocześnie odpowiedzią. Warto jednak zauważyć, że Michael Faraday nie miał takiego ułatwienia, gdy odkrywał prawo indukcji elektromagnetycznej.

### Konstruktywizm XXI wieku

Uczenie się przez stawianie pytań nie wystarcza w dzisiejszych czasach, kiedy mamy do czynienia z bogactwem obrazów i wyjaśnień dostępnych w Internecie. Zarówno YouTube jak media społecznościowe stają się powszechnie dostępnym środkiem nauczania. Mimo sporego nasycenia, innowacyjne materiały dydaktyczne, respektujące zasady konstruktywistycznego budowania wiedzy – obrazowego, używające prostego języka a przede wszystkim postępujące krok po kroku, bez trudu zdobywają internetowych słuchaczy.

Współczesny nauczyciel ma do dyspozycji wystarczająco dużo różnych platform, aby móc różnicować poziom merytoryczny, formy przedstawienia, poziom asysty i kontroli w przekazie dydaktycznym. Sieć społecznościowa staje się miejscem nie-bezpośredniego spotkania

uczniów i nauczycieli; informacje są przekazywane w nowoczesnym „języku” i mogą być wzbogacone o najnowsze wiadomości naukowe. Jednak pomimo tego, że portal społecznościowy jest formatem „swobodnym”, i tam też należy przestrzegać zasad konstruktywizmu.

Ponowne przeczytanie tekstu przed publikacją informacji, przydatność związana z tematem, zwięzłość i interesująca forma mogą pomóc uczniowi wyczuć nastroj i zidentyfikować interesujące go informacje. Na przekaz składają się różne elementy: słowo, schemat, didaskalia, obiekty doświadczalne, rys. 10. Wymogiem podstawowym jest przede wszystkim zrozumiałość tego przekazu. Nauczyciel powinien starać się pisać prostym zrozumiałym językiem, unikać suchych zwrotów i wyrażeń naukowych. Studentów przyciąga przede wszystkim szczerość, przystępność i łatwość korzystania z nowoczesnych treści. Liczba słuchaczy, nawet w stosunkowo niezbyt ludnościowo dużym kraju, jakim jest Kazachstan, sięga dziesiątków tysięcy [11].

Metoda konstruktywistyczna w sieci społecznościowej polega na tym, że przedstawiane informacje są zrozumiałe, użyteczne, interesujące, nawet w wideo bez głosu. Uczniowie samodzielnie budują wiedzę w swoich umysłach, kiedy jest to dla nich wygodne: gdy siedzą wygodnie



Rys. 10. Lekcja internetowa (ZhA): powstawanie obrazu w soczewce skupiającej. Lekcja została nagrana jako 8-sekundowy film. Liczba wyświetleń 9600, liczba polubień 184, liczba kopii 66, 21 komentarzy. (b) Szkolna lekcja w temacie magnetyzmu, umieszczona jako klip w Internecie. Ten format istotnie zwiększa zainteresowanie uczniów. (c) Konstruktywistyczna, internetowa lekcja przygotowania do matury z matematyki (KG). Aby osiągnąć sukces, wykładowca musi być nie tylko sympatyczny, ale przede wszystkim przyjazny dla ucznia.

w domowym fotelu, a nie w szkolnej ławce oraz w nocy, gdy muszą pilnie przygotować się do jutrzejszej lekcji i szukają treści związanych z fizyką: o dziwo! wtedy ich umysły są najbardziej chłonne. W sieciach społecznościowych nieśmiało dzieci zachowują się naturalnie. W komentarzach znajdujemy stwierdzenia – „to, czego nie pojmowałem w szkole, zrozumiałem w jednym krótkim filmiku.”

W poprzednim tekście krytykowaliśmy zbytnią szczegółowość egzaminów maturalnych z matematyki. I to metoda internetowego konstruktoryzmu może być istotną pomocą dla abiturienta. Nasze (KG) konstruktorystyczne lekcje z matematyki na poziomie maturalnym (a jest ich ponad 200), na Instagramie, Facebooku, TikToku [12] mają od tysiąca do 38 tysięcy wyświetleń. Również w internetowej dydaktyce matematyki wymogiem jest przede wszystkim zwięzłość i prostota. Umieszczanie alternatywnych, choć zawsze krótkich filmików, pozwala uczniowi przećwiczyć różne aspekty tego samego zagadnienia. Istotne są też testy sprawdzające poziom przyswojenia materiału. Krótka forma pozwala też na szybkie przygotowanie nowych materiałów, w miarę zmian podstawy programowej i wymagań komisji egzaminacyjnych.

Tak pisze inżynier informatyki, Klaudia Gackowska: „Jednym z moich dziecięcych marzeń było zostać nauczycielką. Teraz realizuję swoją pasję, pracując jako korepetytor-mentor. Cieszę się, że mogę przekazywać wiedzę z matematyki w przystępny sposób i niezmiennie cieszę mnie informacjami od uczniów, którzy dzięki mnie zaczynają rozumieć, o co w tej matematyce chodzi. W odpowiedzi na rosnące oczekiwania uczniów oraz zmieniające się wymagania egzaminacyjne, prowadzę także grupowy kurs przy-

gotowujący do matury z matematyki. Chciałbym zbudować społeczność przyjazną uczniom, pełną inspirujących materiałów przygotowujących nie tylko do matury z matematyki.” Słowem kluczowym jest „budowanie społeczności”.

## Dydaktyka kognitywistyczna

Wybitny polski pedagog, Zbigniew Pietrański zauważył w 1975 roku, że „myślenie jest warunkiem uczenia się, ale też jego najważniejszym wynikiem” [13]. To stwierdzenie jest nadal aktualne i podkreśla znaczenie aktywnego zaangażowania ucznia w proces nauczania. Myślę, po łacinie *cogito*, jest kluczowe w kontekście kognitywizmu. Ale o kognitywizmie następnym razem.

- [1] G. Karwasz, K. Wyborska, „Dydaktyka dydaktyczna”, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, 3/2024, 26-29.
- [2] J. A. Komeński, „Wielka Dydaktyka”, przekład Henryk Wornic, Przegład Pedagogiczny, Warszawa 1883 <http://pbc.up.krakow.pl/dlibra, str. 102>.
- [3] K. Cherry, „Piaget’s 4 Stages of Cognitive Development Explained”, maj 2024, Dotdash Media <https://www.verywellmind.com/piagets-stages-of-cognitive-development-2795457>
- [4] G. Karwasz, K. Wyborska, „Ciecze”, *Fizyka w Szkole*, 2/2020.
- [5] G. Karwasz, M. Kłosiński, „Fiat Lux” – od Witelona do tomografu optycznego, *Fizyka w Szkole* 3/2023, 18-24.
- [6] E. K. Andreson, „Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter”, *Nature*, 27/09/2023, <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06527-1>.
- [7] G. Karwasz, M. Sadowska, K. Rochowicz, „Toruński po-ręcznik do fizyki. Gimnazjum I klasa. Mechanika ...”, Wydawnictwo Naukowe UMK, 2010.
- [8] G. Karwasz, K. Gołębski, W. Peeters, „Mikser z magneśsem (na deser)”, *Foton* 104, Wiosna. 2009, 54.
- [9] G. Karwasz i in. „Fizyka zabawek”, dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1 [https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa\\_strona/?q=Energy\\_Films](https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=Energy_Films)
- [10] L. Shulman, „Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching”, *Educational Researcher*, Vol. 15, No. 2 (Feb., 1986), pp. 4-14.
- [11] Zh. Akimkhanova, Instagram, [www.mdpi.com/2227-7102/13/4/393](http://www.mdpi.com/2227-7102/13/4/393).
- [12] K. Gackowska, „Nie daj się zaskoczyć”, Internetowy kurs przygotowawczy do matury, <https://matematyka-matura.pl/>
- [13] Z. Pietrański, „Sztuka uczenia się”, Wiedza Powszechna, Warszawa 1975.

## Wirtualni influencerzy bardziej autentyczni niż realni?

Wirtualni influencerzy to fikcyjne, wygenerowane postacie, które naśladują wygląd i zachowanie prawdziwych ludzi. Mają miliony followersów. Przez pokolenie Alfa (urodzone w od 2010 r.) są postrzegani nawet jako bardziej autentyczni niż ci realni, co rodzi wiele wyzwań – podkreśla dr Ada Florentyna Pawlak.

Jak podała, aż 25 proc. dziewcząt w grupie wiekowej 18-24 lat śledzi wirtualnych influencerów. Z kolei w grupie 55+ większość nawet nie wie o istnieniu takiego zjawiska.

**Wirtualni influencerzy** zostali stworzeni z reguły w celach marketingowych – mają zarabiać. Nie można jednak zapomnieć o ich innych – bardziej lub mniej – ukrytych celach, np. politycznych czy społecznych. Pełnią przecież opiniotwórcze funkcje – jak wskazuje sama nazwa „influencer” (z ang. influence to wpływ).

Pierwszy wirtualny influencer powstał w 2016 roku i była nim Lil Miquela. Ona – i inne takie postacie – „prowadzą” konta w różnych serwisach społecznościowych, „nagrywają” swoje płyty, których można słuchać w popularnych platformach, a także „biorą udział” w reklamach prawdziwych marek czy promocji miejsc. Za tymi działaniami stoi sztab ludzi – od programistów, przez grafików, aż po storytellerów.

*„Dzięki rozwojowi generatywnej sztucznej inteligencji coraz częściej wchodzimy w interakcje z postaciami o niejasnym statusie ontologicznym. Przecież dla wielu osób wirtualne postaci są żywe, mimo braku biologicznego ciała: istnieją w jakimś świecie, są aktywne, zarabiają pieniądze, wchodzi w interakcje, mogą odpowiadać na pytania. To stwarza więc emocjonalną, która wystarczy, by na mnie wpływać” – powiedziała naukowczyni.*

Zgodnie z założeniem, wirtualni influencerzy mają być niedoskonali tak jak ludzie. „Mają wszystkie cielesne atrybuty, których ludzie influencerzy starają się unikać: piegi, rozmazany makijaż, odstające rano włosy, pot na czole. Do tego nigdzie nie ukrywają, że są cyfrowymi postaciami. To sprawia, że przez pokolenie Alfa są postrzegani za autentycznych – nawet bardziej niż ci realni influencerzy, którzy często używają różnego typu narzędzi do poprawy swojego wyglądu i do dążenia do ideału” – opowiadała.

Jednocześnie dodała, że tu zaczyna się głębszy problem. „Autentyczność zostaje oderwana od tego, czy coś jest prawdziwe, czy nie. Okazuje się, że można ją przypisać czemuś, co nie istnieje. Wciąż mamy podział na fikcję i rzeczywistość, bo podział na offline-online dawno upadł. Teraz zaciera się już również podział na to, co żywe i martwe” – wskazała.

PAP – Nauka w Polsce

# Czy koło Maxwella może być w stanie nieważkości?

Powszechna dostępność wag elektronicznych pozwala wykorzystać znany od dawna przyrząd, którym jest koło Maxwella do przeprowadzenia innych doświadczeń, ilustrujących stany nieważkości i przeciążenia. Opisy tych doświadczeń i wyjaśnienie obserwowanych efektów są tematem niniejszego artykułu.

Stanisław Bednarek

Koło Maxwella jest bardzo prostym przyrządem fizycznym, a jego nazwa pochodzi od nazwiska angielskiego fizyka Jamesa Clarka Maxwella znanego przede wszystkim, jako autora równań, stanowiących podstawę nauki o elektryczności i magnetyzmie. Budowa tego przyrządu, którego działanie wzbudza wśród oglądających duże zdziwienie jest pokazana na rys. 1.

Koło Maxwella składa się z osi, mającej na końcach po jednym przelotowym otworze, skierowanym wzdłuż średnicy jego osi [1]. Przez każdy z tych otworów został przełożony i przywiązany dolny koniec pionowej nici. Górne końce obu nici są przywiązane do poziomego pręta, co pozwala na zwieszenie koła Maxwella, tak żeby jego oś była pozioma. Pręt może tworzyć górną część prostokątnej ramki złożonej jeszcze z dwóch wsporników, których dolne końce są połączone z podstawą, albo być mocowany wprost do statywu. Na osi jest osadzone metalowe koło, składające się ze szprych i dość ciężkiej obręczy. Przez to większa część masy tego koła jest skupiona na jego obwodzie i ma ono duży moment bezwładności.

Dla uproszczenia, w dalszych częściach tego artykułu koło Maxwella będzie nazywane najczęściej kołem, albo przyrządem. Dla uzupełnienia należy dodać, że koło Maxwella bywa też nazywane wahadłem Maxwella, zwłaszcza w literaturze angielskojęzycznej.

## Tradycyjne zastosowanie koła

Opisany przyrząd jest zwykle używany do doświadczeń, pokazujących zachowanie energii na przykładzie zamiany energii potencjalnej ciężkości na energię kinetyczną ruchu obrotowego i postępowego. W tym celu nici nawijają się ręcznie na oś, układając kolejne zwoje równo obok siebie. Przez to koło jest podnoszone ku górze i uzyskuje energię potencjalną ciężkości. Następnie koło przytrzymuje się ręką nieruchomo, zachowując pionowy kierunek nici i puszcza swobodnie.



Fot. 1. Jedno z kół Maxwella używane do doświadczeń ustawione na elektronicznej wadze kuchennej.

Żeby nie wprowadzić przypadkowego zaburzenia na początku ruchu wskazane jest przywiązanie osi dodatkową nicią do pręta i jej przepalenie w celu rozpoczęcia ruchu koła. Skutkiem tego nici odwijają się z osi i koło porusza w dół, najpierw powoli, a potem coraz szybciej, ruchem złożonym, tzn. wykonuje jednocześnie dwa ruchy – obrotowy i postępowy.

Gdy nici odwiną się całkowicie, koło osiąga najniższe położenie oraz maksymalną prędkość i maksymalną energię kinetyczną, a ponadto nadal obraca się w tym samym kierunku. Ograniczona długość nici uniemożliwia dalszy ruch koła w dół i przez to środek koła zatacza półokrąg o małym promieniu, równym promieniowi jego osi. Dzięki temu zachodzi zmiana zwrotu wektora prędkości liniowej koła na przeciwny. W ten sposób koło zaczyna poruszać się ku górze.

Co ciekawe, wartość prędkości liniowej nie ulega przy tym zmianie i energia kinetyczna koła jest zachowana. Jest to możliwe dlatego, że w czasie zmiany zwrotu wektora prędkości na koło działa siła odśrodkowa, która, jest prostopadła do kierunku prędkości i nie wykonuje pracy. Po wzniesieniu prawie na początkową wysokość koło zatrzymuje się i cykl opisanych ruchów zostaje powtórzony.

Oczywiście, ruch koła ustaje po pewnym czasie w wyniku oporów związanych z lepkością powietrza i nawijaniem nici na oś. Nie mniej, koło o dużym momencie bezwładności może wykonać nawet kilkanaście cykli opadania i wznoszenia [2]. Takie działanie koła robi na uczniach duże wrażenie, szczególnie gdy widzą to po raz pierwszy.

## Koło w nowej roli

Okazuje się, że koło można w prosty sposób wykorzystać do przeprowadzenia jeszcze jednego, interesującego doświadczenia, które pozwala łatwo pokazać i wyjaśnić zmiany ciężaru ciała podczas jego ruchu przyspieszonego, albo opóźnionego w kierunku pionowym. Do tego oprócz koła będzie potrzebna elektroniczna waga kuchenna, albo jeden lub dwa czułe siłomierze o zakresie pomiarowym, pozwalającym zmierzyć ciężar zastosowanego koła. Użyteczne też będą: plastikowy wieszak do ubrań, statyw z poziomym prętem i łącznikiem oraz cienkie nici i zapalki.

Dokładność wag kuchennych wynosi zwykle 1 g, a ich zakres 0-2000 g lub 0-5000 g. Lepsza, niż waga kuchenna byłaby waga laboratoryjna o takim samym zakresie i większej dokładności, np. 0,1 g, ale dostęp do takiej wagi jest trudniejszy. Waga zostanie wykorzystana do doświadczeń z kołem zawieszonym na ramce lub statywie (rys. 1). Wtedy zmiana ciężaru poruszającego się koła będzie uwidoczniona przez zmianę masy wskazywaną w gramach na wyświetlaczu wagi. Tę zmianę można przeliczyć na kilogramy, a następnie na niutony, mnożąc wynik w kilogramach przez wartość przyspieszenia ziemskiego.

Zamiast elektronicznej wagi kuchennej do doświadczenia można wykorzystać też tradycyjną wagę dzwigniową z dwiema szalkami. Wtedy koło zostaje zawieszone po

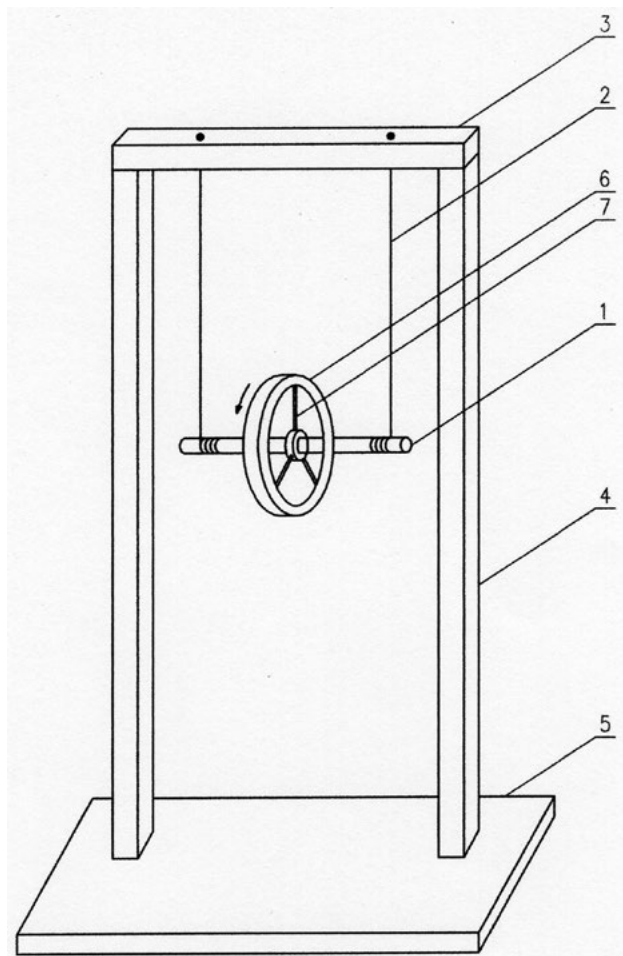
jednej stronie dźwigni, a po drugiej zawieszają się ciężarek o takiej masie, żeby zrównoważył koło [3].

W celu wykonania doświadczenia koło należy ponieść do góry, nawijając obie nici na oś. Poszczególne zwoje nici powinny być ułożone równo jeden obok drugiego. Żeby uruchomić koło bez zaburzenia wskazań wagi, oś poniesionego koła trzeba przywiązać w pozycji poziomej nicią do pręta.

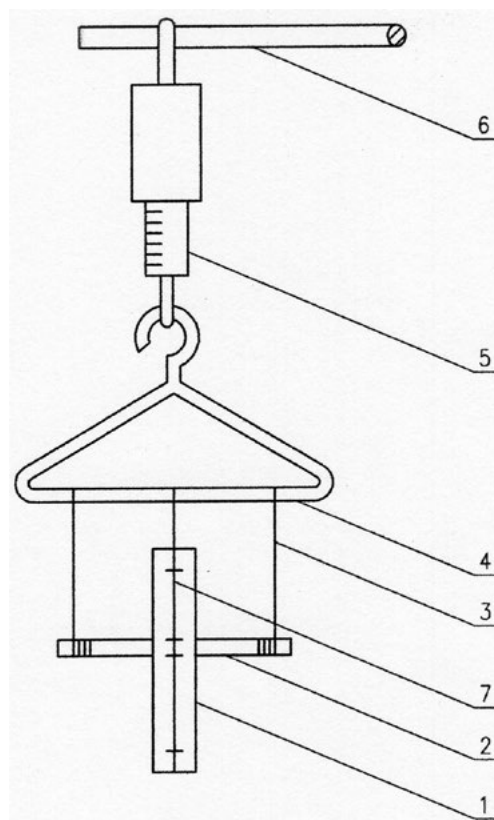
Kolejną czynność to włączenie wagi i sprawdzenie prawidłowości jej wskazań, które przy pustej szalce powinny wynosić 0 g. Następnie na wadze zostaje ustawione koło i odczytana jego masa. Przykład jednego z wykorzystanych kół przedstawia fot. 1. Po tym nic użyta do przywiązania osi przepala się zapalką, powodując opadanie koła i obserwuje wskazania wagi.

Podczas ruchu koła w dół waga wskazuje mniejszą masę, a podczas jego ruchu do góry – większą. Zmiany wskazań zależą od takich parametrów jak: wymiary i masa koła, jej rozkład przestrzenny oraz długość nici, rozwijających się podczas ruchu koła. W przeprowadzonych doświadczeniach te zmiany wynosiły od kilku do kilkudziesięciu gramów.

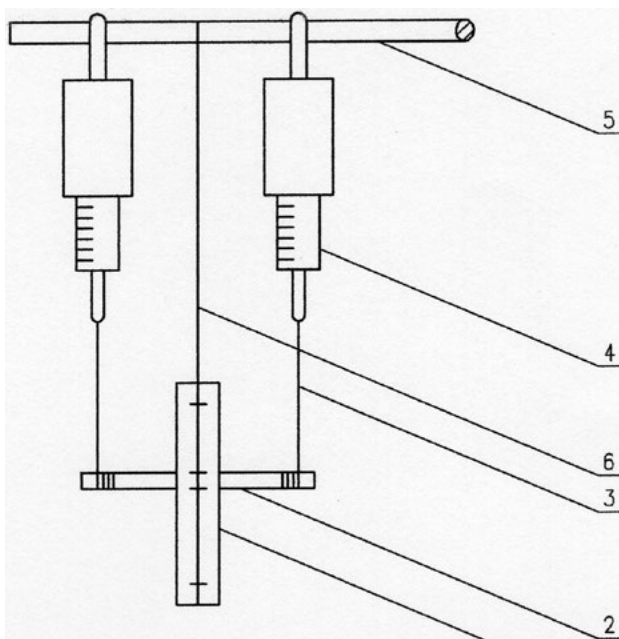
Podobne doświadczenia daje się przeprowadzić z kołem zawieszonym na jednym, albo na dwóch siłomierzach. Mając do dyspozycji tylko jeden siłomierz i koło bez ramki można zbudować układ doświadczalny, pokazany na rys. 2. Górne końce nici koła są wtedy przywiązane bezpośrednio do dolnej poprzeczki wieszaka do ubrań,



Rys. 1. Budowa koła Maxwella; 1 – oś, 2 – nić koła, 3 – pręt koła, 4 – wspornik, 5 – podstawa, 6 – obręcz 7 – szprycha.



Rys. 2. Sposób zawieszenia koła na jednym siłomierzu; 1 – obręcz, 2 – oś, 3 – nić, 4 – wieszak do ubrań, 5 – siłomierz, 6 – pręt połączony ze statywem, 7 – nić do przepalenia.



Rys. 3. Sposób zawieszenia koła na dwóch siłomierzach; 1 – obręcz, 2 – oś, 3 – nić, 4 – pręt, 5 – siłomierz 6 – pręt połączony ze statywem, 6 – nić do przepalenia.

który z kolei jest podwieszony za pomocą siłomierza pod poziomym prętem zamocowanym do statywu. Oś koła powinna znajdować się w pozycji poziomej.

Wykonanie doświadczenia jest podobne, jak poprzednio z tą różnicą, że odczyty ciężaru koła spoczywającego oraz poruszającego się w górę, albo w dół są wykonywane na siłomierzu. Wariant doświadczenia z dwoma siłomierzami jest przedstawiony na rys. 3. W tym przypadku górne końce nici koła są przywiązane do dolnych zaczepek siłomierzy, a ich górne zaczepy są zawieszone na pręcie przymocowanym poziomo do statywu.

Wykonane doświadczenia skłaniają do postawienia pytania, dlaczego waga lub siłomierze wskazują zmiany ciężaru koła? Żeby odpowiedzieć na to pytanie należy zastosować drugą zasadę dynamiki dla ruchu obrotowego bryły sztywnej, rozwiązać równania ruchu i wyznaczyć siły naprężenia nici podczas opadania i wznoszenia koła.

### Dlaczego tak się dzieje?

Siły działające na koło w czasie opadania są pokazane na rys. 4. Wykorzystując drugą zasadę dynamiki, twierdzenie Steinera i podstawowe zależności z kinematyki, można zapisać następujące równania:

$$\varepsilon = \frac{M}{I} \quad (1)$$

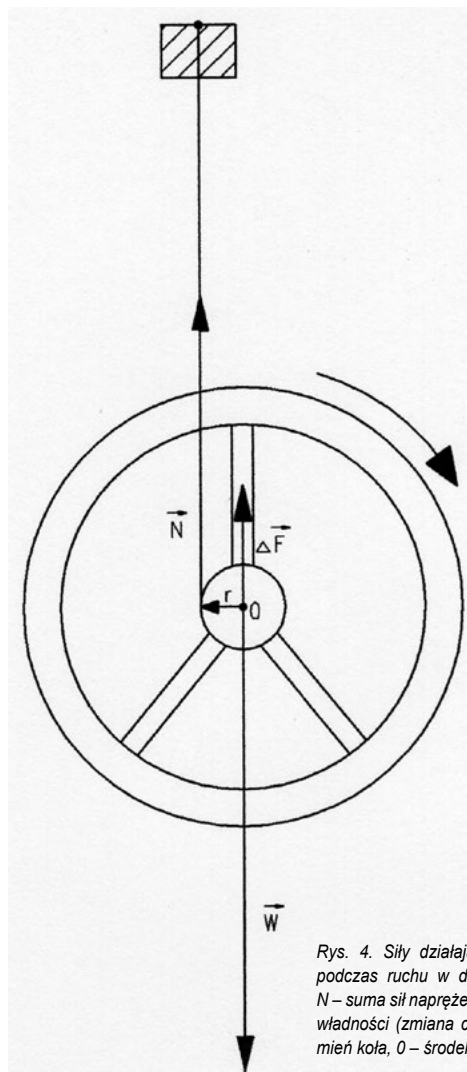
$$M = Wr \quad (2)$$

$$W = mg \quad (3)$$

$$I = I_0 + mr^2 \quad (4)$$

$$a = \varepsilon r \quad (5)$$

w których:  $\varepsilon$ ,  $a$  – przyspieszenia koła odpowiednio kąto- we i liniowe,  $M$  – moment ciężaru koła,  $I$ ,  $I_0$  – momenty bezwładności koła odpowiednio względem chwilowego

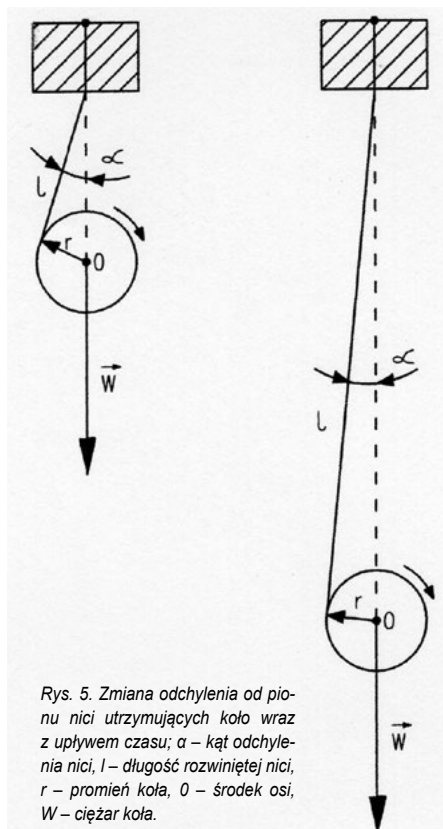


Rys. 4. Siły działające w układzie koła podczas ruchu w dół;  $W$  – ciężar koła,  $N$  – suma sił naprężenia nici,  $\Delta F$  – siła bezwładności (zmiana ciężaru koła),  $r$  – promień koła,  $0$  – środek osi.

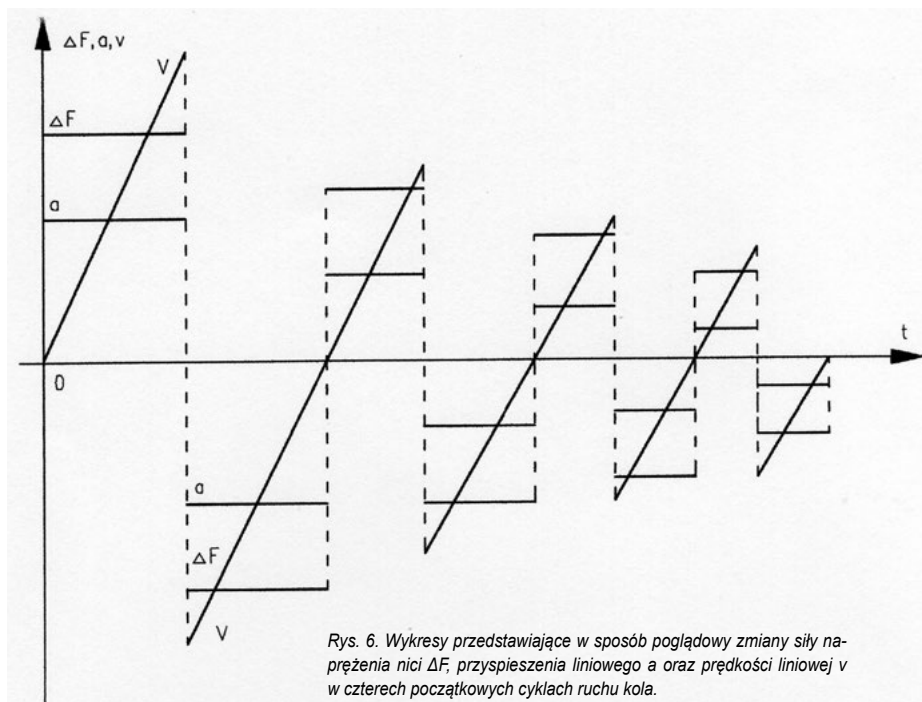
środka obrotu i względem osi symetrii,  $W$  – ciężar koła,  $m$  – jego masa,  $r$  – promień osi koła,  $g$  – przyspieszenie ziemskie ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ). Wzór (1) wyraża drugą zasadę dynamiki dla ruchu obrotowego, natomiast wzór (4) to twierdzenie Steinera, pozwalające obliczyć moment bezwładności bryły sztywnej  $I$  względem dowolnej osi równoległej do osi symetrii, dla której moment bezwładności jest znany i wynosi  $I_0$  [4].

Pisząc równania (1-5) dokonano uproszczenia, polegającego na założeniu, że nici, na których jest zwieszono koło mają przez cały czas ruchu kierunek pionowy. W dokładnym opisie należałoby uwzględnić, że kierunek ten jest nieco odchylony od pionu o kąt  $\alpha$  i zmienia się podczas ruchu (rys. 5). Dlatego w równaniu (2) ciężar  $W$  powinien być pomnożony przez funkcję kosinus kąta  $\alpha$  zależnego od długości odwinętej nici ponad osią  $l$ , która z kolei zależy od czasu ruchu i od promienia osi koła  $r$ . Doprowadziłoby to do układu skomplikowanych równań różniczkowych, możliwych do rozwiązania jedynie metodami numerycznymi.

W praktyce promień osi koła  $r$  ma małą wartość i dlatego można zastosować przyjęte przybliżenie. Ponadto, kąt odchylenia  $\alpha$  maleje wraz ze wzrostem długości  $l$ . Odchylenie nici od pionu ma jednak wpływ na ruch koła i powoduje dające się zauważyć po kilku cyklach wznoszenia i opadania wahanie koła na boki. Warto o tym pamiętać, gdy docieklivy uczeń zapyta, dlaczego koło ulega „rozkołysaniu”?



Rys. 5. Zmiana odchylenia od pionu nici utrzymujących koło wraz z upływem czasu;  $\alpha$  – kąt odchylenia nici,  $l$  – długość rozwiniętej nici,  $r$  – promień koła,  $O$  – środek osi,  $W$  – ciężar koła.



Rys. 6. Wykresy przedstawiające w sposób poglądowy zmiany siły napięcia nici  $\Delta F$ , przyspieszenia liniowego  $a$  oraz prędkości liniowej  $v$  w czterech początkowych cyklach ruchu koła.

Po wykonaniu odpowiednich podstawień i elementarnych przekształceń ze wzorów (1-5) otrzymuje się następujący wzór na przyspieszenie liniowe koła

$$a = \frac{g}{1 + \frac{I_0}{mr^2}} \quad (6)$$

Ze wzoru (6) wynika, że układ odniesienia związany z kołem jest układem nienercjalnym, poruszającym się w dół z przyspieszeniem  $a$ . Dlatego w tym układzie działa siła bezwładności  $\Delta F$ , zwrócona pionowo do góry i stąd suma sił napięcia obu nici  $N$ , na których jest zwieszono koło wyraża się wzorem

$$N = m(g - a) \quad (7)$$

To oznacza, że suma sił napięcia nici  $N$  i ciężar całego koła umieszczonego na wadze odczytany na wyświetlaczu wagi uległ zmniejszeniu o  $\Delta F$

$$\Delta F = -ma \quad (8)$$

Oczywiście, gdyby koło było nieruchome, to  $a = 0$  i wtedy  $\Delta F = 0$ . Podstawiając  $a$  ze wzoru (6) do wzoru (8) otrzymuje się

$$\Delta F = -\frac{mg}{1 + \frac{I_0}{mr^2}} \quad (9)$$

Po powtórzeniu przeprowadzonych rozważań dla ruchu koła w górę łatwo dojść do wniosku, że wtedy waga wskazuje wzrost ciężaru o  $\Delta F$ . Opisana sytuacja jest podobna, jak w przypadku hamującej, albo rozpoczynającej ruch windy. Gdy winda hamuje, to wtedy pasażer odczuwa wzrost swojego ciężaru, natomiast gdy winda rozpoczyna ruch ku dołowi, wówczas pasażer stwierdza zmniejszenie własnego

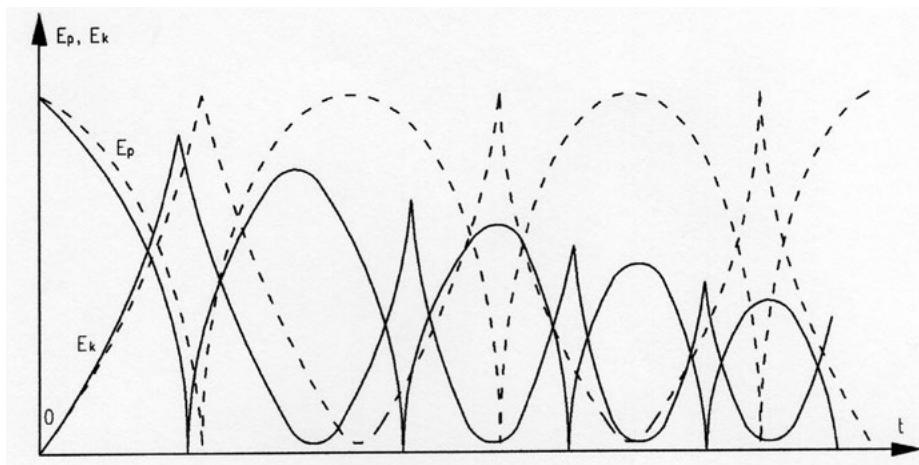
ciężaru. Podobna sytuacja występuje też podczas jazdy kolejką górską po wznoszącym i opadającym torze.

Ze wzorów (7) i (9) wynika jeszcze jeden ciekawy wniosek. Gdyby moment bezwładności koła względem jego osi symetrii spełniał warunek  $I_0 = 0$ , albo jego promień wynosiłby  $r = 0$ , to wtedy byłoby  $\Delta F = -mg$ . Zgodnie tym, ciężar koła byłby równy 0 i koło osiągnęłoby stan nieważkości. Żeby spełnić ten warunek cała masa koła musiałaby znajdować się na jego osi obrotu. Wtedy koło byłoby tzw. masą punktową, albo „linią materialną”, spadającą z przyspieszeniem ziemskim  $g$ , a jak wiadomo swobodnie spadające ciało jest w stanie nieważkości [4].

Dobrym ćwiczeniem uzupełniającym te rozważania jest samodzielne narysowanie przez uczniów wykresów, przedstawiających zależności od czasu: zmiany siły napięcia nici  $\Delta F$ , przyspieszenia  $a$  i prędkości liniowej  $v$  koła w kolejnych cyklach ruchu lub wykresów zmian jego energii potencjalnej  $E_p$  i kinetycznej  $E_k$ . Przykłady takich wykresów, obrazujących charakterystyczne cechy zmian wymienionych wielkości są pokazane na rys. 6 i 7.

Jak wspomniano wcześniej, większa część masy koła jest umieszczona na obwodzie i dzięki temu jego moment bezwładności jest duży, czyli  $I_0 \gg mr^2$ . Ten warunek umożliwia zadziwiająco powolny ruch koła z niewielkim przyspieszeniem, ale zgodnie ze wzorami (7) i (9) powoduje też ograniczenie wartości  $\Delta F$ .

Taka sytuacja ma swoją wadę i zaletę. Wada polega właśnie na ograniczeniu  $\Delta F$  i przez to doświadczenie jest mniej widowiskowe. W praktyce udaje się osiągnąć  $\Delta F$ , którym odpowiadają zmiany masy odczytane na wyświetlaczu wagi wynoszące od kilku do kilkunastu gramów. Zaletą jest umożliwienie obserwacji zmiany  $\Delta F$  przez dłuższy czas bez konieczności stosowania specjalnych



Rys. 7. Wykresy przedstawiające w sposób poglądowy zmiany energii potencjalnej  $E_p$  i energii kinetycznej  $E_k$  koła w kolejnych cyklach ruchu. Linie kreskowe odnoszą się do koła idealnego, poruszającego się bez oporów, natomiast linie ciągłe do koła rzeczywistego.

przyrządów pomiarowych o szybkim działaniu, albo do szybkiego zapisu obrazów.

Udzielając odpowiedzi na sformułowane w tytule pytanie należy wziąć pod uwagę wyniki przeprowadzonych doświadczeń oraz otrzymane wzory i stwierdzić, że koło może być jedynie w stanie ograniczonej nieważkości, albo niewielkiego przeciążenia. Ponadto, do doświadczeń wykazujących nieważkość lepsze jest koło o mniejszym momencie bezwładności, ale takie koło ma mniejszą energię kinetyczną ruchu obrotowego. Przez to opadanie oraz wznoszenie takiego koła potrwa krócej i doświadczenie będzie mniej widowiskowe.

### Inne sposoby na nieważkość

Warto jeszcze dodać, że jest znanych kilka doświadczeń możliwych do wykonania w warunkach szkolnych lub domowych, wykazujących stan nieważkości. Jedno z nich polega na przytrzymaniu za górny koniec sprężynki slinky, tak żeby była rozciągnięta pod działaniem własnego ciężaru, a następnie puszczeniu jej swobodnie [5]. W czasie spadania sprężynka jest w stanie nieważkości i jej rozciągnięcie znika. Podobna sytuacja ma miejsce w doświadczeniu ze spadającą butelką, zawierającą wodę i niewielką ilość powietrza [6]. Podczas spadania powietrze tworzy pęcherzyk w środku objętości wody.

Dokładna obserwacja tych efektów w sposób bezpośredni może być jednak utrudniona, ponieważ czasy spadania z dostępnych w praktyce wysokości są krótkie, np. z dziesiątego piętra czas swobodnego spadania wynosi ok. 2,4 s. Dodatkowym utrudnieniem przy zwiększeniu wysokości staje się wzrost odległości spadających przedmiotów od obserwatora. Dlatego jest konieczne sfilmowanie tych doświadczeń, np. telefonem komórkowym wyposażonym w szybką kamerę.

Można też przetestować inną wersję doświadczenia, pokazującego nieważkość podczas swobodnego spadku. Na szalce wagi elektronicznej należy ustawić pionowo długą, przezroczystą rurę z poprzeczką przymocowaną do jej górnego końca i skierowaną wzdłuż średnicy rury. Na tej poprzeczce jest zawieszona na nitce kulka, umieszczona wewnątrz rury. Rura może być zastąpiona przez ramkę lub statyw z poziomym prętem, na którym zostanie



Fot. 2. Przykład układu doświadczenia do wykazania stanu nieważkości spadającej kulki.

zawieszona kulka przywiązana do nitki (fot. 2). Zamiast kuli można wykorzystać nakrętkę lub niewielki ciężarek. Na szalce wagi należy położyć kawałek gąbki lub tzw. folii bąbelkowej, żeby zamortyzować uderzenie kulki i zabezpieczyć wagę przed ewentualnym uszkodzeniem. Po zważeniu rury lub ramki wraz kulką, nitka zostaje przepalona i kulka spada swobodnie, będąc w stanie nieważkości.

Podczas spadania wskazanie wagi powinno się zmniejszyć, a różnica wskazań być równa masie kulki. Jednak czas spadania w praktyce nie przekroczy kilku dziesiątych części sekundy i może okazać się za krótki, żeby niektóre wagi mogły to zarejestrować. Ponadto, wynik tego doświadczenia jest dość oczywisty, ponieważ kulka w czasie spadania nie jest w jakikolwiek sposób połączona z elementami wagi.

Tak więc, opisane doświadczenie z poruszającym się kołem Maxwella, ustawionym na wadze pozostaje dobrym sposobem na pokazanie stanu nieważkości i przeciążenia. Dawniej koła Maxwella były produkowane przez Fabrykę Pomocy Naukowych i znajdowały się prawie w każdej szkolnej pracowni fizycznej. Dziś w szkołach bywa z tym różnie. Koło Maxwella jest jednak tak prostym przyrządem, że bez większych problemów można je na kilka sposobów wykonać samodzielnie z przedmiotów i materiałów codziennego użytku.

Stanisław Bednarek,

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego

### LITERATURA

- [1] S. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, część I. mechanika i akustyka, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1972.
- [2] T. Dryński, Doświadczenia pokazowe z fizyki, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1964.
- [3] Maxwell's pendulum on a scale #experiment #physics #science #space #history, <https://www.youtube.com/shorts/3LTXCYwGojs>.
- [4] S. J. Ling, J. Sanny, W. Mobes et al., Fizyka dla szkół wyższych, tom 1, OpenStax Polska, Katalyst Education, Warszawa 2018, <https://openstax.org/details/books/fizyka-dla-szkol-wyzszych-polska>.
- [5] Zagadka – spadająca sprężyna, <https://www.youtube.com/watch?v=5jBB36wJ6hc>.
- [6] Nieważkość w spadającej butelce, liceum w Turku, <https://www.youtube.com/watch?v=Q5OmDP0scSE>.

# Monografia Grzegorza Koczana „Obrona Fizyki Arystotelesa”

## Ocena dydaktyka

Edward Rydygier

W monografii dr Grzegorza Koczana pt. „Obrona Fizyki Arystotelesa” została dokonana rekonstrukcja matematyczna zasad dynamiki Arystotelesa wzorowana na rekonstrukcji zasad dynamiki Newtona. Rekonstrukcja zasad dynamiki Arystotelesa jest interesująca dla fizyków dydaktyków, gdyż może zmienić ich ocenę dorobku starożytnych filozofów, a zwłaszcza ich osiągnięć w zakresie fizyki.

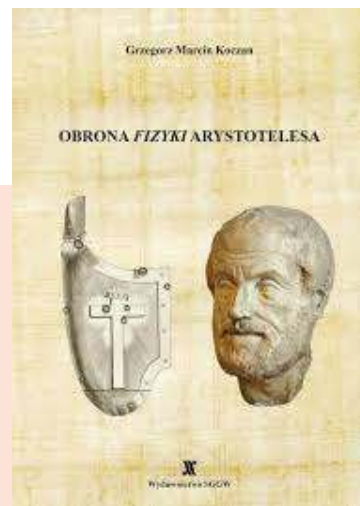
W nauczaniu fizyki w szkołach przyjęto stanowisko krytyczne wobec dorobku starożytnych filozofów (które ma odbicie w treści podręczników), według którego mylili się oni w objaśnianiu zjawisk fizycznych, a błędne poglądy Arystotelesa na zjawiska i procesy fizyczne zaważyły na rozwoju fizyki i astronomii na dwa tysiąclecia.

Takie stanowisko przykładowo prezentuje dr Anna Kaczorowska, dydaktyk fizyki, autorka podręczników szkolnych do fizyki, działaczka Sekcji Nauczycielskiej PTF. Twierdzi ona, że: „Wiele poglądów Arystotelesa na zjawiska i procesy fizyczne było po prostu błędnych. Błędy te zaważyły na rozwoju fizyki i astronomii na wiele stuleci. Trudno było je wykryć i pokonać z dwóch powodów: pierwszym był autorytet Arystotelesa, drugim to, że niektóre wyjaśnienia były zgodne z intuicją, a ta niekiedy nie ma nic wspólnego z nauką. Niektóre z tych błędów jesteśmy skłonni powtarzać do dziś” (por. Anna Kaczorowska, „Fizyka i Astronomia”. Podręcznik dla uczniów liceum ogólnokształcącego i liceum profilowanego. Zakres podstawowy, Wydawnictwo „ŻAK”, Wydawnictwo Edukacyjne Zofii Dobkowskiej, Warszawa 2002).

Natomiast autor monografii „Obrona Fizyki Arystotelesa” dowodzi, że rekonstrukcja matematyczna zasad dynamiki Arystotelesa koresponduje z zasadami dynamiki Newtona, które też uległy późniejszej rekonstrukcji, najpełniej przez XVIII-wiecznego szwajcarskiego matematyka Leonharda Eulera. Z tezami monografii dr Grzegorza Koczana zapoznałem się po raz pierwszy podczas Zjazdu Fizyków w Gdańsku w 2023 roku, gdzie na sesji plakatowej w grupie plakatów dydaktycznych zwróciłem uwagę na plakat Grzegorza Koczana z SGGW w Warszawie pt. „Rekonstrukcja matematyczna zasad dynamiki Arystotelesa wzorowana na rekonstrukcji zasad dynamiki Newtona”. Plakat Grzegorza Koczana wyróżniał się starannie opracowaną formą graficzną i przejrzystą prezentacją treści merytorycznych.

Plakat Grzegorza Koczana ze Zjazdu Fizyków w Gdańsku zapowiadał opublikowanie w 2023 roku przez Wydawnictwo SGGW recenzowanej monografii naukowej

**Grzegorz Marcin Koczan**  
**„Obrona Fizyki Arystotelesa.**  
**Matematycznie ujednolicona**  
**rekonstrukcja niesprzecznej**  
**z obserwacją dynamiki**  
**Arystotelesa”. Monografia.**  
Wydawnictwo SGGW,  
Warszawa 2023.  
Monografia dostępna w formie  
papierowej i w formacie PDF  
(e-book).



pt. „Obrona Fizyki Arystotelesa”. Tezy przedstawione na plakacie stanowiły interesujący przyczynek w dyskusji toczącej się w czasie obrad na kolejnych zjazdach fizyków nad uproszeniem w dydaktyce szkolnej przekazywanej wiedzy fizycznej, a zwłaszcza zapisów matematycznych, które dla pełnego zrozumienia użytego modelu matematycznego powinny być zapisywane w formalizmie rachunku różniczkowego i całkowego. Poza tym nie wspomina się w nauczaniu fizyki w szkole o późniejszych rekonstrukcjach matematycznych zasad fizyki historycznej przypisywanych znanym fizykom jako ich twórcom.

Dydaktycy, którzy reprezentują odmienne opinie na arystotelizm niż establishment metodyczno-dydaktyczny nie wdają się już w oficjalne dyskusje, najwyżej swoje poglądy przedstawiają w zwykle nierecenzowanych pracach wydanych w małej liczbie egzemplarzy. Zatem, aby uniknąć zakwalifikowania do krytyków oficjalnego trendu nauczania fizyki, autor monografii nadał swojej pracy charakter polemiczny, co znalazło także wyraz w samym tytule monografii, gdzie użyto słowa „obrona”.

Autor monografii przytoczył opinie zarówno zwolenników, jak i przeciwników arystotelizmu, w rezultacie praca stała się rozprawą z pogranicza fizyki i filozofii oraz historii nauki. Sam autor monografii przyznaje, że rekonstrukcja matematyczna dynamiki Arystotelesa była procesem długotrwałym, gdyż tematyką dynamiki Arystotelesa interesował się od czasów studenckich, ale dopiero zdobyte doświadczenie dydaktyczne jako nauczyciela szkolnego i akademickiego, a zwłaszcza kontakty z dydaktykami krytycznymi wobec stanowiska establishmentu metodycznego na dorobek filozofów starożytnych zawocowało opracowaniem recenzowanej monografii.

Należy podkreślić, że autor monografii podniósł na wokandę różne fenomeny teorii fizycznych, takie jak

geometryczno-kinematyczne modele Kopernika, zasady dynamiki Kartezjusza, formuły matematyczne wyrażających drugą zasadę dynamiki, odkrycie proporcjonalnego do prędkości oporu gazu doskonałego (opartego na rozkładzie Maxwella–Boltzmanna), reinterpretacja analizy równania Arystotelesa dokonanej przez amerykańskiego fizyka teoretyka i popularyzatora nauki prof. Leonarda Susskinda, która wykazała, że równanie to przedstawia poprawny opis silnie tłumionego oscylatora harmonicznego. Wyniki badań wyszczególnionych powyżej fenomenów miały wpływ na prace nad sformułowaniem rekonstrukcji matematycznej dynamiki Arystotelesa.

Autor monografii w przedmowie przytacza inspiracje, którymi kierował się w swoich badaniach, w tym książki popularnonaukowe ks. prof. Michała Hellera, przedstawiające jedno równanie rekonstrukcji dynamiki Arystotelesa, podczas gdy „Historia fizyki” prof. Andrzeja Kajetana Wróblewskiego wskazywała na inne równanie takiej rekonstrukcji. Ponowne zainteresowanie dorobkiem Arystotelesa nastąpiło w 2019 roku pod wpływem wykładu dr Kazimierza Turzynieckiego na ostatnich zajęciach Ogólnopolskiego Seminarium Dydaktyki Fizyki prowadzonego w Warszawie przez OW PTF i Wydział Fizyki UW.

Dr Turzyniecki wskazał poglądy Filoponosa, z których wynikało, że Arystoteles nie tylko rozpoznał opór ruchu, ale zaproponował proporcję ruchu zawierającą ten opór. Ta oryginalna teza nie spotkała się ze zrozumieniem ani w średniowieczu, ani w czasach współczesnych. Aby poprawnie uwzględnić opór ruchu w relacji matematycznej Arystotelesa należy ten opór zinterpretować jako wymiarowy współczynnik oporu. Podbudową do takiej interpretacji dynamiki Arystotelesa stały się dla autora monografii badania wymiarowego współczynnika tarcia toczonego przeprowadzone z Juliuszem Ziomkiem w roku akademickim 2017/2018.

Swoje przemyślenia zainspirowane wykładem dr Turzynieckiego autor monografii przedstawił w artykule do polskiego czasopisma z zakresu dydaktyki fizyki w roku akademickim 2020/2021, którego nieznacznie skorygowaną wersję zamieścił w repozytorium artykułów naukowych (preprint). Artykuł był recenzowany kolejno przez trzech recenzentów, lecz w rezultacie nie został zaakceptowany przez kolegium redakcyjne.

Opinie tych recenzentów autor monografii przytoczył w tekście swojej pracy nazywając ich autorów „adwersarzami”. Jednym z wymogów dopuszczenia ww. artykułu do publikacji było żądanie usunięcia przytoczonych jako ilustracja dwóch slajdów z wykładu dr Turzynieckiego. Ponieważ wykład dr Turzynieckiego stanowił główne źródło inspiracji badań, których wyniki dr Koczan zamieścił w artykule, więc nie mógł z nich zrezygnować.

Autor monografii przedstawiając polemikę między krytykami i zwolennikami poglądów Arystotelesa przytoczył jako akt oskarżenia krytyczne względem Arystotelesa prace naukowe, a w roli oskarżycieli wystąpili autorzy tych prac. Powołani są również świadkowie obrony, którymi są inni autorzy będący stronnikami poglądów Arystotelesa. Przytoczona polemika zarówno historyczna, jak i współczesna bardzo wzbogaca monografię i rozszerza tematykę

działa poza tylko matematyczną rekonstrukcję zasad dynamiki Arystotelesa. W konsekwencji monografia opiera się na stu siedemdziesięciu ośmiu pozycjach źródłowych.

Przytoczenie wyników badań nad ciekawymi fenomenami z teorii fizyki, które wpłynęły na ukierunkowanie studiów nad dynamiką Arystotelesa nadaje pracy charakter autorskiej kroniki naukowych dociekań składających się na życiowy dorobek naukowy. Należy podkreślić, że autor monografii jest otwartym badaczem rzeczywistości i oczekuje szerokiego zainteresowania środowiska naukowego swoimi badaniami i przemyśleniami. Często zamieszcza swoje nierecenzowane jeszcze artykuły w internetowych repozytoriach naukowych (arXiv, ResearchGate) w formie preprintów, a także prezentuje wyniki swoich badań na kolejnych zjazdach fizyków.

Monografia złożona jest z sześciu rozdziałów, nie licząc przedmowy i wstępu oraz końcowego podsumowania i wniosków wraz z dodatkiem. W dwóch pierwszych rozdziałach przedstawiona jest idea rekonstrukcji zasad dynamiki Arystotelesa i szczegółowa dyskusja poprawności fizycznej zrekonstruowanej dynamiki Arystotelesa. W rozdziale trzecim dokonano przeglądu źródeł pod kątem ich związków ze zrekonstruowanymi zasadami dynamiki Arystotelesa. W rozdziale czwartym skonfrontowano spuściznę Arystotelesa z obliczem przewrotu kopernikańskiego. Najdłuższy jest rozdział piąty, w którym są cytowani krytycy i obrońcy Arystotelesa, a także przytoczono opinie obalające konkretną krytykę. Najbardziej zaawansowany matematycznie i fizykalnie jest rozdział szósty, w którym znajduje się wprowadzenie kinetyczne siły oporu w gazie doskonałym.

Na końcu monografii w aneksie przytoczone są fizykalne doświadczenia i obserwacje Arystotelesa, co dowodzi, że nie był on tylko filozofem czy myślicielem, ale też fizykiem doświadczalnym. Poza tym załączony jest obszerny indeks osobowy i rzeczowy, a także wykaz źródeł.

Na okładce książki przytoczono fragmenty recenzji monografii. Prof. dr hab. Marcin Karas z Instytutu Filozofii UJ napisał tak: „Publikacja przyczyni się nie tylko do pogłębienia poważnej debaty w nauce, ale też powinna dość znacząco zmienić dotychczasowe ujęcia dynamiki Arystotelesa, które pomijały istotny element refleksji nad trwałym wkładem greckiego uczonego w rozwój nauk ścisłych – rekonstrukcję jego teorii i zasad z wykorzystaniem aktualnej matematyki i eksperymentów z zakresu fizyki współczesnej”. Natomiast drugi recenzent prof. dr hab. Arkadiusz Jadczyk, prof. em. Wydziału Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Wrocławskiego napisał tak: „Monografia nosi wszelkie znamiona oryginalnego i głębokiego opracowania podejmującego ważny, acz kontrowersyjny temat. Rozdział 6 tej monografii wartu jest publikacji w czasopiśmie specjalistycznych o zasięgu międzynarodowym, w których z pewnością znajdzie należyty oddźwięk”.

Warto przypomnieć, że w środowisku polskich dydaktyków pojawiały się wcześniej próby rekonstrukcji zasad dynamiki Arystotelesa, ale nie miały one tak szerokiego i podbudowanego oryginalnymi badaniami charakteru jak te prowadzone przez autora monografii. Oprócz przytoczonych w monografii badań dr Turzynieckiego, należy

także wspomnieć o badaniach dr Janusza Kępki (zmarłego 7.04.2011 r.), które są przedstawione w jego autorskim podręczniku pt. „Ruch absolutny i względny” (por. Janusz B. Kępka, Edytor Janusz B. Kępka, Warszawa 2007, wydanie trzecie, poprawione i uzupełnione).

Dr Kępka przyjął, że Arystoteles rozważał ruch jednostajny, dla którego prędkość ma wartość stałą, a siła jest funkcją prędkości w czasie. W uzyskanych zależnościach pęd jest parametrem. Z rozważań Arystotelesa dr Kępka wyprowadził też wzór na energię całkowitą ciała materialnego jako iloczyn masy ciała i kwadratu prędkości.

Dr Kępka ze zrekonstruowanych przez siebie zależności wyciągnął wniosek, że w dynamice Arystotelesa spełnione są jednocześnie zasada zachowania pędu oraz zasada zachowania energii. Oznacza to, że te zasady, do których odwołują się współcześni fizycy można już odnaleźć w dynamice Arystotelesa. Nie jest to jedyna wartość dynamiki Arystotelesa dla współczesnej fizyki, gdyż wg dr Kępki opisuje ona też propagację ruchu falowego w danym ośrodku, który to ośrodek scharakteryzowany jest przez stałą i izotropową prędkość ruchu falowego ze stałą prędkością, natomiast częstotliwość charakteryzuje źródło drgań. Dr Kępka twierdził, że dynamika Arystotelesa posłużyła do wyjaśnienia nieregularności ruchów i do oceny odległości obserwowanych na niebie obiektów zwanych planetami.

Jako rezultat swoich badań nad dynamiką Arystotelesa dr Kępka wyciągnął wniosek, że Arystoteles był nie tylko filozofem, ale także twórcą fizyki, a fizyka współczesna jest „tylko innym, lepszym lub (częściej!) gorszym powtarzaniem”. O tym, że dr Kępka doceniał dorobek fizyczny filozofów starożytnych świadczy motto jego książki zawierające cytaty z *Metafizyki* Arystotelesa: „Otóż jeśli nie byłoby żadnej innej substancji poza tymi, które są wytwarzane przez naturę, to fizyka byłaby wiedzą pierwszą”. Rekonstrukcja dr Kępki zasad dynamiki Arystotelesa nie jest tak precyzyjna jak rekonstrukcja w wykonaniu

dr Grzegorza Koczana, jednak stanowi dowód, że w środowisku dydaktyków są fizycy, którzy nie zgadzają się z ignorowaniem dorobku starożytnych filozofów w zakresie fizyki. Dr Grzegorz Koczan nie przytacza szczegółów badań dr Janusza Kępki, ale jest mu znany jego dorobek naukowy, gdyż w spuściznie po zmarłym dr Turzynieckim przejął między innymi podręcznik Kępki „Ruch absolutny i względny”, który zacytował w monografii.

Dr Kazimierz Turzyniecki, którego badania zainspirowały autora monografii zmarł nagle 20.08.2020 r., był nauczycielem w warszawskich liceach. Mimo osiągnięć naukowych w zakresie badań promieniowania synchrotronowego, poświęcił się dydaktyce fizyki do tego stopnia, że na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej obronił 3.07.2003 r. rozprawę doktorską z dydaktyki fizyki pt. „Analiza pojęcia energii w fizyce z punktu widzenia dydaktyki.” Wspomniany przez autora monografii wykład dr Turzynieckiego, który stanowił inspirację badań został wygłoszony 23.10.2019 r. na ostatnich zajęciach Ogólnopolskiego Seminarium Dydaktyki Fizyki odbywających się w nowej lokalizacji na Wydziale Fizyki UW przy ul. Pasteura na Ochocie. Wykład ten został zacytowany zarówno w monografii jako inspiracja badań, jak i został opisany w preprincie z 2021 r. autorstwa Grzegorza Koczana pt. „Obrona Arystotelesa. Rekonstrukcja jego dynamiki niesprzecznej z obserwacją”, gdzie też zostały załączone zdjęcia z oryginalnych slajdów z tego wykładu, przedstawiające podsumowanie prób rekonstrukcji zasad dynamiki Arystotelesa. Obaj fizycy dydaktycy, dr Kazimierz Turzyniecki i dr Janusz Kępka, którzy zajmowali się próbami rekonstrukcji zasad dynamiki Arystotelesa już nie żyją, ale pamięć o ich dokonaniach przetrwa w badaniach dr Grzegorza Koczana.

**Dr Edward Rydygier**  
Autor fizyk jądrowy, dr nauk techn.  
Jest aktywistą Sekcji Nauczycielskiej PTF

Warto przybliżyć czytelnikom sylwetkę autora monografii.



**Grzegorz Marcin Koczan** urodził się w Lublinie w 1977 roku, gdzie w 1996 roku ukończył Liceum Ogólnokształcące im. Stanisława Staszica i podjął studia fizyczne na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej UMCS. Po dwóch latach studiów w Lublinie kontynuował je na Uniwersytecie Warszawskim, które ukończył w 2002 roku. Kolejnym etapem rozwoju naukowego były studia doktoranckie z fizyki teoretycznej na Uniwersytecie Warszawskim zakończone świadectwem ukończenia w 2006 roku. Przez następne lata prowadził działalność dydaktyczną oraz współpracował z Wydawnictwem Szkolnym i Pedagogicznym. W 2021 roku sfinalizował w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie przewod doktorski obroną dysertacji w zakresie badań eksperymentalnych w ramach nieliniowej teorii wytrzymałości drewna (pod kierunkiem dra hab. Pawła Kozakiewicza, prof. SGGW). Dr Grzegorz Koczan jest zatrudniony w Katedrze Mechanicznej Obróbki Drewna w Instytucie Nauk Drzewnych i Meblarstwa SGGW. Jest członkiem Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Leśnictwa i Drzewnictwa oraz Polskiego Towarzystwa Fizycznego (Sekcja Nauczycielska). Interdyscyplinarne podejście do badań naukowych dr Koczana skutkuje wynikami zarówno w naukach inżynierskich, jak i fizycznych.

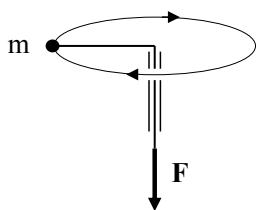
# Powtórz, utrwal, poszerz wiedzę

## Zadania z fizyki. Cz. 2.

Waldemar Reńda

### Zadanie 22. \* (zasada zachowania momentu pędu)

Obciążnik o masie  $m = 100$  g, poruszając się ruchem jednostajnym po okręgu o promieniu  $r_1 = 1$  m, wykonuje jeden obrót w czasie 1s. Następnie, działając siłą jak na rysunku, spowodowano zbliżenie obciążnika do osi obrotu tak, że  $r_2 = 0,5$  m. Zakładając, że ruch odbywa się w tej samej poziomej płaszczyźnie oraz że nie występują żadne opory ruchu, oblicz, jak i ile razy zmienia się wartości okresu ruchu ( $T$ ), częstotliwości obrotów ( $f$ ), prędkości liniowej ( $v$ ) obciążnika, prędkości kątowej ( $\omega$ ), przyspieszenia dośrodkowego ( $a_d$ ), siły dośrodkowej ( $F_d$ ), pędu ( $p$ ) i energii kinetycznej ( $E_k$ ). Ile dżuli pracy wykonano przy zmianie promienia ruchu obciążnika? (Skorzystaj tu z zasady zachowania pracy i energii.) Sporządź wykres  $F_d(r)$  w przedziale od  $r = 0,5$  m do  $r = 1$  m, wykonując obliczenia co 10 cm. Z jaką wielkością związane jest pole zawarte pomiędzy



wykresem  $F(r)$  a osią zmiennej  $r$ ? Sprawdź tę tezę. Czy siła dośrodkowa może zmienić wartość momentu pędu obciążnika i dlaczego? Czy zatem możemy zastosować tu zasadę zachowania momentu pędu?

**Wskazówka:** Zastosuj zasadę zachowania momentu pędu!

Odpowiedzi ująłem w tabeli:

| Wielkość fizyczna                 | Jej wartość ( $w_1$ ) dla $r_1 = 1$ m | Jej wartość ( $w_2$ ) dla $r_2 = 0,5$ m | $w_2/w_1$ |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------|
| $T$ (s)                           | 1                                     | 0,25                                    | $1/4$     |
| $f$ (1/s)                         | 1                                     | 4                                       | 4         |
| $L^1$ ( $\text{kgm}^2/\text{s}$ ) | $0,2\pi$                              | $0,2\pi$                                | 1         |
| $\omega$ (1/s)                    | $2\pi$                                | $8\pi$                                  | 4         |
| $v$ (m/s)                         | $2\pi$                                | $4\pi$                                  | 2         |
| $a_d$ ( $\text{m/s}^2$ )          | $4\pi^2$                              | $32\pi^2$                               | 8         |
| $F_d$ (N)                         | $0,4\pi^2$                            | $3,2\pi^2$                              | 8         |
| $p$ ( $\text{kgm/s}$ )            | $0,2\pi$                              | $0,4\pi$                                | 2         |
| $E_k$ (J)                         | $0,2\pi^2$                            | $0,8\pi^2$                              | 4         |

<sup>1</sup> Wartość momentu pędu (krętu). Symbol zgodny z międzynarodową nomenklaturą. Por.: J. M. Massalski, J. Stadnicki, Międzynarodowy układ jednostek miar SI, PWN, Warszawa 1968, s. 25.

Zauważmy, że następuje tu przyrost energii kinetycznej obciążnika.

Przyrost ten odbywa się dzięki pracy siły  $F$ . W przypadku piruetu pracę tę wykonują odpowiednie mięśnie łyżwiarza (lub łyżwiarki).

W naszym przypadku  $W$  (od  $r_1$  do  $r_2$ ) =  $\Delta E_k = 0,6\pi^2$

(Zadanie to pozwala powtórzyć obszerną część materiału dotyczącą ruchu po okręgu oraz pokazać związek pola pod wykresem  $F(r)$  z pracą, a pracy z energią.)

W tym przypadku:  $W$  (od  $r_1$  do  $r_2$ ) =  $\Delta E_k$ .

**Dowód:**  $F = mv^2/r = m^2v^2r^2/mr^3$ ,

ale  $m_1v_1r_1 = m_2v_2r_2 = \text{const.} = C$  więc:  $F = C^2/mr^3$

Ponieważ:  $dW = -F dr$ , zatem

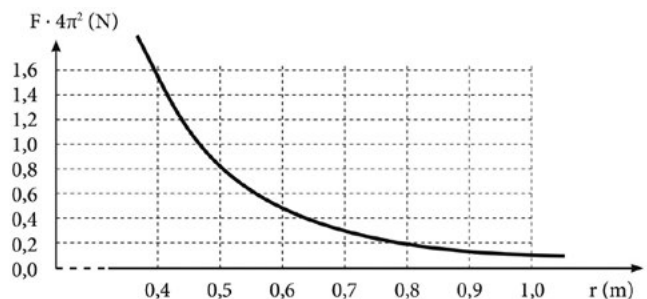
$$\begin{aligned} W &= - \int C^2/mr^3 dr = -C^2/m \int r^{-3} dr \\ &= \frac{1}{2} C^2/mr_2^2 - \frac{1}{2} C^2/mr_1^2 \\ &= \frac{1}{2} m^2v_2^2r_2^2/mr_2^2 - \frac{1}{2} m^2v_1^2r_1^2/mr_1^2 = \Delta E_k. \end{aligned}$$

Co należało udowodnić.

Oto tabela wartości:

| $r$ (m)              | 0,3 | 0,4  | 0,5 | 0,6  | 0,7 | 0,8 | 0,9  | 1,0 |
|----------------------|-----|------|-----|------|-----|-----|------|-----|
| $F \cdot 4\pi^2$ (N) | 3,7 | 1,56 | 0,8 | 0,46 | 0,3 | 0,2 | 0,14 | 0,1 |

W obliczeniach skorzystałem z faktu, że w tym przypadku  $L = I \cdot \omega = 0,1 \cdot 2\pi = \text{constans}$  oraz że  $F(r) = \omega L/r$ . Ostatecznie otrzymaliśmy funkcję  $F(r) = 0,1 \cdot 4\pi^2/r^3$ , a więc typu  $f(x) = C/x^3$ . Ponieważ wartość tej funkcji rośnie szybko dla malejącej zmiennej niezależnej, dlatego ograniczyłem się do przedziału od  $r = 0,4$  m do  $r = 1$  m.



### Zadanie 23. \* (gravitacja)

Wiedząc, że  $M_{\text{Ziemi}} = 81 M_{\text{Księżycza}}$  oraz że  $r_K = 60 R_Z$ , oblicz, w jakiej odległości na osi Ziemia-Księżyc mierzonej w  $R_Z$  znajduje się punkt, w którym natężenie pola grawitacyjnego tego układu ciał jest równe zero. Jaką wartość ma w tym punkcie potencjał tego pola? Jaka jest wartość tego potencjału w otoczeniu tego punktu? Jaką rolę w związku z tym może pełnić ten punkt w przypadku lotów na Księżyc?

*Odp.: Ten punkt jest jakby „przełączką” (siodłem) tego pola i przez niego przebiega najbardziej ekonomiczna trajektoria statków kosmicznych udających się w pobliże Księżycza.*

### Zadanie 24. \* (gravitacja, energia potencjalna i kinetyczna satelity)

Oblicz wartość pierwszej i drugiej prędkości kosmicznej dla Księżycza i porównaj z wartościami tych prędkości dla Ziemi. Porównaj energię kinetyczną z energią potencjalną satelity krążącego po orbicie kołowej. Jaka jest wówczas całkowita energia mechaniczna tego satelity?

*(Odp.:  $E_k = \frac{1}{2}|E_p|$ ,  $E_c = -E_k$ ).*

Oblicz pracę potrzebną do zmiany orbity satelity o masie  $m$  z orbity o promieniu  $r_1$  na  $r_2$ .

Jeżeli gwiazda powstaje z rozległego obłoku pyłowego i nie posiada planet, to jaka część energii potencjalnej tego obłoku powinno zamienić się na energię wewnętrzną (cieplną) powstałej gwiazdy? (Odp.:  $\frac{1}{2}$ .)

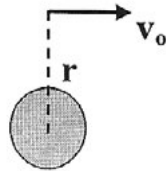
Oszacuj średnią wartość temperatury, jaką powinna uzyskać gwiazda przy założeniu, że gwiazda składa się z wodoru, ma masę równą masie Słońca oraz że niewielka część energii została wypromieniowana w czasie jej tworzenia.

### Zadanie 25. \* (gravitacja, tor ruchu ciał w polu grawitacyjnym)

Statek kosmiczny „wyniesiono” na pewną wysokość ponad powierzchnię Ziemi i nadano mu prędkość  $v_0$  w kierunku poziomym. ( $\gamma$  – wartość natężenia pola grawitacyjnego.)

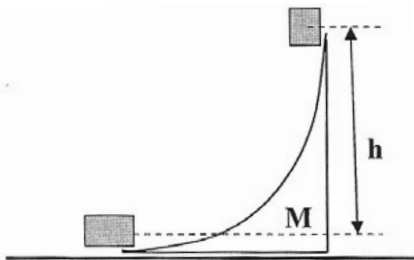
Ustal kształt toru tego statku w zależności od nadanej mu wartości prędkości,<sup>1</sup> gdy:

- $v_0 = 0$ ,
- $0 < v_0 < (\gamma \cdot r)^{\frac{1}{2}}$ ,
- $v_0 = (\gamma \cdot r)^{\frac{1}{2}}$ ,
- $(\gamma \cdot r)^{\frac{1}{2}} < v_0 < (2\gamma \cdot r)^{\frac{1}{2}}$ ,
- $v_0 = (2\gamma \cdot r)^{\frac{1}{2}}$ ,
- $v_0 > (2\gamma \cdot r)^{\frac{1}{2}}$ .



### Zadanie 26. \*\* (zasada zachowania pędu i energii)

Z klina jak na rysunku ześlizguje się klocek.



Oblicz wartości prędkości jakie uzyskają klin i klocek, jeżeli  $m = 1$  kg,  $M = 5$  kg,  $h = 20$  cm i brak jest zarówno oporów ruchu pomiędzy klockiem i klinem, jak i klinem a poziomym podłożem. Do jakiej wartości dążyć będą szybkości klocka i klina, gdy  $m \rightarrow 0$ ?

Do jakiej wartości dążyć będzie prędkość klocka, gdy  $M \rightarrow \infty$ ?

**Wskazówka:** Należy tu zastosować zarówno zasadę zachowania pędu. Czy można zastosować tu zasadę zachowania energii i dlaczego?

### Zadanie 27. (dynamika)

Droga hamowania na suchej i poziomej jezdni asfaltowej przy szybkości 100 km/h wynosi 70 m. Oblicz wartość współczynnika tarcia. Pod jakim kątem do poziomu może być nachylona ta jezdnia, by ten samochód mógł po niej jechać ruchem jednostajnym?

Odp.:  $f = 0,56$ ,  $\alpha = 30^\circ$ .

<sup>1</sup> Nie uwzględniono ruchu obrotowego Ziemi

### Zadanie 28. (gravitacja)

Oblicz wartość natężenia pola grawitacyjnego (przyspieszenie grawitacyjne) na równiku Ziemi, na  $45^\circ$  szer. geogr. oraz na biegunie, jeżeli z pomiarów grawimetrycznych wynika, że na równiku  $g_r = 9,7805$  m/s<sup>2</sup>, na  $45^\circ$  szer. geogr.  $g_o = 9,80665$  m/s<sup>2</sup> (wartość standardowa), na biegunie  $g_b = 9,8322$  m/s<sup>2</sup>. Oblicz kąt odchylenia pionu (kierunek działania siły ciężkości) od kierunku ku środkowi Ziemi na  $45^\circ$  szer. geogr.

Dane:  $R_r = 6378160$  m,  $R_o = 6371000$  m,  $R_b = 6356775$  m,  $T_z = 23^h 56^m 4^s = 86164$  s.

Odp.:  $\gamma_b = 9,8322$  m/s<sup>2</sup>,  $\gamma_o = 9,8236$  m/s<sup>2</sup>,  $\gamma_r = 9,8143$  m/s<sup>2</sup>,  $\alpha = 0,1^\circ$ , na równiku  $\alpha_d = 0,03391$  m/s<sup>2</sup>.

### Zadanie 29. (ruch ciał w polu grawitacyjnym Ziemi)

Na jaką wysokość nad powierzchnię Ziemi mógłby dotrzeć pocisk wystrzelony pionowo do góry z I prędkością kosmiczną. Odp.:  $h = R_z$ .

### Zadanie 30. \* (ruch ciał w polu grawitacyjnym Ziemi)

Oblicz stosunek energii kinetycznej ciał o tej samej masie poruszających się z II i I prędkością kosmiczną.

Odp.: 2

### Zadanie 31. (ruch ciał w polu grawitacyjnym)

Dwie jednakowe gwiazdy o masie  $m$  każda krążą po tej samej kołowej orbicie o promieniu  $R$ . Oblicz energię potrzebną do zmiany tej orbity na orbitę kołową o promieniu  $2R$ .

Odp.:  $1/8 Gm^2/R$

### Zadanie 32. (energia ciała w polu grawitacyjnym)

Porównaj energię potencjalną ciała względem środka Ziemi umieszczonego na jej powierzchni z energią potencjalną tego ciała względem nieskończoności (potraktuj Ziemię jako ciało odosobnione i jednorodne).

### Zadanie 33. \* (gravitacja)

Oblicz wartość potencjału grawitacyjnego w środku Ziemi i pochodzące tylko od Ziemi.

Odp.: Natężenie pola grawitacyjnego w **jednorodnej kuli** jest wprost proporcjonalne do promienia  $\gamma = \frac{4}{3}\pi G\rho r$ . Siła grawitacyjna:  $F = \frac{4}{3}\pi G\rho m r$ .

Praca siły zewnętrznej:

$$W_{R \rightarrow 0} = -F_{sr} \cdot R = -\frac{1}{2}F_{max} \cdot R = -\frac{2}{3}\pi G\rho m R^2 \\ = -\frac{1}{2}GMm/R = \Delta E_p.$$

Zatem  $\Delta V = -\frac{1}{2}GM/R$ . Stąd  $V_0 = -\frac{3}{2}GM/R$ .

Jest to obliczenie zgodne z definicją energii potencjalnej, ale wiemy, że ciało ma wówczas energię, gdy może wykonać pracę. A ciało w środku Ziemi nie może wykonać pracy, zatem ma tam energię potencjalną równą zero. Jeżeli chcemy obliczyć energię potencjalną ciała o masie  $m$  na powierzchni Ziemi względem jej środka, to jest ona równa pracy:

$$W_{0 \rightarrow R} = F_{sr} \cdot R = \frac{1}{2}F_{max} \cdot R = \frac{1}{2}mg_o R$$

Drużyna i z lewej strony jej liderzy  
Damian Jabłeka i Waldemar Ogłóza

# Srebrni olimpijczycy

W Brazylii zakończyła się 17. Międzynarodowa Olimpiada z Astronomii i Astrofizyki (IOAA). Nasz zespół zdobył aż 4 srebrne medale oraz jedno wyróżnienie! Medaliści to Andrzej Maroń z Warszawy, Michał Jagodziński ze Szczecina, Dawid Chudzik z Warszawy oraz Piotr Jędrzejczyk z Krakowa. Wyróżniony został natomiast Krzysztof Nadulicz z Białegostoku. Taki wynik plasuje nas wysoko w międzynarodowej klasyfikacji.

Absolutnym zwycięzcą Olimpiady został, tak jak w zeszłym roku, Peter Andolšek ze Słowenii. Zdobył on również tytuł najlepszego zawodnika w części praktycznej. Olimpijski konkurs na plakat wygrała reprezentacja Kolumbii. Wśród państw na uwagę zasługuje Iran, który w tym roku zdobył aż 5 złotych medali.

Podczas tegorocznej olimpiady uczestnicy zmierzili się z serią 11 zadań teoretycznych, na których rozwiązanie mieli 5 godzin. Wśród nich były między innymi zadania związane z czarnymi dziurami, lotami satelitów czy gromadami galaktyk.

W części praktycznej znalazły się dwa zadania z analizy danych. W jednym z nich należało wyznaczyć położenie centrum naszej galaktyki opierając się o obserwacje gromad kulistych. Do części praktycznej należało także zadanie w planetarium, gdzie było trzeba się wykazać znajomością nieba południowego. Ponadto uczestnicy prowadzili obserwacje rozwiązując zadanie z użyciem galileoskopu, oraz używając mapy nieba.

Naszą drużyną opiekowała się brazylijska przewodniczka Bárbara Mendes Nascimento. Jak zgodnie stwierdziła cała drużyna, bez jej wielkiego uśmiechu, szczerego dzielenia się emocjami i dbania o każdy element dnia cała wyprawa nie miałaby tak wspaniałego charakteru. Dziękujemy Ci za ten wspaniały czas Barbara!

Nasz wyjazd był w części finansowany przez Ministerstwo Edukacji Narodowej, nie byłby jednak możliwy bez wspaniałych

sponsorów, który pokryli ponad połowę kosztów biletów lotniczych. Dziękujemy Akademii Kopernikańskiej, Obserwatorium Astronomicznemu Uniwersytetu Warszawskiego oraz Polskemu Towarzystwu Astronomicznemu. To również Wasz sukces!

**Damian Jabłeka**  
Wicedyrektor Planetarium w Chorzowie, drugi z liderów drużyny



Fot. 1 – od lewej Michał Jagodziński, Piotr Jędrzejczyk, Krzysztof Nadulicz, Andrzej Maroń, Dawid Chudzik

## Uczniowskie Olimpiady Międzynarodowe

Jerzy Kuczyński

Znamy wyniki tegorocznej Olimpiady w Paryżu. Ogólnie rzecz biorąc, dla Polski marne (10 medali i 42 miejsce). Wyraźnie lepiej było w paralimpiadzie<sup>1</sup> – miejsce 16 i 23 medale w tym osiem złotych. Wręcz świetnie wyglądają wyniki naszej młodzieży w Olimpiadach Międzynarodowych. W Olimpiadzie, z którą jestem związany, czyli z astronomii i astrofizyki (IOAA – International Olympiad on Astronomy and Astrophysics) polska pięcioosobowa drużyna zdobyła cztery srebrne medale i jedno wyróżnienie. To ostatnie „o włos” od brązowego medalu. Jeszcze lepiej poszło na Olimpiadzie Fizycznej – złoto, trzy srebra i brąz.

I jedyne co szokuje w tej sprawie to brak jakiegokolwiek próby dyskutowania tych wyników. Jeszcze w przypadku paralimpiady coś o tych wynikach słyszymy. W przypadku olimpiad młodzieżowych w mediach cisza. Nie wiem, jak było w przypadku „fizycznej” ale w Astronomicznej główny udział Ministerstwa stanowiło pokrycie 1/3 kosztów i dostarczenie strojów i plecaków. Na pokrycie 2/3 kosztów podróży dla ekipy (zawodnicy plus liderzy) trzeba było szukać sponsorów.

Nie wiem, jak było w przypadku „fizycznej” ale w Astronomicznej główny udział Ministerstwa stanowiło dostarczenie strojów, bo już na pokrycie kosztów podróży dla ekipy (zawodnicy plus liderzy) trzeba było szukać sponsorów.

Warto zwrócić uwagę na rolę liderów, którzy mają w Olimpiadzie bardzo ważne zadania. Poza opieką nad młodzieżą w trakcie podróży (w trakcie zawodów nie mają z oczywistych względów z zawodnikami kontaktu i opiekę sprawują organizatorzy), muszą ocenić i zatwierdzić zadania co wynika z tego, że programy szkolne różnych krajów są inne.

W praktyce rozwiązują proponowane przez organizatorów zadania, zgłaszają do nich poprawki, a w pewnych przypadkach żądają usunięcia z zestawu niektórych zadań, które z jakichś względów są nie do przyjęcia z punktu widzenia danego kraju<sup>2</sup>. Można dodać, że takie ingerencje są dość rzadkie.

Następną czynnością jest przetłumaczenie zadań na języki narodowe. Zawodnicy, niezależnie od wersji oryginalnych, dostają również przetłumaczone wersje. W praktyce większość zna angielski więc tłumaczenie ma umiarkowane znaczenie a autorytatywna jest wersja angielska. Najistotniejszym zadaniem liderów jest tzw. „moderacja” polegająca na tym, że liderzy otrzymują kopie prac zawodników i porównują wyniki swoich zawodników z ocenami sędziów. W dzień przeznaczony na moderację na sali siedzą sędziowie i liderzy uzgadniają z nimi oceny. Czyli mówiąc krótko „wyklócają się o swo-

je”. Z zasady b. kulturalnie, choć zdarzają się „zgrzyty”, czasem związane z różnicami kulturowymi.

W większości wypadków oczywiście jest zgoda i moderacja sprowadza się do podpisania protokołów. Często jednak dochodzi do zmian oceny. Zwykle niewielkich. Najgorzej, gdy sędziowie muszą uznać rację lidera a rzecz dotyczy sposobu oceny całego zadania. Wtedy trzeba zmienić oceny wszystkich zawodników, czyli w praktyce „na szybko” jeszcze raz przejrzeć wszystkie prace. Na szczęście w mojej karierze sędziego (sędziowałem obie Olimpiady, które odbyły się w Polsce) nic takiego mi się nie zdarzyło i o ile wiem są to bardzo incydentalne przypadki.

Częściej (ale też rzadko!) zdarzają się ostre kłótnie, które muszą moderować „wyżej postawieni” czyli np. „Prezydent IOAA”. I w poprzedniej Olimpiadzie (ok 10 lat temu) miałem taki przypadek, gdy Brazylijka wymusiła na mnie podwyższenie oceny zawodnika na podstawie jakiegoś zdania wypisanego przez zawodnika. Dlatego w zeszłym roku powtarzałam jak mantrę „It’s not TV game – no calculations, no points” i mimo pewnej ilości prób wmówienia mi, że jakieś słowo oznacza, że zawodnik coś osiągnął, brak rachunków w danym temacie okazywał się przekonujący. Co nie oznacza, że w wielu przypadkach nie trzeba było nieco poprawić oceny, bo lider znalazł coś na korzyść zawodnika czego sędziowie (prace ocenia dwu sędziów) nie dopatrzyli. Jak z tego widać liderzy na Olimpiadę nie jadą dla przyjemności i czasu na odpoczynek wiele nie mają.

Pomińmy koszty jakie poniósł nasz kraj za udział w paraskiej olimpiadzie. Za złoty medal (jedyne) zawodniczka otrzymała dwupokojowe mieszkanie, 250 tys. zł, diament i voucher na wakacje. Całkiem spore sukcesy naszych drużyn olimpijskich najwyraźniej nie interesują nikogo, ani władz, ani sponsorów, ani mediów.

Zupełnie odwrotnie niż w przypadku zawodów sportowych, które mają bardzo liczne grono fanów i nawet paralimpiada jest całkiem okazale reprezentowana w mediach. Można dodać, w przypadku paralimpiady, słusznie! Natomiast dlaczego wyniki olimpiad młodzieżowych są ignorowane jest niezrozumiałe. Warto zauważyć, że ten brak zainteresowania dotyczy Polski, bo gdzie indziej, zwłaszcza w Azji jest zupełnie inaczej i państwa azjatyckie inwestują bardzo dużo w młode pokolenia. I np. w Iranie medaliści IOAA są zwalniani ze służby wojskowej, co w kraju będącym w permanentnym konflikcie militarnym ma spore znaczenie<sup>3</sup>.

Podobnie jest w przypadku Indii, gdzie jak „niesie wieść gminna” przygotowania do olimpiady zaczynają się od 30000 obiecujących młodych ludzi, których się szkoli i ostatecznie wybiera z nich się drużynę. U nas tę rolę pełni około stu uczestników pierwszego etapu krajowej olimpiady. A więc w pewnym sensie mamy lepszą efektywność.

<sup>1</sup> Taka podobno obowiązuje pisownia! – p. Polityka 37/24 s. 9.

<sup>2</sup> Np. zadanie polegające na znalezieniu na podstawie jakichś danych kolejności księżyców od planety dla Chińczyków jest absurdalne, bo po chińsku ich nazwy to „Pierwszy, Drugi itp.”. Oczywiście, żądanie odpowiednich rachunków w takiej sytuacji może uratować sytuację!

<sup>3</sup> I przynosi sukcesy – w tym roku pięć złotych medali, a więc zdobyli je wszyscy członkowie irańskiej drużyny.

Znany też jest przypadek, gdy minister oświaty pewnego azjatyckiego kraju dowiedziawszy się o złotym medalu swojego rodaka osobiście zadzwonił z gratulacjami (nad ranem, więc ktoś go musiał tą wiadomością obudzić!). Jak z tego widać są kraje, gdzie olimpiady młodzieżowe są traktowane bardzo poważnie. Można się zastanowić, dlaczego. I powody bez trudu znajdziemy patrząc na to jak jest z olimpiadami sportowymi.

**M**edalami olimpijskimi fascynują się prawie wszyscy i ta fascynacja w pewien sposób przenosi się na rząd poprawiając<sup>4</sup> jego notowania. Dlatego politycy uważają, że warto sygnąć groszem. Medale sportowe to spore pieniądze i a w przypadku Olimpiady zabezpieczenie na całe życie – prawo do emerytury sportowej. Ta ostatnia może nie jest zbyt wielka, ale umożliwia przeżycie. A szum medialny powoduje, z punktu widzenia polityka, opłacalność gratyfikacji finansowych. Warto zauważyć, że w sumie nie jest to zbyt kosztowne. Medali nie jest zbyt dużo a przeciętny medalista w nadziei na medal inwestuje kilkanaście lat ciężkiej pracy i kłopoty ze zdrowiem w późniejszym wieku. Warto zauważyć, że inwestuje wielu a medale przynosi niewielu – polska ekipa w Paryżu liczyła ponad 200 członków a przecież to tylko ci, którzy mieli jakieś szanse na medale. Sportowców, z których wybrano reprezentację było tysiące. Warto to porównać to z olimpiadami młodzieżowymi. Przede wszystkim koszty. Wysłane reprezentacji do Brazylii kosztowało poniżej 50 tysięcy złotych. A więc medal za nieco powyżej 10 tysięcy. Dodatkowo, większość kosztów pokryli sponsorzy.

**O**czywiście nie ma zysków z biletów i transmisji, ale są dwa poza finansowe pozytywy, jak się wydaje

decydujące dla krajów poważnie traktujących edukację. Chyba najistotniejszy polega na zachęceniu młodych ludzi do uczenia się danego przedmiotu. Łatwo daje się zaobserwować jak młody człowiek na początku liceum startuje w Olimpiadzie często nie przechodząc nawet do drugiego etapu. Rok później ociera się o kwalifikacje do finału by w trzecim roku startów w przywieźć z Olimpiady Międzynarodowej medal<sup>5</sup>.

Medal niekoniecznie jest największym profitem tej procedury. Znaczna część naszych profesorów astronomii to wychowankowie Olimpiady Astronomicznej. Tu warto dodać, że dobrze ponad połowa prac Polaków w *Nature* i *Science*<sup>6</sup> to prace naszych astronomów. Z pewną dozą megalomanii można powiedzieć, że bez Olimpiady Astronomicznej polskie uczelnie cofnęłyby się w rankingach o następne kilkadziesiąt pozycji<sup>7</sup>.

Jeżeli to wziąć pod uwagę, inwestycja pt. „Olimpiada Astronomiczna” jest wręcz niesamowicie opłacalna i stanowisko Iranu polegające na zrezygnowaniu z paru żołnierzy na rzecz astronomii jest całkowicie zrozumiałe.

Co by więc się stało gdyby w telewizji było kilka wywiadów z medalistami a Minister pofatygował się by wręczyć symboliczne nagrody medalistom i ewentualnie przyznał im paruset złotych stypendia na studia w renomowanych uczelniach<sup>8</sup>. Jakies powody by tego nie robić muszą być. Z jednej strony to pewnie braki finansowe. Jak wiemy deficyt budżetu jest ogromny. Ale chyba są i inne ważniejsze powody. I może lepiej nie próbować ich znajdować.

Jerzy Kuczyński  
Akademia Śląska

<sup>4</sup> Lub pogarszając – marne wyniki w Paryżu wyraźnie obniżyły notowania rządu.

<sup>5</sup> W Olimpiadzie Astronomicznej drużyna na Międzynarodową to pierwszych pięciu z Krajowej.

<sup>6</sup> Warto zauważyć, że popularne rankingi uczelni w dużej mierze opierają się na ilości publikacji w tych czasopismach (i na ilości laureatów nagrody Nobla, ale ilu ich mamy wszyscy wiemy). Tym samym narzekanie, że polskie uczelnie plasują się w piątej setce tych rankingów sprowadza się do narzekania na ilość publikacji w tych czasopismach.

<sup>7</sup> Megalomania megalomanią, ale przyczyny współczesnego wpływu astronomii na rankingi uczelni są bardzo realne. Jak gdzieś przeczytałem, na początku XX wieku fizyka miała „złote czasy” i była obfitość istotnych tematów do badań – były dostępne pierwszorzędne tematy nawet dla drugorzędnych ludzi. Na początku XXI wieku brakuje nawet drugorzędnych tematów dla pierwszorzędnych ludzi. Zupełnie inaczej jest w astronomii, gdzie pierwszorzędnych problemów do rozwiązania jest względna obfitość. Stąd niewielka ilościowo grupa astronomów ma ponad przeciętną reprezentację w wiodących czasopismach. To w przypadku astronomii, ale ogólna zasada jest uniwersalna – olimpiady młodzieżowe zwiększają ilość oraz poprawiają jakość kandydatów startujących do karier naukowych. A więc zwiększają szanse na sukcesy naukowe a w konsekwencji na rozwój, również ekonomiczny, kraju. Oczywiście pod warunkiem, że talenty nie zostaną zmarnowane co wg mnie oznacza, że medaliści olimpiad międzynarodowych powinni trafić do dobrych uczelni pod opiekę możliwie dobrych profesorów.

<sup>8</sup> Dla Polski oznaczałoby to pewnie spory skok do przodu, ale dla mnie i Kolegów z Komisji Olimpiady byłoby nieszczęściem, bo zamiast stu prac pierwszego etapu byłoby ich kilkakrotnie więcej. Pewnie trzeba by je ocenić za te same kilkadziesiąt złotych, bo pieniędzy by więcej nie było. A tak w ogóle to teraz fantazjuję – stypendium kilkadziesiąt złotych miesięcznie przez pięć lat studiów to tyle ile kosztuje jedna edycja Olimpiady Astronomicznej więc takich pieniędzy nigdy nie będzie i nadzieja (niektórych!) na nobla dla Polaka jest – jak już powyżej napisałem – czystą fantazją

## W następnych wydaniach polecamy m.in.

### • Fotometria nie tylko dla biofizyków

Podstawowa wiedza z zakresu fotometrii często okazuje się przydatna w życiu codziennym.

### • Roger Penrose, fizyk Noblista – oryginalny popularyzator nauki

Światowej sławy fizyk o oryginalnych talentach popularyzatorskich, znany kosmolog teoretyk, laureat Nagrody Nobla z 2020 r.

### • Promieniowanie kosmiczne – przyspieszać, albo nie przyspieszać, oto jest pytanie

Cząstki promieniowania kosmicznego docierają do granic ziemskiej atmosfery z różnymi prędkościami.

### • Precyzyjna waga jubilerska jako waga magnetyczna?

Czy do rozpoznawania właściwości magnetycznych materiałów można użyć wagi jubilerskiej?

# Porównywanie jasności gwiazd

## Lekcja matematyki z elementami astronomii

**Wyzwanie:** wykorzystując wiedzę astronomiczną oblicz, ile razy jaśniejsza jest najjaśniejsza gwiazda widoczna gołym okiem od najśłabszej gwiazdy widocznej gołym okiem. Przedstaw rozwiązanie dla trzech różnych warunków obserwacyjnych (duże miasto, gdzie widać tylko najjaśniejsze gwiazdy, teren podmiejski kilkanaście kilometrów od miasta i bardzo ciemne niebo z dala od sztucznych światel np. w Bieszczadach).

Krzysztof Kowalczyk

### Wprowadzenie do tematu jasności gwiazd

Któż z nas nie patrzył w rozgwieżdżone niebo. Już na pierwszy rzut oka gwiazdy różnią się jasnościami. Tematem obserwowanych jasności gwiazd astronomowie zajmowali się od dawna, pamiętając jednocześnie, że gwiazdy, które widzimy jako bardzo jasne niekoniecznie muszą świecić z jakąś szczególną mocą w porównaniu do innych gwiazd. Niekiedy są to po prostu jedne z najbliższych gwiazd i dlatego zdają się świecić jaśniej. Z drugiej strony niektóre bliskie gwiazdy mogą być bardzo słabo widoczne, bądź też w ogóle niewidoczne gołym okiem, jak najbliższa Słońcu gwiazda Proxima Centauri.

W atlasach nieba oraz mobilnych aplikacjach astronomicznych, takich jak np. Stellarium (<https://stellarium.org/pl/>) gwiazdy mają podane jasności obserwowane w jednostkach magnitudo, zwanych też wielkościami gwiazdowymi. Już około 140 r. n.e. w traktacie „Almagest” Klaudiusz Ptolemeusz podał – wtedy jeszcze dość subiektywną – miarę jasności gwiazd z podziałem na sześć wielkości gwiazdowych. I tak, gwiazdy pierwszej wielkości gwiazdowej są jaśniejsze od gwiazd drugiej wielkości, a drugiej wielkości gwiazdowej od gwiazd trzeciej wielkości gwiazdowej itd. Przy czym, co też warto podkreślić, nie oznacza to, że gwiazdy pierwszej wielkości gwiazdowej są większe od gwiazd drugiej wielkości gwiazdowej, a drugiej od trzeciej itd. – nie jest to bowiem miara rozmiarów gwiazd, ale ich jasności.

W XIX w. subiektywna miara jasności gwiazd zaczerpnięta od Ptolemeusza została powiązana z wiedzą w zakresie optyki, co w połączeniu z pojawieniem się techniki fotografii (rejestrowanie obrazów gwiazd) pozwoliło zobiektywizować skalę jasności. Jakościowy opis jasności gwiazd został wzbogacony o matematyczny opis ilościowy, odnoszący się do obserwowanych natężeń jasności.

Najpierw około 1830 r. John Herschel powiązał pojęcie wielkości gwiazdowych z całkowitym natężeniem światła docierającym od gwiazd. Sformułował pogląd, iż różnicom wielkości gwiazdowych odpowiadają określone stosunki natężeń blasku gwiazd rejestrowanych przez obserwatora, przy czym oceniał, że gwiazdy pierwszej wielkości wg. klasyfikacji Ptolemeusza są około 100 razy jaśniejsze niż gwiazdy szóstej wielkości.

Inny angielski astronom Norman Pogson w 1867 r. również doszedł do podobnego wniosku i uściślił tradycyjny system, przyjmując, że różnica jasności rzędu 5 magnitudo (5 wielkości gwiazdowych) oznacza stosunek natężeń oświetlenia równy 1:100. Tym samym gwiazda pierwszej wielkości jest 100 razy jaśniejsza od gwiazdy szóstej wielkości, ledwie widocznej gołym okiem przy bardzo ciemnym niebie. Jednocześnie gwiazda pierwszej wielkości jest tyle samo razy jaśniejsza od gwiazdy drugiej wielkości, co gwiazda drugiej wielkości od gwiazdy trzeciej wielkości itd.

Skala jasności gwiazd nie kończy się jednak na gwiazdach pierwszej wielkości. W rzeczywistości dla najjaśniejszych gwiazd trzeba było wprowadzić ujemne wielkości gwiazdowe – i tak np. dla najjaśniejszej gwiazdy

nocnego nieba Syriusza jasność wynosi  $-1,47$  mag. W wielkościach gwiazdowych różnica jasności Syriusza i najsłabszych gwiazd (6 mag.) widocznych tylko z dala od miejskich świateł wynosi więc  $6 \text{ mag.} + 1,47 \text{ mag.} = 7,47 \text{ mag.}$  Wyliczenie, ile razy jaśniejszy jest Syriusz od najsłabszych gwiazd widocznych w idealnych warunkach gołym okiem (czyli jakiemu stosunkowi natężeń światła odpowiada różnica  $7,47 \text{ mag.}$ ), jest jedną z części zadania do zrealizowania przez uczniów w ramach lekcji „Porównywanie jasności gwiazd”.

### Schemat lekcji i rozwiązania zadania:

1) Sformułowanie wyzwania – przedstawienie treści zadania „Porównywanie jasności gwiazd” (przeczytanie treści, napisanie na tablicy lub wyświetlenie na tablicy multimedialnej).

2) Informacja źródłowa

Dajemy uczniom do przeczytania tekst „Wprowadzenie do tematu jasności gwiazd” (tekst powyżej). Następnie inicjujemy dyskusję na temat tego co to są wielkości gwiazdowe i które informacje są kluczowe dla porównywania jasności gwiazd. Pod koniec dyskusji na forum klasy podkreślamy znaczenie założenia, że różnicy 5 wielkości gwiazdowych odpowiada stosunek natężenia światła jaśniejszej gwiazdy do słabszej równy 100 (skala Pogsona).

3) Wypisanie danych

W naszym wyzwaniu dane nie są podane w treści zadania. Niczym prawdziwi naukowcy musimy je znaleźć w materiałach źródłowych lub sami wyznaczyć.

Informację o obserwowanej jasności najjaśniejszej gwiazdy ( $-1,47 \text{ mag}$ ) mamy podaną w tekście źródłowym „Porównywanie jasności gwiazd”. Przyjmujemy na podstawie danych źródłowych znalezionych w Internecie, bądź własnych obserwacji, jasności najsłabszych gwiazd widocznych gołym okiem w zależności od miejsca obserwacji (ciemne niebo: 6 mag., kilkanaście km. od miasta ok. 4,5 mag, duże miasto ok. 3 mag.). Opcjonalnie: tydzień przed lekcją można poprosić uczniów o narysowanie mapki fragmentu nieba w okolicy Wielkiego Wozu (widać przez cały rok), włącznie z najsłabszymi gwiazdami, które widzą i na lekcji np. na podstawie bezpłatnego programu Stellarium lub atlasu nieba określić jakie najsłabsze gwiazdy widzą w swoim miejscu zamieszkania.

Informację o tym, że różnica 5 wielkości gwiazdowych odpowiada stukrotnej różnicy jasności też traktujemy jako daną. Zapisujemy ją jako  $I_m/I_{m+5} = 100$ , gdzie  $I_m$  to natężenie światła gwiazdy o jasności  $m$ , a  $I_{m+5}$  natężenie światła gwiazdy o jasności  $m+5$  wyrażonej w wielkościach gwiazdowych (magnitudo).

4) Wypisanie szukanych

Różnica magnitudo:  $\Delta m = ?$

Stosunek natężeń światła:  $I_{m1}/I_{m2} = ?$

Dla rozwiązania zadania potrzebujemy ustalić dwie wielkości: różnicę jasności  $\Delta m$  między najjaśniejszą a najsłabszą

gwiazdą oraz odpowiadający im stosunek natężeń światła  $I_{m1}/I_{m2}$ , gdzie  $m_1 < m_2$  (bo gwiazda o natężeniu światła  $I_{m1}$  jaśniejsza od gwiazdy o natężeniu światła  $I_{m2}$ , zgodnie z zasadą, że mniejsze magnitudo to większa jasność).

Wiemy, że stosunek  $I_{m1}/I_{m2}$  jest funkcją  $\Delta m$  (różnica magnitudo zależy od stosunku jasności). Chcąc więc wyznaczyć, ile razy jedna gwiazda jest jaśniejsza od drugiej musimy tą funkcję znaleźć, innymi słowy wyznaczyć  $I_{m1}/I_{m2}$  w funkcji  $\Delta m$  jest trywialne, gdy znamy jasność najjaśniejszej i najsłabszej gwiazdy. Skupmy się zatem na znalezieniu formuły na  $I_{m1}/I_{m2}$ .

Najpierw ustalmy jakiemu stosunkowi natężeń światła odpowiada różnica 1 magnitudo. Łatwo obliczyć, że dla gwiazd różniących się o jedną wielkość gwiazdową, czynnik ten równa się pierwiastkowi piątego stopnia ze 100. Liczba ta, zwana czynnikiem Pogsona, równa się w przybliżeniu 2,51188643150958. Otrzymujemy ją wychodząc od założenia, że różnicy 5 magnitudo odpowiada stukrotna różnica jasności.

Obliczenia, schemat rozumowania:

$$\frac{I_m}{I_{m+5}} = 100$$

Logarytmujemy obustronnie i korzystając z tego, że logarytm ilorazu to różnica logarytmów o takiej samej podstawie, otrzymujemy:

$$\log I_m - \log I_{m+5} = \log 100 = 2$$

Powyższe równanie odpowiada różnicy 5 wielkości gwiazdowych, więc możemy również zapisać:

$$\log I_m - \log I_{m+5} = 5(\log I_m - \log I_{m+1}) = 2$$

Zatem:

$$\log I_m - \log I_{m+1} = \frac{2}{5} = 0,4$$

$$\log \frac{I_m}{I_{m+1}} = 0,4$$

Z definicji logarytmu dziesiętnego wynika dalej, że:

$$\frac{I_m}{I_{m+1}} = 10^{\frac{2}{5}} = \sqrt[5]{10^2} = \sqrt[5]{100}$$

Wykazaliśmy, że różnica 1 mag odpowiada stosunkowi natężeń światła rzędu pierwiastka piątego stopnia ze 100, czyli ok. 2,512.

Zatem:

różnicy 2 mag odpowiada stosunek natężeń światła równy  $\sqrt[5]{100} * \sqrt[5]{100}$ ,  
różnicy 3 mag:  $\sqrt[5]{100} * \sqrt[5]{100} * \sqrt[5]{100}$ ,  
różnicy 4 mag:  $\sqrt[5]{100} * \sqrt[5]{100} * \sqrt[5]{100} * \sqrt[5]{100}$   
i wreszcie różnicy 5 mag:

$$\sqrt[5]{100} * \sqrt[5]{100} * \sqrt[5]{100} * \sqrt[5]{100} * \sqrt[5]{100} = 100,$$

co jest zgodne z pierwotnym założeniem.

Możemy więc wprowadzić ogólną formułę:

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = \left( \sqrt[5]{100} \right)^{\Delta m}$$

gdzie  $I_{m1}/I_{m2}$  to stosunek natężeń światła gwiazd o jasnościach  $m_1$  i  $m_2$ , a  $\Delta m = m_2 - m_1$  to różnica ich jasności w skali magnitudo.

Alternatywnie po obustronnym zlogarytmowaniu formułę tę możemy zapisać jako:

$$\log \frac{I_{m1}}{I_{m2}} = \log (10^{\frac{2}{5}})^{\Delta m} = \log 10^{\frac{2}{5}\Delta m} = \frac{2}{5}\Delta m$$

Zatem

$$\Delta m = \frac{5}{2} \log \frac{I_{m1}}{I_{m2}} = 2,5 \log \frac{I_{m1}}{I_{m2}}$$

Jest to tzw. wzór Pogsona.

Dalej nasze zadanie dotyczące porównywania jasności gwiazd możemy rozwiązać na 2 sposoby:

a) Za pomocą działań na potęgach przy użyciu wzoru:

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = (\sqrt[5]{100})^{\Delta m}$$

b) Za pomocą działań na logarytmach i potęgach przy użyciu wzoru:

$$\Delta m = 2,5 \log \frac{I_{m1}}{I_{m2}}$$

Przeprowadźmy obliczenia za pomocą kalkulatora w obu tych wariantach dla trzech różnych warunków obserwacyjnych. Wiedząc, że najjaśniejszą gwiazdą nocnego nieba jest Syriusz (-1,47 mag) przyjmijmy jasność najsłabszych gwiazd widocznych gołym okiem pod bardzo ciemnym niebem jako 6 mag., kilkanaście km od miasta 4,5 mag, a w dużym mieście 3 mag. Analogicznie i opcjonalnie można przeprowadzić obliczenia dla innych granicznych wartości jasności najsłabszych gwiazd (czyli zasięgu obserwatora) wyznaczonych przez uczniów.

1) Syriusz i gwiazda 6 mag.

Dane:

$$m_1 = -1,47 \text{ mag}, m_2 = 6 \text{ mag}$$

Szukane:  $\Delta m = ?$

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = ?$$

$$\Delta m = m_2 - m_1 = 6 \text{ mag} - (-1,47 \text{ mag}) = 7,47 \text{ mag}$$

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = (\sqrt[5]{100})^{\Delta m} = (\sqrt[5]{100})^{7,47} = 10^{\frac{2}{5} \cdot 7,47} = 10^{2,988} \cong 972,4$$

Analogicznie możemy dojść do tego samego wyniku ze wzoru w postaci logarytmicznej, jako że logarytmowanie jest operacją odwrotną do potęgowania:

$$\Delta m = 2,5 \log \frac{I_{m1}}{I_{m2}} = 7,47$$

$$\log \frac{I_{m1}}{I_{m2}} = \frac{7,47}{2,5} = 2,988$$

Z własności logarytmu dziesiętnego:

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = 10^{2,988} \cong 972,4$$

2) Syriusz i gwiazda 4,5 mag.

Dane:

$$m_1 = -1,47 \text{ mag}, m_2 = 4,5 \text{ mag}$$

Szukane:  $\Delta m = ?$

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = ?$$

$$\Delta m = m_2 - m_1 = 4,5 \text{ mag} - (-1,47 \text{ mag}) = 5,97 \text{ mag}$$

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = (\sqrt[5]{100})^{\Delta m} = (\sqrt[5]{100})^{5,97} = 10^{\frac{2}{5} \cdot 5,97} = 10^{2,388} \cong 244,3$$

Analogicznie możemy dojść do tego samego wyniku ze wzoru w postaci logarytmicznej, jako że logarytmowanie jest operacją odwrotną do potęgowania:

$$\Delta m = 2,5 \log \frac{I_{m1}}{I_{m2}} = 5,97$$

$$\log \frac{I_{m1}}{I_{m2}} = \frac{5,97}{2,5} = 2,388$$

Z własności logarytmu dziesiętnego:

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = 10^{2,388} \cong 244,3$$

3) Syriusz i gwiazda 3 mag.

Dane:

$$m_1 = -1,47 \text{ mag}, m_2 = 3 \text{ mag}$$

Szukane:  $\Delta m = ?$

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = ?$$

$$\Delta m = m_2 - m_1 = 3 \text{ mag} - (-1,47 \text{ mag}) = 4,47 \text{ mag}$$

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = (\sqrt[5]{100})^{\Delta m} = (\sqrt[5]{100})^{4,47} = 10^{\frac{2}{5} \cdot 4,47} = 10^{1,788} \cong 61,4$$

Analogicznie możemy dojść do tego samego wyniku ze wzoru w postaci logarytmicznej, jako że logarytmowanie jest operacją odwrotną do potęgowania:

$$\Delta m = 2,5 \log \frac{I_{m1}}{I_{m2}} = 4,47$$

$$\log \frac{I_{m1}}{I_{m2}} = \frac{4,47}{2,5} = 1,788$$

Z własności logarytmu dziesiętnego:

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = 10^{1,788} \cong 61,4$$

Odpowiedź: Przy bardzo ciemnym niebie, np. w Bieszczadach i w idealnych warunkach pogodowych, dla osoby obdarzonej dobrym wzrokiem (zasięg 6 mag) najjaśniejsza gwiazda nocnego nieba (Syriusz) będzie około 972,7 razy jaśniejsza od najsłabszej widocznej gołym okiem, kilkanaście kilometrów od miasta przy dobrej pogodzie (zasięg 4,5 mag) około 244,3 razy, a w dużym mieście (zasięg 3 mag) około 61,4 razy.

Krzysztof Kowalczyk

# Badanie właściwości optycznych i składu chemicznego wybranych skał osadowych

Skała osadowa pod względem geologicznym zaliczana jest do trzech podstawowych skał, które wchodzi w skład skorupy ziemskiej. Powstała poprzez nagromadzenie się materiału, który jest przenoszony przez czynniki zewnętrzne takie jak: wiatr, woda oraz lodowiec.

Marcin Wesołowski, Piotr Potera,  
Partycja Skała, Joanna Sobaszek

Ze względu na powstawanie skały osadowe możemy podzielić na następujące grupy:

- **skały okruchowe** – powstałe w wyniku rozkruszenia starych skał,
- **skały piroklastyczne** – powstałe w wyniku wyrzucenia w powietrze materiałów powstałych z erupcji wulkanów,
- **skały rezydualne** – powstałe w wyniku wietrzenia skał węglanowych,
- **skały chemogeniczne** – powstałe w wyniku rozpuszczenia składników starych skał i ponownego wytrącenia się osadu na skutek parowania lub reakcji chemicznych,
- **skały organogeniczne** – powstałe w wyniku nagromadzenia się szczątków organicznych lub wytrącenia substancji chemicznych powstałych na skutek przemian fizjologicznych organizmów.

W Polsce jedną z najliczniejszych grup skał osadowych są skały okruchowe, na które składa się między innymi piasek jako skała średniookruchowa. Piasek to luźna, niepołączona żadnym spoiwem skała osadowa składająca się z ziaren mineralnych zawierających przeważnie kwarc. Wielkość ziaren

piasku zależy od podtypu skał okruchowych. Najczęściej wyróżnia się trzy podtypy skał okruchowych:

- **grubookruchowe** – czyli takie, których wielkość ziaren jest większa niż 2 mm, grupę tę tworzą żwiry i grzy, różniące się owalnymi lub ostrokrawędzistymi zarysami ziaren;
- **średniookruchowe** – czyli takie, których wielkość ziaren jest mniejsza niż 2 mm, a większa niż 0,063 mm, grupę tę tworzą piaski oraz piaszkowce;
- **drobnookruchowe** – czyli takie, których wielkość ziaren jest mniejsza niż 0,063 mm, grupę tę tworzą pyły i muły.

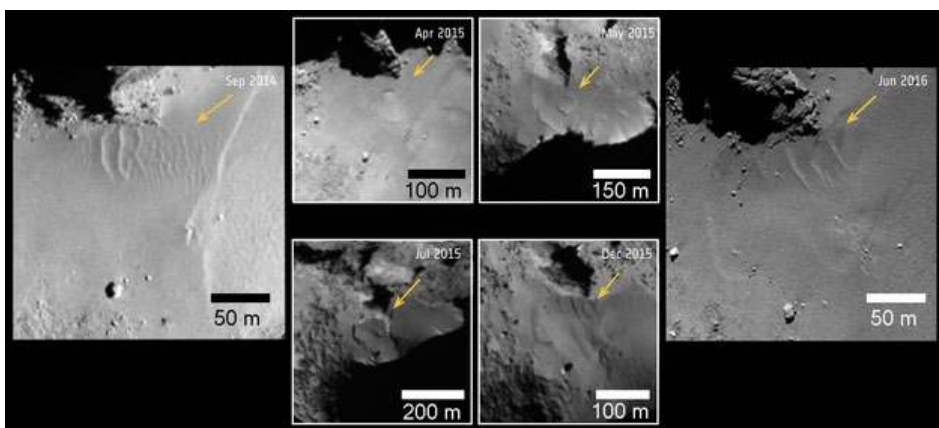
Piasek odgrywa również ważną rolę w gospodarce. Wydobywany jest metodą odkrywkową w kopalniach zwanych żwirowniami jak również pozyskuje się go w przypadku pogłębiania rzek, jezior. Ponadto piasek wykorzystywany jest między innymi do wyrobu szkła a także w budownictwie jako składnik betonu lub różnorodnych tynków.

W wyniku oddziaływania ziaren piasku z wiatrem i wodą na powierzchni Ziemi powstają charakterystyczne wydmy, wały piaszczyste, rewy, odsypy boczne, łachy, zmarszczki, fale piaszczyste, wstęgi piaszczyste. Rozważając powstawanie struktur podob-

nych do wydym musimy zaznaczyć, że kluczową rolę pełnią trzy parametry. Pierwszym jest obecność materiału pyłowego (np. piasku), drugim jest wiatr a trzecim jest przeszkoda.

Występowanie pierwszych dwóch parametrów w warunkach ziemskich jest oczywiste więc pozostawiamy je bez dalszej dyskusji. W kontekście formowania się wydym najważniejszym parametrem jest przeszkoda, którą dosłownie może stanowić nawet „piórko”. Przeszkoda powoduje zatrzymanie największych cząstek, które stanowią podstawę do budowy wydmy. Jeżeli powyższe trzy parametry zaistnieją równocześnie to powstanie wydmy jest praktycznie pewne. Największe ziarna zlokalizowane są przed przeszkodą podczas gdy ziarna najmniejsze opadają za przeszkodą. Jeżeli powstała wydma będzie większa od samej przeszkody, dzięki której powstała to sama stanie się przeszkodą.

Biorąc pod uwagę przedstawiony mechanizm formowania się wydym należy podkreślić, że wydmy powstają również na powierzchni innych ciał niebieskich. Bezpośrednim przykładem takich obiektów są komety, czyli małe ciała niebieskie powstałe podczas formowania się Układu Słonecznego. Cechą charakterystyczną komet w porównaniu do Ziemi jest to, że nie



Fot. 1. Struktury wydymowe widoczne na powierzchni jądra komety 67P/Churyumov-Gerasimenko. Źródło: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA.

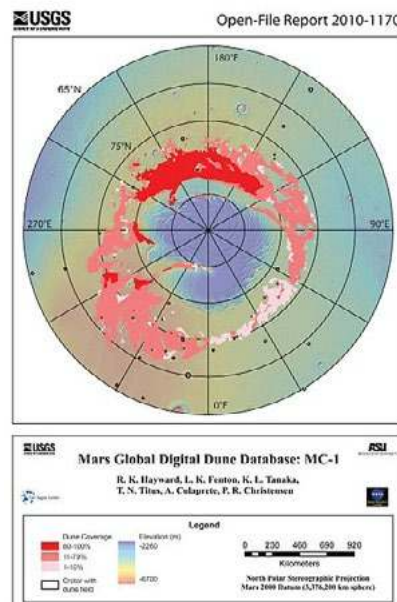
posiadają atmosfery, a struktury wydymowe (zmarszczki) zostały zaobserwowane na powierzchni komety 67P/Churyumov-Gerasimenko podczas misji kosmicznej Rosetta.

W przypadku jądra komety obecność materiału pyłowego oraz przeszkoda, którą może stanowić np. większy okruch materii kometarnej nie stanowi większego problemu. Jednakże w tym przypadku należy wyjaśnić skąd na kometach bierze się „wiatr”. W celu wyjaśnienia tej kwestii należy zaznaczyć, że w skład jąder kometarnych w głównej mierze wchodzi różne lody kometarne spośród których największy udział ma lód wodny. Oprócz lodów w strukturze wewnętrznej komety można wyróżnić drobnoziarnisty pył, okruchy skalne o różnych wymiarach.

Powstanie przysłowiowego „wiatru” w przypadku komet związane jest z różnicą ciśnienia pomiędzy stroną

komety oświetloną przez Słońce a tą zacienioną. To właśnie sublimujący lód jest odpowiedzialny za powstanie niezwykle rzadkiej i przejściowej atmosfery. Ponadto sublimujący lód kometarny istotnie przyczynia się do emisji i redystrybucji materii kometarnej, a to z kolei bezpośrednio przyczynia się do zmian morfologicznych widocznych na powierzchni komet w tym między innymi do formowania się wydym.

Z przedstawionej analizy wynika, że struktury podobne do wydym mogą występować na wszystkich ciałach niebieskich mających atmosferę nawet niezwykle rzadką jak w przypadku komet. Poza kometami i Ziemią wydmy zostały jeszcze zaobserwowane na Marsie, Wenus i Tytanie (jednym z księżyców Saturna). Jako przykład można podać jedną z największych pustyń wydymowych rozciągających się wokół północnej czoły polarnej Marsa (Olympia Undae).



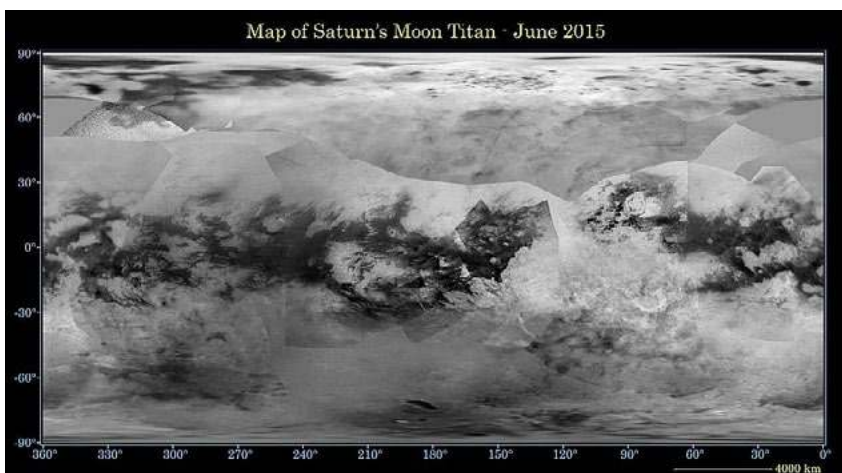
Fot. 2. Pustynie wydymowe na powierzchni Marsa pomiędzy 120° a 240° długości geograficznej wschodniej.

## Pomiar albedo półkulistego

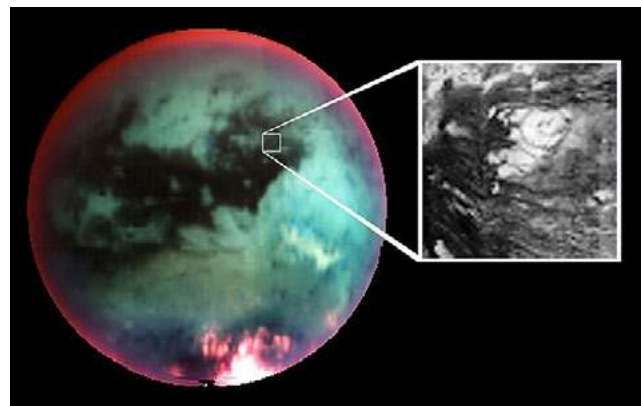
W celu przeprowadzenia eksperymentów wykorzystany został piasek, który pobrano z lokalnej żwirowni. Został on pobrany z głębokości około 40 cm w celu uniknięcia zanieczyszczeń powierzchniowych. Piasek ten został wysuszony i posortowany przez sita standaryzacyjne. W wyniku frakcjonowania otrzymano cztery próbki dla których średnica ziaren mieściła się w następujących zakresach:

- próbka A –  $0.49 < d < 1.50$  mm,
- próbka B –  $0.43 < d < 0.49$  mm,
- próbka C –  $0.30 < d < 0.43$  mm,
- próbka D –  $0.06 < d < 0.30$  mm.

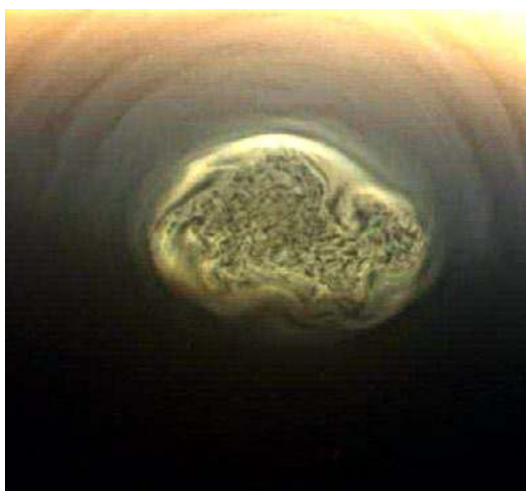
Do pomiaru albedo półkulistego wykorzystany został dwuwieżkowy spektrometr Cary 5000. Źródłami światła w tym spektrometrze są lampy



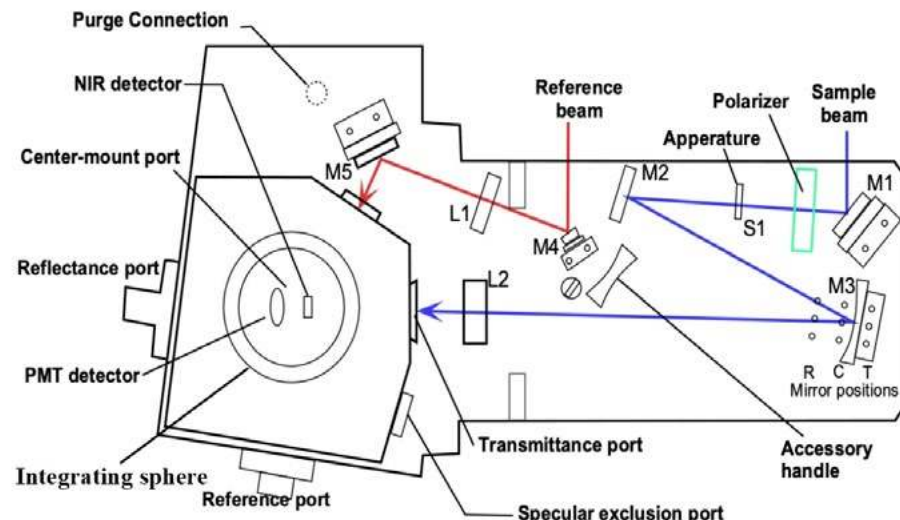
Fot. 3. Mapa powierzchni tytana (Foto - NASA).



Fot. 4. Wzniesienie Tortola Facula na powierzchni Tytana, które otoczone jest ciemne wydmy (Foto - NASA).



Fot. 5. Wiatr polarny nad południowym biegunem Tytana (Foto - NASA).



Rys. 1. Konstrukcja optyczna przystawki DRA. Schemat spektrometru został zaczerpnięty z jego instrukcji obsługi.

halogenowo-wolframowa i lampa deuterowa (UV). Zakres widmowy lampy deuterowej wynosi 175–375 nm, natomiast zakres widmowy lampy halogenowej mieści się w zakresie od 375 do 3300 nm. Wiązka światła regulowana przez szczelinę pada na monochromator Littrowa (dwie siatki dyfrakcyjne 1200 linii/mm w zakresie Uv-Vis).

Monochromator jest sterowany przez silnik krokowy, którego funkcją jest oddzielenie wiązki światła monochromatycznego od światła lampy. Silnik krokowy zmienia również położenie siatek monochromatora, co powoduje zmianę długości fali światła monochromatycznego. Następnie wiązka światła monochromatycznego o długości fali zmieniającej się w czasie pada na próbkę.

Przed wykonaniem pomiarów spektrometr został skalibrowany przy użyciu referencyjnego widma odbicia, aby ustalić linię bazową, która jest linią reprezentującą poziom sygnału, gdy próbka nie pochłania i nie transmituje światła, a jedynie odbija światło) w oparciu o certyfikowany standard odbicia Labsphere USRS-99-020 AS-01159-60. Linia zerowa została skalibrowana na podstawie okna kwarcowego.

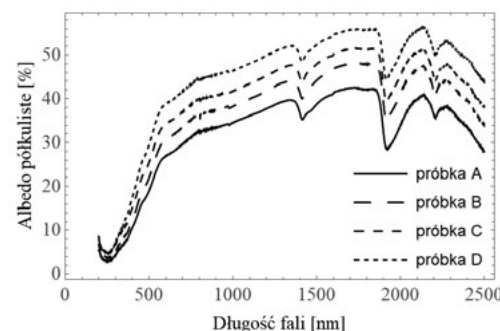
Dodajmy, że kalibracja linii zerowej (korekta zera) względem kwarcu eliminuje błąd powstający w wyniku badania próbki przez okno kwarcowe. Celem zerowania jest zrównoważenie zarówno wiązki odniesienia, jak i wiązki próbki. Po ustawieniu na zero odczyty przyrządu odzwierciedlają brak próbki. W celu wykonania pomiarów albedo półkulistego używamy

przystawki DRA (Diffuse Reflection Accessory, Rys.1). Proces pomiaru można opisać w pięciu krokach:

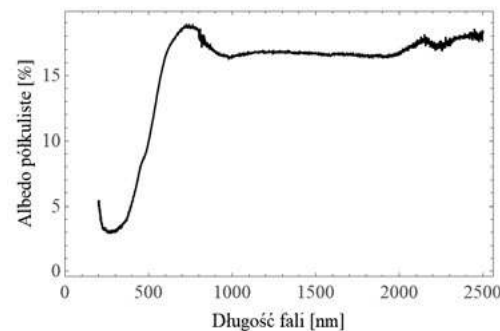
1. Wiązka próbki uderza w lustro M1, a następnie jest odbijana do M2.
2. Wiązka przechodzi przez soczewkę i jest skupiana w porcie transmisyjnym i na porcie odbicia.
3. Odbita wiązka jest rozpraszana w całej kuli, zanim zostanie zmierzona przez detektor.
4. Wiązka odniesienia wchodzi do kuli bezpośrednio przez port odniesienia i ulega rozproszeniu.
5. Następnie zmierzono wartość albedo półkulistego.

Podstawową konfiguracją spektrofotometru Cary 5000 wykorzystanego do określania albedo półkulistego jest sfera całkująca. W tej konfiguracji promień światła o określonej długości fali pada prostopadle na próbkę umieszczoną na przedniej powierzchni poza sferą całkującą. Próbkę rozprasza światło do sfery całkującej, gdzie w wyniku wielokrotnych odbić od powierzchni sfery zostaje ono skupione w wiązkę światła padającą na detektor.

Zakres pomiarowy spektrometru wraz ze sferą całkującą wynosi od 200 do 2500 nm. Dokładność pomiaru spektrometru oparta na danych podanych przez producenta dla długości fali w zakresie Uv-Vis wynosi  $\Delta\lambda = \pm 0,08$  nm, podczas gdy w przypadku półkulistego albedo, dokładność wynosi  $\Delta A_h = 0,07\%$ . Każde widmo składa się z ponad 2300 punktów pomiarowych. Pomiar albedo półkulistego w funkcji długości fali dla badanego piasku został przedstawiony na rys. 2. Dodatkowo wykorzystując



Rys. 2. Rozkład albedo półkulistego dla piasku.



Rys. 3. Rozkład albedo półkulistego dla sproszkowanego meteorytu.

spektrometr Cary 5000 dokonano pomiaru albedo półkulistego dla sproszkowanego meteorytu, a jego wynik przedstawiono na rys.3.

W tym miejscu należy podkreślić, że dla złożonych mieszanin zostały również przeprowadzone pomiary albedo półkulistego, a ich wyniki zostały przedstawione w naszych publikacjach naukowych. Pomiary te zostały wykorzystane do określenia mocy promieniowania słonecznego, która jest pochłaniana przez badany analog pyłowy, co prowadzi do wyznaczenia temperatury na powierzchni jądra komety modelowej.

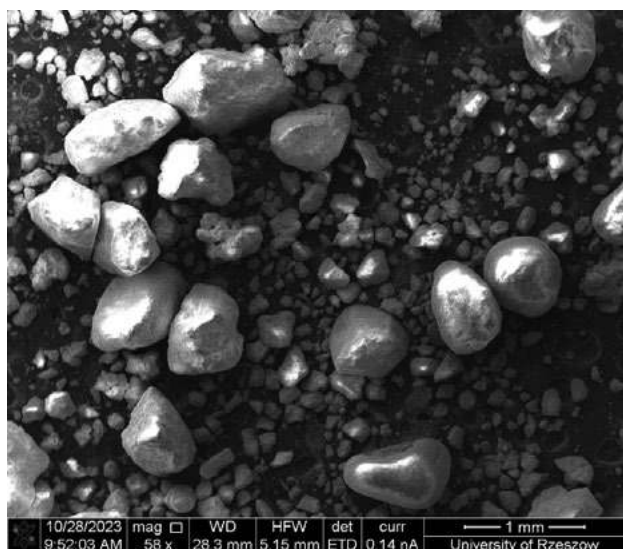


Foto. 6. Fotografia piasku (próbki A) wykonana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Poszczególne parametry oznaczają: **HV** to napięcie przyspieszające, którego wartość wynosiła 7 kV, **mag** to powiększenie obrazu, **HFW** to szerokość pola poziomego, **WD** to odległość między soczewką a próbką (odległość robocza), **det ETD** to detektor rejestrujący sygnał elektronów wtórnych, **curr** to prąd wiązki elektronowej. Podczas wykonywania pomiarów ciśnienie w komorze było rzędu  $10^{-3}$  Pa.

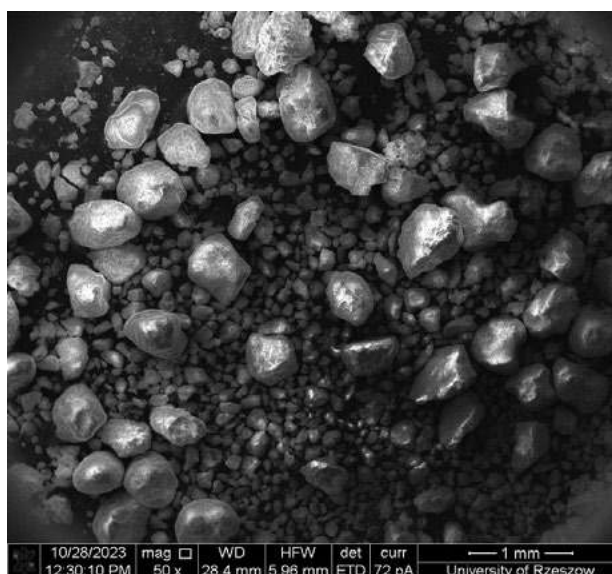


Foto. 7. Fotografia piasku (próbki B) wykonana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego.

## Analiza składu chemicznego

Identyfikację pierwiastków chemicznych obecnych w badanych próbkach wykonano wykorzystując Skaningowy Mikroskop Elektronowy Quanta 3D 200i, który jest wyposażony w system EDS (Energy Dispersive Spectroscopy). Detektor EDS umożliwia jakościową i ilościową analizę składu chemicznego badanego obszaru próbki. Wartość energii promieniowania pozwala na identyfikację poszczególnych pierwiastków obecnych w próbce, natomiast intensywność lub wysokość pików związana jest z analizą ilościową.

Próbki w postaci proszku przymocowano do stolika mikroskopu za pomocą taśmy węglowej, aby zabezpieczyć pompę próżniową. Ponadto taśma zapewniała lepszą przewodność elektryczną, a zawarty w niej węgiel uniemożliwiał ładowanie próbki. Dzięki temu eliminowany jest efekt akumulacji elektronów na powierzchni próbki umieszczonej w próżni.

Zdjęcia dla badanych próbek przedstawiono na Foto. 6–9, a analizę składu chemicznego tych próbek przedstawiono w Tab. 1–4.

## Podsumowanie

Wśród skał osadowych, do których zaliczamy skały okruchowe, skały piroklastyczne, skały rezydualne, skały chemogeniczne i skały organogeniczne, w Polsce najliczniejszą grupę stanowią skały okruchowe, spośród których prymwiodą piaski. Piasek stanowi ważny

Tab.1. Procentowa zawartość zidentyfikowanych pierwiastków w próbce A.

| Próbka A    |          |       |          |       |          |       |         |       |
|-------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|
| pierwiastek | pomiar 1 |       | pomiar 2 |       | pomiar 3 |       | średnia |       |
|             | WT%      | AT%   | WT%      | AT%   | WT%      | AT%   | WT%     | AT%   |
| C           | 24.31    | 34.62 | 45.75    | 57.05 | 32.62    | 44.99 | 34.23   | 45.55 |
| O           | 44.30    | 47.37 | 36.54    | 34.21 | 35.51    | 36.77 | 38.78   | 39.45 |
| Fe          | 3.41     | 1.04  | 2.43     | 0.65  | 1.64     | 0.49  | 2.49    | 0.73  |
| Na          | 0.38     | 0.29  | 0.07     | 0.05  | 0.28     | 0.20  | 0.24    | 0.18  |
| Mg          | 0.23     | 0.17  | 0.14     | 0.09  | 0.24     | 0.16  | 0.20    | 0.14  |
| Al          | 4.25     | 2.70  | 1.70     | 0.95  | 3.50     | 2.15  | 3.15    | 1.93  |
| Si          | 21.66    | 13.19 | 12.56    | 6.70  | 24.89    | 14.68 | 19.70   | 11.52 |
| K           | 0.91     | 0.40  | 0.51     | 0.19  | 0.95     | 0.40  | 0.79    | 0.33  |
| Ca          | 0.55     | 0.23  | 0.30     | 0.11  | 0.36     | 0.15  | 0.40    | 0.16  |

Tab. 2. Procentowa zawartość zidentyfikowanych pierwiastków w próbce B.

| Próbka B    |          |       |          |       |          |       |         |       |
|-------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|
| pierwiastek | pomiar 1 |       | pomiar 2 |       | pomiar 3 |       | średnia |       |
|             | WT%      | AT%   | WT%      | AT%   | WT%      | AT%   | WT%     | AT%   |
| C           | 17.15    | 26.56 | 17.99    | 26.62 | 30.50    | 42.23 | 21.88   | 31.80 |
| O           | 39.21    | 45.58 | 47.35    | 52.61 | 39.05    | 40.59 | 41.87   | 46.26 |
| Fe          | 2.52     | 0.84  | 3.46     | 1.10  | 2.55     | 0.76  | 2.84    | 0.90  |
| Na          | 0.26     | 0.21  | 0.27     | 0.21  | 0.39     | 0.28  | 0.31    | 0.23  |
| Mg          | 0.33     | 0.25  | 0.35     | 0.26  | 0.36     | 0.25  | 0.35    | 0.25  |
| Al          | 3.71     | 2.55  | 4.00     | 2.64  | 3.14     | 1.94  | 3.62    | 2.38  |
| Si          | 34.85    | 23.08 | 25.16    | 15.92 | 22.49    | 13.32 | 27.50   | 17.44 |
| K           | 1.18     | 0.56  | 1.07     | 0.49  | 0.91     | 0.39  | 1.05    | 0.48  |
| Ca          | 0.78     | 0.36  | 0.34     | 0.15  | 0.60     | 0.25  | 0.57    | 0.25  |

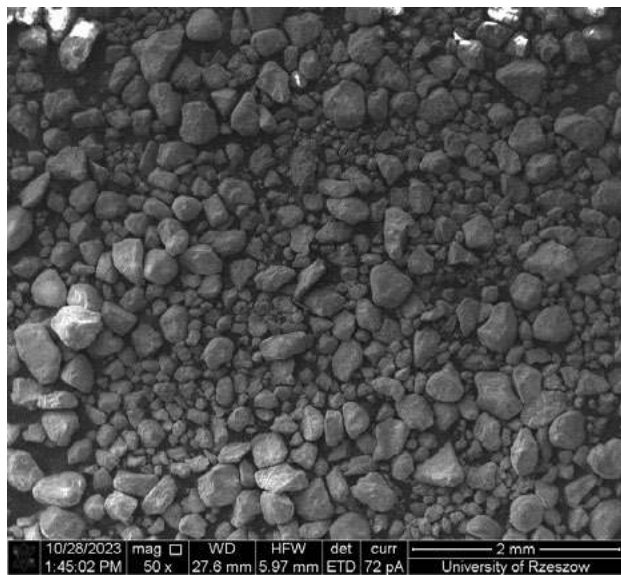


Foto. 8. Fotografia piasku (próbki C) wykonana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego.

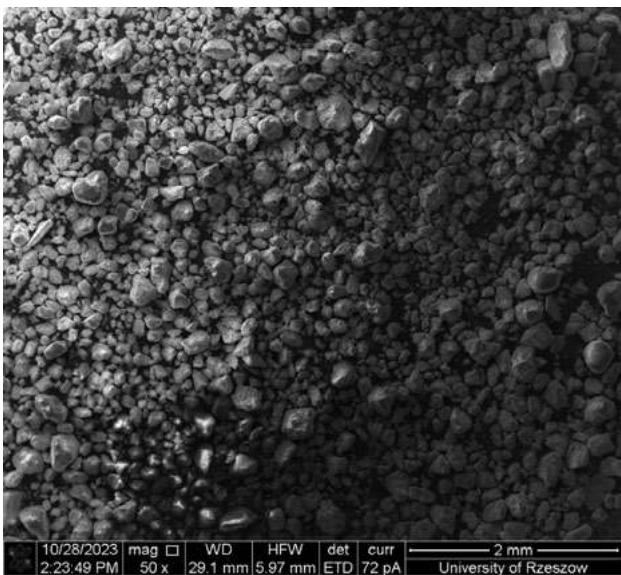


Foto. 9. Fotografia piasku (próbki D) wykonana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego.

Tab. 3. Procentowa zawartość zidentyfikowanych pierwiastków w próbce C.

| Próbka C    |          |       |          |       |          |       |         |       |
|-------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|
| pierwiastek | pomiar 1 |       | pomiar 2 |       | pomiar 3 |       | średnia |       |
|             | WT%      | AT%   | WT%      | AT%   | WT%      | AT%   | WT%     | AT%   |
| C           | 24.22    | 35.71 | 27.97    | 38.69 | 17.77    | 27.30 | 23.32   | 33.90 |
| O           | 36.64    | 40.57 | 43.80    | 45.48 | 39.41    | 45.45 | 39.95   | 43.83 |
| Fe          | 2.11     | 0.67  | 2.62     | 0.78  | 1.98     | 0.65  | 2.24    | 0.70  |
| Na          | 0.36     | 0.28  | 0.39     | 0.28  | 0.37     | 0.30  | 0.37    | 0.29  |
| Mg          | 0.24     | 0.17  | 0.18     | 0.12  | 0.29     | 0.22  | 0.24    | 0.17  |
| Al          | 4.18     | 2.74  | 3.55     | 2.18  | 4.42     | 3.02  | 4.05    | 2.65  |
| Si          | 29.56    | 18.64 | 20.04    | 11.85 | 33.47    | 21.99 | 27.69   | 17.49 |
| K           | 1.88     | 0.85  | 1.18     | 0.50  | 1.77     | 0.83  | 1.61    | 0.73  |
| Ca          | 0.81     | 0.36  | 0.26     | 0.11  | 0.51     | 0.24  | 0.53    | 0.24  |

Tab. 4. Procentowa zawartość zidentyfikowanych pierwiastków w próbce D.

| Próbka D    |          |       |          |       |          |       |         |       |
|-------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|
| pierwiastek | pomiar 1 |       | pomiar 2 |       | pomiar 3 |       | średnia |       |
|             | WT%      | AT%   | WT%      | AT%   | WT%      | AT%   | WT%     | AT%   |
| C           | 27.74    | 39.79 | 27.34    | 37.87 | 35.31    | 46.70 | 30.13   | 41.45 |
| O           | 35.66    | 38.40 | 44.29    | 46.06 | 40.58    | 40.29 | 40.18   | 41.58 |
| Fe          | 1.34     | 0.41  | 2.29     | 0.68  | 2.10     | 0.60  | 1.91    | 0.56  |
| Na          | 0.25     | 0.18  | 0.27     | 0.19  | 0.25     | 0.17  | 0.26    | 0.18  |
| Mg          | 0.30     | 0.21  | 0.15     | 0.11  | 0.23     | 0.15  | 0.23    | 0.16  |
| Al          | 4.44     | 2.83  | 3.17     | 1.95  | 2.68     | 1.58  | 3.43    | 2.12  |
| Si          | 27.93    | 17.14 | 21.37    | 12.66 | 17.91    | 10.13 | 22.40   | 13.31 |
| K           | 1.83     | 0.81  | 0.87     | 0.37  | 0.70     | 0.29  | 1.13    | 0.49  |
| Ca          | 0.51     | 0.22  | 0.25     | 0.10  | 0.24     | 0.10  | 0.33    | 0.14  |

LITERATURA:

[1] Wesołowski M., 2023, Modeling of the processes of dunes formation on the surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 521, 1570–1577.

[2] Kossacki K. J., Wesołowski M., Szutowicz S., Mikołajków T., 2023, Outgassing of ice agglomerates, Icarus 398 article id.115518.

[3] Wesołowski M., 2024, Ejection of porous dust–ice agglomerates from the surface of the cometary nucleus, Icarus 411, article id. 115937.

[4] Wesołowski M., Potera P., Gronkowski P., Skala P., Sobaszek J., 2024a, The influence of hemispherical albedo on the dynamics of cometary particles, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 527, 7613–7625.

[5] Wesołowski M., Potera P., 2024b, New measurements of the hemispherical albedo of cometary analogues: influence on the amplitude of the change of cometary brightness during its outburst, Icarus 416, article id. 116087.

[6] Wesołowski M., Potera P., 2024c, Determination of bolometric albedo based on spectroscopic measurements for selected dust analogues and its impact on the change of cometary brightness during its outburst, Astronomy & Astrophysics 686, A248.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Sand>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Sedimentary\\_rock](https://en.wikipedia.org/wiki/Sedimentary_rock)

budulec krajobrazu ziemskiego, tworząc wydmy, które to zaobserwowano także na Marsie, Wenus, Tytanie i kometach. Badania własności optycznych piasku mogą więc służyć lepszemu poznaniu tych ciał niebieskich.

W niniejszej pracy metodą spektroskopii optycznej przebadano widma odbicia 4 frakcji piasku o różnym uziarnieniu. Do badań wykorzystano spektrometr UV-VIS-NIR ze sferą całkującą (DRA), przy pomocy, której otrzymano albedo półkuliste w funkcji długości fali. Największe wartości albedo występują dla obszaru podczerwieni, dochodzą one do 60%, przy czym ich wartości silnie zależą od frakcji piasku. Wykorzystując Skaningowy Mikroskop Elektronowy Quanta 3D 200i, wyposażony w system EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) wykonano jakościową i ilościową analizę składu chemicznego próbek piasku.

**dr hab. Marcin Wesołowski, prof. UR**  
Uniwersytet Rzeszowski, Kolegium Nauk Przyrodniczych,  
Instytut Nauk Fizycznych,  
Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy  
Techniczno-Przyrodniczej Uniwersytetu Rzeszowskiego.

**dr hab. Piotr Potera, prof. UR**  
Uniwersytet Rzeszowski, Kolegium Nauk Przyrodniczych,  
Instytut Inżynierii Materiałowej,  
Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy  
Techniczno-Przyrodniczej Uniwersytetu Rzeszowskiego.

**mgr inż. Partycja Skala**  
Uniwersytet Rzeszowski, Kolegium Nauk Przyrodniczych,  
Instytut Nauk Fizycznych,  
Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy  
Techniczno-Przyrodniczej Uniwersytetu Rzeszowskiego.

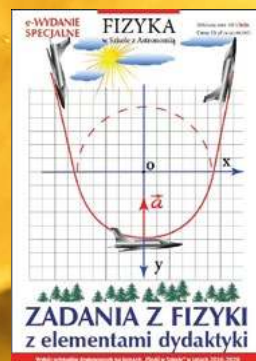
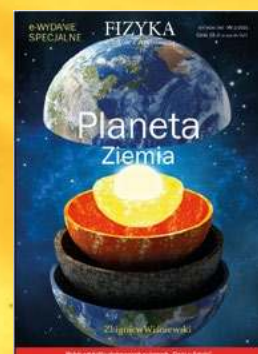
**mgr inż. Joanna Sobaszek**  
Uniwersytet Rzeszowski, Kolegium Nauk Przyrodniczych,  
Instytut Nauk Fizycznych,  
Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy  
Techniczno-Przyrodniczej Uniwersytetu Rzeszowskiego

# Cyfrowe wydania specjalne

## Fizyki w Szkole

### Tylko w wersji PDF!

Już od 10 zł!  
Wysyłamy na adres  
mailowy!



Szczegóły i formularz zamówienia na [www.aspress.com.pl/wydania-specjalne/](http://www.aspress.com.pl/wydania-specjalne/)

eprasa.pl e0bcf8788d

# PRENUMERATA 2025

**PRZEDŁUŻ  
LUB  
ZAMÓW!**

- Prenumerata roczna i półroczna
- Wersja drukowana lub cyfrowa – pliki PDF



Szczegóły i formularz zamówienia na [www.aspress.com.pl/prenumerata/](http://www.aspress.com.pl/prenumerata/)

eprasa.pl e0bcf8788d